



**Universidad  
Europea**

## **TRABAJO FIN DE MÁSTER**

# **DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DIGITAL DE APOYO A LA TOMA DE DECISIONES PARA LA SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE MICROTUNELACIÓN.**

Máster Universitario en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Jonatan Álvarez López

Dirigido por:

Dr. Carlos Barba Ávila

Madrid

Marzo del 2026

---

## **AGRADECIMIENTOS**

Este trabajo marca el final de una etapa intensa y exigente, pero también profundamente enriquecedora, que no habría sido posible sin el apoyo de muchas personas a las que me gustaría dedicar unas palabras.

En primer lugar, quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi tutor, Carlos Barba, por despertar en mí la curiosidad por el mundo de la geotecnia durante sus clases de cimentaciones y túneles, siempre llenas de experiencias, anécdotas y vivencias que conseguían transmitir una auténtica pasión por la ingeniería. Gracias también por su cercanía, su disponibilidad y por la orientación que me ha brindado a lo largo de este proceso, ayudándome a llevar este Trabajo Fin de Máster a buen puerto.

Me gustaría hacer también una mención muy especial a la persona que, en su momento, me animó a “lanzarme a la piscina” y comenzar este máster. Aunque este último año y medio nos haya dado algún que otro momento complicado, confío en que todo el esfuerzo compartido durante este tiempo se transforme en muchos más momentos buenos a lo largo de todo el camino que aún nos queda por recorrer juntos.

A mis compañeros de batalla —ellos saben perfectamente quiénes son—, gracias por cubrirme las espaldas cuando ha sido necesario y por empujarme a seguir adelante incluso cuando el cansancio y las dificultades hacían el camino más cuesta arriba.

No puedo olvidar a la famosa UTE Ferromediterránea, la cual ha pasado después de mucho trabajo compartido durante este último año y medio a ser parte de esa familia que se elige, los amigos.

Y, por último, a mi familia, por haber sembrado desde pequeño los valores del esfuerzo, la constancia y la curiosidad que hoy me permiten recoger los frutos de todo ese proceso.

---

## **DEDICATORIAS**

Este Trabajo Fin de Máster está dedicado a mi abuelina, persona referente en mi vida en todos los ámbitos. Ella me inculcó unos valores que, a día de hoy, son para mí innegociables y que me permiten seguir avanzando por el camino que, sin yo saberlo entonces, ella marco para mí.

---

## **RESUMEN**

*El presente Trabajo Fin de Máster (TFM) tiene como objetivo estructurar el conocimiento existente en el sector de la microtunelación, un ámbito que actualmente carece de marcos normativos consolidados que determinen la tecnología más adecuada en función de los condicionantes del proyecto. Esta situación provoca que, en numerosas ocasiones, la selección tecnológica dependa en gran medida de la experiencia del decisor o de criterios no sistematizados. Con el fin de contribuir a una toma de decisiones más fundamentada, este trabajo desarrolla una herramienta de apoyo a la decisión para la selección de la tecnología de microtunelación y de su configuración auxiliar. La propuesta se basa en la evaluación de criterios eminentemente técnicos, los cuales se integran posteriormente con otros criterios relevantes en los que el decisor puede tener un mayor margen de influencia, como los aspectos económicos, ambientales, sociales y de operación y seguridad. Como resultado, se plantea una aplicación de uso sencillo y escalable que permita apoyar la toma de decisiones en fases preliminares de los proyectos. Esta herramienta está dirigida a diferentes perfiles del sector, incluyendo promotores, proyectistas y constructores, con el objetivo de facilitar la selección tecnológica más adecuada y contribuir a la minimización de riesgos en el desarrollo de proyectos de microtunelación.*

## **ABSTRACT**

*This Master's Thesis aims to structure the existing knowledge within the microtunneling sector, an area that currently lacks consolidated regulatory frameworks defining the most appropriate technology according to project conditions. As a result, technology selection is often strongly influenced by the experience of the decision-maker or by non-systematized criteria. In order to support a more structured decision-making process, this thesis develops a decision-support tool for the selection of microtunneling technologies and their auxiliary configurations. The proposed approach is primarily based on technical criteria, which are subsequently combined with other relevant factors where decision-makers may have greater influence, such as economic, environmental, social, operational, and safety considerations. The outcome of this work is a user-friendly and scalable application designed to assist decision-making during the preliminary stages of microtunneling projects. The tool is intended for various stakeholders in the sector, including project promoters, designers, and contractors, with the aim of facilitating the selection of the most suitable technology and minimizing risks in project development.*

---

## Índice de contenido

1.	INTRODUCCION Y MOTIVACION DE LA INVESTIGACION.....	1
2.	OBJETIVOS.....	2
2.1.	<i>Estudio de condicionantes.....</i>	3
2.2.	<i>Creación de una aplicación de selección en base al estudio y al árbol lógico.....</i>	3
2.3.	<i>Creación de una aplicación de toma de decisiones.....</i>	4
3.	ESTADO DEL ARTE.....	5
3.1.	<i>Evolución histórica de las técnicas de microtunelación. ....</i>	5
3.2.	<i>Incremento actual de la necesidad de recurrir al uso de la microtunelacion. ....</i>	8
3.3.	<i>Documentos técnicos de referencia, asociaciones, y organismos.....</i>	9
3.3.1.	<i>ASCE36-15-Standard Design and Construction Guidelines for Microtunneling.....</i>	11
3.3.2.	<i>ITA-AITES – International Tunnelling and Underground Space Association.....</i>	14
3.3.3.	<i>NASTT – North American Society for Trenchless Technology.....</i>	16
3.3.4.	<i>TTC – Trenchless Technology Center (Louisiana Tech University).....</i>	16
3.3.5.	<i>IBSTT-Asociación Ibérica de Tecnología sin zanja. ....</i>	17
3.4.	<i>Criterios de clasificación de las diferentes técnicas de microtunelación.....</i>	17
3.4.1.	<i>Clasificación según el tipo de frente y sistema de control de presión.....</i>	18
3.4.1.1.	<i>Frente no presurizado. Escudos abiertos. ....</i>	19
3.4.1.1.1.	<i>Cabezal abierto. Open Face.....</i>	21
3.4.1.1.1.1.	<i>Cabezal abierto con retroexcavadora. ....</i>	22
3.4.1.1.1.2.	<i>Cabezal abierto con pico/cortadores Roc Head. ....</i>	23
3.4.1.1.1.3.	<i>Cabezal abierto con barredora mecánica-Auger Head/Bucket Whell. ....</i>	24
3.4.1.1.2.	<i>Open Face apoyado por técnicas auxiliares de geotecnia.....</i>	25

---

3.4.1.1.2.1.	<i>Inyecciones previas. Jet Grouting, compaction Grouthing.</i>	26
3.4.1.1.2.2.	<i>Congelación del terreno.</i>	26
3.4.1.1.2.3.	<i>Drenaje o depresiones del nivel freático.</i>	26
3.4.1.1.3.	<i>Extracción mecánica del material del frente de excavación.</i>	27
3.4.1.1.3.1.	<i>Cintas o sistemas posteriores.</i>	27
3.4.1.2.	<i>Frente presurizado. Escudo cerrado.</i>	28
3.4.1.2.1.	<i>Sistema Slurry. Balance hidráulico.</i>	32
3.4.1.2.1.1.	<i>Extracción hidráulica del material del frente de excavación.</i>	40
3.4.1.2.1.1.1.	<i>Circuito de lodos con mezcla de agua + bentonita.</i>	44
3.4.1.2.1.1.2.	<i>Circuito de lodos modificados. Polímeros/Fluidos mixtos.</i>	44
3.4.1.2.1.1.3.	<i>Bombeo mediante bombas centrifugas o diafragmas.</i>	46
3.4.1.2.2.	<i>Sistemas EPB. Balance mecánico.</i>	46
3.4.1.2.2.1.	<i>EPB hibrido. EPB+Slurry.</i>	50
3.4.1.2.2.2.	<i>Extracción mecánica del material del frente de excavación.</i>	54
3.4.1.2.2.2.1.	<i>EPB Estándar. Sinfín interior. Auger.</i>	55
3.4.1.2.2.2.2.	<i>EBP Hibrido. Sinfín exterior y planta de separación.</i>	56
3.5.	<i>Sistemas de logística de empuje, guiado y avance.</i>	57
3.5.1.	<i>Sistema de Jacking.</i>	57
3.5.1.1.	<i>Empuje directo.</i>	61
3.5.1.2.	<i>Estaciones intermedias.</i>	62
3.5.2.	<i>Sistemas de guiado.</i>	66
3.5.2.1.	<i>Laser directo.</i>	67
3.5.2.2.	<i>Giroscopio.</i>	69
3.5.2.3.	<i>Sensor Inercial.</i>	71
3.5.2.4.	<i>Curvas tridimensionales. Sistemas de navegación avanzados.</i>	73
3.6.	<i>Condicionantes para tener en cuenta en la elección de la tecnología.</i>	74

---

3.6.1.	<i>Condicionantes geométricos del trazado.</i>	74
3.6.1.1.	<i>Diámetro exterior del tubo.</i>	74
3.6.1.2.	<i>Numero de drives previsto.</i>	77
3.6.1.3.	<i>Radios de curvatura admisibles.</i>	78
3.6.1.4.	<i>Pendiente longitudinal.</i>	80
3.6.1.5.	<i>Profundidad de la clave.</i>	82
3.6.2.	<i>Condicionantes del terreno. Geológicos y geotécnicos.</i>	83
3.6.2.1.	<i>Criterios de rotura del suelo</i>	83
3.6.2.1.1.	<i>Criterio de rotura de Mohr Coulomb.</i>	84
3.6.2.1.2.	<i>Criterio de rotura de Hoek-Brown.</i>	86
3.6.2.2.	<i>Tipos de suelo.</i>	88
3.6.2.2.1.	<i>Suelos cohesivos.</i>	89
3.6.2.2.2.	<i>Suelos no cohesivos.</i>	92
3.6.2.2.3.	<i>Suelos mixtos.</i>	95
3.6.2.2.4.	<i>Suelos con bloques o cantos rodados.</i>	96
3.6.2.2.5.	<i>Roca blanda.</i>	97
3.6.2.2.6.	<i>Roca dura.</i>	99
3.6.2.2.7.	<i>Parámetros geotécnicos claves a considerar para cada tipo de suelo.</i>	101
3.6.2.2.8.	<i>Aplicabilidad de las tecnologías según los tipos de suelos.</i>	103
3.6.3.	<i>Condicionantes hidrogeológicos.</i>	104
3.6.3.1.	<i>Presencia del nivel freático.</i>	104
3.6.3.2.	<i>Presencia intersticial prevista en el frente.</i>	107
3.6.3.3.	<i>Flujos subterráneos significativos.</i>	110
3.6.3.4.	<i>Necesidad de despresurización o drenajes previos.</i>	111
3.6.3.5.	<i>Sensibilidad a la descompresión del terreno.</i>	113
3.6.4.	<i>Condicionantes estructurales y del tubo a instalar.</i>	116

---

3.6.4.1.	<i>Material.</i>	117
3.6.4.1.1.	<i>Hormigón.</i>	117
3.6.4.1.2.	<i>Acero</i>	121
3.6.4.1.3.	<i>PRFV.</i>	123
3.6.4.2.	<i>Resistencia a compresión del tubo.</i>	123
3.6.4.3.	<i>Resistencia a cargas externas. Cargas de tierra, tráfico, edificación.</i>	125
3.6.4.4.	<i>Tipo de junta. Machiembado, junta elástica, junta rígida.</i>	126
3.6.4.5.	<i>Longitud de tubo.</i>	129
3.6.4.6.	<i>Coefficiente de fricción tubo-Terreno.</i>	130
3.6.5.	<i>Condicionantes de puesta en obra.</i>	134
3.6.5.1.	<i>Ejecución de pozos de ataque y salida.</i>	135
3.6.5.2.	<i>Espacio disponible para instalación de planta de separación de lodos.</i>	137
3.6.5.3.	<i>Logística de entrada/salida del material excavado.</i>	138
3.6.6.	<i>Condicionantes ambientales y urbanos.</i>	139
3.6.6.1.	<i>Riesgos de asientos en superficie.</i>	140
3.6.6.2.	<i>Proximidad a estructuras sensibles.</i>	141
3.6.6.2.1.	<i>Edificaciones, vías ferroviarias, colectores existentes, viales etc.</i>	142
3.6.6.3.	<i>Nivel de vibraciones admisibles.</i>	143
3.6.6.4.	<i>Nivel de ruidos permitidos.</i>	143
3.6.6.5.	<i>Riesgo de afloramiento de lodos.</i>	144
3.6.7.	<i>Condicionantes económicos y logísticos.</i>	145
3.6.7.1.	<i>Coste de instalación de la planta de Slurry.</i>	147
3.6.7.2.	<i>Coste de lodos bentónicos o polímeros.</i>	147
3.6.7.3.	<i>Disponibilidad de maquinaria en el mercado local.</i>	148
3.6.7.4.	<i>Costes de mantenimiento del cabezal.</i>	149
3.6.7.5.	<i>Costes energéticos.</i>	151

---

3.6.7.6.	<i>Costes de gestión de lodos y residuos.</i>	152
3.7.	<i>Riesgos asociados a la técnica.</i>	152
3.7.1.	<i>Riesgos de colapso del frente.</i>	153
3.7.2.	<i>Riesgos de blow-out. Rotura del frente por exceso de presión.</i>	154
3.7.3.	<i>Riesgo de inundaciones del túnel.</i>	155
3.7.4.	<i>Riesgo de atasco del escudo.</i>	155
3.7.5.	<i>Riesgo de rotura del tubo por empuje.</i>	157
3.7.6.	<i>Riegos de desviación fuera de tolerancias.</i>	157
3.7.7.	<i>Riesgo de desgaste prematuro por abrasividad.</i>	158
3.7.8.	<i>Riesgo de colapso durante la descompresión.</i>	159
3.8.	<i>Síntesis del estado del arte.</i>	160
4.	IDENTIFICACION DE LA NECESIDAD.	162
5.	PROPUESTA METODOLOGICA.	163
5.1.	<i>Generación de un árbol lógico de decisiones mediante el software Bizagui Modeler.</i>	164
5.2.	<i>Creación de matriz multicriterio</i>	194
5.2.1.	<i>Matriz multicriterio. Proceso analítico jerárquico AHP.</i>	195
5.2.2.	<i>Justificación del uso de la matriz multicriterio tipo AHP.</i>	198
5.2.3.	<i>Escala utilizada para la comparación de pares de los criterios de decisión.</i>	200
5.2.4.	<i>Escala utilizada para el Score de alternativas.</i>	201
5.2.5.	<i>Definición de los criterios principales a introducir en la matriz.</i>	202
5.2.5.1.	<i>Ponderación de los pesos para los criterios principales</i>	204
5.2.6.	<i>Definición de los criterios secundarios a introducir en la matriz</i>	205
5.2.6.1.	<i>Ponderación de los pesos para los criterios secundarios</i>	210
5.2.6.2.	<i>Justificación de los valores saaty dados a los criterios.</i>	213
5.2.7.	<i>Score de las alternativas.</i>	217
5.2.7.1.	<i>Justificación del score propuesto</i>	218

---

5.2.8.	<i>Matriz de score por criterio y alternativa</i> .....	231
5.2.9.	<i>Matriz de pesos ponderados</i> .....	232
5.2.10.	<i>Puntuación global por alternativa y porcentaje de decisión del criterio.</i> .....	233
5.3.	<i>Creación de una herramienta de ayuda a la decisión en la elección de la tecnología de microtunelacion con Power Bi.</i> .....	234
5.3.1.	<i>Implementación de la herramienta</i> .....	235
5.3.2.	<i>Estructura de datos del modelo</i> .....	236
5.3.3.	<i>Interfaz de usuario de la herramienta</i> .....	245
5.3.3.1.	<i>Configuración de la visualización</i> .....	245
5.3.3.2.	<i>Funciones principales</i> .....	250
5.3.3.3.	<i>Versión desktop de la herramienta</i> .....	252
5.3.3.4.	<i>Versión móvil de la herramienta</i> .....	258
5.3.4.	<i>Acceso a la herramienta de decisión</i> .....	266
6.	<b>CASO DE ESTUDIO.</b> .....	267
6.1.	<i>Propuesta de casuística y elección mediante el método de la tecnología apropiada y su posible alternativa.</i> .....	268
6.1.1.	<i>Contexto de la actuación y antecedentes técnicos</i> .....	268
6.1.2.	<i>Descripción del ámbito de actuación.</i> .....	269
6.1.3.	<i>Caracterización geológica</i> .....	270
6.1.4.	<i>Estudio geotécnico</i> .....	271
6.1.5.	<i>Problemática detectada.</i> .....	276
6.1.6.	<i>Propuesta de actuación</i> .....	277
6.1.7.	<i>Solución tecnológica adoptada para el caso de estudio</i> .....	278
6.2.	<b>Resultados.</b> .....	281
6.2.1.	<i>Presentación de resultados.</i> .....	286
6.2.2.	<i>Análisis de sensibilidad.</i> .....	289

---

6.3.	<i>Discusiones e interpretaciones</i> .....	292
7.	CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS DE TRABAJO .....	294
7.1.	<i>Conclusiones</i> .....	294
7.2.	<i>Líneas futuras de trabajo</i> .....	296
8.	BIBLIOGRAFIA .....	298
9.	DECLARACION DEL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL.....	306

---

## Índice de figuras

Figura 1. Clasificación de tecnología sin zanja. (Ig, 1988) .....	6
Figura 2. N° de publicaciones sobre técnicas de microtunelación según año (Yoganathan et al., 2025) .....	7
Figura 3. N° de proyectos significativos con técnicas de microtunelacion en diferentes paises (Yoganathan et al., 2025) .....	7
Figura 4. ASCE 36-15 .....	11
Figura 5. Estados miembros ITA. <a href="https://about.ita-aites.org/members">https://about.ita-aites.org/members</a> .....	14
Figura 6. Comites ITA. <a href="https://about.ita-aites.org/wg-committees">https://about.ita-aites.org/wg-committees</a> .....	15
Figura 7. AETOS <a href="https://aetos.es/">https://aetos.es/</a> .....	15
Figura 8. Métodos de sostenimiento del frente y de tratamiento del terreno para diversas condiciones del suelo. Pipe Jacking Association.2017. ....	19
Figura 9. Ejemplo de escudo abierto. Pipe Jacking Association.2017. ....	21
Figura 10. Mecanismos de corte en escudos abiertos. Rozacera y retroexcavadora mecánica. Pipe Jacking Association.2017. ....	21
Figura 11. Obra ADIF Cieza. Fuente propia 2021. ....	22
Figura 12. Frente de material estable. Fuente propia. 2021 .....	22
Figura 13. Escudo abierto. Brazo con cazo. Fuente propia.2021. ....	22
Figura 14. Escudo abierto con cabezal tipo rozadera. Eurohinca. ....	23
Figura 15. Cabezal y frente de ataque. Fuente propia.2025. ....	24
Figura 16. Auger Head. Fuente propia.2025. ....	24
Figura 17. Tornillo sin fin. Fuente propia. 2025. ....	24
Figura 18. Selección tecnología en base al terreno. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT. ....	28
Figura 19. Compensación de fuerzas con frente presurizado. Herrenknecht 2025. ....	29
Figura 20. Tipos de escudo cerrado. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT. ....	30
Figura 21. Escudos cerrado. MTB. Pipe Jacking Association.2017. ....	30
Figura 22. XI Suspensión de Lodos. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT. ....	32
Figura 23. Aplicacion de Slurry para mejora de fricción entre tubería y terreno. Herrenknecht 2025. ....	32
Figura 24. Hinchamiento de lodos. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT. ....	33
Figura 25. Viscosidad de Lodos. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT. ....	33

---

<i>Figura 26. Tixotropía de lodos. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT. ....</i>	<i>33</i>
<i>Figura 27. Características estructurales lodos. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT. ....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 28. Grafico de reograma de la bentonita. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT. ....</i>	<i>35</i>
<i>Figura 29. Relación de la dosificación y el Yield point. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT. ....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 30. Lodo bentónico más sólidos. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT. ....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 31. Vista de escudo cerrado. Herrenknecht 2025. ....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 32. Vista de espacio entre escudo cerrado y aplicación de slurry. Herrenknecht 2025. ....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 33. Suspensión bombeable y extracción. Herrenknecht 2025. ....</i>	<i>37</i>
<i>Figura 34. Sistema de transporte de suspensión bombeable, lodos más sólidos. Herrenknecht 2025. ....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 35. Estación de separación se solidos con ciclones. Herrenknecht 2025. ....</i>	<i>38</i>
<i>Figura 36. Interfaz de control de variables. Herrenknecht 2025. ....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 37. Esquema de dispensación de slurry y control de variables. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT. ....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 38. Gráfico de control de presiones en frente de excavación. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT. ....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 39. Vista de la interacción bentonita-tubería de hormigón. Namli &amp; Guler, 2017. ....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 40. Vista de escudo cerrado. Herrenknecht 2025. ....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 41. Vista de espacio entre escudo cerrado y aplicación de slurry. Herrenknecht 2025. ....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 42. Suspensión bombeable y extracción. Herrenknecht 2025. ....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 43. Esquema de extracción de sólidos. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT. ....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 44. Sistema de transporte de suspensión bombeable, lodos más sólidos. Herrenknecht 2025. ....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 45. Estación de separación se solidos con ciclones. Herrenknecht 2025. ....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 46. Detalle de proceso de separación de sólidos. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT. ....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 47. Tecnologías recomendadas de separación de solidos según granulometría. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT. ....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 48. Centro de bombeo de lodos. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT. ....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 49. Balance de presiones en frente de excavación. Herrenknecht 2025. ....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 50. Escudo cerrado. EPB. Pipe Jacking Association. 2017. ....</i>	<i>48</i>

---

<i>Figura 51. Gráfico para la elección del método según granulometría. Mendaña Savedra &amp; Fernandez Martinez, 2011.</i>	52
<i>Figura 52. Gráfico para la adicción de aditivos según granulometría. Mendaña Savedra &amp; Fernandez Martinez, 2011.</i>	53
<i>Figura 53. Sinfín interior tipo Auger. Herrenknecht 2025.</i>	55
<i>Figura 54. Línea de extracción. Herrenknecht 2025.</i>	55
<i>Figura 55. Muro de empuje y equipo de hincado. Herrenknecht 2025.</i>	57
<i>Figura 56. Bastidor compacto y bastidor no compacto doble. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.</i>	58
<i>Figura 57. Ficha técnica de equipo de empuje. Segoqui HT-2000.</i>	58
<i>Figura 58. Ficha técnica de equipo de hinca. Segoqui HT-2000.</i>	58
<i>Figura 59. Posicionamiento de la microtuneladora sobre zona de empuje. Herrenknecht 2025.</i>	59
<i>Figura 60. Disposición de tubos de hormigón hincados. Herrenknecht 2025.</i>	59
<i>Figura 61. Fuerza de empuje admisible. Distribución de esfuerzos de compresión. XI Ed. curso de postgrado Especialista en tecnología sin zanja 2025. IBSTT.</i>	60
<i>Figura 62. Open Joint. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.</i>	60
<i>Figura 63. Desviaciones de alineación y corrección. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.</i>	60
<i>Figura 64. Detalle de estación intermedia. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.</i>	63
<i>Figura 65. Vista de instalación de estación intermedia en línea de empuje. Herrenknecht 2025.</i>	63
<i>Figura 66. Esquema de funcionamiento de una estación intermedia. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.</i>	64
<i>Figura 67. Vista interior de laser. Fuente propia.</i>	67
<i>Figura 68. Emisor laser anclado a bancada. Herrenknecht 2025.</i>	67
<i>Figura 69. Vista laser del interior de la MTBM sobre diana receptora. Herrenknecht 2025.</i>	68
<i>Figura 70. Diana receptora. Herrenknecht 2025.</i>	68
<i>Figura 71. Interface de sistema de control de guiado. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.</i>	68
<i>Figura 72. Sistema de guiado laser en alineación curva. TuNis Navigation. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.</i>	69
<i>Figura 73. Sistema de medición con giroscopio. <a href="https://www.smig.org.mx/revista-digital-smig/266/microtunel.php">https://www.smig.org.mx/revista-digital-smig/266/microtunel.php</a></i>	70
<i>Figura 74. Sistema INS. <a href="https://www.dextermag.com/es/markets/defense/missiles/inertial_nav_s/">https://www.dextermag.com/es/markets/defense/missiles/inertial_nav_s/</a></i>	71
<i>Figura 75. Esquema de giroscopios MEMS o FOG. <a href="https://www.luisllamas.es/como-usar-un-giroscopio/">https://www.luisllamas.es/como-usar-un-giroscopio/</a></i>	71
<i>Figura 76. Esquema de sistema hibrido de guiado. Laser+ IMU. Qui et al.,2025.</i>	72

<i>Figura 77. Tabla de selección de tecnología por diámetro y riesgo. Tunnelling and Pipejacking: Guidance for Designers. London, UK.2015.</i> .....	76
<i>Figura 78 Recomendación de técnicas en base a longitudes de avance indicativas y número máximo de avances. Tunnelling and Pipejacking: Guidance for Designers. London, UK.2015.</i> .....	78
<i>Figura 79. Ejemplo de circulo de Mohr. Jimenez Salas, 1975.</i> .....	85
<i>Figura 80. Recomendación para la elección de tecnología en base a rango de permeabilidad y tipo de suelo. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.</i> .....	88
<i>Figura 81.Suelos cohesivos. Sistema unificado de clasificación SUCS. ASTM D2487.</i> .....	90
<i>Figura 82. Suelos no cohesivos. Sistema unificado de clasificación SUCS. ASTM D2487.</i> .....	92
<i>Figura 83. Gráfico para selección de tecnología de microtunelacion según tipo de suelo. Pipe Jacking Asociación 2017.</i> .....	103
<i>Figura 84. Nivel freático y saturación del suelo.</i> <i><a href="https://medioambientedecalidad.wordpress.com/tag/suelos/">https://medioambientedecalidad.wordpress.com/tag/suelos/</a></i> .....	105
<i>Figura 85. Ejemplo de control de presión del frente en EPB. Sun,2015.</i> .....	109
<i>Figura 86. Geometría de asientos inducida por la excavación de un túnel. (Attewell y Yeates et al. 1986)</i> .....	114
<i>Figura 87.Perfil de asientos longitudinales. Yubero,2013.</i> .....	115
<i>Figura 88. Proceso de disposición de armadura para tubo hincado. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.</i> .....	118
<i>Figura 89. Proceso de fabricación y colocación de virolas en tubos. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.</i> .....	119
<i>Figura 90. XI Ed. Izaje de tubos de hormigón y puntos de izaje. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.</i> .....	120
<i>Figura 91. Ensayo de aplastamiento. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.</i> .....	120
<i>Figura 92.Ensayos de estanqueidad. XI Ed. Curso Postgrado. Especialista tecnología sin zanja 2025. IBSTT.</i> .....	121
<i>Figura 93. Patologías típicas de tuberías de hormigón. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.</i> .....	121
<i>Figura 94. Tubería de acero de 1200 mm. Fuente propia.2025.</i> .....	121
<i>Figura 95. Vista área de cruce bajo FCC y vial en suelo cohesivo. Tubería de acero. Fuente propia.2025.</i> .....	122
<i>Figura 96. Composición de tubo de PRFV. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.</i> .....	123
<i>Figura 97. Influencia de cargas sobre tubería debido a edificaciones colindantes. Ghazali et al., 2025</i> .....	126

<i>Figura 98. Distribución de tensiones axiales en uniones de tuberías bajo diferentes cargas axiales. He et al., 2024.</i> .....	127
<i>Figura 99. Distribución de deformación plástica en uniones de tuberías diferentes ángulos de deflexión. He et al., 2024.</i> .....	127
<i>Figura 100. Esquema de fuerzas de fricción durante el empuje. Wadood et al., 2025.</i> .....	130
<i>Figura 101. Incremento de la fuerza de empuje-fricción a lo largo del proceso de hincado. XI Ed. curso postgrado Especialista sin zanja. 2025.</i> .....	130
<i>Figura 102. Transcurso de tubería por diferentes composiciones geológicas. Jin et al., 2023.</i> .....	131
<i>Figura 103. Registro de fuerza de fricción en KN en diferentes puntos. Jin et al., 2023.</i> .....	131
<i>Figura 104. (a) Diagrama esquemático de contacto completo y (b) modelo de contacto parcial tubería-suelo en lechada. Jin et al., 2023.</i> .....	132
<i>Figura 105. Fricciones en zona de contacto tubo-suelo. Jin et al., 2023</i> .....	132
<i>Figura 106. Incremento de la fricción con el paso del tiempo. Li et al., 2022.</i> .....	133
<i>Figura 107. Pozo de ataque. Pipe Jacking Associate. 2017.</i> .....	136
<i>Figura 108. Esquema de una planta de separación de lodos. Herrenknecht 2025.</i> .....	137
<i>Figura 109. Diferentes composiciones para los elementos de separación primaria. Herrenknecht 2025.</i> .....	138
<i>Figura 110. Acopio de lodos tras pasar por separador compacto. Herrenknecht 2025.</i> .....	139
<i>Figura 111. Entorno urbano típico en microtunelacion. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.</i> .....	139
<i>Figura 112. Perfil transversal de una microtunelacion en un entorno urbano. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.</i> .....	141
<i>Figura 113. Caso práctico. Microtunelación Santiago de Compostela. Cruce con edificaciones y vial existente. Eurohinca</i> .....	142
<i>Figura 114. Ámbito de afección sonora [dB] en un caso de estudio de microtunelacion. Lyons., 2009.</i> .....	144
<i>Figura 115. Conjunto de equipos necesarios para la ejecución de técnicas de microtunelacion.</i> <i><a href="https://www.bessac.com.mx/bessac/Microtuneles">https://www.bessac.com.mx/bessac/Microtuneles</a>.</i> .....	146
<i>Figura 116. Elementos de corte en microtunelacion con escudos cerrados.</i> <i><a href="https://www.microtunel.com/equipos-auxiliares">https://www.microtunel.com/equipos-auxiliares</a></i> .....	151
<i>Figura 117. Escenarios operativos base de los arboles lógicos. Elaboración propia.</i> .....	167
<i>Figura 118. Muestra de árbol lógico para la elección de la tecnología principal. Elaboración propia.</i> 168	
<i>Figura 119. Muestra de árbol lógico par selección de configuración auxiliar. Elaboración propia</i> .....	169
<i>Figura 120. Muestra de FASE I: Toma de decisiones dentro de árbol lógico. Elaboración propia.</i> .....	172
<i>Figura 121. Árbol lógico para el CASO 1. Presión en el frente y presencia de nivel freático. Elaboración propia.</i> .....	178

---

<i>Figura 122. Árbol lógico para el CASO 2. Presión en el frente y sin presencia de nivel freático. Elaboración propia</i> .....	183
<i>Figura 123. Árbol lógico para el CASO 3. Sin presión en el frente y sin presencia de nivel freático. Elaboración propia</i> .....	188
<i>Figura 124. Árbol lógico para el CASO 4. Sin presión en el frente y presencia de nivel freático. Elaboración propia</i> .....	193
<i>Figura 125 Pantallazo del software Power bi con tablas asociadas para la elección de la tecnología principal. Fuente propia</i> .....	237
<i>Figura 126.- Pantallazo de software Power bi con tablas asociadas para el establecimiento de los pesos por criterio secundario. Fuente propia</i> .....	239
<i>Figura 127. Pantallazo de software Power bi con tablas asociadas para el establecimiento de los pesos por criterio principal. Fuente propia</i> .....	240
<i>Figura 128. Vista modelo de Power Bi. Muestra de relaciones de variables internas del modelo. Fuente propia</i> .....	244
<i>Figura 129. Selectores de la herramienta de decision del apartado Menú. Elaboración propia</i> .....	245
<i>Figura 130. Segmentadores de la herramienta de decision para la introducción de condicionantes. Elaboración propia</i> .....	246
<i>Figura 131. Tarjetas de salida de resultados de la herramienta de decision. Elaboración propia</i> .....	247
<i>Figura 132. Grafico de anillos para visualización de datos. Elaboración propia</i> .....	248
<i>Figura 133. Grafico de embudo para muestra de pesos por subcriterio. Elaboración propia</i> .....	249
<i>Figura 134. Grafico de barras para muestra de Score total por criterio. Elaboración propia</i> .....	249
<i>Figura 135. Gráfico Treemap para representar pesos de criterios principales. Elaboración propia</i> .....	249
<i>Figura 136. Cuadro de análisis con IA para datos del modelo. Fuente propia</i> .....	250
<i>Figura 137. Cuadro para extracción de reporte. Fuente propia</i> .....	250
<i>Figura 138. Explicación del funcionamiento de la hoja de menú de la herramienta de decisión. Elaboración propia</i> .....	253
<i>Figura 139. Explicación del funcionamiento de la hoja de información específica de la herramienta de decision. Elaboración propia</i> .....	254
<i>Figura 140. Explicación del funcionamiento de la hoja de selección tecnológica de la herramienta de decision. Elaboración propia</i> .....	255
<i>Figura 141. Explicación del funcionamiento de la hoja de Matriz multicriterio AHP de la herramienta de decision. Elaboración propia</i> .....	256
<i>Figura 142. Explicación del funcionamiento de la hoja de caso de estudio de la herramienta de decision. Elaboración propia</i> .....	257
<i>Figura 143. Visualización Android de la herramienta de decision. Elaboración propia</i> .....	265
<i>Figura 144. Ubicación caso de estudio. Cieza. Murcia. Fuente propia</i> .....	268
<i>Figura 145. ODTs tributarias a colmatadas. Fuente propia</i> .....	269

---

<i>Figura 146. Muestra tipo de suelo. Fuente propia.....</i>	<i>270</i>
<i>Figura 147. Mapa geológico del ámbito. Fuente propia. ....</i>	<i>271</i>
<i>Figura 148. Ejecución de sondeos en el ámbito de actuación. Fuente propia. ....</i>	<i>271</i>
<i>Figura 149. Muestras de material extraído de los 6 sondeos realizados. Fuente propia.....</i>	<i>272</i>
<i>Figura 150. Plano de distribución de ensayos ejecutados en el ambito. ....</i>	<i>275</i>
<i>Figura 151. Perfiles longitudinales geológicos. Fuente propia.....</i>	<i>275</i>
<i>Figura 152. Estudio hidráulico previa microtunelación. Fuente propia. ....</i>	<i>276</i>
<i>Figura 153. Estado y defectos de la vía debido al embolsamiento de agua. Fuente propia. ....</i>	<i>277</i>
<i>Figura 154. Estudio hidráulico tras microtunelación y mejora de la capacidad. Fuente propia. ....</i>	<i>277</i>
<i>Figura 155. Escudo abierto con útil de corte mediante cazo empleado en el caso de estudio. Fuente propia. ....</i>	<i>278</i>
<i>Figura 156. Muro de empuje y estación no compacta utilizada en el caso de estudio. Fuente propia.</i>	<i>279</i>
<i>Figura 157. Vista aérea del ámbito. Alineación recta y cruce inferior a 120 m. Fuente propia. ....</i>	<i>279</i>
<i>Figura 158. Hitofeno en la cabeza del talud para control de asientos mediante topografía clásica. Fuente propia. ....</i>	<i>280</i>
<i>Figura 159. Elementos de extracción de material empleado en el caso de estudio. Fuente propia. ...</i>	<i>281</i>
<i>Figura 160. Interfaz de la hoja de selección tecnológica de la herramienta de decision tras la introducción de condicionantes extraídos del caso de estudio. Elaboración propia.....</i>	<i>284</i>
<i>Figura 161. Interfaz de la hoja de Matriz multicriterio AHP de la herramienta de decision tras la introducción de condicionantes extraídos del caso de estudio. Elaboración propia.....</i>	<i>285</i>
<i>Figura 162. Alternativa N°217 recomendada por la aplicación como respuesta a los condicionantes del caso de estudio. Elaboración propia. ....</i>	<i>286</i>
<i>Figura 163. Configuración aux. recomendada como respuesta a condicionantes del caso de estudio. Elaboración propia.....</i>	<i>286</i>
<i>Figura 164. Aspectos a tener en cuenta según la aplicación durante las labores de microtunelación. Elaboración propia.....</i>	<i>287</i>
<i>Figura 165. Tecnología alternativa propuesta. Elaboración propia. ....</i>	<i>287</i>
<i>Figura 166. interfaz de la hoja de matriz multicriterio AHP para la tecnología alternativa propuesta. Elaboración propia.....</i>	<i>288</i>
<i>Figura 167. Variación de pesos de criterios principales para análisis de sensibilidad. Elaboración propia. ....</i>	<i>289</i>

---

## Índice de tablas

<i>Tabla 1. Comparativa de propiedades de los principales lodos tipo slurry. Elaboración propia.</i>	45
<i>Tabla 2. Aplicación de bastidores comparados. Elaboración propia.</i>	58
<i>Tabla 3. Rango de curvatura admisible según tecnología. Elaboración propia.</i>	80
<i>Tabla 4. Relaciones aproximadas entre la calidad de los macizos rocosos y los valores de las constantes m y s. Valores del índice GSI. Hoek y Brown, 1988.</i>	87
<i>Tabla 5. Clasificación geomecánica de Bieniawski. Parámetros de la clasificación (Bieniawski, 1.989).</i>	101
<i>Tabla 6. Parámetros geotécnicos que considerar según tipo de suelo. Pipe Jacking Association.2017.</i>	102
<i>Tabla 7. Recomendación del uso de tecnología en base a la saturación del suelo. Pipi Jacking Associate.2017.</i>	107
<i>Tabla 8. Tabla de armado de tubería de hormigón según diámetro. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.</i>	118
<i>Tabla 9. Tabla de clases resistente para tubos de hinca. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.</i>	118
<i>Tabla 10. Recomendaciones para la ejecución de pozos de ataque y salida en condiciones saturadas del terreno. Pipe Jacking Asocciate. 2017.</i>	135
<i>Tabla 11. Recomendaciones para la ejecución de pozos de ataque y salida en condiciones no saturadas del terreno. Pipe Jacking Asocciate. 2017.</i>	136
<i>Tabla 12. Proyectos fallidos por atasco. Elaboración propia.</i>	156
<i>Tabla 13. Análisis de criterios impuestos en árbol lógico CASO 1. Elaboración propia.</i>	174
<i>Tabla 14. Análisis de condicionantes principales árbol lógico CASO 1. Elaboración propia.</i>	175
<i>Tabla 15. Análisis de condicionantes secundarios árbol lógico CASO 1. Elaboración propia.</i>	176
<i>Tabla 16. Tipos de salida de la tecnología principal árbol lógico CASO 1. Elaboración propia.</i>	176
<i>Tabla 17. Tipos de salida para la configuración auxiliar del árbol lógico CASO 1. Elaboración propia.</i>	177
<i>Tabla 18. Documentación necesaria para alimentar condicionantes del árbol lógico CASO 1. Elaboración propia.</i>	177
<i>Tabla 19. Análisis de criterios impuestos en árbol lógico CASO 2. Elaboración propia.</i>	179
<i>Tabla 20. Análisis de condicionantes principales árbol lógico CASO 2. Elaboración propia.</i>	180
<i>Tabla 21. Análisis de condicionantes secundarios árbol lógico CASO 2. Elaboración propia.</i>	180
<i>Tabla 22. Tipos de salida de la tecnología principal árbol lógico CASO 2. Elaboración propia.</i>	181
<i>Tabla 23. Tipos de salida de la configuración auxiliar árbol lógico CASO 2. Elaboración propia.</i>	182
<i>Tabla 24. Documentación necesaria para alimentar condicionantes del árbol lógico CASO 2. Elaboración propia.</i>	182
<i>Tabla 25. Análisis de criterios impuestos en árbol lógico CASO 3. Elaboración propia.</i>	184

---

<i>Tabla 26. Análisis de condicionantes principales árbol lógico CASO 3. Elaboración propia. ....</i>	<i>184</i>
<i>Tabla 27. Análisis de condicionantes secundarios árbol lógico CASO 3. Elaboración propia. ....</i>	<i>185</i>
<i>Tabla 28. Tipos de salida de la tecnología principal árbol lógico CASO 3. Elaboración propia. ....</i>	<i>186</i>
<i>Tabla 29. Tipos de salida de la configuración auxiliar árbol lógico CASO 3. Elaboración propia. ....</i>	<i>187</i>
<i>Tabla 30. Documentación necesaria para alimentar condicionantes del árbol lógico CASO 3. Elaboración propia. ....</i>	<i>187</i>
<i>Tabla 31. Análisis de criterios impuestos en árbol lógico CASO 4. Elaboración propia. ....</i>	<i>189</i>
<i>Tabla 32. Análisis de condicionantes principales árbol lógico CASO 4. Elaboración propia. ....</i>	<i>190</i>
<i>Tabla 33. Análisis de condicionantes secundarios árbol lógico CASO 4. Elaboración propia. ....</i>	<i>191</i>
<i>Tabla 34. Tipos de salida de la tecnología principal árbol lógico CASO 4. Elaboración propia. ....</i>	<i>191</i>
<i>Tabla 35. Tipos de salida de la configuración auxiliar árbol lógico CASO 4. Elaboración propia. ....</i>	<i>192</i>
<i>Tabla 36 Documentación necesaria para alimentar condicionantes del árbol lógico CASO 4. Elaboración propia. ....</i>	<i>192</i>
<i>Tabla 37. Escala Saaty para ponderación de pesos de matriz multicriterio tipo AHP. Elaboración propia. .....</i>	<i>200</i>
<i>Tabla 38. Escala Score. Elaboración propia. ....</i>	<i>201</i>
<i>Tabla 39. Matriz de valoración para criterios principales de decision. Elaboración propia. ....</i>	<i>204</i>
<i>Tabla 40. Resumen de pesos normalizados por criterio principal. Elaboración propia. ....</i>	<i>204</i>
<i>Tabla 41. Análisis de consistencia de criterios principales. Elaboración propia. ....</i>	<i>205</i>
<i>Tabla 42. Matriz de valoración para criterios secundarios de decision económicos. Elaboración propia. .....</i>	<i>211</i>
<i>Tabla 43. Resumen de pesos normalizados por criterio secundarios de decisión económicos. Elaboración propia. ....</i>	<i>211</i>
<i>Tabla 44. Análisis de consistencia de criterios secundarios de decision económicos. Elaboración propia. ....</i>	<i>211</i>
<i>Tabla 45. Estabilidad de la consistencia de los criterios secundarios de decisión económicos. Elaboración propia. ....</i>	<i>211</i>
<i>Tabla 46. Matriz de valoración para criterios secundarios de decision ambientales. Elaboración propia. .....</i>	<i>211</i>
<i>Tabla 47. Resumen de pesos normalizados por criterio secundarios de decisión ambientales. Elaboración propia. ....</i>	<i>211</i>
<i>Tabla 48. Análisis de consistencia de criterios secundarios de decision ambientales. Elaboración propia. ....</i>	<i>212</i>
<i>Tabla 49. Estabilidad de la consistencia de los criterios secundarios de decisión ambientales. Elaboración propia. ....</i>	<i>212</i>
<i>Tabla 50. Pesos para criterios secundarios de decision sociales. Elaboración propia. ....</i>	<i>212</i>

---

<i>Tabla 51. Matriz de valoración para criterios secundarios de decision seguridad y operación. Elaboración propia</i> .....	212
<i>Tabla 52. Resumen de pesos normalizados por criterio secundarios de decisión seguridad y operación. Elaboración propia</i> .....	212
<i>Tabla 53. Análisis de consistencia de criterios secundarios de decision seguridad y operación. Elaboración propia</i> .....	212
<i>Tabla 54. Estabilidad de la consistencia de los criterios secundarios de decisión seguridad y operación. Elaboración propia</i> .....	212
<i>Tabla 55. Justificación del valor de escala Saaty dado por criterio económico. Elaboración propia</i> ...	214
<i>Tabla 56. Justificación del valor de escala Saaty dado por criterio ambiental. Elaboración propia</i> .....	215
<i>Tabla 57. Justificación del valor de escala Saaty dado por criterio de seguridad y operación. Elaboración propia</i> .....	216
<i>Tabla 58. Scores de las variables que componen las alternativas. Elaboración propia</i> .....	218
<i>Tabla 59.-Justificación de los scores dados por criterio y subcriterio. Elaboración propia</i> .....	230
<i>Tabla 60. Muestra de matriz de score por criterio y alternativa. Elaboración propia</i> .....	231
<i>Tabla 61. Muestra de matriz multicriterio ponderada. Elaboración propia</i> .....	232
<i>Tabla 62. Muestra de puntuación global por alternativa y porcentaje de decision del criterio. Elaboración propia</i> .....	233
<i>Tabla 63.-Pantallazo del software Power bi con tabla origen transformada para visualización de datos parciales. Fuente propia</i> .....	241
<i>Tabla 64. Pantallazo del software Power bi con tabla origen transformada para visualización de datos parciales. Fuente propia</i> .....	241
<i>Tabla 65. Pantallazo del software Power bi con tabla origen transformada para visualización de datos totales. Fuente propia</i> .....	242
<i>Tabla 66. Pantallazo del software Power bi con tabla origen transformada para visualización de Notas combinación. Fuente propia</i> .....	243
<i>Tabla 67. Sondeos ejecutados en el ámbito de la actuación. Fuente propia</i> .....	271
<i>Tabla 68. NSPT. Fuente propia</i> .....	273
<i>Tabla 69. Ensayos efectuados para caracterización geotécnica. Fuente propia</i> .....	273
<i>Tabla 70. Resultados ensayos. Fuente propia</i> .....	274
<i>Tabla 71. Distribución de niveles geotécnicos detectados. Fuente propia</i> .....	275
<i>Tabla 72. Resmen de parámetros geotécnicos de los suelos interceptados. Elaboración propia</i> .....	276
<i>Tabla 73. Datos de entrada a la herramienta de decisión extraídos del caso de estudio. Elaboración propia</i> .....	283

---

## Índice de fórmulas

<i>Fórmula 1.-Superficie comprimida de la unión entre tubos</i> .....	61
<i>Fórmula 2.-Superficie comprimida de la unión entre tubos</i> .....	61
<i>Fórmula 3.-Fuerza máxima perpendicular</i> .....	61
<i>Fórmula 4.-Fuerza máxima perpendicular</i> .....	61
<i>Fórmula 5.-Unión cerrada</i> .....	62
<i>Fórmula 6.-Unión cerrada</i> .....	62
<i>Fórmula 7.-Unión abierta</i> .....	62
<i>Fórmula 8.-Unión abierta</i> .....	62
<i>Fórmula 9.-Fricción lineal</i> .....	65
<i>Fórmula 10.-Fricción lineal</i> .....	65
<i>Fórmula 11.-Tensión cortante en rotura</i> .....	84
<i>Fórmula 12.-Tensión cortante en rotura</i> .....	84
<i>Fórmula 13.- Esfuerzo principal mayor</i> .....	85
<i>Fórmula 14.- Criterio de falla en condiciones no drenadas</i> .....	86
<i>Fórmula 15.- Criterio de falla en condiciones no drenadas</i> .....	86
<i>Fórmula 16.-Tensión principal mayor efectiva en rotura</i> .....	87
<i>Fórmula 17.-Tensión principal mayor efectiva en rotura</i> .....	87
<i>Fórmula 18.-Presión de poro</i> .....	105
<i>Fórmula 19.-Presión de poro</i> .....	105
<i>Fórmula 20.- Tensiones efectivas</i> .....	106
<i>Fórmula 21.- Tensiones efectivas</i> .....	106
<i>Fórmula 22.- Rango de presiones en frente</i> .....	108
<i>Fórmula 23.- Rango de presiones en frente</i> .....	108
<i>Fórmula 24.- Condición de reciprocidad</i> .....	196
<i>Fórmula 25.- Condición de reciprocidad</i> .....	196
<i>Fórmula 26.- Autovector de prioridades</i> .....	196
<i>Fórmula 27.- Autovector de prioridades</i> .....	196
<i>Fórmula 28.-Condición de matriz en diagonal igual a la unidad</i> .....	196
<i>Fórmula 29.-Condición de matriz en diagonal igual a la unidad</i> .....	196
<i>Fórmula 30.-Índice de consistencia</i> .....	197
<i>Fórmula 31.-Índice de consistencia</i> .....	197
<i>Fórmula 32.- Ratio de consistencia</i> .....	197
<i>Fórmula 33.- Ratio de consistencia</i> .....	197
<i>Fórmula 34.-Sumatorio de score por alternativa</i> .....	197
<i>Fórmula 35.-Sumatorio de score por alternativa</i> .....	197

---

<i>Fórmula 36.- Dimensión de la matriz.....</i>	<i>199</i>
<i>Fórmula 37.- Dimensión de la matriz.....</i>	<i>199</i>
<i>Fórmula 38.-Sumatorio del score global dado a las alternativas.....</i>	<i>217</i>

---

## **1. INTRODUCCION Y MOTIVACION DE LA INVESTIGACION.**

El desarrollo de la sociedad contemporánea ha estado históricamente ligado a la capacidad del ser humano para proyectar y ejecutar infraestructuras que permitan mejorar la conectividad, optimizar el uso de los recursos y garantizar el acceso eficiente a los servicios esenciales. Sin embargo, el crecimiento urbano, la densificación del territorio y la coexistencia de múltiples redes de transporte y suministro han generado un escenario en el que la implantación de nuevas infraestructuras lineales resulta cada vez más compleja. La presencia de servicios existentes —carreteras, ferrocarriles, colectores, redes de abastecimiento, conducciones eléctricas o gasistas— condiciona significativamente la ejecución de nuevas actuaciones, y cualquier afección sobre ellas conlleva elevados costes sociales, económicos y ambientales.

Ante este contexto, las administraciones y los promotores demandan soluciones constructivas capaces de minimizar la interferencia con la infraestructura en servicio y reducir los impactos sobre la superficie. Esto ha impulsado la expansión de técnicas constructivas sin zanja (trenchless), entre las cuales la microtunelación se ha convertido en una herramienta esencial para la ejecución de cruces dirigidos y conducciones enterradas en entornos urbanos y periurbanos con elevadas restricciones.

A pesar de su relevancia creciente, la normativa existente y las referencias técnicas disponibles son todavía escasas, heterogéneas o insuficientes para establecer criterios sistemáticos de selección entre las diferentes tecnologías actualmente disponibles. Esto conduce, con frecuencia, a decisiones basadas en la experiencia particular de los agentes intervinientes, lo que introduce incertidumbre y puede derivar en soluciones no óptimas desde el punto de vista técnico, económico o del riesgo geotécnico.

La limitada disponibilidad de referencias técnicas específicas en el ámbito de la microtunelación se debe en gran medida a que, históricamente, este tipo de actuaciones no ha sido percibido como infraestructura de alta complejidad, a diferencia de obras lineales convencionales como puentes, carreteras o túneles excavados a sección completa. Su ejecución subterránea, la ausencia de excavación a cielo abierto y la reducida afección superficial han contribuido a que su consideración social y administrativa se sitúe por debajo de la magnitud técnica real que implican. No obstante, los procedimientos de microtunelación requieren un control preciso del frente de excavación, una gestión adecuada de presiones intersticiales, un conocimiento detallado del comportamiento del terreno y una coordinación operativa equiparable a la de obras geotécnicas de mayor escala. En un contexto de creciente congestión urbana, proximidad entre servicios enterrados y exigencias de

minimización de riesgos y asentamientos, estas técnicas han adquirido un papel estratégico en el desarrollo de nueva infraestructura. Por ello, resulta imprescindible establecer líneas técnicas de referencia que permitan sistematizar criterios de selección, definir condiciones de aplicabilidad y estandarizar parámetros de diseño y control, asegurando que la elección y ejecución de soluciones de microtunelación respondan a un marco técnico riguroso y reproducible.

No obstante, la microtunelación no constituye una única tecnología, sino un conjunto de soluciones con diferencias sustanciales en su funcionamiento, campo de aplicación, capacidad de control, requerimientos geotécnicos y limitaciones geométricas.

En consecuencia, se identifica la necesidad de desarrollar un estudio comparativo riguroso que analice las características operativas, capacidades, limitaciones y ámbitos de aplicación de las principales tecnologías de microtunelación. La investigación pretende establecer una base técnica sólida que permita estructurar un criterio objetivo de selección, fundamentado en los condicionantes geotécnicos, hidráulicos, geométricos y operativos que caracterizan cada proyecto.

## **2. OBJETIVOS.**

El objetivo del presente TFM es avanzar hacia la elaboración de un árbol lógico de toma de decisiones que integre variables de proyecto y de terreno, y permita recomendar la tecnología de microtunelación más adecuada para un determinado escenario. Dicho árbol se vinculará a una aplicación informática que facilite su implementación práctica y que sirva como herramienta de apoyo para administraciones, proyectistas y empresas constructoras. De manera complementaria, se incorpora un análisis multicriterio que permite evaluar las distintas alternativas tecnológicas desde perspectivas adicionales a la estrictamente técnica, considerando aspectos económicos, ambientales, sociales y de operación y seguridad. La presente investigación aspira a aportar claridad y estructura a un campo que, pese a su creciente relevancia, carece todavía de herramientas sólidas para orientar las decisiones de ingeniería. La microtunelación se emplea cada vez con mayor frecuencia en entornos urbanos y en cruces sensibles, pero la elección de la tecnología adecuada no siempre se realiza apoyándose en criterios comparables o en metodologías verificables. Mediante el análisis detallado del comportamiento, requisitos operativos y limitaciones de cada sistema, este estudio pretende generar un marco de referencia que permita interpretar de forma coherente las implicaciones técnicas de cada alternativa. Este enfoque no solo busca mejorar la calidad de las decisiones durante la fase de diseño, sino también anticipar posibles problemas de ejecución, optimizar los medios necesarios y garantizar que las soluciones elegidas respondan de manera eficaz a los condicionantes del terreno y del entorno. Además, disponer de una herramienta

que relacione de forma directa los parámetros de proyecto con las capacidades reales de cada tecnología contribuirá a impulsar prácticas más transparentes, reproducibles y alineadas con los estándares de sostenibilidad y de mínima afección que demanda la infraestructura moderna.

### *2.1. Estudio de condicionantes.*

El análisis comparativo de tecnologías de microtunelación requiere, como paso previo, la identificación y sistematización de los condicionantes que intervienen en la selección de un determinado procedimiento constructivo. Para ello, se establecerá un criterio estructurado de recopilación que permita agrupar, clasificar y evaluar de manera homogénea los parámetros que influyen de forma directa en el comportamiento del terreno, en el rendimiento del equipo y en los riesgos asociados a la ejecución. El proceso se desarrollará en tres etapas diferenciadas. En primer lugar, se realizará una revisión bibliográfica y documental, abarcando literatura técnica especializada, guías internacionales de trenchless technology, manuales de fabricantes, experiencias de obra y publicaciones científicas, con el objetivo de identificar los parámetros más recurrentes y técnicamente relevantes. En segundo lugar, se llevará a cabo una clasificación funcional de los condicionantes, agrupándolos en categorías tales como: características geotécnicas (granulometría, cohesión, compacidad, parámetros de resistencia, nivel freático, permeabilidad), condicionantes geométricos (diámetro, longitud, curvatura y radio mínimo admisible), condicionantes estructurales y de carga (sobrecargas, proximidad a infraestructuras existentes, sensibilidad a asentamientos), condicionantes operativos (métodos de confinamiento, requerimientos de lodos, sistemas de guiado, capacidad de empuje) y condicionantes logísticos (accesibilidad, tamaño de pozos, restricciones urbanas). Finalmente, se procederá a la normalización de los parámetros recopilados, definiendo para cada uno su rango de variabilidad, su forma de cuantificación y su relevancia en la toma de decisiones. Este proceso permitirá disponer de una matriz completa de condicionantes que servirá como base objetiva para el análisis comparativo y para la posterior elaboración del árbol lógico de selección de tecnologías.

### *2.2. Creación de una aplicación de selección en base al estudio y al árbol lógico.*

A partir de los condicionantes previamente recopilados, se establecerá un conjunto de árboles lógicos de decisión que permitan transformar dichos parámetros de entrada en una recomendación técnica fundamentada sobre la tecnología de microtunelación más adecuada para cada escenario. Este objetivo consiste en definir una estructura secuencial de evaluación en la que cada condicionante —o combinación de ellos— conduzca a diferentes rutas de decisión basadas en la casuística observada en la práctica y en el análisis comparativo de las capacidades de los distintos

sistemas. Para ello, se identificarán primero los puntos críticos de decisión, es decir, aquellos parámetros que determinan cambios sustanciales en la aplicabilidad de una tecnología (por ejemplo, comportamiento del terreno frente al confinamiento del frente, sensibilidad a los asentamientos, limitaciones de curvatura, permeabilidad o presiones intersticiales). Sobre estos nodos se construirán reglas condicionales que asignen una tecnología recomendada, una alternativa secundaria viable y, cuando sea pertinente, descarten explícitamente opciones técnicamente desaconsejadas. Además, cada rama del árbol incorporará una evaluación asociada de riesgos y consideraciones específicas, como potenciales mecanismos de fallo, requisitos especiales de control, condiciones de operación, limitaciones estructurales, o la necesidad de medidas complementarias de mitigación. El resultado final será una herramienta metodológica capaz de integrar múltiples condicionantes en un sistema coherente de decisión, garantizando que la selección tecnológica no solo responda a criterios de aplicabilidad, sino también a criterios de seguridad, fiabilidad y viabilidad constructiva.

### *2.3. Creación de una aplicación de toma de decisiones*

Como culminación del proceso de análisis de condicionantes y del establecimiento de árboles lógicos de decisión, se plantea el desarrollo de una aplicación informática que permita implementar de forma operativa la metodología propuesta. El objetivo de esta herramienta es que, a partir de un conjunto de datos de entrada representativos de los condicionantes del proyecto —derivados de los parámetros previamente definidos en el estudio y estructurados conforme a los árboles lógicos—, el usuario obtenga como salida una recomendación de tecnología de microtunelación, una alternativa técnica viable, así como una relación de riesgos asociados y recomendaciones específicas de diseño y ejecución. La aplicación incorporará las reglas de decisión derivadas de los árboles lógicos, de manera que el proceso de selección se realice de forma sistemática, reproducible y coherente con los criterios técnicos establecidos en la investigación. Se buscará, además, que la herramienta presente una interfaz sencilla, intuitiva y de fácil interpretación, de modo que pueda ser utilizada tanto por técnicos especializados como por usuarios con menor experiencia en microtunelación, como personal de administraciones o de empresas consultoras. Para ello, los datos de entrada se estructurarán en formularios claros y guiados, y los resultados se mostrarán de manera sintética, incluyendo no solo la tecnología recomendada, sino también las razones principales de dicha elección, las condiciones críticas que la han motivado y las precauciones o medidas complementarias que se consideren convenientes. De este modo, la aplicación se configurará como una herramienta de apoyo a la decisión que contribuya a la homogenización de criterios y a la mejora de la calidad técnica en la selección de soluciones de microtunelación.

### 3. ESTADO DEL ARTE.

El estado del arte constituye un elemento fundamental en todo trabajo de investigación, ya que permite situar el estudio en el contexto científico, técnico y conceptual en el que se enmarca. A través de una revisión crítica y sistemática de las contribuciones existentes, se identifican los avances más relevantes, las metodologías predominantes y las principales líneas de debate que han configurado la evolución del campo. Este análisis no solo ofrece una visión estructurada del conocimiento disponible, sino que también permite detectar lagunas, inconsistencias y oportunidades de mejora que justifican la pertinencia del trabajo desarrollado.

En este apartado se recopilan y examinan las normativas, asociaciones técnicas, investigaciones, enfoques teóricos y desarrollos tecnológicos más significativos relacionados con el objeto de estudio. Asimismo, se establecen conexiones entre diferentes perspectivas para ofrecer una síntesis comprensiva que facilite entender cómo se ha construido el conocimiento actual y cuáles son las tendencias emergentes. Este marco de referencia servirá como base para definir de manera fundamentada la metodología de trabajo que nos haga conseguir los objetivos descritos en punto anterior.

#### 3.1. *Evolución histórica de las técnicas de microtunelación.*

Para poder alcanzar los objetivos del estudio, es imprescindible conocer de primera mano el camino recorrido por esta tecnología desde su creación hasta la actualidad, esto nos ayuda a comprender los avances tecnológicos en función de las dificultades surgidas, lo que nos ayuda a tener una base más rica a la hora de poder identificar los condicionantes claves para tener en cuenta a la hora de proponer las tecnologías existentes en la actualidad. La tecnología de la microtunelación no nace directamente por sí sola, sino que es la evolución de técnicas más primitivas como es la ejecución de tubería sin zanjas, más conocidas en el ámbito anglosajón y americano, como trenchless, siendo en este último las primeras referencias de ejecución. Por lo tanto, antes de iniciar con su evolución histórica es importante resaltar que la microtunelación nace como un tipo de hincado de tubería. El elemento esencial que distingue al hincado de tuberías (en comparación con otros métodos de tunelaje) es que el revestimiento del túnel resultante se empuja a través del suelo desde el punto de inicio en lugar de construirse sección por sección justo detrás del frente de excavación o dentro del escudo de cola de una tuneladora. (Sterling, 2020a)

La microtunelación fue diseñada para realizar perforaciones sin zanja para tuberías de pequeño diámetro (hasta 900 mm) donde la participación humana es muy limitada o imposible. Inicialmente, la longitud de la perforación era apenas de 100 metros, pero con el desarrollo de la construcción,

el método ha mejorado. Hoy en día, con la disponibilidad de maquinaria especializada, el diámetro de la perforación puede ser de hasta 2500 mm (incluso hasta 4000 mm) y la distancia es de más de 300 metros. (Beltps, s. f.)

El desarrollo de la tecnología de microtunelación fue posible gracias a la introducción de equipos modernos: sensores de control de ultra precisión, mecanismos de control progresivos y tecnologías que se utilizaban previamente en la construcción de túneles a gran escala utilizando escudos con cargas de suelo y agua.(Beltps, s. f.)

Las primeras actuaciones relacionadas con la ejecución de tuberías sin zanjas datan de hace unos 130 años, en 1896 se utiliza para instalar una alcantarilla de hormigón bajo el Ferrocarril del Pacífico Norte en los EE. UU (Sterling, 2020a). La tecnología existente en aquellos años imponía el acceso de personas al frente para llevar a cabo el trabajo de excavación y para cargar y retirar los escombros, lo cual suponía un elevado riesgo para los operarios de la actuación. No fue hasta 1910, cuando se empezó a hablar sobre la técnica de la microtunelación, la cual permite un proceso de tunelaje controlado en diámetros inferiores a los permitidos para la entrada de personas (Sterling, 2020a).

A partir de este momento algunos países tomaron la delantera en cuanto a desarrollo de la tecnología, siendo punteros en su evolución países como Japón, Alemania o incluso Reino Unido. Desde entonces las evoluciones y tecnologías en relación con este aspecto han sido constantes. Se empieza hablar de términos como lodos, hidro escudos etc. En 1964 Reino unido concede una patente a John Bartlett, así como Japón que se lanza con pruebas de tecnologías de hidro escudos.(Sterling, 2020a).

Los mayores desarrollos tecnológicos se dieron sin lugar a duda en Japón, donde se siguió apostando y desarrollando la tecnología en años sucesivos, volviendo a tener nuevas aportaciones al mercado a finales de los años 70 y 80, con la aparición de las primeras maquinas que ofrecían perforaciones en diámetros cuya entrada de personas no era viable.

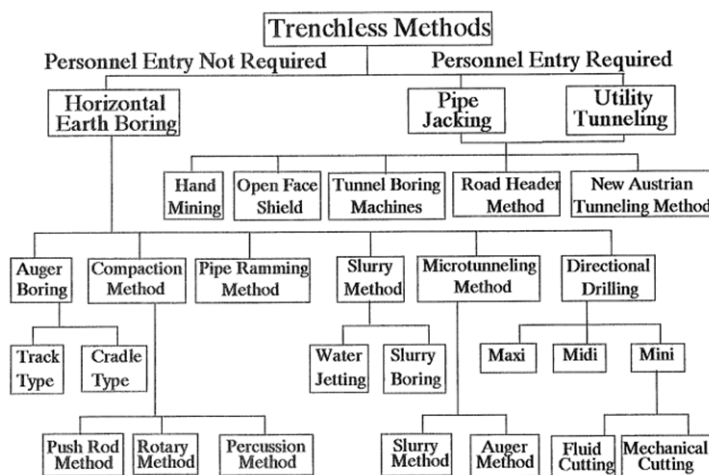


Figura 1. Clasificación de tecnología sin zanja. (Ig, 1988)

La microtunelación fue desarrollada en 1972 en Japón por Komatsu y el primer proyecto de microtunelación se completó en 1974 (Hegab & Salem, 2010a)

A partir de ese momento, las publicaciones relacionadas con la microtunelación se dispararon proporcionalmente hasta la fecha tal y como muestra el siguiente gráfico.

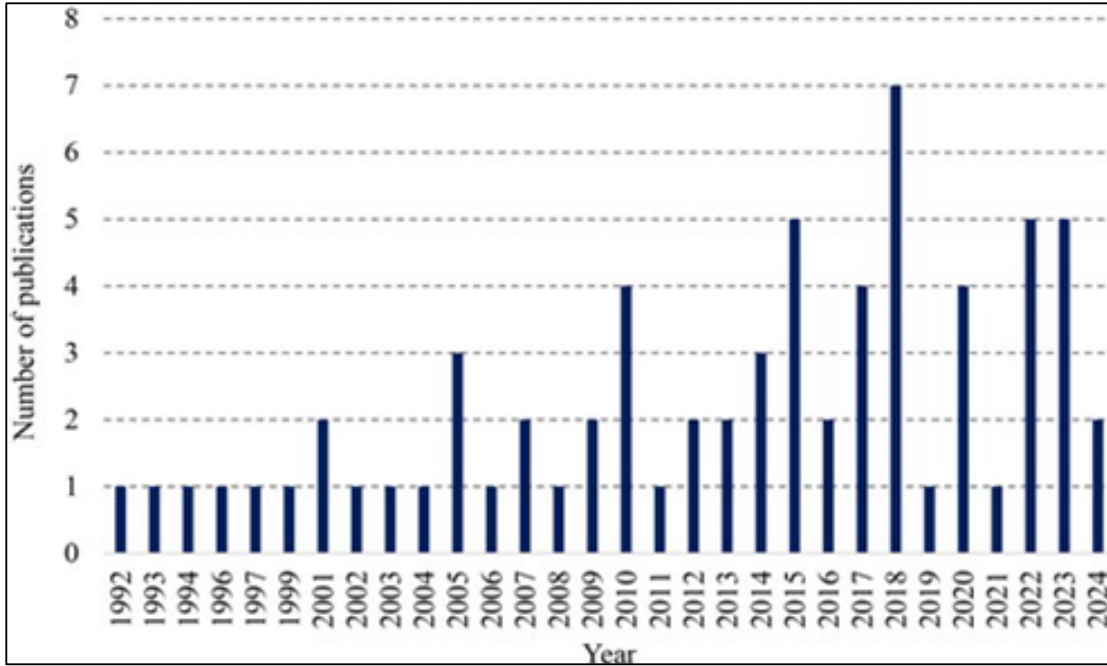


Figura 2. Nº de publicaciones sobre técnicas de microtunelación según año (Yoganathan et al., 2025)

Esta evolución de la tecnología y de la información sobre la misma ha generado también un fuerte incremento en el uso de esta en todo el mundo, tal y como refleja el siguiente gráfico.

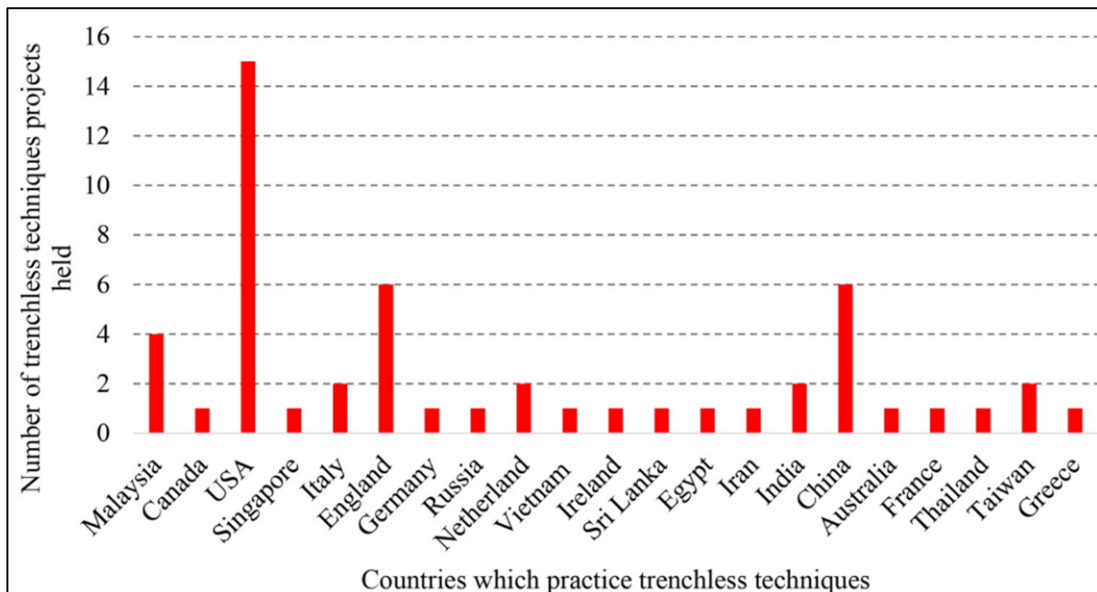


Figura 3. Nº de proyectos significativos con técnicas de microtunelación en diferentes países (Yoganathan et al., 2025)

Es importante destacar que existen ligeras diferencias en los criterios de denominación de la técnica entre el país originario de la misma, Europa y Estados Unidos. Europa y Japón definen cualquier máquina de hincado de tuberías como una máquina de microtunelización en función de su tamaño. En Japón, cualquier tamaño por debajo de 800 mm es una microtunelización, mientras que en Europa el margen es de 1000 mm. En Estado Unidos se considera cualquier máquina de hincado de tuberías guiada por control remoto como una máquina de microtunelización (Hegab & Salem, 2010a).

### *3.2. Incremento actual de la necesidad de recurrir al uso de la microtunelización.*

El desarrollo de infraestructuras se encuentra bajo una presión constante debido al aumento poblacional y la creciente urbanización. Este panorama ha redefinido las prioridades en la construcción civil. Debido a esta fuerte presión urbanística, algunas publicaciones, hace mas ya de una década indicaban que en los próximos años se produciría un rápido crecimiento del microtunelaje en las áreas urbanas debido a la alta relación costo-beneficio del microtunelaje en comparación con los métodos de tajo abierto.(Hegab & Salem, 2010a). Este pronóstico se ha cumplido al pie de la letra. La microtunelización es un medio cada vez más popular para ubicar servicios públicos bajo tierra.(Sheil, 2020). Y se espera que su demanda siga creciendo y evolucionando. La construcción subterránea ha evolucionado de ser un método para refugios o extracción de materias primas a contribuir a un campo diverso que incluye: Redes de servicios públicos (líneas de agua, saneamiento, gas). Transporte, almacenamiento y construcción en general. (Yoganathan et al., 2025). Para mantener el ritmo del crecimiento demográfico y satisfacer las necesidades futuras de infraestructura, se requiere una cantidad sustancial de trabajo en la vasta red de servicios subterráneos existentes (agua, alcantarillado, gas, electricidad).(Sheil, 2020).

La afección a servicios existentes cada vez es más común dado que el territorio cada vez está más densificado de actuaciones, ya sean subterráneas o en superficie. En comparación con los métodos de tajo abierto, el microtunelaje tiene un mejor control del tráfico, menores costos de reinstalación, menos necesidad de excavar alrededor de los servicios públicos existentes y un menor costo social(Hegab & Salem, 2010a). Permite la instalación de tuberías a mayores profundidades y con un nivel de precisión mucho mayor que otras técnicas sin zanja (como el HDD), lo que minimiza el riesgo en áreas sensibles.(Yoganathan et al., 2025). Esto hoy en día es clave para que su demanda sea cada vez mayor, dado que minimiza en gran medida la interacción entre promotores, lo que deriva en una mejora de los plazos de ejecución así minimizando en gran medida también los costes económicos. Además de la mejora de las variables de tiempo y coste el uso de la microtunelización

presenta un bajo costo social y ambiental, el cual resulta del hecho de que el microtunelaje reduce el tiempo de demora del tráfico y la interrupción de las actividades comerciales (McKim, 1997). Reduce el ruido, la contaminación del aire y el impacto en la infraestructura circundante y el medio ambiente (ej. cruce de ríos, humedales, carreteras o vías férreas). (Sheil, 2020). La aplicabilidad de la microtunelación en la sociedad moderna abarca una amplia gama sectorial debido a su gran versatilidad, puede ser aplicada en diferentes proyectos, como líneas de gravedad y presión, conductos permanentes para cables y cruces bajo ferrocarriles o carreteras. (Hegab & Salem, 2010a). Por tanto, las técnicas de microtunelación resultan una herramienta fundamental hoy en día para ingenieros que deben llevar a cabo tareas de planificación, así como ingenieros que están ejecutando dichas actuaciones. El uso de la microtunelación permite ejecutar actuaciones difícilmente realizables mediante apertura de zanja, por lo que su evolución tecnológica debe ser constante para poder obtener cada vez mejores rendimientos y producciones sin olvidarse de estar alineados con temas tan importantes hoy en día como puede ser la sostenibilidad y el medio ambiente.

### 3.3. *Documentos técnicos de referencia, asociaciones, y organismos.*

El marco normativo específico aplicable a las tecnologías de microtunelación se encuentra, en la actualidad, en un estado de cierta fragmentación y ausencia de armonización plena a nivel internacional. No existe, por el momento, ninguna norma ISO dedicada de forma exclusiva a estas tecnologías, por lo que la regulación técnica se apoya hoy en día fundamentalmente en guías sectoriales, normas nacionales y recomendaciones de asociaciones profesionales que la profesión toma como referencia.

En el ámbito internacional, el referente más consolidado lo constituyen las publicaciones de la American Society of Civil Engineers (ASCE), especialmente el estándar *ASCE 36-15 – Standard Design and Construction Guidelines for Microtunneling* y el *Manual of Practice MOP 133 – Pipe Jacking and Microtunneling*. Estos documentos establecen criterios de diseño geotécnico, selección de la microtuneladora (MTBM), control de asentamientos, requisitos de las tuberías de hincado y procedimientos de ejecución, y son ampliamente aceptados como base técnica en proyectos de microtunelación en numerosos países, pese a no tener carácter legal obligatorio fuera del entorno estadounidense.

En Europa, la normativa más específica en materia de técnicas sin zanja procede de países con larga tradición en este tipo de tecnologías, especialmente Alemania. En este contexto destacan las recomendaciones técnicas de la DWA, entre ellas la DWA-A 125, que establece criterios para el diseño y ejecución de tuberías instaladas mediante métodos de hincado y microtunelación, y la serie

DWA-M 143, cuya Parte 14 se centra específicamente en la instalación de conducciones mediante micro túnel. Por su parte, la norma EN 1610, relativa a la construcción y ensayo de redes de saneamiento y drenaje, si bien no está dedicada a la microtunelación como método constructivo, sí resulta de aplicación para las tuberías instaladas mediante micro túnel cuando estas pasan a formar parte de sistemas de alcantarillado o drenaje.

En el caso de España, no existe actualmente una normativa técnica específica para la microtunelación equivalente a las normas ASCE o DIN comentadas anteriormente. El marco regulador es indirecto y suele darse forma a partir de distintos documentos generales: el Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG-3), la Orden Circular 3.1-IC sobre drenaje, el Código Técnico de la Edificación (CTE), así como diversas normas UNE-EN relativas a los materiales de las tuberías (hormigón, fundición dúctil, polímeros, acero, etc.).

*La Microtunelación. Tecnología y Aplicaciones* del CEDEX constituye una de las escasas referencias técnicas de carácter público disponibles en España dedicadas de forma específica a la tecnología de la microtunelación. Este documento ofrece una descripción clara y sistemática del método constructivo, sus componentes principales —incluyendo el MTBM, los sistemas de guiado, las estaciones de empuje y los sistemas de evacuación de lodo, así como de los criterios básicos de aplicación según las condiciones geotécnicas del terreno. Aunque no tiene carácter normativo, su contenido ha sido ampliamente utilizado como documento de consulta en administraciones y empresas de ingeniería, al aportar criterios de selección de la técnica frente a alternativas convencionales, recomendaciones sobre diseño geométrico y constructivo, y un repaso de las ventajas operativas de la microtunelación en entornos urbanos o con restricciones ambientales. La aportación del CEDEX es especialmente relevante en el contexto español, donde no existe una normativa específica equivalente a las desarrolladas por organismos internacionales, por lo que este documento se ha consolidado como una referencia técnica fundamental para contextualizar y justificar el uso de la microtunelación en proyectos nacionales.

A pesar del avance técnico de la microtunelación y su creciente implantación en entornos urbanos e infraestructuras de servicios, la disponibilidad de documentación técnica de obligado cumplimiento sigue siendo limitada. Esta carencia se explica en gran medida porque las obras ejecutadas mediante microtunelación no suelen considerarse proyectos emblemáticos o de referencia, a diferencia de los grandes túneles, puentes o infraestructuras singulares que tradicionalmente han impulsado el desarrollo normativo sólido y altamente estructurado. Como consecuencia, la microtunelación se ha regulado históricamente a través de guías técnicas,

recomendaciones sectoriales y normativa general de obra civil, sin alcanzar el grado de formalización propio de otras disciplinas. Ante esta ausencia de normativa específica, es habitual que proyectistas y administraciones recurran a las referencias consolidadas de su “hermano mayor”, la ingeniería de túneles, utilizando normas y recomendaciones desarrolladas para tunelación mecanizada y obras subterráneas convencionales como marco técnico de apoyo para definir criterios de diseño, ejecución y control de calidad en micro túneles.

### 3.3.1. ASCE36-15-Standard Design and Construction Guidelines for Microtunneling.



Figura 4. ASCE 36-15

El ASCE 36-15, Standard Design and Construction Guidelines for Microtunneling, fue publicado en 2015 por la American Society of Civil Engineers (ASCE), constituye la norma técnica de referencia en Estados Unidos para el diseño y la ejecución de obras mediante microtunelación. Este estándar recoge de forma sistemática los criterios técnicos, requerimientos constructivos, procedimientos de control y recomendaciones operativas necesarios para garantizar la seguridad, funcionalidad y eficiencia de las conducciones instaladas mediante esta técnica de perforación dirigida.

Este estándar fue desarrollado mediante un proceso de elaboración de normas por consenso que ha sido acreditado por el American National Standards Institute (ANSI). La acreditación por parte de ANSI, un organismo de acreditación voluntario que representa a organizaciones de desarrollo de normas de los sectores público y privado en los Estados Unidos y en el extranjero, significa que el proceso de elaboración de normas utilizado por ASCE ha cumplido los requisitos de ANSI en cuanto a apertura, equilibrio, consenso y debido proceso.

El documento compila los lineamientos técnicos relacionados con:

- Planificación y estudios previos, incluyendo los requisitos mínimos de investigación geotécnica y caracterización del terreno.
- Criterios de diseño estructural e hidráulico de las tuberías jacking y sus uniones, considerando cargas de empuje, presiones externas, estabilidad frente a hundimientos y tolerancias geométricas.

- Especificaciones de construcción, que abarcan la configuración de pozos de ataque y recepción, operación del Microtunnel Boring Machine (MTBM), sistemas de guiado, control de presiones en la cámara de excavación, procesos de lubricación y gestión del material excavado.
- Monitoreo, control de ejecución y gestión de riesgos, estableciendo parámetros obligatorios de instrumentación, seguimiento de asentamientos, vigilancia de fuerzas de empuje, y protocolos de actuación ante contingencias geotécnicas o mecánicas.
- Requisitos contractuales y de aseguramiento de calidad, incluyendo documentación técnica, submittals, ensayos y criterios de aceptación.

Presenta un enfoque integral basado en la interacción entre el terreno, la máquina tuneladora y la tubería empujada, reconociendo que el comportamiento geotécnico es un factor determinante en la seguridad y viabilidad de la microtunelación. El estándar establece que la estabilidad del frente de excavación depende de un adecuado control de presiones —especialmente en suelos saturados o de baja cohesión—, lo cual condiciona tanto el tipo de MTBM seleccionado como la estrategia de operación. Asimismo, define los parámetros esenciales para estimar las fuerzas de fricción suelo–tubería y las cargas axiales acumuladas durante el jacking, considerando la influencia de la lubricación y de la rigidez del terreno circundante. El documento aborda también la estabilidad de los pozos de ataque y recepción frente a esfuerzos laterales, subpresiones y posibles fenómenos de sifonamiento, destacando la necesidad de modelar el comportamiento del terreno como un sistema acoplado a la estructura excavada.

El ASCE 36-15 ofrece una caracterización detallada de los distintos sistemas de microtunelación disponibles, con el objetivo de proporcionar criterios técnicos para la selección del método constructivo más adecuado en función de las condiciones geotécnicas y operativas del proyecto. El documento distingue principalmente entre los sistemas de slurry microtunneling, basados en la extracción hidráulica del detritus mediante un circuito presurizado de lodos, y los sistemas de auger microtunneling, que emplean tornillos sinfín para el transporte mecánico del material excavado, cada uno con requisitos específicos de aplicación según el tipo de suelo, la permeabilidad del terreno y el nivel freático. Asimismo, el estándar analiza las configuraciones de los Microtunnel Boring Machines (MTBM), incluyendo aquellas con control activo de presión de cara para mantener la estabilidad del frente, y las tecnologías de guiado disponibles —como sistemas de navegación por láser o instrumentos asistidos electrónicamente— que permiten mantener la alineación y las tolerancias geométricas exigidas. La selección del equipo se plantea como un proceso técnico

fundamentado en parámetros tales como la longitud del tramo, la curvatura admisible del trazado, la sensibilidad del entorno a asentamientos, y las necesidades de precisión, de modo que la norma proporciona un marco racional para elegir la tecnología que garantice la estabilidad del terreno, el control del frente y el cumplimiento geométrico del proyecto.

El documento también dedica una atención significativa a las propiedades, configuraciones y requisitos mecánicos de las tuberías destinadas a ser instaladas mediante jacking, reconociendo que la integridad estructural del sistema depende tanto de la resistencia del material como de la capacidad de las juntas para transmitir cargas axiales y mantener estanqueidad bajo condiciones variables de operación. El documento contempla el uso de diferentes materiales —incluyendo hormigón armado o pretensado, acero, poliéster reforzado con fibra de vidrio (GRP) y cerámica vitrificada— y establece para cada uno de ellos criterios mínimos relativos a resistencia a compresión axial, tolerancias dimensionales, comportamiento frente a cargas externas inducidas por el terreno y el nivel freático, y mecanismos de transmisión de empuje entre tubos consecutivos. Además, la norma resalta la importancia de las juntas herméticas, tanto desde el punto de vista hidráulico como estructural, describiendo configuraciones de anillos metálicos, juntas elásticas y sistemas de sellado capaces de soportar presiones internas y externas sin comprometer la estabilidad. A través de estas directrices, el ASCE 36-15 unifica los criterios para la selección y especificación de tuberías en microtunelación, garantizando que la solución aplicada sea compatible con los esfuerzos generados durante la fase constructiva y que asegure un desempeño duradero de la infraestructura enterrada.

El ASCE 36-15 dedica un apartado fundamental a los modelos de carga y al dimensionamiento de las fuerzas de empuje, elementos críticos en la ingeniería de microtunelación por su influencia en la integridad estructural de la tubería y en la operatividad del MTBM. El estándar define los factores que intervienen en el cálculo de la fuerza de jacking, incorporando la fricción generada en la interfaz tubería–terreno o tubería–lecho de lubricante, el efecto de la longitud total empujada, las características del alineamiento y las propiedades mecánicas de la tubería. Aunque no prescribe fórmulas cerradas, establece qué variables deben considerarse y qué enfoques de modelación son válidos para justificar los esfuerzos máximos admisibles. De igual modo, se abordan los criterios para determinar la necesidad de estaciones de empuje intermedias, especialmente en tramos extensos o con radios de curvatura reducidos, así como los riesgos asociados al pandeo por compresión axial, que deben verificarse mediante métodos de estabilidad estructural acordes al material empleado. También contempla el control y estimación de las presiones de lodo en sistemas

slurry, dado que éstas pueden inducir cargas adicionales sobre la tubería y modificar la configuración tensional del sistema.

### 3.3.2. *ITA-AITES – International Tunnelling and Underground Space Association*

Fundada en 1974 por iniciativa de diecinueve naciones, la Asociación Internacional de Túneles y Espacios Subterráneos (ITA) tiene como misión liderar, defender y facilitar el desarrollo de soluciones sostenibles e innovadoras para un uso mayor, optimizado, seguro y equitativo del espacio subterráneo, permitiendo que la industria de los túneles y sus partes interesadas se destaquen en la entrega de:

- Conocimientos técnicos en el campo de la tunelaría y el espacio subterráneo mediante la publicación de directrices, capacitación y creación de plataformas para el intercambio de información e ideas;
- Mejores prácticas en salud y seguridad, planificación, ingeniería, contratación, construcción, operación y mantenimiento;
- Las herramientas para empoderar a los tomadores de decisiones y profesionales aliados para que puedan tomar decisiones informadas sobre el subsuelo;
- Soluciones subterráneas fiables y económicas para los desafíos urbanísticos y medioambientales;
- Infraestructura subterránea eficiente y resiliente para las generaciones actuales y futuras.

Desde entonces, la ITA ha experimentado un desarrollo considerable. Actualmente, cuenta con 81 Estados Miembros y 300 Miembros Afiliados, ya sean corporativos o individuales.

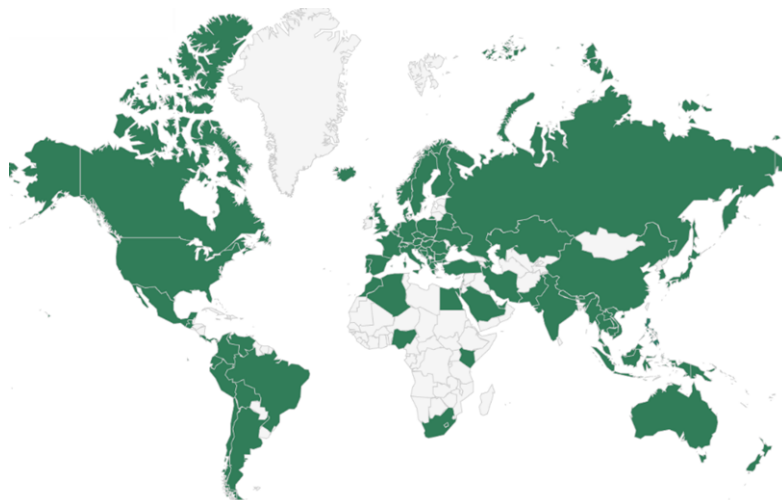


Figura 5. Estados miembros ITA. <https://about.ita-aites.org/members>

Actualmente, cuenta con 119 Miembros Corporativos Afiliados (CAM), 46 Colaboradores (SUP) y 11 Patrocinadores Principales (PS). Tiene 23 grupos de trabajo activos, 4 Comités permanentes y 1 Comité especial de sostenibilidad.



Figura 6. Comités ITA. <https://about.ita-aites.org/wg-committees>

Es importante reseñar que dentro de los 23 grupos de trabajo activo que tiene la organización, el grupo denominado como N°2 presenta una clara orientación hacia la investigación del ámbito de las obras subterráneas.

Dentro de dicha asociación España está representada por AETOS [1975], la cual promueve las relaciones de colaboración entre Profesionales, Empresas, Colegios Profesionales, Universidades y Asociaciones Nacionales e Internacionales con los que se trabaja en la investigación, desarrollo y defensa de la industria de túneles y obras subterráneas.



Figura 7. AETOS <https://aetos.es/>

AETOS tiene establecidos acuerdos de colaboración con organizaciones públicas y privadas interesadas en promover el desarrollo de la industria de túneles y obras subterráneas, con ellas ha puesto en marcha diferentes proyectos de investigación, colaboración o promoción.

A su vez ITA también tiene establecidas relaciones con otras organizaciones internacionales como la Unión Europea o asociaciones como la Asociación Mundial de Carreteras (PIARC), la Sociedad Internacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica (ISSMGE), la Sociedad Internacional de Mecánica de Rocas (ISRM), la Sociedad Internacional de Planificadores Urbanos y Regionales (ISOCARP), la Federación Internacional de Ingenieros Municipales (IFME), el Grupo Internacional de

Seguros de Túneles (ITIG), la Federación Internacional de Carreteras (IRF), la Federación Internacional de Ingenieros Consultores (FIDIC).

### 3.3.3. NASTT – North American Society for Trenchless Technology.

Fundada en 1990, NASTT representa a más de 2,000 miembros en Estados Unidos, Canadá y México, quienes promueven formas mejores y más responsables de gestionar infraestructura subterránea. La misión de NASTT ha sido y es impulsar la tecnología sin zanja, así como promover sus beneficios para el público y el medio ambiente, fomentando la concienciación y el conocimiento mediante la difusión de información técnica, la investigación y el desarrollo, la educación y la capacitación. NASTT busca representar a todos los sectores de la industria de la tecnología sin zanja. Durante más de 30 años, los miembros voluntarios de NASTT han impartido seminarios informativos y capacitaciones no comerciales sobre estos métodos de ingeniería "alternativos verdes" a las comunidades norteamericanas.

### 3.3.4. TTC – Trenchless Technology Center (Louisiana Tech University).

El TTC se fundó como Centro de Excavación sin Zanja en 1989 y se convirtió formalmente en el TTC en noviembre de 1991. El Centro de Tecnología sin Zanja (TTC) de la Universidad Tecnológica de Luisiana es un centro de investigación cooperativa para el ámbito académico, gubernamental e industrial. Su misión es impulsar la tecnología sin zanja, sirviendo como fuente independiente de conocimiento, investigación y formación en este campo. La tecnología sin zanja abarca una amplia gama de métodos utilizados para instalar y rehabilitar sistemas de servicios públicos subterráneos con mínimas perturbaciones y daños en la superficie como resultado de la excavación. El TTC utiliza un triple enfoque para cumplir su misión: investigación y desarrollo, formación y transferencia de tecnología. El TTC ha colaborado con diversas organizaciones en la evaluación y el desarrollo de nuevas tecnologías para la industria.

El Centro Nacional de Investigación de Tecnología sin Zanja constituye un espacio de investigación relevante, cuenta con una grúa puente para realizar experimentos a gran escala. También dispone de una caja de suelo de 6 x 6 metros que permite aplicar cargas horizontales y verticales al suelo y a las estructuras que contiene, así como construir marcos de prueba especialmente diseñados. Esta caja de suelo de esta escala es una de las pocas en Norteamérica y una de las más grandes.

La instalación consta de cuatro secciones de prueba de suelos, cada una de aproximadamente 14,6 m de longitud, que contienen arcilla local, arena, limo y una mezcla de arcilla y grava hasta una profundidad de unos 2 m. La sección de prueba cuenta con un pozo de hincado de 3 x 6 m en un extremo.

### 3.3.5. *IBSTT-Asociación Ibérica de Tecnología sin zanja.*

La IBSTT es la Asociación Ibérica de Tecnología SIN Zanja, es una entidad privada sin ánimo de lucro, creada, con fines técnico-científicos en 1995, legalizada el 29 de abril de 1996 e inscrita en el Registro General de Asociaciones el 8 de julio de 1996, con el fin de desarrollar en España y Portugal los conocimientos y prácticas de la Tecnología Sin Zanja en beneficio de los ciudadanos y el medio ambiente, a semejanza de las 29 sociedades de Tecnología Sin Zanja existentes en el resto de países del mundo. Agrupa 70 empresas y 40 entidades colaboradoras, con el objetivo común de promover y divulgar tecnologías sin apertura de zanja que están destinadas a la localización, inspección, limpieza, mantenimiento, construcción, rehabilitación y renovación de infraestructuras, garantizando la eficiencia, pero también la protección del medio ambiente, la reducción de los impactos a los ciudadanos, así como a otros servicios básicos y a la movilidad.

IBSTT cuenta desde el inicio con el apoyo y respaldo de Entidades Colaboradoras públicas y/o privadas más representativas del país, para el intercambio mutuo de conocimientos y experiencias: Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Universidad Politécnica de Valencia (UPV), ETSIME, COIMCE, ETSII, ETSICCP-UPM, ETSICCP-UPV, Fundación Gómez Pardo, ADEMI, Canal Isabel II, AETOS, Universidad Pontificia Comillas, Universidad de León, AEAS, ASETUB, CITOP, COAM, ASELIME, Madrid Convention Bureau, FMM, ALEOP, REDAC, CLUSTER Mejores Edificios, Alianza FP DUAL.

Igualmente recibe habitualmente la colaboración del CEDEX a través de la Dirección del Laboratorio de Hidráulica CEH-CEDEX

### 3.4. *Criterios de clasificación de las diferentes técnicas de microtunelación.*

Tras revisar en detalle la documentación técnica disponible —incluyendo normas, guías sectoriales, publicaciones académicas y material procedente de asociaciones especializadas en tecnologías sin zanja— se constata que no existe una clasificación unificada, explícita y ampliamente aceptada de las tecnologías de microtunelación. Los distintos organismos y fuentes consultadas abordan la microtunelación desde perspectivas diversas (normativa, operativa, geotécnica o de maquinaria), lo que conduce a descripciones parciales y, en algunos casos, a tipologías superpuestas o ambiguas que dificultan la elaboración de un marco conceptual homogéneo. Esta heterogeneidad documental impide establecer de forma directa una hoja de ruta clara para el análisis del estado del arte, especialmente cuando se pretende comparar métodos, evaluar su aplicabilidad o estudiar su evolución tecnológica.

Ante esta circunstancia, y con el fin de disponer de una base metodológica sólida sobre la que estructurar el presente trabajo, se ha optado por definir una clasificación propia de las tecnologías

de microtunelación, construida a partir de los elementos comunes identificados en la literatura y orientada a facilitar su estudio sistemático. Dicha clasificación se organiza en categorías principales que responden a los principios tecnológicos fundamentales del método, y se complementa con subclasificaciones específicas que permiten diferenciar las variantes operativas y los distintos niveles de control del frente, extracción del material o aplicabilidad geotécnica. Esta estructura pretende proporcionar un marco claro, coherente y funcional, que permita exponer de manera rigurosa el estado actual de la microtunelación y sirva de soporte para los análisis desarrollados en capítulos posteriores.

#### **3.4.1. *Clasificación según el tipo de frente y sistema de control de presión.***

La estabilidad del frente de las tuneladoras de microtunelaje es un aspecto importante para la ejecución segura y controlada de proyectos (Broere, 2014), debido a que condiciona tanto la seguridad geotécnica como el rendimiento operativo del método. Desde un punto de vista técnico, el frente de excavación es la superficie activa donde se equilibran las presiones del terreno y del agua subterránea frente a la capacidad del sistema excavador para transmitir esfuerzos y mantener un confinamiento adecuado, el componente de la tensión horizontal efectiva que debe contrarrestarse es menor que la tradicional presión efectiva de tierra activa (en condiciones de deformación plana), derivada por Rankine (1857) (Broere, 2014). La falta de control en esta zona puede generar pérdida de terreno, asentamientos en superficie, influjos de agua, bloqueos de la máquina o incluso inestabilidad global del túnel en avance, lo que convierte al frente en el elemento más determinante para evaluar la aplicabilidad de una tecnología de microtunelación en distintos contextos geotécnicos. La presión de sostenimiento requerida debe calcularse para un proyecto específico, teniendo en cuenta las dimensiones, las condiciones locales del suelo y la estratigrafía, más que estimarse basándose en valores tabulados para casos simplificados.(Broere, 2014)

En este sentido, cada tecnología de microtunelación incorpora mecanismos específicos para soportar, equilibrar o estabilizar el frente. Estos mecanismos no solo definen el comportamiento de la máquina, sino que determinan directamente su campo de aplicabilidad, ya que la capacidad para controlar la presión en el frente condiciona la posibilidad de trabajar en suelos no cohesivos, en presencia de nivel freático, en formaciones heterogéneas o bajo infraestructuras sensibles.

Por ello, la estabilidad del frente no puede considerarse un parámetro operativo secundario, sino un criterio estructurante para clasificar las tecnologías de microtunelación desde un punto de vista técnico. Este enfoque permite distinguir de forma clara entre métodos que dependen de un soporte hidráulico presurizado, aquellos que emplean soporte mecánico basado en equilibrio de presiones,

y los que operan con frente abierto sin presurización activa, proporcionando un marco clasificatorio coherente con la lógica geotécnica que gobierna el comportamiento del proceso.

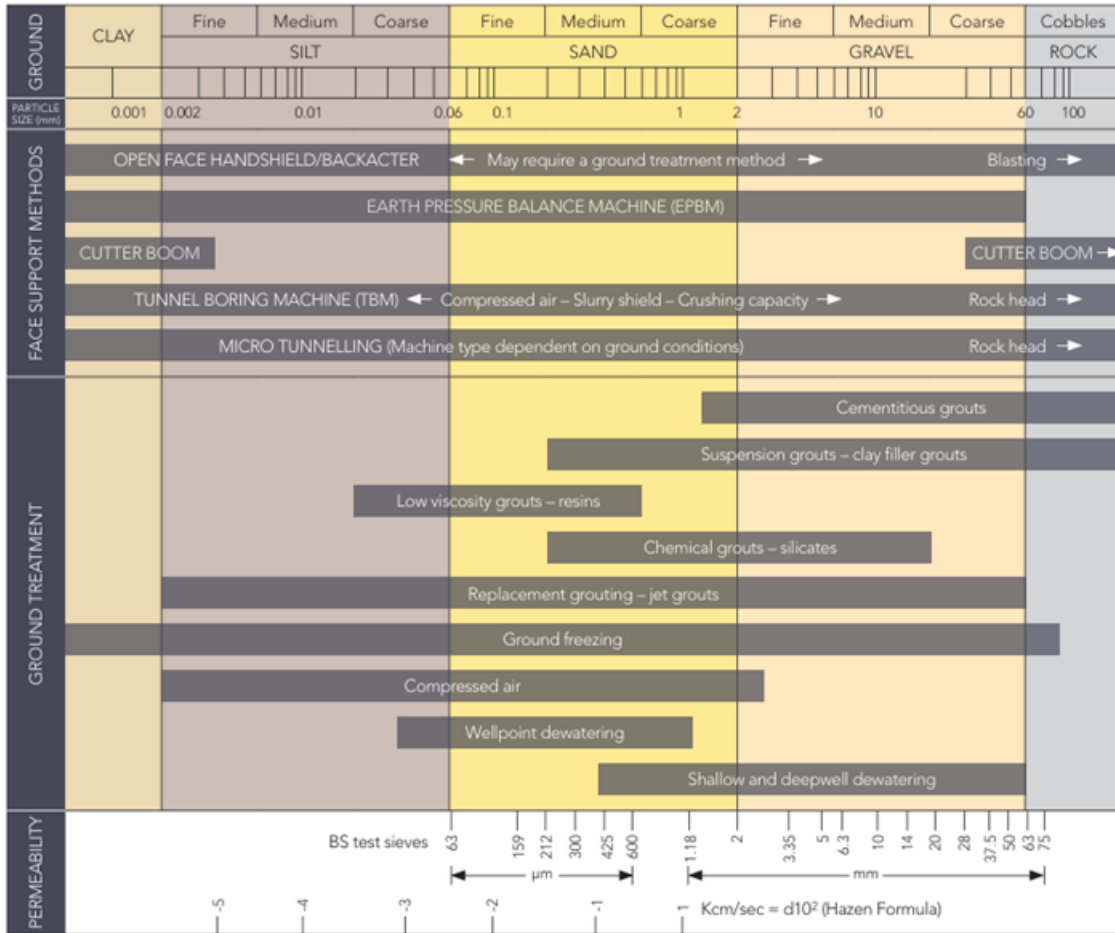


Figura 8. Métodos de sostenimiento del frente y de tratamiento del terreno para diversas condiciones del suelo. Pipe Jacking Association. 2017.

### 3.4.1.1. Frente no presurizado. Escudos abiertos.

La microtunelación con frente no presurizado, ejecutada mediante escudos abiertos, constituye la variante más simple desde el punto de vista del control de presiones en la excavación, la excavación manual en frente abierto es uno de los métodos más antiguos de microtunelado (Marzouk et al., 2010). En este tipo de sistemas, el frente se mantiene expuesto sin aplicar una presión artificial de soporte, de modo que la estabilidad depende exclusivamente de la competencia geotécnica del terreno. Por ello, su utilización se limita a suelos o formaciones capaces de mantener su integridad sin riesgo significativo de desprendimientos, colapsos o infiltraciones de agua, como pueden ser determinadas rocas blandas competentes, suelos muy cohesivos o estratos con comportamiento autoportante. El propósito del escudo es proporcionar un entorno de trabajo seguro para los operarios y permitir que la excavación se mantenga abierta para que la tubería pueda ser empujada (*jacked*) a su posición. (Marzouk et al., 2010)

Desde el punto de vista constructivo, el escudo abierto incorpora una cabeza de corte accesible desde la cámara de excavación, el diámetro accesible se define como el diámetro mínimo que permite a un trabajador ingresar y excavar el frente del túnel (aproximadamente 1.3 m)(Marzouk et al., 2010), sin separación total entre el frente y el interior del escudo. Este método permite visibilidad directa del frente de excavación, lo que facilita la toma de decisiones técnicas en campo. La extracción del material se realiza normalmente mediante sistemas mecánicos —como tornillo sinfín, cuchara o cargadores integrados— sin necesidad de lodos presurizados ni cámaras de equilibrio. Esta técnica requiere de un guiado preciso, dado que la máquina avanza mediante el empuje de la tubería y debe seguir un alineamiento rígido con tolerancias estrictas. Los escudos suelen ser articulados, lo que permite cierto grado de control de alineación y pendiente(Marzouk et al., 2010). En este tipo de configuración, los sistemas de guiado utilizados son similares a los empleados en métodos de frente cerrado, pero con particularidades derivadas de la mayor exposición del frente y de la variabilidad geotécnica del entorno. Esta configuración implica que, a diferencia de los sistemas de frente cerrado, no existe un mecanismo activo de control de la presión del terreno o del agua subterránea, lo que restringe de forma drástica su aplicabilidad en suelos no cohesivos, medios saturados o entornos sensibles a asentamientos.

La microtunelación de frente abierto mantiene relevancia en determinados contextos por su simplicidad operativa, reducidos requerimientos de equipamiento y eficiencia en situaciones donde la geología permite la excavación sin confinamiento. Su inclusión dentro de la presente clasificación responde a que constituye una familia tecnológica diferenciada, cuyo comportamiento geotécnico, riesgos asociados y campo de aplicación difieren de manera sustancial de los sistemas con frente presurizado. Dentro del conjunto de tecnologías de microtunelación, la variante basada en escudos abiertos o frentes no presurizados presenta una menor consistencia en cuanto a literatura técnica especializada en comparación con los sistemas de frente. Esta escasez de documentación no responde únicamente a una falta de estudio, sino que refleja la limitada aplicabilidad práctica de esta técnica, fuertemente condicionada por la competencia geotécnica del terreno. La técnica de escudo abierto debe considerarse, desde una perspectiva ingenieril, como una opción menos frecuente o de carácter tradicional, adecuada únicamente cuando concurren condiciones muy específicas: baja permeabilidad, ausencia de nivel freático (Marzouk et al., 2010), elevada cohesión o presencia de formaciones rocosas competentes. Por ello, su análisis en el marco del estado del arte requiere situarla como método no mayoritario, empleado en escenarios donde el riesgo geotécnico es reducido y donde no es necesario —ni eficiente— incorporar sistemas complejos de soporte del frente.



Figura 9. Ejemplo de escudo abierto. Pipe Jacking Association.2017.

#### 3.4.1.1.1. Cabecal abierto. Open Face.

Dentro de la familia de técnicas de microtúnelación con escudo abierto, en función de la resistencia del macizo, la heterogeneidad de los estratos y el rendimiento requerido, los escudos abiertos integran diferentes mecanismos de corte y extracción, que van desde cabezales simples para suelos muy estables hasta configuraciones más avanzadas con picos, cortadores, brazos excavadores o barredoras mecánicas. La diversidad de estos sistemas refleja la necesidad de adaptar la excavación a las características geotécnicas del entorno.

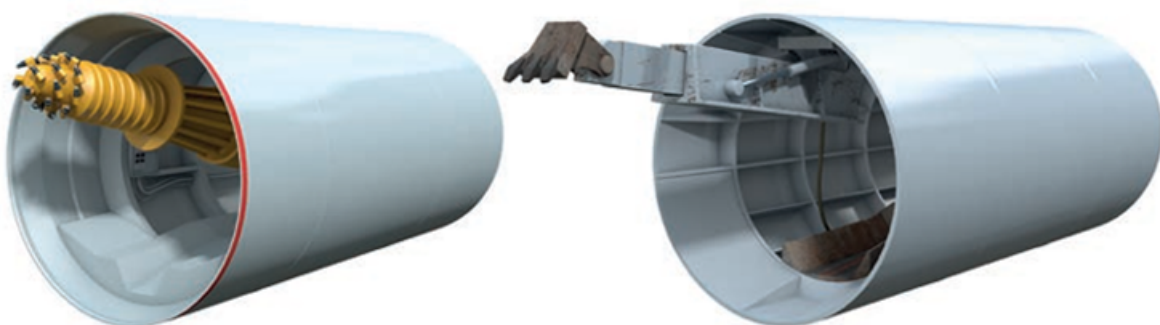


Figura 10. Mecanismos de corte en escudos abiertos. Rozadera y retroexcavadora mecánica. Pipe Jacking Association.2017.

### 3.4.1.1.1. Cabezal abierto con retroexcavadora.

El cabezal abierto con retroexcavadora constituye una solución de excavación empleada en microtunelación para aquellos frentes donde el terreno presenta una elevada capacidad autoportante, permitiendo trabajar sin soporte frontal ni presurización. Este sistema integra un brazo mecánico articulado, similar al de una retroexcavadora de pequeño tamaño, instalado en el interior del escudo y orientado hacia el frente de excavación. El operario controla el brazo desde una cabina protegida dentro del escudo, permitiendo realizar cortes, arranques y desmote del material de forma precisa.



Figura 11. Obra ADIF Cieza. Fuente propia 2021.

El brazo de retroexcavadora incorpora habitualmente:

- 1.- Cazo o cucharón, para desmote general de materiales competentes.



Figura 13. Escudo abierto. Brazo con cazo. Fuente propia.2021.



Figura 12. Frente de material estable. Fuente propia. 2021

- 2.-Martillo rompedor hidráulico, cuando el frente presenta inclusiones duras, bloques cementados o roca blanda.
- 3.-Ripper o diente de ataque, útil para arcillas muy densas o suelos cohesionados de alta rigidez.

El movimiento articulado del brazo permite modelar progresivamente el frente, seleccionando zonas de ataque y controlando el desprendimiento del terreno. El cabezal con retroexcavadora ofrece una alta flexibilidad para adaptarse a heterogeneidades del terreno, capacidad para tratar bloques sueltos o zonas con resistencia variable y un mayor control manual en escenarios geotécnicamente favorables. Es una técnica menos automatizada y dependiente de la experiencia del operador.

<https://www.youtube.com/watch?v=FDJaofMBdno>

### 3.4.1.1.1.2. Cabezal abierto con pico/cortadores Roc Head.

El cabezal abierto con picos o cortadores, habitualmente denominado Rock Head, constituye una variante de frente abierto diseñada para trabajar en formaciones de mayor resistencia, tales como roca blanda, semiroca o suelos altamente competentes. A diferencia del cabezal abierto simple, este sistema incorpora herramientas de ataque



Figura 14. Escudo abierto con cabezal tipo rozadera. Eurohinca.

directo —picas, cortadores radiales, discos de corte de pequeño diámetro u otros elementos abrasivos— que permiten fracturar y desagregar el terreno antes de su extracción.

El empleo de cabezales tipo Rock Head mejora notablemente el rendimiento de la excavación en estratos competentes, permitiendo avances controlados y reduciendo el desgaste del equipamiento. Esta herramienta resulta especialmente adecuada para microtunelaciones de trazados cortos o medianos, donde la presencia de materiales firmes hace innecesario un escudo cerrado y permite aprovechar la simplicidad operativa del frente abierto sin comprometer la seguridad. Su uso, no obstante, exige una evaluación geotécnica detallada, ya que la ausencia de soporte frontal lo descarta en suelos no cohesivos, estratos heterogéneos, medios saturados o áreas sensibles a asentamientos.

Los mecanismos de corte pueden ser: elementos de ataque puntual, lineal y rotacional. Su función es desagregar el macizo rocoso o semirrocoso de forma controlada, garantizando que los fragmentos resultantes sean manejables para los sistemas de extracción posteriores.

1.-Picas: Son herramientas de ataque puntual fabricadas en aleaciones de alta resistencia. Están diseñadas para producir microfracturas locales mediante impactos o presión concentrada.

2.- Rippers: Actúan siguiendo trayectorias circulares al girar la cabeza. Son útiles en estratos laminados o fisurados. Se combinan con picas para evitar la acumulación de material arrancado en el frente.

3.- Discos de corte: Algunos cabezales Rock Head incluyen discos de corte similares a los utilizados en TBM de roca, aunque de tamaño reducido. Los discos generan tensiones de compresión tangencial que inducen fracturas en la roca. Permiten trabajar en materiales más abrasivos o semirrocosos que estarían fuera del rango de eficacia de las picas tradicionales.

### 3.4.1.1.1.3. Cabezal abierto con barredora mecánica-Auger Head/ Bucket Wheel.

El cabezal abierto con barredora mecánica ya sea en configuración Auger Head (tornillo sinfín frontal) o Bucket Wheel (rueda de cangilones), tienen por objeto aumentar la capacidad de arranque y la eficiencia en la extracción del material excavado. Se trata de un equipo mecanizado que actúa directamente sobre el frente expuesto, fragmentando el terreno y trasladando los detritos hacia el interior del escudo sin necesidad de presurización. Su función principal es proporcionar un corte continuo y estable en suelos competentes donde la autoestabilidad del frente permite trabajar sin soporte frontal.

El sistema Auger Head incorpora un sinfín rotativo situado en el propio cabezal.



Figura 16. Auger Head. Fuente propia.2025.



Figura 15. Cabezal y frente de ataque. Fuente propia.2025.



Figura 17. Tornillo sin fin. Fuente propia. 2025.

Este sinfín cumple simultáneamente la función de desgajar el terreno y transportar el material excavado hacia la parte posterior del escudo. La acción helicoidal facilita un flujo constante de detritos, lo que mejora la continuidad del avance frente a métodos manuales o semimecanizados. Resulta adecuado para suelos cohesivos densos, arcillas compactas y materiales estables de dureza moderada, donde no existe riesgo significativo de inestabilidad frontal.

La variante Bucket Wheel utiliza una rueda provista de cucharas o cangilones, que realiza un arranque mecánico progresivo mediante un movimiento rotativo. Los cangilones capturan el material en el frente y lo descargan en el interior del escudo, donde otros sistemas (sinfín posterior, cinta o transporte mecánico) lo evacúan hacia el pozo de ataque. Este sistema permite trabajar con

un alto rendimiento en suelos competentes, especialmente en materiales fragmentables o rocas blandas. Su ventaja principal radica en su capacidad para generar una excavación uniforme, reduciendo vibraciones y mejorando el control del avance.

El cabezal con barredora mecánica aporta una mayor capacidad de producción respecto a los cabezales abiertos simples o a los sistemas semimanuales, manteniendo la simplicidad estructural de los métodos sin soporte frontal. Representa una solución intermedia entre la excavación manual/semimecanizada y los sistemas completamente presurizados, adecuada cuando se requiere incrementar el rendimiento sin comprometer la estabilidad natural del terreno.

#### *3.4.1.1.2. Open Face apoyado por técnicas auxiliares de geotecnia.*

La excavación en frente abierto (Open Face) solo es viable de forma segura cuando el terreno presenta una capacidad autoportante suficiente. Sin embargo, en numerosas situaciones la geotecnia del entorno no garantiza dicha estabilidad de manera natural, ya sea por la presencia de suelos sueltos, materiales granulares no cohesivos, nivel freático elevado o condiciones que puedan inducir pérdida de terreno. Para hacer posible la excavación sin presurización del frente en estos casos, es habitual recurrir a medios auxiliares de mejora o estabilización del terreno, cuya finalidad es incrementar la resistencia y rigidez del macizo, reducir su permeabilidad, o controlar el agua subterránea, de modo que el frente pueda excavar con un escudo abierto sin comprometer la seguridad.

La posibilidad de emplear técnicas auxiliares de estabilización del terreno —como inyecciones previas, drenaje o incluso congelación— está estrechamente vinculada al diámetro de la perforación y a la capacidad autoportante del terreno. En diámetros pequeños, por debajo de 600–800 mm, la ejecución de estas técnicas en frente abierto resulta prácticamente inviable, ya que la ausencia de presurización incrementa de forma crítica el riesgo de colapso del frente y limita la capacidad operativa de los equipos de excavación. A partir de diámetros de 800 mm, y especialmente en el rango comprendido entre 800 y 1600 mm, el uso de medios auxiliares puede considerarse una solución técnica válida para mejorar localmente el terreno y permitir el empleo de un escudo abierto en condiciones marginales de estabilidad. Sin embargo, es en diámetros superiores a 1600 mm, típicos de microtunelación de gran sección, donde estas técnicas adquieren su mayor eficacia y aplicabilidad, ya que el incremento del área del frente implica mayores exigencias geotécnicas y la excavación Open Face requiere un soporte adicional para garantizar la estabilidad.

Estos métodos auxiliares permiten ampliar de forma significativa el campo de aplicación de los sistemas Open Face, constituyendo soluciones de carácter previo o complementario a la excavación.

#### **3.4.1.1.2.1. Inyecciones previas. Jet Grouting, compaction Grouting.**

Las técnicas de inyección previa son utilizadas para mejorar las condiciones del terreno antes de la excavación en frente abierto. Existen dos enfoques principales:

**Jet Grouting:** Consiste en la inyección de lechadas de cemento a alta presión que destruyen y mezclan el suelo in situ, formando columnas o paneles de suelo-cemento de elevada resistencia y muy baja permeabilidad. Aporta estabilidad estructural al frente, minimiza la posibilidad de pérdida de terreno, y permite controlar la infiltración de agua.

**Compaction Grouting:** En este caso se inyecta una mezcla densa, de baja movilidad, que desplaza y compacta el terreno circundante. Incrementa la densidad y rigidez del suelo, reduce su deformabilidad, y mejora su comportamiento como material autoportante.

#### **3.4.1.1.2.2. Congelación del terreno.**

La congelación artificial del terreno es un método de consolidación temporal que consiste en crear un macizo congelado alrededor del frente o del alineamiento de excavación, reduciendo drásticamente la permeabilidad y multiplicando la resistencia del suelo.

Se realiza mediante la circulación de salmuera refrigerada o nitrógeno líquido en tubos instalados alrededor del frente. El suelo congelado actúa como un material monolítico y estable, con una resistencia similar a la de una roca blanda competente. Además, permite trabajar en presencia de nivel freático elevado sin el riesgo de inundación del escudo. Esta técnica, presenta un coste elevado de implantación, así como de consumo energético para su aplicación, ofrece un nivel de seguridad muy elevado en contextos donde la excavación en frente abierto sería inviable sin confinamiento artificial.

#### **3.4.1.1.2.3. Drenaje o depresiones del nivel freático.**

El control del agua subterránea es fundamental cuando se pretende excavar con un escudo abierto en terrenos que no son completamente secos. Las técnicas de drenaje o depresión del nivel freático buscan reducir la presión hidrostática y evitar la entrada de agua al frente durante la excavación.

Las soluciones más comunes suelen ser el uso de pozos de bombeo y abatimiento del nivel freático, drenes subhorizontales, Sistemas de wellpoint, así como drenaje profundo con bombas sumergibles. Reducir el nivel freático mejora la estabilidad del frente, incrementa la resistencia efectiva del terreno y evita fenómenos como sifonamiento, licuación parcial o afluencias de agua que podrían comprometer la seguridad del proceso.

El uso de medios auxiliares de estabilización o control del terreno constituye una herramienta clave para ampliar el rango de aplicabilidad de las técnicas Open Face. Estas intervenciones permiten transformar condiciones que serían incompatibles con un frente no presurizado en escenarios geotécnicamente aceptables, garantizando la seguridad de la excavación y la integridad.

#### **3.4.1.1.3. Extracción mecánica del material del frente de excavación**

En los sistemas de microtunelación con frente no presurizado y escudos abiertos, la extracción mecánica del material del frente de excavación se realiza sin la aplicación de una presión de sostenimiento activa, por lo que la estabilidad del frente depende fundamentalmente de las propiedades resistentes del terreno, del recubrimiento existente y del control del proceso de excavación.

El material excavado cae por gravedad o es conducido mecánicamente hacia el interior del escudo, donde es recogido mediante sistemas simples de evacuación, como cintas transportadoras o vagonetas, según la configuración de la instalación. El ritmo de extracción debe mantenerse equilibrado con el avance del escudo, de modo que el volumen de terreno retirado sea coherente con el espacio excavado, minimizando así la pérdida de confinamiento en el frente.

##### **3.4.1.1.3.1. Cintas o sistemas posteriores.**

El sistema más habitual es el empleo de cintas transportadoras, dispuestas longitudinalmente a lo largo del microtúnel. Estas cintas recogen el material excavado una vez que ha sido arrancado del frente y depositado en el interior del escudo, garantizando una evacuación continua que acompaña al avance de la máquina. Su diseño debe adaptarse a las dimensiones del túnel, al caudal previsto de material y a la granulometría del terreno excavado.

En tramos de longitud reducida o en configuraciones de obra específicas, la extracción puede realizarse mediante vagonetas o tolvas móviles, especialmente en microtunelaciones de pequeño diámetro o con ritmos de avance moderados. Estos sistemas, aunque más simples desde el punto de vista mecánico, requieren una coordinación precisa con el avance del escudo para evitar acumulaciones de material en el interior del túnel.

La capacidad de las vagonetas está condicionada por el diámetro del túnel y el gálibo disponible, siendo habituales volúmenes unitarios comprendidos entre aproximadamente 0,3 y 1,5 m<sup>3</sup>, con cargas útiles que pueden variar entre 0,5 y 3 toneladas en función de la densidad del material excavado. En diámetros mayores puede optarse por trenes de varias vagonetas acopladas con el fin de aumentar el volumen transportado por ciclo.

En terrenos heterogéneos o con presencia de bloques y gravas gruesas, el sistema de extracción debe contemplar dispositivos de protección frente a atascos, así como elementos de guiado que aseguren el correcto funcionamiento de la cinta. Asimismo, la evacuación del material en el pozo de ataque debe integrarse en la logística general de la obra, evitando cuellos de botella que condicionen el avance del microtúnel.

La productividad de estos sistemas depende no solo de la capacidad individual de cada vagoneta, sino del tiempo total necesario para completar el ciclo de carga, transporte, descarga y retorno al frente de excavación.

La extracción del material se realiza de manera cíclica.

### 3.4.1.2. Frente presurizado. Escudo cerrado.

Constituye la solución más avanzada y segura para la excavación mecanizada en terrenos donde la estabilidad del frente no puede garantizarse de forma natural. Existe una clara dominancia de las obras realizadas con máquinas de escudo cerrado. Se podría decir que más de un 75 % de las hincas se hacen mediante estos equipos, fundamentalmente debido a la versatilidad de estas máquinas, ya que permiten una mayor “adaptación” del sistema de excavación en terrenos que no son los propiamente adecuados para este equipo. (Hoyo Rodríguez & Romana, 2015).

En este tipo de sistemas, el cabezal excavador se encuentra confinado dentro de una cámara cerrada, diseñada para aplicar una presión controlada que equilibre los esfuerzos del terreno y el nivel freático, evitando fenómenos de sifonamiento, pérdida de material o colapso del frente. La presurización se consigue mediante distintos mecanismos según la tecnología utilizada, fundamentalmente sistemas slurry o Earth Pressure Balance (EPB).

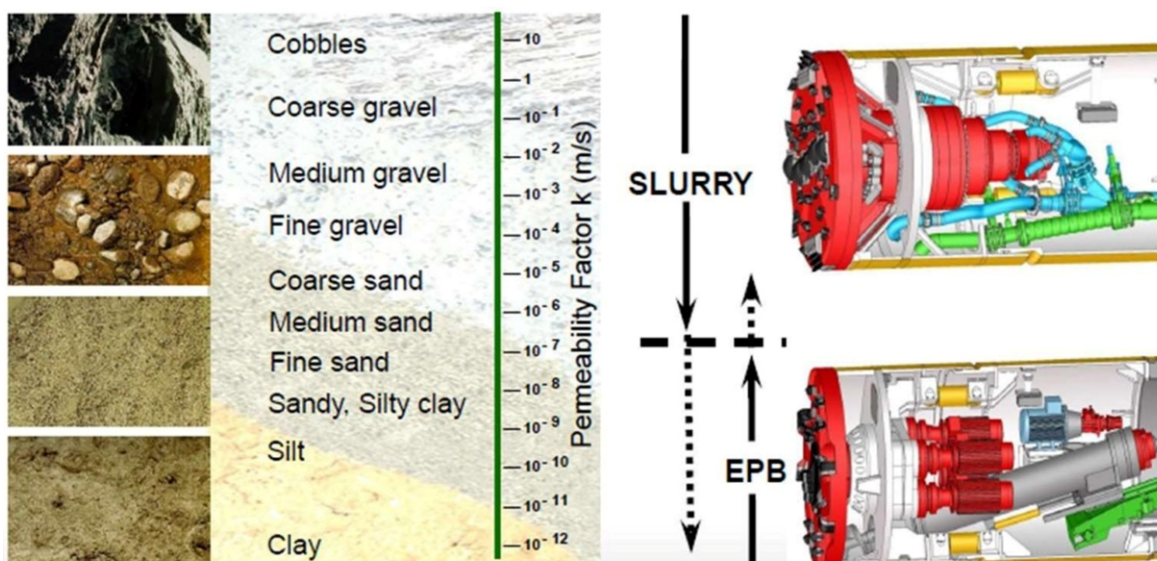


Figura 18. Selección tecnología en base al terreno. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.

pero en todos los casos la función esencial es controlar el equilibrio de presiones en el frente, manteniendo las condiciones de estabilidad durante todo el avance.

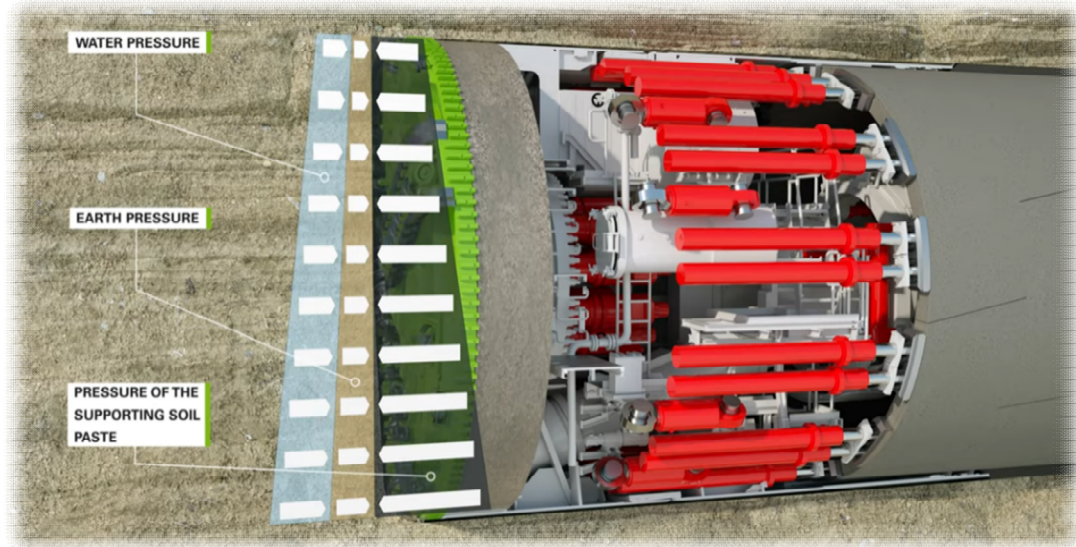


Figura 19. Compensación de fuerzas con frente presurizado. Herrenknecht 2025.

La fuerza de presión en el frente está constituida por las presiones del terreno y del fluido que actúan sobre el frente de la máquina. En general, la experiencia de campo muestra que las fuerzas de presión en el frente representan un porcentaje muy bajo de la fuerza total de empuje. (Namli & Guler, 2017).

El grado en que se generan las presiones intersticiales frente a la TBM depende de la permeabilidad del suelo, la distribución granulométrica, las propiedades del lodo y la velocidad de rotación de la rueda cortadora, entre otros factores. En suelos finos e impermeables, la infiltración será prácticamente nula. En suelos altamente permeables y de granulometría gruesa, la presión intersticial excesiva se disipará tan rápidamente que no tendrá efecto. Sin embargo, en suelos de granulometría media fina, especialmente arenas finas, pueden desarrollarse presiones intersticiales excesivas. Estas reducirán la efectividad de la presión de sostenimiento, ya que disminuye la diferencia entre la presión de sostenimiento y la presión intersticial real; además, reducirán la estabilidad de la cuña de suelo, pues las tensiones efectivas bajan debido a la presión intersticial excesiva y, como resultado, disminuye la fricción entre la cuña de falla y el suelo circundante. Ambos efectos requieren una mayor presión de sostenimiento para estabilizar el frente. (Broere, 2014)

No obstante, estas fuerzas no son las únicas que se oponen al avance, sino que existen otras incluso con más peso como son las fuerzas de fricción entre la tubería y el terreno. Las fuerzas de fricción que actúan sobre la máquina de hincado de tuberías y la conducción han sido mucho menos comprendidas que las fuerzas de presión en el frente, aunque existe un consenso general en que el

componente friccional de las fuerzas de empuje debe seguir la formulación general de la fricción.(Namli & Guler, 2017).

El escudo cerrado permite trabajar en suelos no cohesivos, arenas saturadas, limos, rellenos heterogéneos y terrenos con presencia significativa de agua, donde los métodos de frente abierto resultarían inseguros o técnicamente inviables.



Figura 20. Tipos de escudo cerrado. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.

Al mantener el frente presurizado, se garantiza la contención del terreno excavado, se minimizan los movimientos inducidos en superficie y se controla de forma continua la interacción entre el MTBM y el macizo.

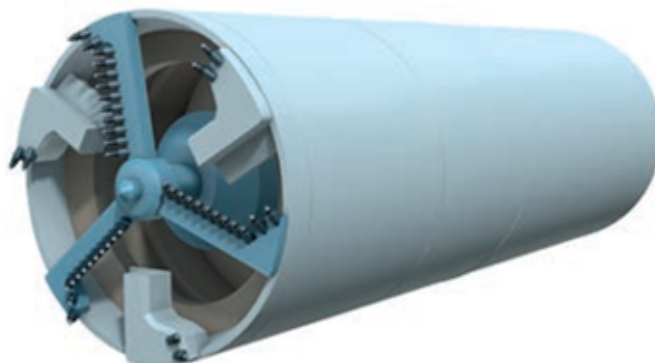


Figura 21. Escudos cerrados. MTB. Pipe Jacking Association.2017.

Este elevado nivel de control hace que los sistemas de frente cerrado representen la tecnología predominante en la microtunelación moderna, especialmente en ciudades altamente pobladas, con infraestructuras densas y tráfico intenso, las obras pueden ejecutarse mediante este método sin generar perturbaciones significativas (Namli & Guler, 2017).

Desde un punto de vista operativo, los escudos cerrados integran sistemas de monitoreo y regulación de presión, curvas de caudal, sensores de densidad y control de par de corte, que permiten ajustar en tiempo real los parámetros de excavación y asegurar la estabilidad del terreno. Estas características no solo permiten excavar en condiciones adversas, sino que proporcionan una trazabilidad completa del comportamiento del frente, convirtiendo la microtunelación presurizada en un método altamente fiable y con un desempeño predecible.

### 3.4.1.2.1. Sistema Slurry. Balance hidráulico.

El sistema Slurry, basado en el balance hidráulico del frente, es una de las tecnologías más extendidas y consolidadas dentro de la microtunelación con escudo cerrado. Su principio fundamental consiste en estabilizar el frente de excavación mediante la aplicación de una presión hidráulica controlada, así como una mejora de en la fricción entre la tubería empujada y el terreno, ejercida por una suspensión de lodos, generalmente a base de bentonita o polímeros.

#### Arcillas

SEPIOLITA



BENTONITA



ATAPULGITA



#### Polímeros

ACRILICOS



CELULÓSICOS



GOMAS



Figura 22.XI Suspensión de Lodos. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.

Estas suspensiones permiten, facilitan y aceleran los trabajos de perforación en el terreno mediante sus principales propiedades.

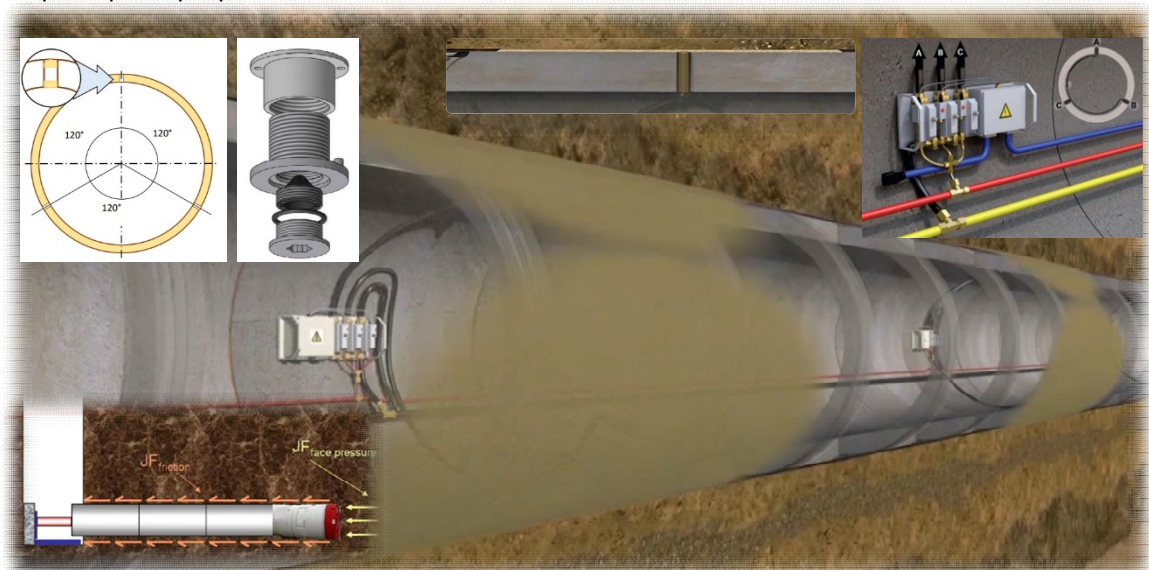


Figura 23. Aplicación de Slurry para mejora de fricción entre tubería y terreno. Herrenknecht 2025.

Las fuerzas de fricción que actúan sobre la máquina de hincado de tuberías y la tubería instalada han sido mucho menos estudiadas que las fuerzas de presión en el frente, aunque existe un acuerdo general en que el componente friccional de las fuerzas debe seguir la ecuación general de fricción. (Namli & Guler, 2017).

Las características estructurales de los fluidos nos permiten considerar 3 propiedades importantes:

1.-Capacidad de hinchamiento: En presencia de agua, los cationes interlaminares, como el sodio  $Na^+$ , se hidratan al combinarse con las moléculas de agua  $OH^-$ . Esto crea un fuerte proceso de absorción de agua y separación de las plaquetas de bentonita. Cuanto mayor es el nivel de sodio, mayor es el proceso de hinchamiento.

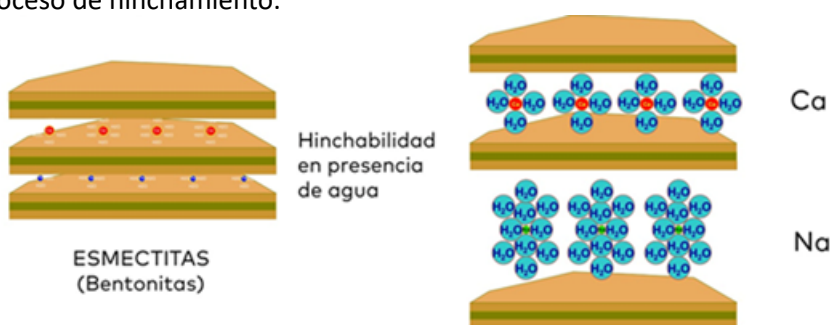


Figura 24. Hinchamiento de lodos. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.

2.-Estructura y viscosidad de gel: Los cationes de sodio y calcio en las caras de las partículas de arcilla

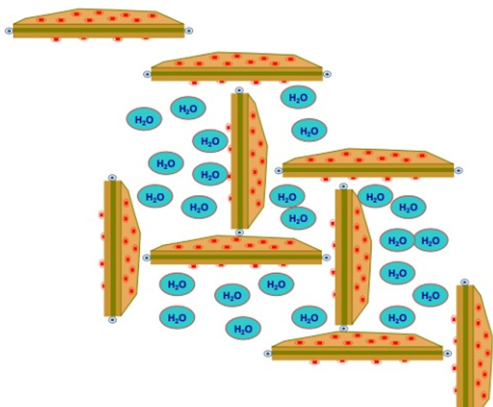


Figura 25. Viscosidad de Lodos. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.

son clave para las propiedades y el rendimiento ya que, en presencia de agua, se hidratan fuertemente. Esto separa las plaquetas permitiendo que las cargas positivas atraigan la carga negativa en la superficie de las partículas individuales. Esto crea una estructura tridimensional que retiene el agua (aumentando la viscosidad) y reteniendo otras partículas en el sistema (mejorando el comportamiento de arrastre de partículas).

3.-Tixotropía: La mezcla de un % de bentonita en polvo del 3% o más en agua, genera suspensiones de consistencia similar a un gel que cuando se agita es fluido, pero que vuelve a la forma de gel si se deja reposar.

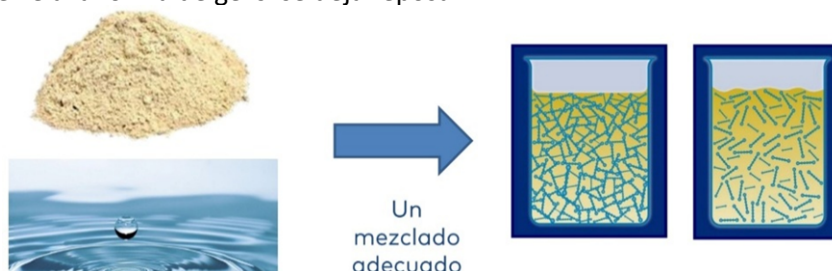


Figura 26. Tixotropía de lodos. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.

Este fenómeno es conocido como tixotropía, y es la propiedad que hace que las suspensiones de bentonita-agua sean adecuadas para aplicaciones de ingeniería civil, lo que permite el bombeo manteniendo las características de la suspensión.

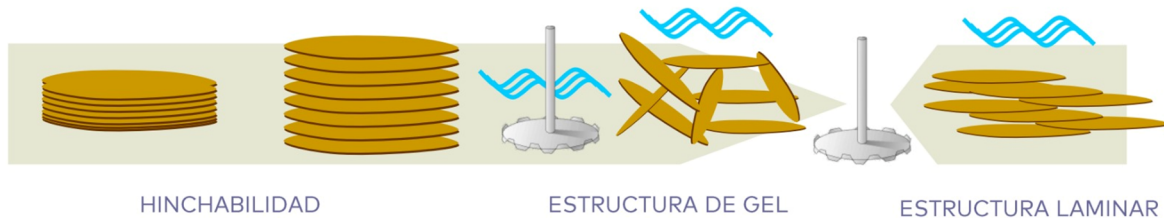


Figura 27. Características estructurales lodos. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.

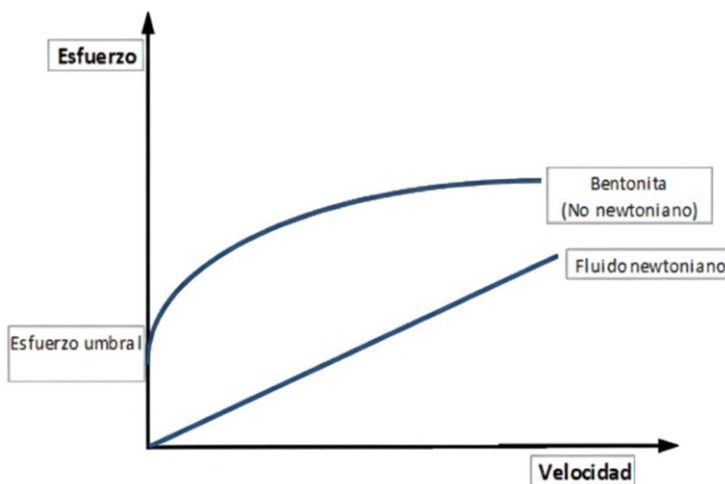
El uso de suspensiones de bentonita como lubricante en hincado de tuberías es hoy práctica habitual. La lubricación solo puede funcionar eficazmente si se mantiene una capa discreta del lubricante entre las superficies deslizantes de la tubería y el terreno excavado. Si el terreno colapsa sobre la tubería, la efectividad de la lubricación se reduce en gran medida. Por lo tanto, la función más importante de las suspensiones de bentonita, o de cualquier lubricante, es proporcionar una presión interna suficiente para estabilizar el contorno del túnel.(Namli & Guler, 2017).

En la actualidad existen tres tipos de inyección de bentonita: la primera es la inyección controlada, que utiliza una cantidad limitada de bentonita sin presión continua. La inyección controlada se refiere al uso de volúmenes reducidos de lubricante a lo largo de las operaciones de tunelación, a menudo desde un único puerto de lubricación, que sirve para mantener las fuerzas de empuje dentro de un rango bajo. El segundo tipo de inyección es la aplicación masiva, que utiliza una gran cantidad de bentonita. La aplicación masiva de lubricación se refiere a la situación en la cual se permite que las fuerzas de empuje aumenten sin usar lubricación y, posteriormente, se aplica la lubricación en grandes volúmenes a lo largo de toda la línea de tuberías en zonas que ya habían sido excavadas. Durante la lubricación por aplicación masiva, la bentonita se bombea desde numerosos puertos alimentados por una misma bomba, de manera simultánea y bajo la misma presión, y los volúmenes bombeados suelen exceder ampliamente el volumen del espacio anular. El tercer método es la lubricación automática con bentonita, que mantiene constante la presión de la bentonita inyectada sin considerar la cantidad de bentonita. El sistema automático de inyección de bentonita es totalmente programable, permitiendo al operador inyectar una cantidad predeterminada de bentonita en todas o en zonas específicas del vacío, sin necesidad de que una persona ingrese al túnel. Una unidad de controlador lógico programable (PLC) se conecta a varias estaciones de inyección ubicadas a lo largo de la línea de bentonita dentro del túnel; estas estaciones de inyección se instalan normalmente cada 15 m.(Namli & Guler, 2017).

En microtunelación, la elección del lodo lubricante depende tanto de la geología como de la química del agua subterránea. La bentonita es el lodo más habitual y resulta adecuada en condiciones estándar, especialmente en suelos finos a medios (limos, arenas finas y arcillas) y en tramos de empuje largos, ya que forma una película viscosa continua que reduce significativamente la fricción entre la tubería y el terreno. Sin embargo, cuando el suelo es muy arenoso o altamente permeable, o cuando se requiere una mayor fluidez y rapidez de bombeo, es preferible emplear polímeros, que actúan como acondicionadores reológicos sin generar espesamientos excesivos. Finalmente, en entornos con agua salada o salobre, como cruces marinos, zonas costeras o acuíferos con intrusión marina, la bentonita pierde sus propiedades por defloculación; en estos casos se debe sustituir por sepiolita, que mantiene estabilidad y capacidad lubricante aun en presencia de cloruros.

En el análisis reológico de lodos para microtunelación, los reogramas constituyen la herramienta principal para describir cómo se comporta el fluido. Cada tipo de lodo —bentonita, polímeros y sepiolita— presenta una curva característica que determina su capacidad de lubricar, transportar material o sostener el frente. En términos reológicos, interesa especialmente el esfuerzo umbral o yield point (Indicador de la capacidad dinámica de sustentación), es decir, la tensión mínima que debe aplicarse para iniciar el movimiento del fluido; cuanto mayor sea este valor, más capaz es el lodo de mantener sólidos en suspensión y de crear una barrera que establezca el contacto suelo-tubería.

Figura 28. Grafico de reograma de la bentonita. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.



La bentonita presenta típicamente un comportamiento de fluido tipo Bingham plástico, con un reograma donde existe un yield point bien definido y una viscosidad plástica que aumenta de manera casi lineal con la tasa de deformación. Este esfuerzo umbral elevado le permite transportar sólidos y conservarlos en suspensión,

además de formar un “gel” estable en reposo. En obra, esto se traduce en lubricación eficaz y control de presiones, pero también en mayor resistencia al bombeo si se exceden las concentraciones.

Cuando aumenta la concentración de bentonita en el lodo, tanto la viscosidad como el yield point crecen, pero no lo hacen al mismo ritmo ni producen los mismos efectos. Al incrementarse la

cantidad de partículas de bentonita hidratadas, se forman redes estructurales internas más densas, capaces de retener agua y generar flóculos; esto provoca que el lodo ofrezca mayor resistencia inicial al movimiento, es decir, sube el yield point, haciéndolo más apto para mantener sólidos en suspensión y sellar el anular. Paralelamente, la viscosidad también aumenta, pero este incremento afecta sobre todo la energía

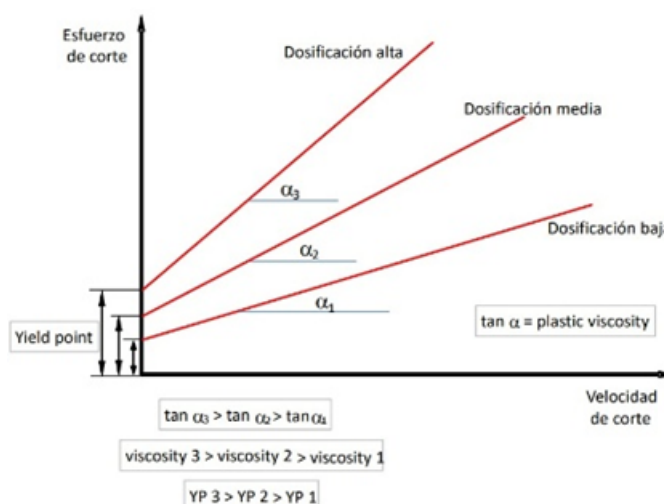


Figura 29. Relación de la dosificación y el Yield point. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.

necesaria para bombear y hacer circular el lodo una vez que ya está fluyendo

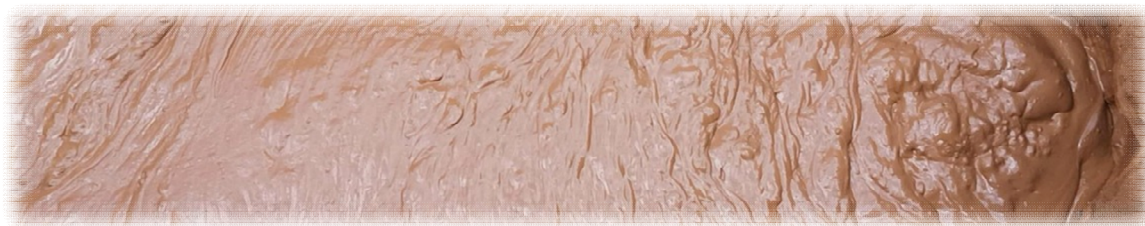


Figura 30. Lodo bentónico más sólidos. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.

Los polímeros, por el contrario, tienden a comportarse como fluidos pseudoplásticos (shear-thinning): su viscosidad disminuye cuando aumenta la velocidad. En su reograma, el yield point es bajo o prácticamente inexistente, lo cual implica que se movilizan fácilmente con poca energía, aportando lubricación sin generar espesamientos excesivos. Esto es ventajoso en terrenos muy drenantes, pero hace que los polímeros sean menos eficientes para sostener partículas en suspensión: necesitan caudal continuo para no sedimentar.

La sepiolita, empleada sobre todo en ambiente con agua salada, presenta un reograma intermedio con tendencia tixotrópica: la viscosidad disminuye bajo cizalladura sostenida y se recupera lentamente en reposo. Su yield point es moderado, menor que el de la bentonita, pero mayor que el de los polímeros, lo que permite cierto grado de suspensión y, al mismo tiempo, una protección frente a la defloculación causada por cloruros. Por ello, aun con un comportamiento menos plástico que la bentonita, la sepiolita conserva capacidad lubricante y estabilidad en medios salinos donde la bentonita perdería completamente su estructura.

En síntesis, el reograma y el yield point determinan la función óptima de cada lodo.

Contenida en una cámara presurizada situada inmediatamente detrás del cabezal excavador. Esta presión se ajusta de forma que equilibre las tensiones efectivas del terreno y la presión del agua subterránea, garantizando la estabilidad del frente durante el avance.

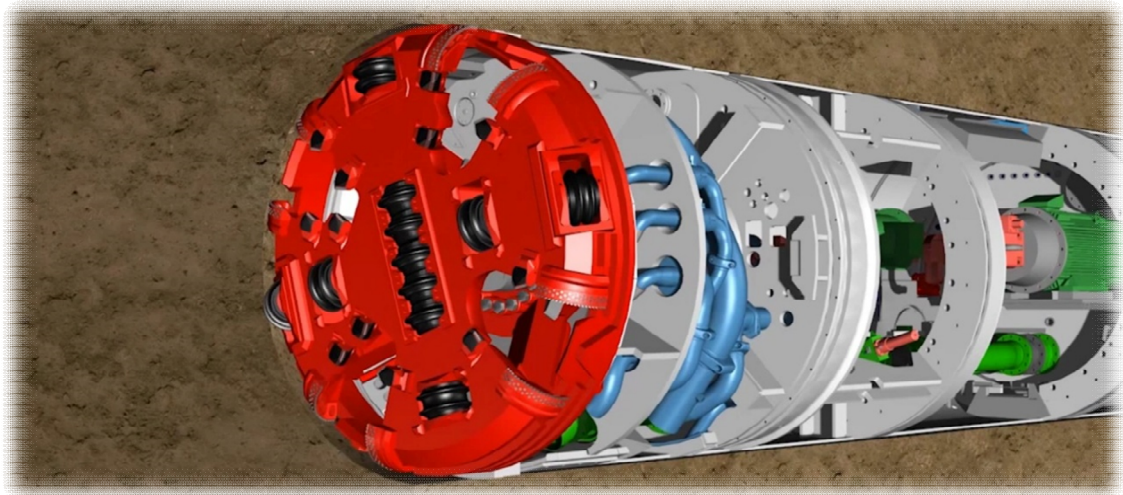


Figura 31. Vista de escudo cerrado. Herrenknecht 2025.

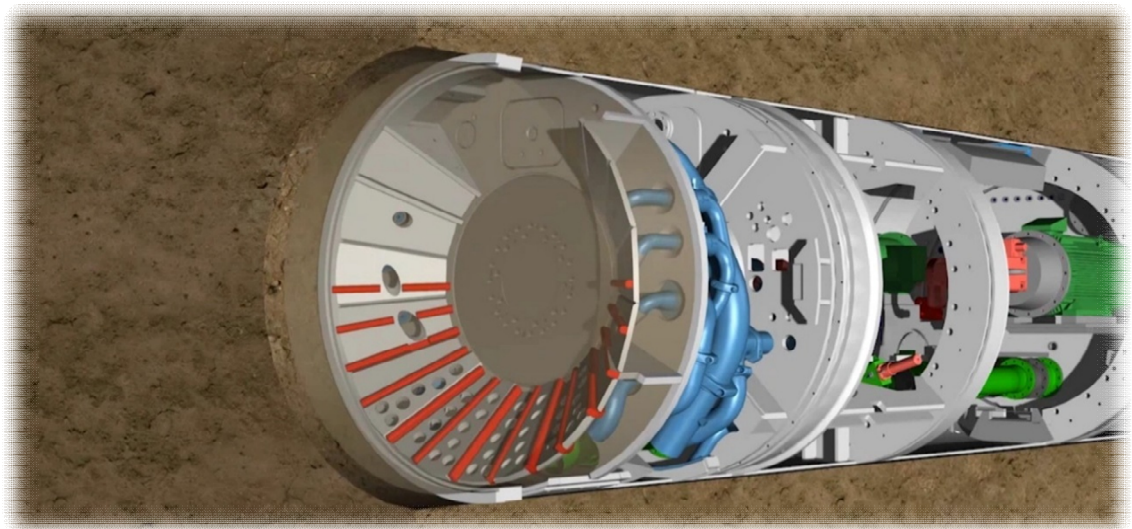


Figura 32. Vista de espacio entre escudo cerrado y aplicación de slurry. Herrenknecht 2025.

Desde el punto de vista mecánico, el cabezal excavador fragmenta el material, que se mezcla con el lodo formando una suspensión bombeable.

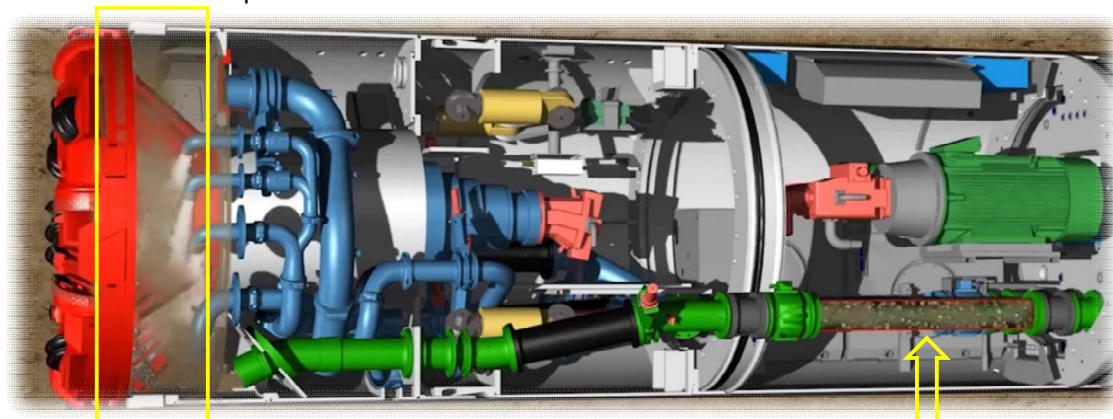


Figura 33. Suspensión bombeable y extracción. Herrenknecht 2025.

Esta mezcla es transportada a superficie a través de un circuito cerrado de tuberías.

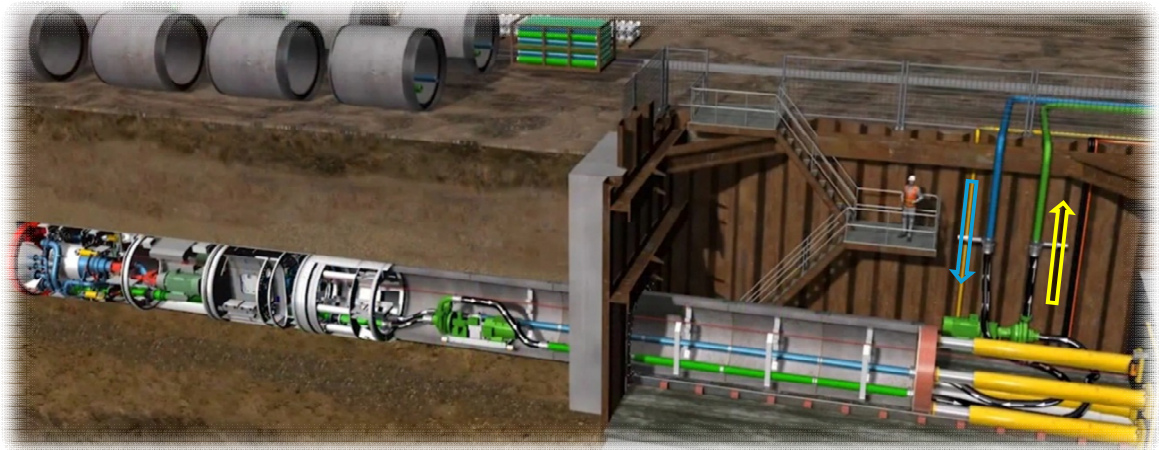


Figura 34. Sistema de transporte de suspensión bombeable, lodos más sólidos. Herrenknecht 2025.

Se somete a un proceso de separación sólido-líquido mediante ciclones antes de reutilizar el fluido.



Figura 35. Estación de separación de sólidos con ciclones. Herrenknecht 2025.

El sistema de ciclones es una unidad de separación hidráulica por fuerza centrífuga, diseñada para retirar los sólidos (material excavado) contenidos en el slurry y permitir que el lodo limpio sea recirculado al frente de excavación para seguir sosteniéndolo. Es un proceso continuo, cerrado y presurizado, fundamental para mantener: Densidad adecuada del lodo, viscosidad y reología controladas, estabilidad del frente y equilibrio hidráulico y capacidad de transporte sin colmatación. Un sistema de separación típico incluye:

- 1.- Bomba de impulsión / retorno de slurry
- 2.-Zaranda o tamiz vibratorio primario (separa sólidos gruesos antes del ciclón)
- 3.-Hidrociclones (núcleo de separación – por tamaño y densidad)
- 4.-Tanques intermedios / manifolds de distribución
- 5.-Decantación / desarenadores / filtro-prensa (acabado, opcional)
- 6.-Tanque de lodo limpio y líneas de recirculación.

El control del balance hidráulico se realiza mediante la regulación de parámetros como la presión en la cámara, el caudal de lodos, la densidad del fluido y la viscosidad, permitiendo adaptar el comportamiento del sistema a las condiciones geotécnicas encontradas

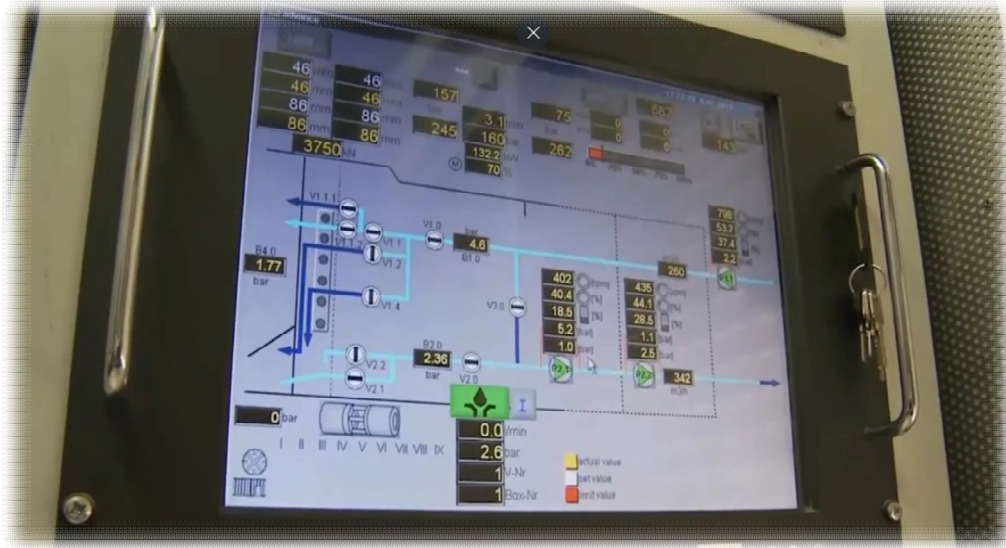


Figura 36. Interfaz de control de variables. Herrenknecht 2025.

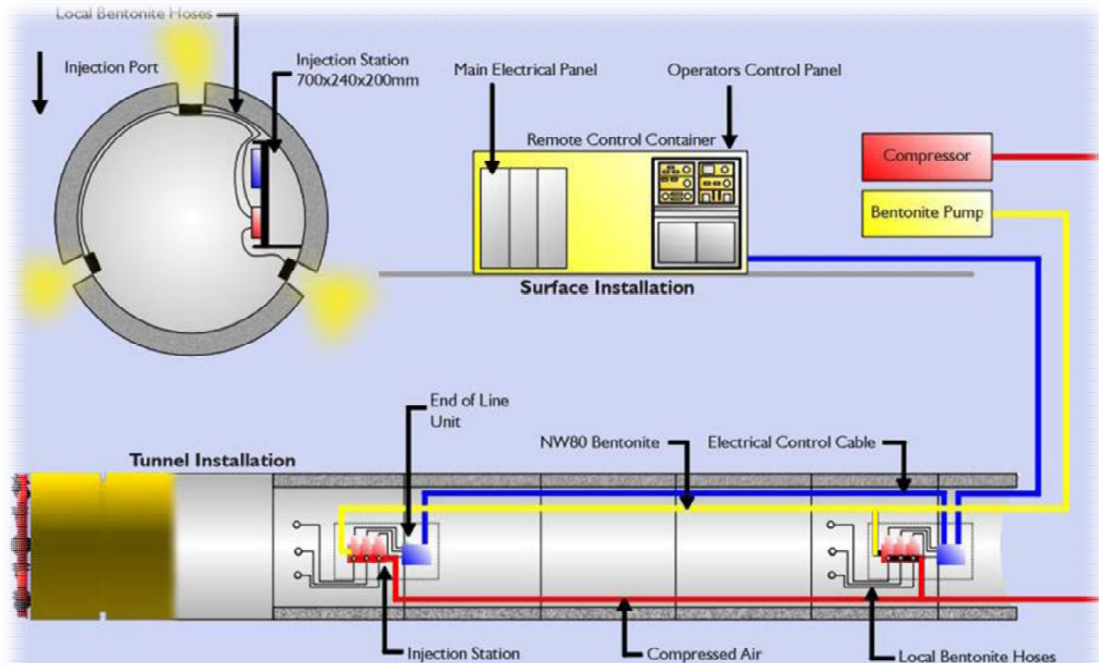


Figura 37. Esquema de dispensación de slurry y control de variables. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.

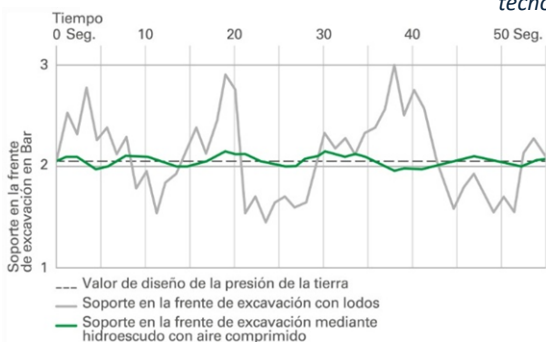


Figura 38. Gráfico de control de presiones en frente de excavación. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista

El sistema Slurry resulta especialmente adecuado para la excavación en suelos no cohesivos, arenas finas, limos y terrenos saturados, donde la estabilidad del frente depende en gran medida de la capacidad de controlar las presiones intersticiales.



Figura 39. Vista de la interacción bentonita-tubería de hormigón.  
Namli & Guler, 2017

La formación de una torta de filtración (filter cake) en la interfaz entre el lodo y el terreno contribuye adicionalmente a reducir la permeabilidad local y a mejorar la contención del frente.

Gracias a este mecanismo, la microtunelación slurry permite minimizar la pérdida de terreno y los asentamientos en superficie.

El sistema Slurry representa la solución más robusta dentro de los métodos de frente presurizado, al ofrecer un control preciso y continuo del equilibrio hidráulico del frente, independientemente de la cohesión del terreno o de la presencia de nivel freático.

La viabilidad técnica y la rentabilidad económica del hincado de tuberías dependen principalmente de la magnitud de las fuerzas de empuje. Estas determinan la capacidad requerida del sistema de empuje y el diseño del muro de reacción que absorbe dichas fuerzas, así como las tensiones en las tuberías (Namli & Guler, 2017)

#### 3.4.1.2.1.1. Extracción hidráulica del material del frente de excavación.

Contenida en una cámara presurizada situada inmediatamente detrás del cabezal excavador. Esta presión se ajusta de forma que equilibre las tensiones efectivas del terreno y la presión del agua subterránea, garantizando la estabilidad del frente durante el avance.

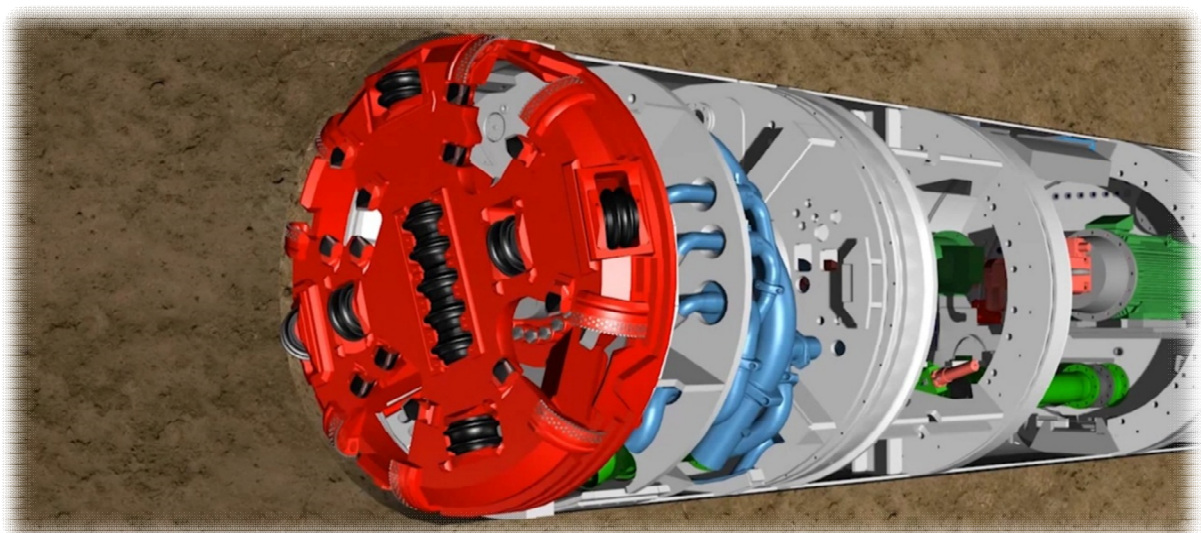


Figura 40. Vista de escudo cerrado. Herrenknecht 2025.

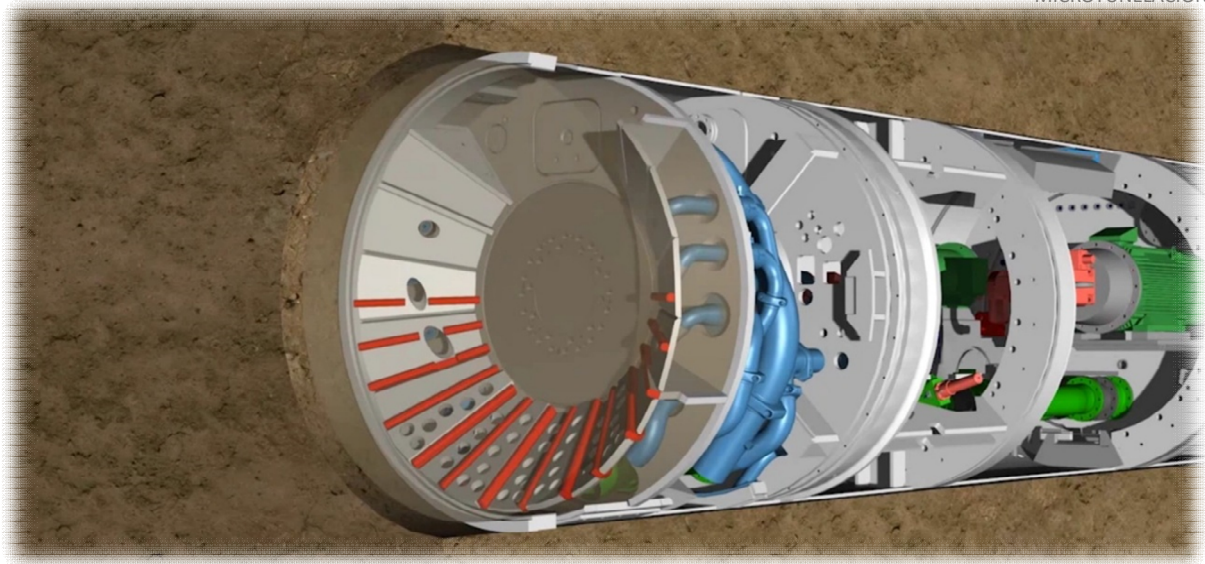


Figura 41. Vista de espacio entre escudo cerrado y aplicación de slurry. Herrenknecht 2025.

Desde el punto de vista mecánico, el cabezal excavador fragmenta el material, que se mezcla con el lodo formando una suspensión bombeable.

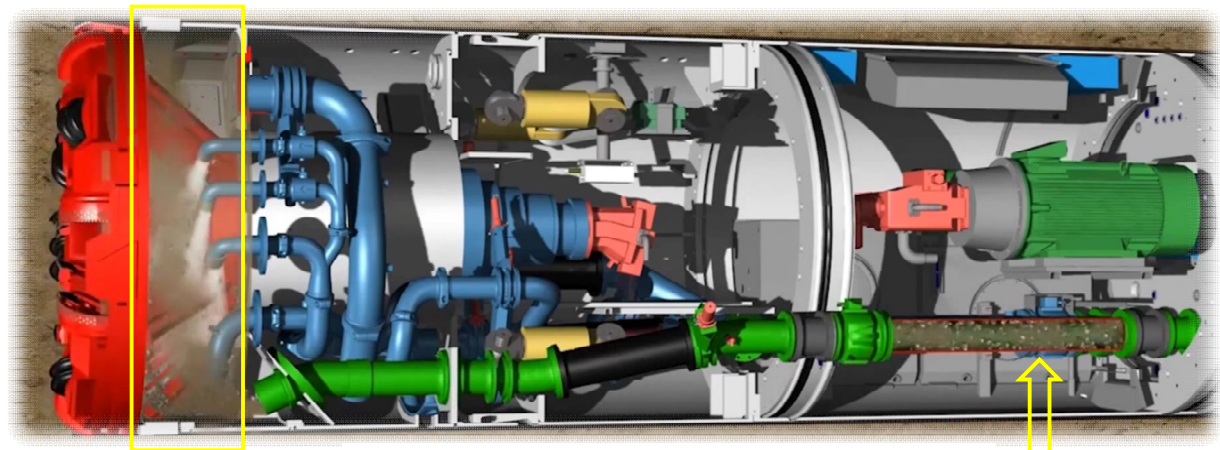


Figura 42. Suspensión bombeable y extracción. Herrenknecht 2025.

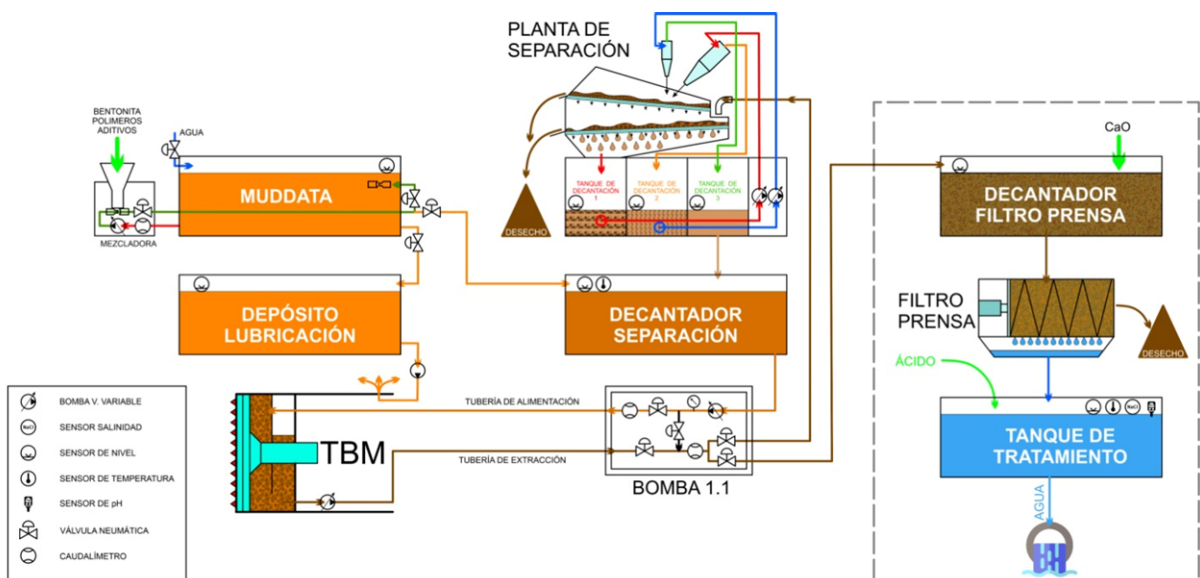


Figura 43. Esquema de extracción de sólidos. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.

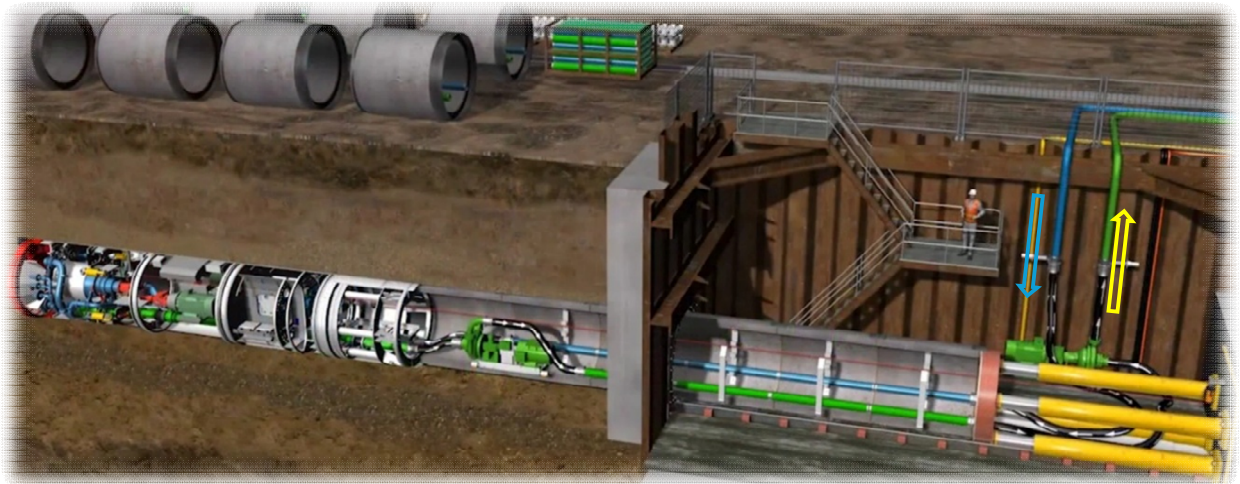


Figura 44. Sistema de transporte de suspensión bombeable, lodos más sólidos. Herrenknecht 2025.

Se somete a un proceso de separación sólido-líquido mediante ciclones antes de reutilizar el fluido.



Figura 45. Estación de separación de sólidos con ciclones. Herrenknecht 2025.

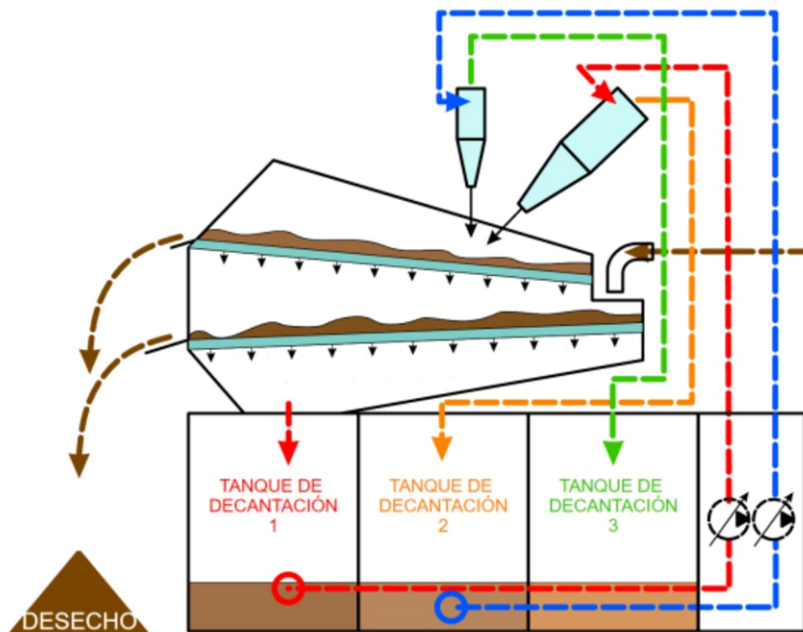


Figura 46. Detalle de proceso de separación de sólidos. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.

El sistema de ciclones es una unidad de separación hidráulica por fuerza centrífuga, diseñada para retirar los sólidos (material excavado) contenidos en el slurry y permitir que el lodo limpio sea recirculado al frente de excavación para seguir sosteniéndolo. Es un proceso continuo, cerrado y presurizado,

fundamental para mantener: Densidad adecuada del lodo, viscosidad y reología controladas, estabilidad del frente y equilibrio hidráulico y capacidad de transporte sin colmatación. Un sistema de separación típico incluye:

- 1.- Bomba de impulsión / retorno de slurry
- 2.-Zaranda o tamiz vibratorio primario (separa sólidos gruesos antes del ciclón)
- 3.-Hidrociclones
- 4.-Tanques intermedios / manifolds.
- 5.-Decantación / desarenadores
- 6.-Tanque de lodo limpio y líneas de recirculación.

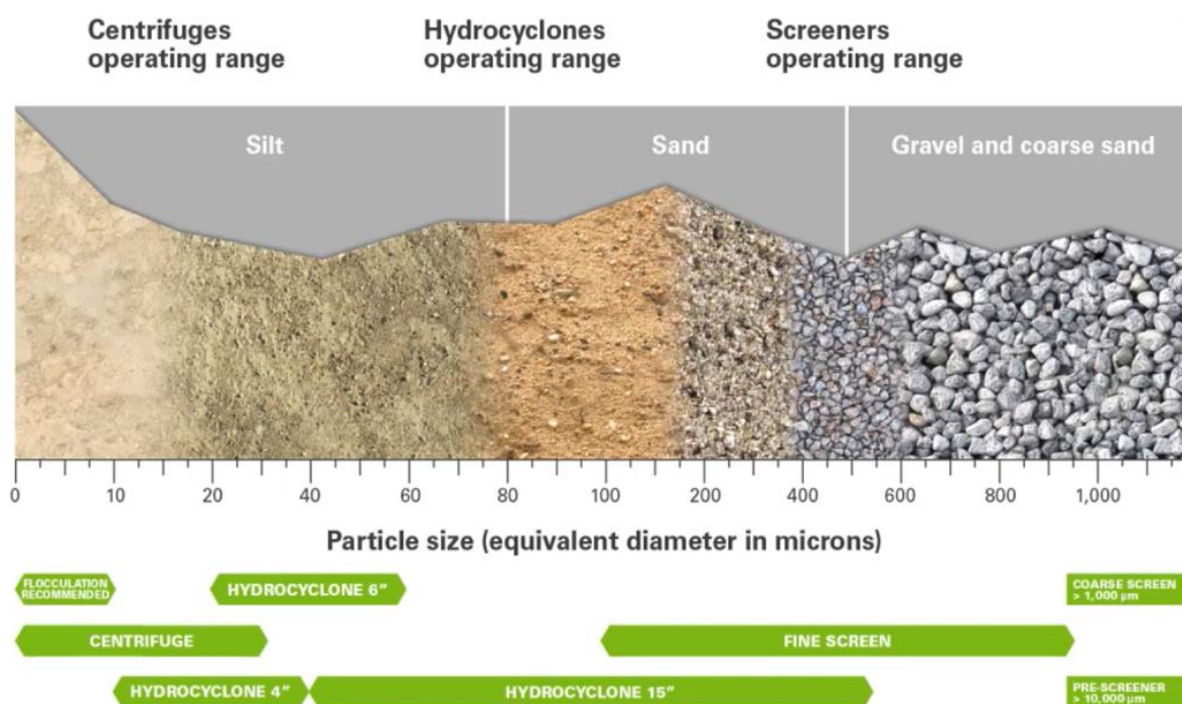


Figura 47. Tecnologías recomendadas de separación de sólidos según granulometría. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.

La bentonita no es gratis y, por tanto, es obligada su recuperación, hoy día fácil de lograr con pérdidas mínimas (de un 1% a un 2% como máximo) con las plantas de separación modernas, pero eso es aplicable a los suelos no cohesivos, porque comercialmente ha venido siendo imposible separar dos arcillas (en este caso, la bentonita y la arcilla del terreno). Con la actual tecnología de las plantas se ha conseguido separar la bentonita de un escombros arcilloso con pérdidas limitadas (se habla hasta de un 5%) pero, por el momento, a costa de un incremento exagerado de la potencia de las plantas, lo que lleva sus costes de inversión y explotación a cifras inaceptables. (Mendaña Savedra & Fernández Martínez, 2011)

#### 3.4.1.2.1.1.1. Circuito de lodos con mezcla de agua + bentonita.

El circuito de lodos con mezcla de agua y bentonita constituye el sistema base de soporte y lubricación en microtunelación tipo slurry. La bentonita, hidratada previamente en tanques de mezcla, forma una suspensión tixotrópica que actúa como fluido portante y estabilizador del frente. El circuito típico comprende: (i) preparación del lodo en superficie mediante agitación e hidratación controlada de la bentonita; (ii) impulsión del fluido hacia el frente de excavación mediante bombas de alta presión, donde el lodo ingresa a la cámara del escudo y colabora en equilibrar la presión del terreno y del agua; (iii) mezcla con el material excavado, generando un slurry cargado de sólidos; y (iv) retorno de dicho slurry a la planta de separación, donde se extraen sólidos mediante zarandas, ciclones y decantadores, recuperándose el lodo para su recirculación. Las propiedades reológicas del lodo —especialmente viscosidad y yield point— dependen directamente de la concentración de bentonita y condicionan su capacidad de transportar material, lubricar la tubería de empuje y sellar el espacio anular. Por ello, el circuito opera como un sistema cerrado en el cual densidad, viscosidad y presión se ajustan de manera continua para garantizar estabilidad del frente, minimizar la fricción de jacking y mantener un flujo hidráulico eficiente

#### 3.4.1.2.1.1.2. Circuito de lodos modificados. Polímeros/Fluidos mixtos.

Los circuitos de lodos modificados emplean soluciones poliméricas o mezclas híbridas (bentonita + polímeros) con el fin de optimizar la lubricación, reducir la fricción y mejorar la bombeabilidad en condiciones donde el uso exclusivo de bentonita resulta insuficiente o ineficiente. En estos sistemas, el fluido base se prepara en superficie mediante la dosificación controlada de polímeros sintéticos —generalmente de naturaleza aniónica o no iónica— que, al disolverse, generan soluciones pseudoplásticas con bajo yield point y viscosidad dependiente de la cizalladura, permitiendo una menor energía necesaria para movilizar el fluido en la red de tubería y una respuesta rápida ante variaciones de caudal.

Una vez preparado, el fluido modificado se bombea hacia el frente de excavación, donde actúa fundamentalmente como lubricante, reduciendo las fuerzas de empuje en el pipe jacking y evitando bloqueos de avance, y secundariamente como acondicionador reológico para facilitar el transporte hidráulico del material excavado. En escenarios de alta permeabilidad o cuando se requiere una mayor capacidad de suspensión de sólidos, puede optarse por fluidos mixtos bentonita-polímero, que combinan el esfuerzo umbral característico de la bentonita con la fluidez y baja viscosidad de los polímeros.

Al igual que en los circuitos tradicionales, el slurry cargado retorna a la planta de separación para la extracción de sólidos y posterior ajuste de propiedades antes de su recirculación; no obstante, en lodos poliméricos la separación física puede requerir ajustes en etapa de tamizado o decantación debido a la menor tendencia del fluido a formar estructuras gelificadas. La elección de un circuito de lodos modificados se fundamenta principalmente en la condición geotécnica (arenas limpias, gravas permeables) y en la geometría de la obra (diámetros reducidos, longitudes elevadas), donde la baja viscosidad y la capacidad de recuperación rápida del fluido resultan críticas para la operativa.

Parámetro / Propiedad	Bentonita (agua + bentonita)	Polímeros (lodos modificados)	Fluidos mixtos (bentonita + polímeros)
Comportamiento reológico	Bingham plástico (yield point elevado)	Pseudopolítico / shear-thinning (yield point bajo)	Intermedio: yield point moderado y buena fluidez
Yield point (esfuerzo umbral)	Alto → gran capacidad de suspensión y sellado	Muy bajo → requiere caudal para mantener sólidos en movimiento	Medio → combina suspensión (bentonita) y fluidez (polímero)
Viscosidad	Media–alta, aumenta con concentración; mayor energía de bombeo	Baja–media, disminuye al aumentar cizalladura → bajo consumo energético	Variable según dosificación; ajustable según obra
Función principal	Estabilidad del frente + transporte de sólidos + lubricación exterior	Lubricación y reducción de fricción; mejora bombeabilidad	Optimización dual: lubricación + cierta suspensión
Ventajas principales	Excelente capacidad de suspensión; buen sellado del anular; estabilidad tixotrópica	Fluido ligero, rápido de preparar, fácil bombeo; ideal en terrenos permeables	Flexibilidad; se adapta a geologías complejas sin perder bombeabilidad
Limitaciones	Pierde propiedades en agua salada; puede generar sobrepresiones si concentración es alta	Baja retención de sólidos; requiere caudal continuo; menor capacidad de sellado	Mayor coste y necesidad de calibración técnica
Terrenos más favorables	Limos, arenas finas, arcillas; permeabilidad moderada	Arenas limpias y muy permeables; granulometría abierta	Suelos mixtos o cambiantes; condiciones con alternancia de suelos
Condiciones hidráulicas	Adecuado en agua dulce, baja salinidad	Adecuado en cualquier tipo de agua	Adecuado; puede corregirse para ambientes marinos
Alternativa para agua salada	No estable → sustituir por sepiolita	Puede usarse	Puede usarse; se puede combinar con sepiolita
Energía bombeo	Alta (↑ viscosidad)	Baja (shear-thinning)	Media
Velocidad de preparación	Lenta (requiere hidratación completa)	Rápida	Media
Ejemplos típicos de uso	Microtunelación urbana, colectores, longitudes > 80–100 m	Pipe jacking en arenas, diámetros pequeños y medias velocidades de avance	Tramos largos con cambio de geología, obras estratégicas con control fino del rendimiento

Tabla 1. Comparativa de propiedades de los principales lodos tipo slurry. Elaboración propia.

### 3.4.1.2.1.1.3. Bombeo mediante bombas centrífugas o diafragmas.

El transporte del lodo en microtunelación precisa garantizar un caudal continuo y estable tanto hacia el frente de excavación como en el retorno del slurry cargado. Para ello, el sistema puede emplear bombas centrífugas o bombas de diafragma, seleccionadas según las condiciones reológicas del lodo, la concentración de sólidos y la longitud del circuito.



Figura 48. Centro de bombeo de lodos. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.

Las bombas centrífugas son las más habitua

baja a media viscosidad, debido a su capacidad para trabajar en régimen continuo, su eficiencia energética y la facilidad de mantenimiento. Su funcionamiento depende del giro de un impulsor que transfiere energía al fluido, generando una presión dinámica suficiente para impulsar el caudal requerido; sin embargo, su rendimiento se ve afectado cuando la mezcla contiene un porcentaje elevado de sólidos abrasivos o cuando la viscosidad supera los límites recomendables, generándose pérdidas de carga o cavitación.

Por su parte, las bombas de diafragma —o bombas de desplazamiento positivo— se emplean en situaciones donde el slurry presenta alta densidad o elevado contenido de sólidos, o cuando es necesario asegurar una presión de impulsión estable y controlada independientemente de las variaciones de viscosidad. Su mecanismo basado en una membrana oscilante permite mover el fluido mediante pulsos volumétricos, evitando la recirculación interna y reduciendo el desgaste por abrasión; no obstante, operan con caudales generalmente menores y requieren diseño adecuado para minimizar vibraciones y golpes de ariete en la línea.

### 3.4.1.2.2. Sistemas EPB. Balance mecánico.

Los sistemas EPB (*Earth Pressure Balance*) constituyen uno de los métodos de frente presurizado utilizados en microtunelación. Su principio de funcionamiento se basa en equilibrar la presión del terreno y del agua en el frente de

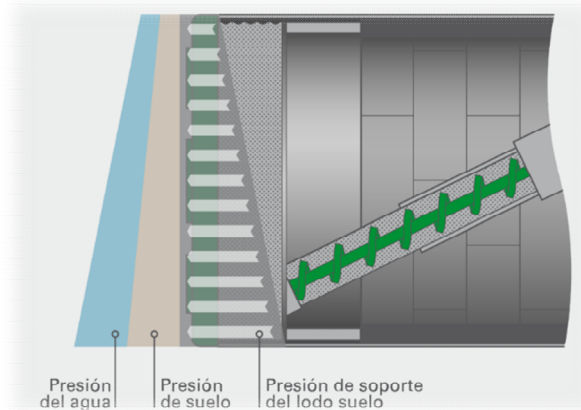


Figura 49. Balance de presiones en frente de excavación. Herrenknecht 2025.

excavación utilizando el propio material excavado, el material excavado ingresa a la cámara de presión (*plenum*) a través del cabezal de corte. La presión del terreno y del agua en el frente se equilibra mediante la compresión de este material en la citada cámara. El empuje frontal del escudo genera presión en el *plenum* mientras, de manera simultánea, mezcla y plastifica el suelo. Una vez equilibrada la presión de frente, el material es evacuado mediante un tornillo sinfín (*screw conveyor*). A medida que el suelo avanza por el tornillo, la presión se disipa, permitiendo su descarga al final del mismo a presión atmosférica. (*An Introduction to Pipe Jacking and Microtunnelling*, 2017)

El soporte del frente no se realiza mediante un fluido hidráulico (como en el sistema slurry), sino mediante una masa de suelo excavado que actúa como tapón mecánico, transmitiendo presión hacia la cara del terreno.

Las EPB son generalmente adecuadas para suelos de grano fino (Sterling, 2020a). En suelos naturales, especialmente limosos, arenosos o con granulometría gruesa, donde el terreno extraído no posee cohesión suficiente para comportarse como un fluido plástico suelen utilizarse polímeros y espumantes (comúnmente denominados producto). Los objetivos buscados con la aplicación de estas sustancias según (Mendaña Savedra & Fernández Martínez, 2011) son:

- 1.-Plastificar el suelo, aumentando su cohesión y capacidad de transmitir presión.
- 2.-Reducen el rozamiento del terreno con el acero de la Rueda y, en consecuencia, disminuyen el Par de giro y el desgaste de las herramientas.
- 3.-Refrigeran el corte mecánico, evitando la tendencia general de las arcillas a endurecerse formando bloques que obturan las entradas a la cámara o al tornillo sinfín.
- 4.-Reducen la “pegajosidad” de las arcillas a la rueda, otra causa más del cierre de las aberturas de entrada, del material a la cámara.
- 5.-Homogenizan la mezcla en la cámara rellenando los vacíos creados por el esponjamiento del terreno a excavar para conseguir el efecto de estabilización del frente en la extracción con tornillo sin pérdida de presión.

Un determinado tipo de tratamiento puede mejorar de modo radical la trabajabilidad de la mezcla, variando simplemente el FIR del espumante (Mendaña Savedra & Fernández Martínez, 2011)

Autores como (Mendaña Savedra & Fernández Martínez, 2011) indican que existen variantes de polímeros a los que se recurre en determinadas ocasiones, como:

Polímeros desestructurantes, a los que hay que recurrir, como complemento de los tensoactivos, cuando la alta plasticidad de algunas arcillas produce dificultades máximas tanto por su “pegajosidad” como por la dificultad para lograr una masa uniforme y trabajable.

Polímeros reductores de agua, imprescindibles para impedir la disgregación de la mezcla cuando hay arenas muy finas, generalmente de estructura monogranular, es decir, con husos estrechos de tipo vertical en el gráfico de su granulometría.

No se logró una clara aceptación general de los EPB hasta la aplicación generalizada de los aditivos químicos, que se fue imponiendo a lo largo de la década de los años 1990-99 (Mendaña Savedra & Fernández Martínez, 2011).

La reología final debe encontrarse dentro de un rango determinado, con un yield point suficiente para sostener presión, pero viscosidad baja para permitir un bombeo y extracción eficiente de forma controlada a través del tornillo sinfín (auger). El tornillo sinfín (auger) es el corazón del sistema, ya que controla la extracción del material excavado y, con ello, la presión interna. Ajustando la velocidad de giro y la inclinación del tornillo es posible modular el caudal de salida:

Si se extrae demasiado material, la presión interna disminuye aumentando el riesgo de asentamientos o entrada de agua. Si se extrae muy poco material, la presión aumenta incrementando el riesgo de sobrepresión y levantamiento del terreno en superficie.

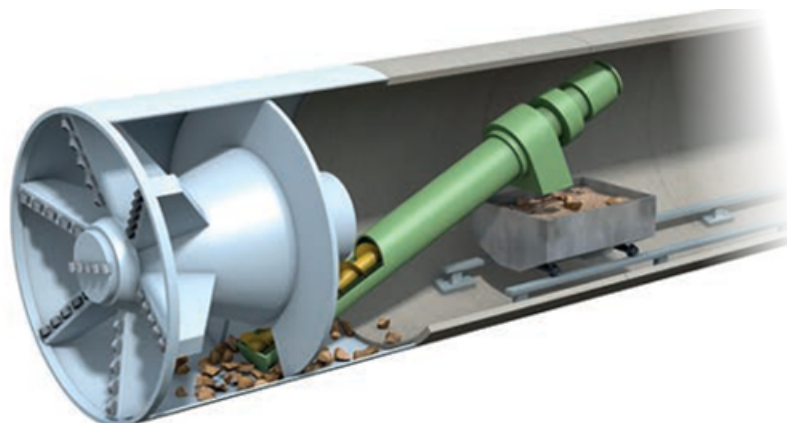


Figura 50. Escudo cerrado. EPB. Pipe Jacking Association. 2017.

La regulación de la velocidad del tornillo y del caudal de extracción es el mecanismo clave para mantener estable la presión del frente, evitando colapsos del terreno o entradas de agua. Además, el control del contenido de humedad y la incorporación de espumas, agua o polímeros permiten obtener una mezcla con un yield point y viscosidad adecuados para sostener presiones de tierra y agua sin desestabilizarse. El equilibrio es estrictamente mecánico: si el suelo pierde cohesión o no se acondiciona correctamente, la presión del frente colapsa y el EPB deja de ser efectivo.

Las tuneladoras EPB funcionan como un sistema cerrado donde la presión se regula por balance volumétrico, manteniendo una cámara parcialmente llena que actúa como un buffer de presión. En microtunelación, este control debe ser aún más fino debido al menor volumen disponible y mayor sensibilidad a pequeñas variaciones de extracción.

Aunque el uso clásico de los sistemas EPB está asociado principalmente a TBM de gran diámetro, su aplicación en microtunelación es posible en diámetros mayores del rango típico de MTBM [1,7 y metros] y en condiciones donde el suelo presenta fino contenido arcilloso, humedad natural o capacidad de plastificación, lo que permite formar un tapón mecánico efectivo. Su uso resulta menos frecuente en microtunelación en comparación con el sistema slurry, ya que este último ofrece mayor versatilidad en suelos arenosos, limosos saturados o con nivel freático alto; sin embargo, un EPB puede ser una alternativa competitiva en suelos de muy baja permeabilidad, profundidades moderadas y tramos de empuje relativamente cortos, donde la existencia de un circuito hidráulico completo no se justifica económicamente.

El EPB presenta limitaciones claras en condiciones donde el terreno no puede retener presión. Suelos muy arenosos, gravas limpias o terrenos con niveles freáticos altos generan pérdida de agua hacia el macizo, segregación de la mezcla y colapso del tapón EPB. En tales casos, incluso con aditivos, el material condicionado puede volverse no transportable o incapaz de sellar filtraciones. Por eso, en microtunelación bajo nivel freático elevado y en suelos granulares saturados, se prefiere el sistema slurry (balance hidráulico), que permite sostener el frente mediante presión de fluido. El EPB solo es adecuado si el suelo presenta al menos una fracción suficiente de finos para desarrollar cohesión o si la profundidad es baja–media.

Una de las ventajas operativas del EPB es que no requiere un circuito hidráulico completo. A diferencia del slurry, que necesita planta de separación, ciclones, tamices, tanques de mezcla y bombas de retorno, el EPB solo necesita:

- 1.-Sistema mecánico de extracción (tornillo sinfín).
- 2.-Unidad de inyección de aditivos.
- 3.-Bomba o cinta para retirar el material fuera del pozo.

Esto implica menor coste de montaje, menos requerimientos de espacio en obra, y logística más simple, razón por la cual algunos proyectos pequeños o urbanos con longitudes cortas optan por EPB cuando la geología lo permite. Sin embargo, esta simplicidad se paga con menor rango geotécnico de aplicación.

#### 3.4.1.2.2.1. EPB híbrido. EPB+Slurry.

El sistema EPB híbrido es una variante evolucionada del método de balance mecánico (EPB) en la que se incorpora apoyo hidráulico mediante lodos (slurry) para ampliar el rango geológico y operativo del equipo. Se sitúa funcionalmente entre el EPB estándar y el sistema slurry puro: mantiene la lógica EPB de equilibrar la presión del frente mediante una cámara llena de material excavado, pero incorpora inyecciones de lodos de manera controlada para estabilizar el frente, sellar pérdidas y mejorar la reología del suelo acondicionado. Las máquinas modernas suelen llevar un equipo de inyección automática de lodo bentónico para rellenar el “gap” entre escudo y terreno a una presión del orden de 0,5 Bar por encima de la presión de confinamiento, con lo cual es posible reducir muy sensiblemente los asentamientos. (Mendaña Savedra & Fernández Martínez, 2011)

En un EPB híbrido, la presión del frente se mantiene por dos vías simultáneas:

- 1.-Mecánica: mediante una masa semiplástica de suelo excavado acumulada en la cámara, cuya consistencia se regula extrayendo o reteniendo material con el tornillo sinfín.
- 2.-Hidráulica complementaria: mediante un fluido presurizado (lodo) que actúa sellando zonas permeables, compensando pérdidas de presión y aportando cohesión adicional.

El equilibrio se consigue mediante la ecuación de balance volumétrico, donde el sistema controla el volumen total que entra al frente (excavación) y el que sale (extracción por tornillo), mientras se regula la presión mediante la inyección y redistribución del lodo dentro de la cámara.

En un sistema EPB híbrido, el lodo no reemplaza al material excavado como medio principal de sostenimiento, sino que actúa como un complemento hidráulico orientado a reforzar el equilibrio que en un EPB estándar depende únicamente de la masa semiplástica acumulada en la cámara. Su función es múltiple: por un lado, sella el frente de excavación, permitiendo cerrar microhuecos y articulaciones entre estratos granulares; además, reduce la permeabilidad local del terreno, mitigando pérdidas de agua y evitando la desestabilización del tapón mecánico; al mismo tiempo, contribuye a modificar reológicamente la mezcla suelo–excavado, incrementando moderadamente el esfuerzo umbral (yield point) y la cohesión sin comprometer la extrudibilidad del material a través del tornillo sinfín. Finalmente, el lodo también favorece una distribución homogénea de presión, rellenando vacíos y compensando zonas donde el soporte mecánico del suelo por sí solo sería insuficiente, y disminuye la fricción interna, facilitando el avance y la extracción.

El empleo de este sistema requiere una operación sensiblemente más controlada que en el EPB estándar, pues deben equilibrarse simultáneamente tres variables: la reología interna, la extracción

mecánica y la dosificación hidráulica. La reología debe monitorizarse de forma continua, ajustando parámetros como densidad, viscosidad (por ensayo Marsh), contenido de finos y humedad, con el objetivo de mantener la mezcla dentro de una “ventana operativa” capaz de sostener presión sin volverse demasiado viscosa como para dificultar el bombeo o la extrusión. La extracción mediante el tornillo sinfín continúa siendo el mecanismo fundamental de regulación de presión: cualquier desviación —extracción excesiva o insuficiente— puede producir bajo- o sobrepresiones en la cámara, con riesgos de asentamientos o levantamientos en superficie. A su vez, la inyección del slurry debe ser cuidadosamente modulada, pudiendo aplicarse en la cámara, en el escudo exterior o en el anular tras la tubería, dependiendo de si se busca mejorar la cohesión del tapón, proteger el escudo o reducir la fricción de jacking. Inyecciones excesivas inundarían la cámara y comprometerían el control del sinfín, mientras que inyecciones insuficientes dejarían zonas vulnerables en el terreno o favorecerían filtraciones.

El fluido utilizado en un EPB híbrido no suele ser bentonita pura, sino un lodo modificado de baja viscosidad, compuesto habitualmente por agua y polímeros o por mezclas bentonita–polímero. En ambientes salinos, la bentonita pierde capacidad de gelificación y deflocula, por lo que debe ser sustituida por sepiolita, que mantiene sus propiedades reológicas en presencia de cloruros. De este modo, el lodo debe diseñarse no sólo según parámetros hidráulicos, sino también atendiendo a la compatibilidad química con el suelo, evitando fenómenos como hinchamiento de arcillas, segregación de agua o ruptura de estructuras gelificadas.

En cuanto a su campo de aplicación, el EPB híbrido se emplea especialmente cuando el terreno carece de finos suficientes para formar un tapón estable, cuando se presenta permeabilidad alta o moderada o cuando existe nivel freático que, aunque significativo, no justifica el despliegue de un sistema slurry completo. También es la solución preferida en zonas donde la geología es variable y la tuneladora atraviesa transiciones rápidas entre arcillas y arenas. Cuando se encuentran arenas y gravas en un frente mixto, estos materiales pueden acondicionarse mediante la inyección de aditivos tales como bentonita (*An Introduction to Pipe Jacking and Microtunnelling*, 2017). No obstante, el sistema presenta límites: no es adecuado en suelos altamente granulares y completamente saturados, en condiciones de permeabilidad  $k$  extremadamente alta ( $>10^{-3}$ – $10^{-2}$  m/s), en frentes con presiones de agua elevadas, ni en situaciones donde la extracción mecánica no pueda gestionar el volumen de material generado.

El EPB híbrido implica una mayor complejidad instrumental y de control en comparación con el EPB estándar, requiriendo unidades de dosificación de lodos, inyector multizona, sensores de presión

en cámara, así como un sistema de control integrado —frecuentemente SCADA— para sincronizar avance, extracción e inyección. Aun así, continúa representando un sistema intermedio desde el punto de vista de infraestructura, manteniendo la ventaja de no necesitar planta ciclónica de separación, tamices ni retorno hidráulico como en el sistema slurry. Ha habido casos en que este diseño ha permitido mejorar el coste final del túnel, como sucedió en la máquina de la autopista perimetral de Paris A-86.(Mendaña Savedra & Fernández Martínez, 2011)

La presencia de aditivos reológicos (polímeros, espumas) es una operación normal en el uso del EPB estándar. Solo cuando el sistema pasa a depender también de una fase fluida presurizada para sostener el frente, se habla de EPB híbrido.

Existen gráficos, publicados por (Mendaña Savedra & Fernández Martínez, 2011) donde se recomienda el uso de una u otra tecnología.

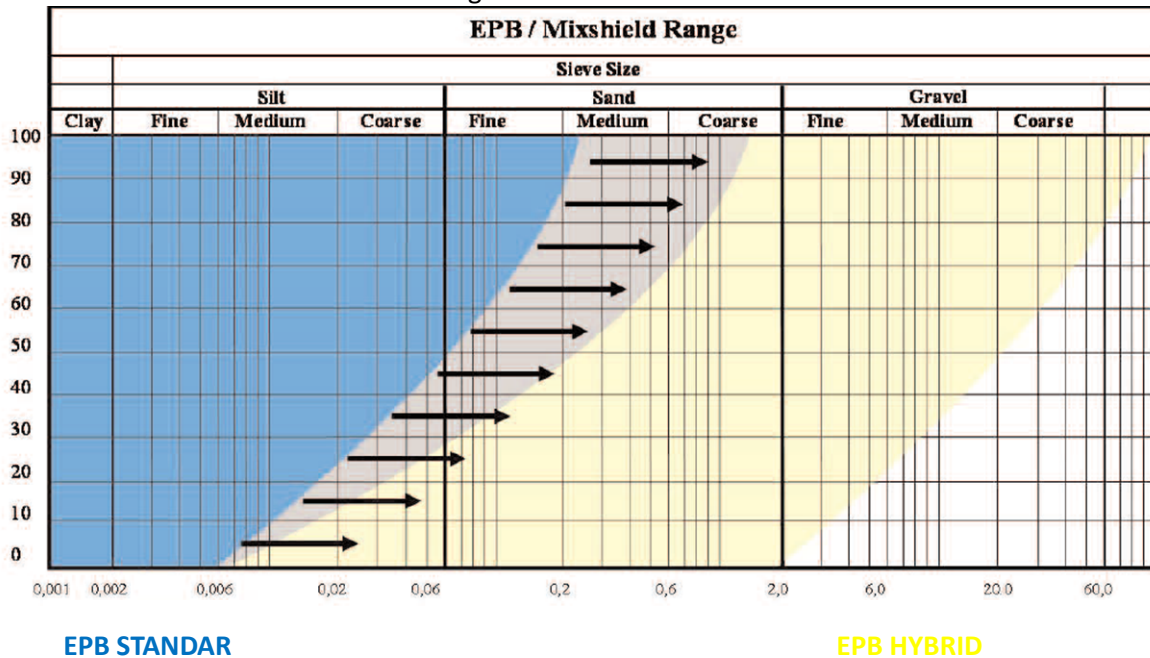


Figura 51. Gráfico para la elección del método según granulometría. Mendaña Savedra & Fernández Martínez, 2011.

Este gráfico representa, en un diagrama granulométrico, el rango geotécnico de aplicabilidad de los diferentes métodos de microtunelación presurizada, específicamente EPB (Earth Pressure Balance) frente a sistemas híbrido. Su lectura permite identificar qué tecnología es más adecuada según la distribución granulométrica del terreno y, por extensión, su comportamiento frente a la presión de frente y permeabilidad.

El eje horizontal (X) indica el tamaño de partícula, en escala logarítmica, desde arcillas (≈ 0,001 mm) hasta gravas gruesas (≈ 60 mm). El eje vertical (Y) representa el porcentaje de cada fracción en la mezcla de suelo, es decir, la proporción de ese tamaño de grano dentro del suelo total (0–100%).

El área está dividida en dos grandes zonas:

- Zona azul – EPB estándar: suelos finos y de media granulometría, arcillas, limos y arenas finas–medias.
- Zona amarilla –EPB híbrido: suelos arenosos gruesos, gravas y suelos permeables.

Existe además una zona de solape central (gris), que representa terrenos intermedios donde, dependiendo de la permeabilidad, contenido de finos y presión de agua, ambos métodos podrían funcionar, aunque requiriendo acondicionamiento.

Los suelos dentro del área azul contienen:

- Finos cohesivos (arcillas y limos).
- Suficiente porcentaje de partículas menores a 0,06 mm.

Estos suelos permiten que el EPB forme un tapón mecánico mediante el material excavado acondicionado con polímeros/espumas, manteniendo la presión del frente sin pérdida hídrica.

Como condición crítica se requiere suficiente contenido de finos (>15–20%) para permitir un yield point elevado y formar mezcla estable.

Los suelos dentro del área amarilla corresponden a:

- Arenas medias a gruesas y gravas finas a muy gruesas.
- Materiales con alta permeabilidad.

En estos terrenos, la presión de frente no puede transmitirse solo a través del suelo excavado, por lo que se requiere un apoyo de balance hidráulico con lodo (bentonita / polímeros) para sostener el frente y evitar el sifonamiento.

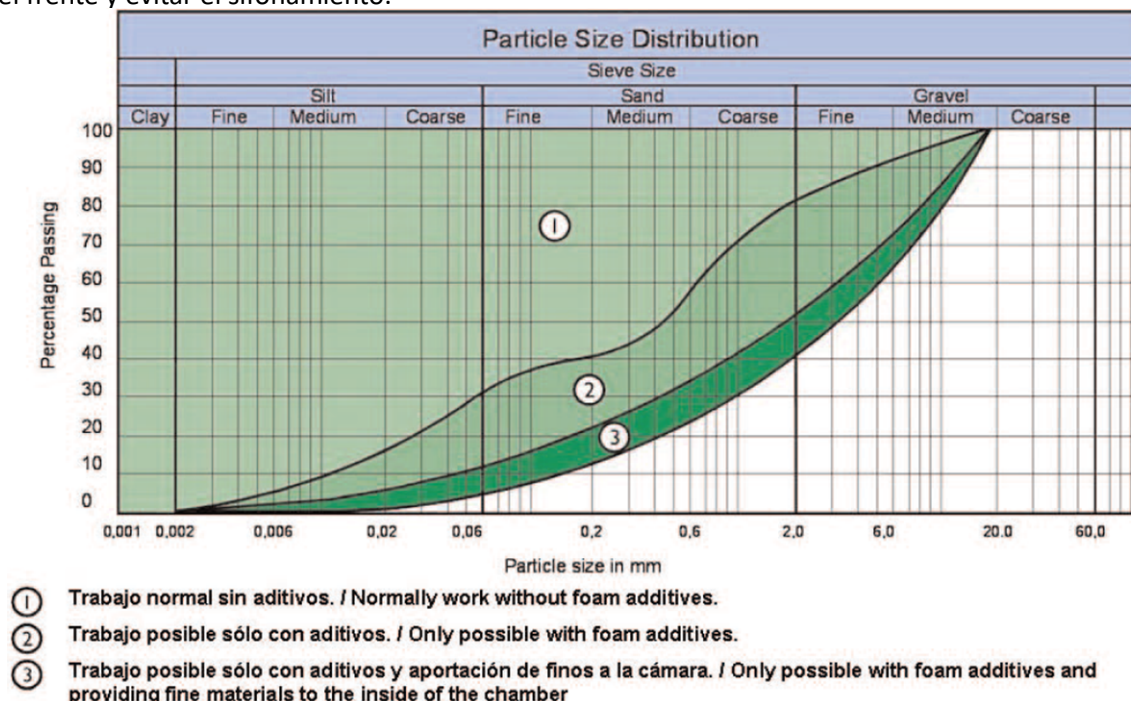


Figura 52. Gráfico para la adición de aditivos según granulometría. Mendaña Savedra & Fernández Martínez, 2011.

En el gráfico, el uso de polímeros y espumantes se interpreta de manera gradual según las zonas 1, 2 y 3, que representan distintos niveles de dificultad para que el método EPB mantenga un frente estable únicamente con el suelo excavado.

En la zona 1, correspondiente a suelos con una fracción dominante de finos (arcillas y limos), el terreno posee cohesión natural, capacidad para retener agua y formar una masa plástica con un yield point suficientemente alto. En estas condiciones, el material excavado se comporta de forma adecuada y no es necesaria la inyección de espumantes ni polímeros, dado que la propia reología del suelo permite estabilizar el frente y regular la presión mediante el tornillo sinfín.

En la zona 2, donde predominan las arenas finas a medias y el contenido de finos disminuye, el terreno presenta peor retención hídrica y menor cohesión, lo que impide formar un tapón presurizado de manera natural. Aquí los aditivos se vuelven imprescindibles: los espumantes reducen la permeabilidad y ayudan a sellar el frente, incorporando microburbujas que capturan agua y aire, mientras que los polímeros incrementan la cohesión del suelo y mejoran su comportamiento reológico, elevando el yield point y permitiendo que el material pueda ser extruido por el tornillo con control de presión. En esta zona, el EPB solo es viable con un acondicionamiento químico adecuado.

En la zona 3, el suelo está compuesto mayoritariamente por arenas gruesas o fracciones granulares superiores, y la permeabilidad es tan alta que el terreno por sí mismo no puede contener agua ni generar cohesión, incluso con aditivos. En este caso, el uso de polímeros y espumantes sigue siendo necesario, pero no es suficiente por sí solo: debe complementarse con aporte de finos externos, introducidos deliberadamente en la cámara para generar una matriz que permita a los polímeros actuar y para que la espuma pueda sellar el frente. Sin esta combinación, el material excavado se comporta como agregado seco y no puede transmitir presión, por lo que el EPB sería inviable.

#### 3.4.1.2.2.2. Extracción mecánica del material del frente de excavación.

Los sistemas de excavación con escudo cerrado bajo principio de balance mecánico tipo EPB (*Earth Pressure Balance*), la extracción del material procedente del frente puede ejecutarse bajo dos configuraciones diferenciadas. En su modalidad estándar, la retirada del suelo se realiza de forma exclusivamente mecánica, mediante tornillo sinfín, el cual asume simultáneamente la función de transporte y de regulación del equilibrio de presiones en la cámara de excavación. No obstante, existen variantes híbridas EPB–Slurry, en las que la extracción combina un desplazamiento mecánico inicial con un transporte hidráulico posterior mediante bombeo, lo cual permite evacuar materiales de mayor granulometría o elevada permeabilidad. Este segundo enfoque exige la instalación de

sistemas adicionales —cámara de transferencia, red de tuberías, bombas de lodos y, eventualmente, equipos auxiliares de separación— por lo que implica un mayor coste de implantación y complejidad operativa respecto a una EPB estándar.

#### 3.4.1.2.2.1. EPB Estándar. Sinfín interior. Auger.

En un sistema EPB, la extracción del material excavado se realiza mediante un proceso puramente mecánico, cuyo órgano principal es el tornillo sinfín, encargado tanto de transportar el terreno como de regular el equilibrio de presiones en la cámara frontal.

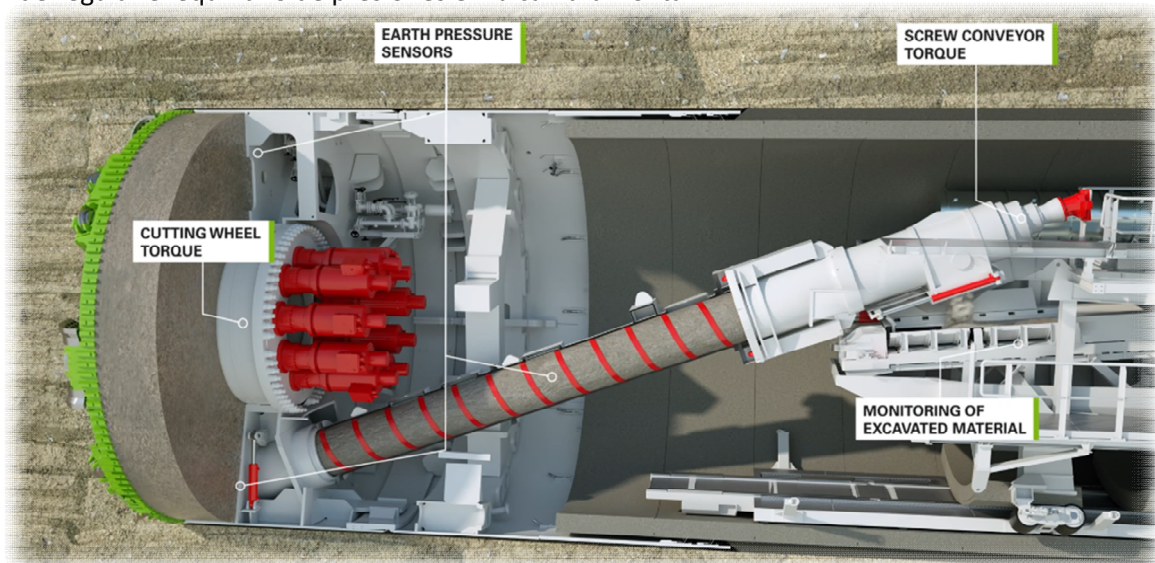


Figura 53. Sinfín interior tipo Auger. Herrenknecht 2025.

Una vez que el cabezal de corte disgrega el suelo en el frente, este cae a la cámara de presión, donde se mezcla con aditivos tales como espumas, polímeros o agua para modificar su cohesión, viscosidad y capacidad de retener agua, convirtiéndolo en una masa semiplástica capaz de transmitir presión hacia el terreno circundante. El tornillo sinfín evacúa el material de forma gradual, permitiendo una disipación progresiva de la presión interna hasta transportar el suelo a presión atmosférica en el pozo de ataque. La tasa de extracción es el parámetro crítico de control: si se evacua demasiado material, la presión en el frente disminuye y existe riesgo de subsidencia o entrada de agua; si se evacua demasiado poco, la presión aumenta y se puede inducir levantamiento del terreno. Una vez descargado del sinfín, el material se traslada mediante cintas, tolvas o contenedores para su gestión fuera del pozo.

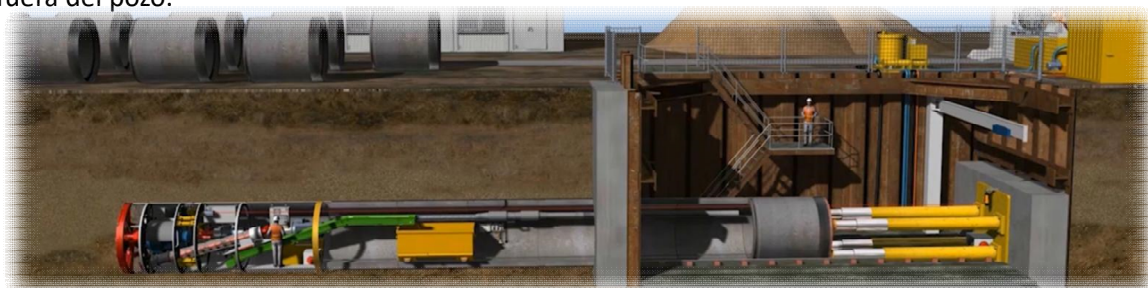


Figura 54. Línea de extracción. Herrenknecht 2025.

#### 3.4.1.2.2.2. EBP Híbrido. Sinfín exterior y planta de separación

En un sistema híbrido EPB–Slurry, el proceso de extracción del material excavado se desarrolla en dos etapas consecutivas, combinando el desplazamiento mecánico inicial y el transporte hidráulico posterior hasta la superficie. Una vez que el cabezal de corte disgrega el terreno, este ingresa en la cámara situada detrás del frente, donde es recogido por el tornillo sinfín, que efectúa una primera fase de extrusión volumétrica del suelo, trasladándolo desde la zona de presión hacia un sector de descarga. El tornillo actúa como elemento de transferencia y regulación, impulsando el material hacia una cámara secundaria o punto de entrega, donde el suelo se mezcla con un fluido acondicionador (slurry), habitualmente formado por bentonita o polímeros, que lo transforma en una suspensión bombeable.

A partir de esa segunda cámara, la extracción continúa por vía hidráulica, mediante la activación de bombas de lodos, que aspiran y propulsan la mezcla sólida–fluido hacia una tubería de impulsión. El flujo circula bajo presión hasta alcanzar el punto de destino, generalmente ubicado en la superficie, donde el material descargado es depositado o sometido a procedimientos de separación, si se dispone de ellos. El efecto combinado del tornillo y del caudal de bombeo evita la compactación del suelo en la zona de transición y permite mantener una extracción continua, incluso cuando el material excavado presenta granulometrías que no serían fácilmente desplazables únicamente por transporte mecánico.

El correcto funcionamiento del proceso depende de la sincronización entre el caudal volumétrico evacuado por el tornillo y el caudal hidráulico bombeado, evitando acumulaciones intermedias o vacíos en la línea. El fluido empleado debe poseer una viscosidad suficiente para mantener partículas en suspensión durante el trayecto de bombeo, de modo que no se produzcan sedimentaciones en la tubería, ni se genere bloqueo en el punto de transferencia. De esta forma, el sistema híbrido garantiza que el suelo pasa directamente desde la cámara de excavación a la superficie a través de una secuencia combinada: extrusión mecánica inicial → mezcla con fluido → bombeo hidráulico → descarga final, conformando una ruta de extracción continua y controlada.

La transformación, aunque haya que aplicarla una sola vez, tiene un coste muy elevado, por la necesaria duplicación de las instalaciones de transporte de escombros, (cinta continua/transporte hidráulico y planta de separación) todo ello con un coste muy importante que ha de amortizarse en la obra. (Mendaña Savedra & Fernández Martínez, 2011).

### 3.5. *Sistemas de logística de empuje, guiado y avance.*

#### 3.5.1. *Sistema de Jacking.*

El sistema de empuje (*pipe jacking*) constituye el método fundamental mediante el cual se impulsa la microtuneladora (MTBM). Dicho empuje también se aprovecha para la instalación de las tuberías de revestimiento desde el pozo de ataque, transmitiendo fuerza axial continua a lo largo de la conducción. Este procedimiento se desarrolla en el interior del pozo de lanzamiento o ataque, estructura que deberá ser construida previamente y que alojará los elementos de reacción y empuje, garantizando condiciones geométricas y resistentes adecuadas para iniciar la perforación.

El proceso inicia con la construcción de un muro de reacción, generalmente ejecutado en hormigón armado de alta resistencia, diseñado para absorber la totalidad de las cargas de empuje generadas durante el avance. Contra dicho muro se apoya el cajón o bastidor de empuje, así como una estructura metálica guía donde se posicionan los gatos hidráulicos principales (main jacks).

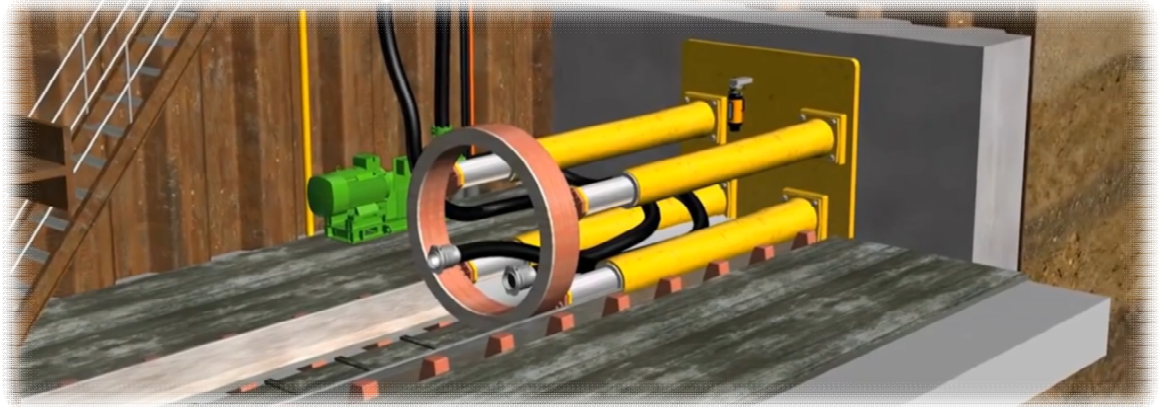


Figura 55. Muro de empuje y equipo de hincado. Herrenknecht 2025.

Dentro de los equipos de hincados empleados en microtunelación, el sistema de empuje se apoya sobre un bastidor o marco estructural, que actúa como elemento de transmisión de carga entre los gatos hidráulicos y la tubería a instalar. En función de las necesidades de carrera, capacidad de empuje y del espacio disponible en el pozo de ataque, presenta dos configuraciones principales:

El bastidor de empuje compacto es una estructura metálica de tamaño reducido diseñada para ser instalada en pozos de ataque con espacio limitado y en hincas de diámetros pequeños o medios. Su configuración integra en un único bloque el marco estructural, los gatos hidráulicos principales y la placa de empuje que transmite la fuerza a la tubería. Esta disposición permite una transferencia directa de carga, pero debido a su carrera de empuje corta, requiere detener el avance con mayor frecuencia para recolocar los gatos. Por su simplicidad, bajo coste y rapidez de montaje, se utiliza habitualmente en microtunelaciones de longitud moderada o en entornos urbanos donde el espacio disponible en el pozo es muy reducido.

Por otra parte, el bastidor de empuje no compacto o doble está concebido para operaciones de mayor exigencia, como hincas largas, diámetros elevados o cuando se prevén fuerzas significativas de fricción durante el avance. Este bastidor está formado por dos marcos paralelos o telescópicos que amplían la carrera útil de empuje, permitiendo que los gatos hidráulicos se desplacen dentro del conjunto y reduzcan la frecuencia de recolocación. Gracias a esta mayor longitud efectiva y capacidad estructural, se incrementa la fuerza de empuje disponible y se mejora el control de la alineación axial del tren de tuberías. Su utilización implica la necesidad de un pozo de ataque de mayores dimensiones y un montaje más complejo.

Característica	Bastidor compacto	Bastidor no compacto / doble
Carrera de empuje	Corta	Larga
Frecuencia de recolocación	Alta	Baja
Capacidad de empuje	Medía	Alta
Espacio necesario en pozo	Reducido	Amplio
Complejidad / coste	Bajo	Alto
Uso típico	Obras pequeñas–medias, pozos restringidos	Longitudes grandes, diámetros grandes, cargas elevadas

Tabla 2. Aplicación de bastidores comparados. Elaboración propia.

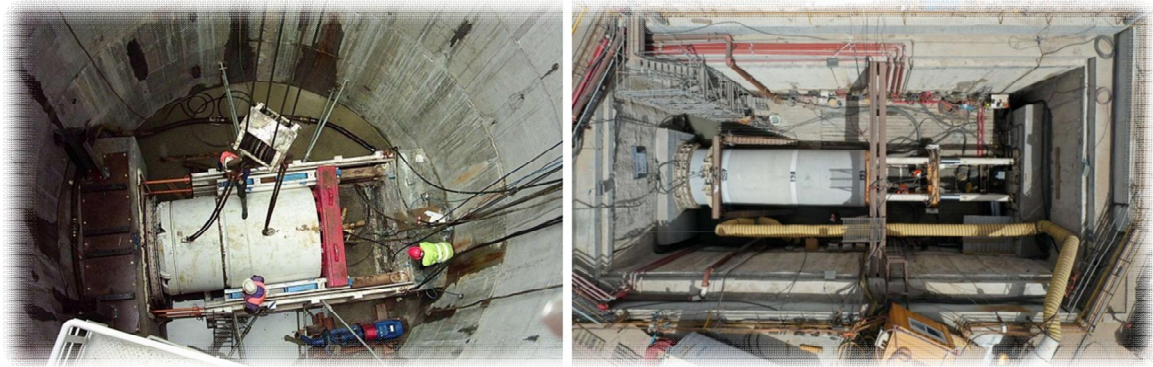


Figura 56. Bastidor compacto y bastidor no compacto doble. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.

Estas unidades hidráulicas —ubicadas entre el bastidor y la tubería a empujar— transforman la

**EQUIPOS DE PERFORACIÓN / HINCA DE TUBERÍA / SEGOQUI HT-2000**

Equipos de empuje para perforación e instalación de tubería de gran diámetro. Se utilizan tanto para tubería de hormigón como para tubería metálica, y las máquinas de corte son escudos abiertos con brazo rozador o brazo de retroexcavadora.

Estos equipos, que permiten perforar y colocar el tubo de manera simultánea, pueden trabajar para diferentes diámetros, desde 1.500 mm hasta 3.000 mm, y son idóneos para llevar a cabo perforaciones por debajo de carreteras, ferrocarril, etc.

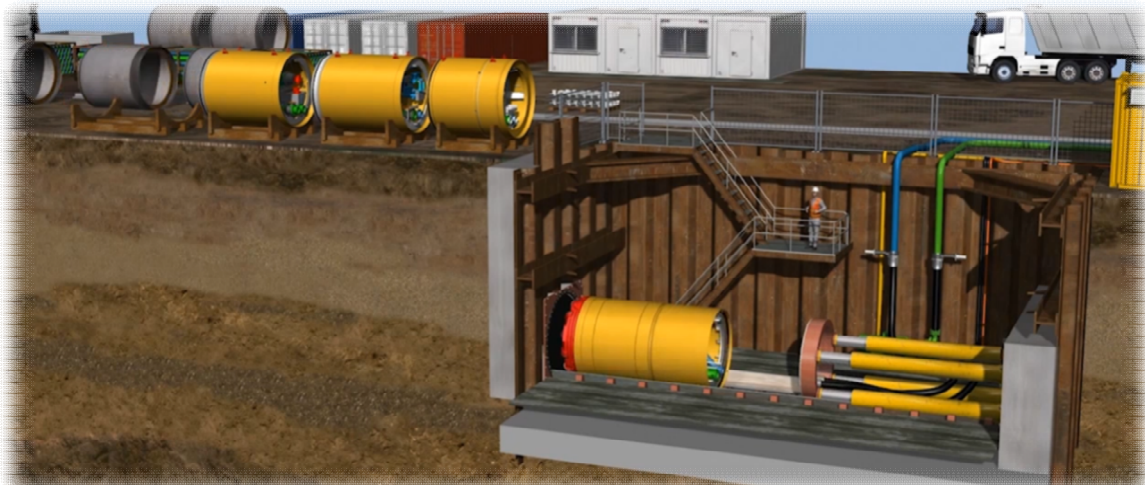
**SEGOQUI HT-2000 - CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS**

PERFORADORA HT-2000	
Propósito:	Hinca de Tubería de hormigón y metálica desde ø1.000mm a ø3.000mm, cambiando los escudos de empuje.
Capacidad total de Empuje:	1.000 toneladas a 350 bar.
Cilindros de Empuje:	4 cilindros de 2.700mm de carrera.
Bancada de Apoyo:	Regulable para adaptar al ancho de diferentes Escudos.
Cabrestante de recogida:	Para extraer material con 4.800kg de tiro y embrague manual.
Varios:	Placa de anclaje – muro reacción.
GRUPO HIDRÁULICO HT-2000	
Potencia de Grupo:	Motor Diesel 75 kw (100 H.P) a 1.800 r.p.m.
Hidráulico:	De pistones y caudal variable.
Bombas Hidráulicas:	De pistones y caudal variable.
Principales:	
Tanque de Aceite:	1.000 litros.
Tanque de Gasóleo:	150 litros.
Varios:	Caseta carenada e insonorizada, apta para transporte y manipulación.
	Control regulable de velocidad y presión de empuje en el tubo.
OPCIONALES PARA LOS EQUIPOS	
	Kit completo de Accionamiento Vía Radio

presión de aceite generada por una central hidráulica en una fuerza de compresión axial de alto tonelaje. Para microtuneles típicos, los empujes pueden oscilar desde cientos de kN hasta varios MN, dependiendo del diámetro, la longitud del tramo de empuje y las condiciones geotécnicas. La microtuneladora se instala inicialmente en este bastidor y,

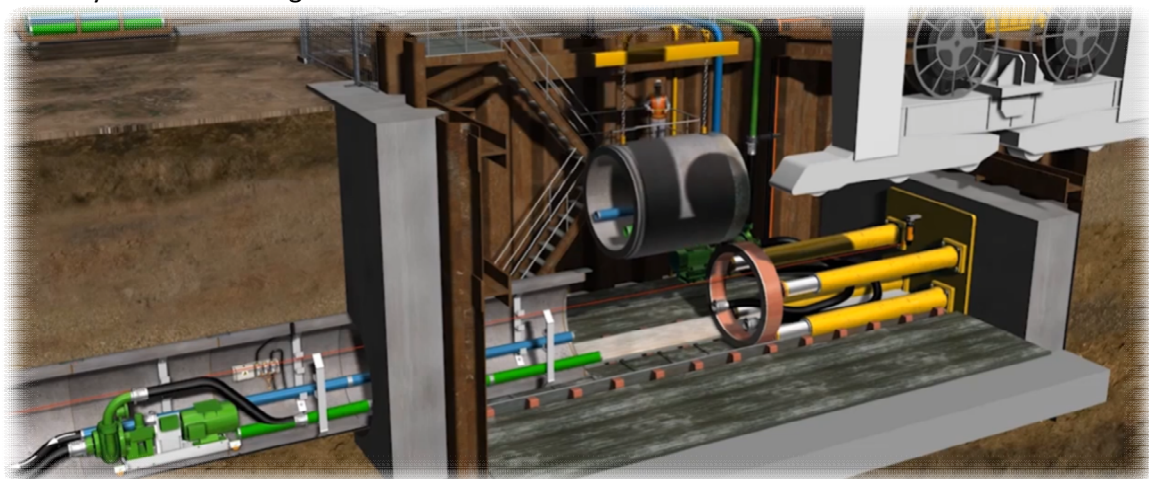
Figura 58. Ficha técnica de equipo de hinc. Sequoi HT-2000.

mediante la activación progresiva de los gatos, es impulsada hacia el terreno, iniciándose la excavación. El gato principal empuja la máquina y comienza la excavación. Una vez que la máquina ha penetrado en el terreno, se instala la primera sección de tubería inmediatamente detrás de ella. A medida que el gato principal empuja las tuberías que han de instalarse, la excavación se realiza simultáneamente en el frente de la máquina (Ueki et al., 1999).



*Figura 59. Posicionamiento de la microtuneladora sobre zona de empuje. Herrenknecht 2025.*

Una vez que el MTBM ha penetrado lo suficiente, se introduce el primer tubo a instalar, que actúa como segmento estructural de la conducción. A partir de ese momento, el proceso se vuelve cíclico: los gatos empujan simultáneamente el conjunto tubo-máquina; cuando alcanzan el máximo recorrido, se retraen, se interpone un nuevo tubo y el ciclo de empuje continúa. Durante este proceso, es fundamental el uso de juntas antifricción y lechadas lubricantes, normalmente bentoníticas o poliméricas, inyectadas en el anular entre la tubería y el terreno para reducir la fricción y evitar sobrecargas en la estructura.



*Figura 60. Disposición de tubos de hormigón hincados. Herrenknecht 2025.*

Cuando se alcanzan longitudes considerables de microtúnel —habitualmente superiores a 80–120 m, según diámetro—, el empuje axial pierde eficacia debido a la acumulación de rozamiento lineal.

Para contrarrestarlo, se instalan estaciones intermedias de empuje (*intermediate jacking stations, IJS*), consistentes en anillos o dispositivos hidráulicos insertos entre tramos de tubería, que permiten redistribuir la carga y transmitir el empuje desde secciones posteriores, evitando daños por tracción excesiva o rotura de juntas.

La fuerza de empuje de hincado depende del diámetro, la clase de presión y la relación con el espesor. Durante el proceso de hincado, el ángulo entre los ejes de las tuberías determina la fuerza de hincado permitida. La fuerza de hincado permitida se calcula para una excentricidad máxima con la unión cerrada [Es decir, contacto total en un borde de la tubería, cayendo a cero en el otro borde], utilizando la resistencia a compresión mínima declarada de la tubería.

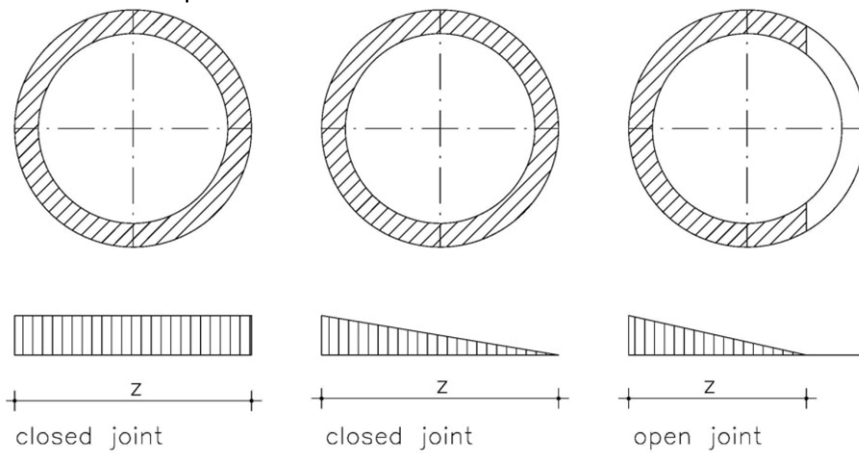


Figura 61. Fuerza de empuje admisible. Distribución de esfuerzos de compresión. XI Ed. curso de postgrado Especialista en tecnología sin zanja 2025. IBSTT.

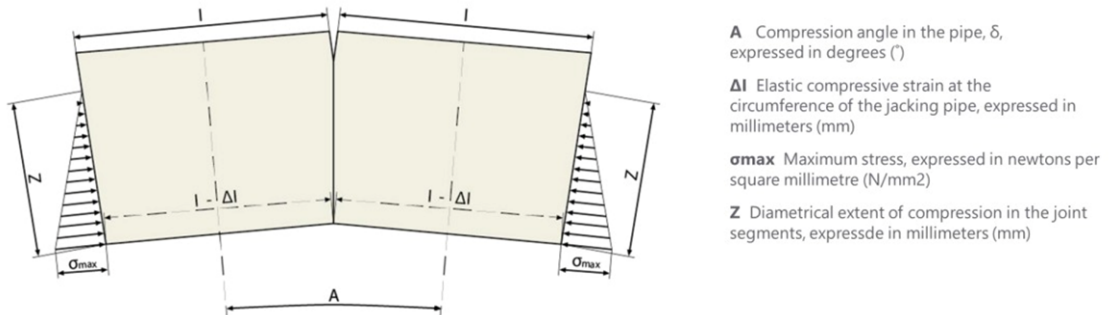


Figura 62. Open Joint. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.

Un hincado completamente recta no existe, siempre surgen desviaciones que someten al tubo a esfuerzos diferenciales. Las correcciones sobre alineaciones provocan contactos entre tuberías y entre tuberías y relleno.

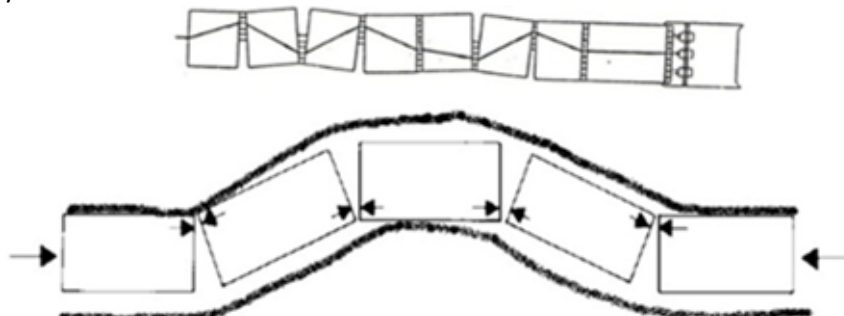


Figura 63. Desviaciones de alineación y corrección. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.

El sistema de *pipe jacking* en microtunelación se caracteriza por la acción conjunta de: un muro de reacción que absorbe esfuerzos; gatos hidráulicos que transforman presión en empuje axial; un bastidor guía para posicionar conexiones; tuberías hincadas que forman el revestimiento estructural final; lubricación anular para reducir fricción; y, en tramos largos, estaciones intermedias de empuje que aseguran la continuidad operativa y la integridad estructural durante el avance.

### 3.5.1.1. Empuje directo.

La viabilidad técnica y la rentabilidad económica del hincado de tuberías dependen principalmente de la magnitud de las fuerzas de empuje. Estas determinan la capacidad requerida del sistema de empuje y el diseño del muro de reacción que absorbe las fuerzas de empuje, así como las tensiones que se generan en las tuberías. (Namli & Guler, 2017)

El empuje directo en operaciones de *pipe jacking* constituye el mecanismo mediante el cual se transmite la fuerza axial necesaria para avanzar la conducción dentro del terreno a través de los tubos de hinca. Desde el punto de vista estructural y mecánico, el empuje aplicado por los gatos hidráulicos debe ser soportado por las secciones extremas del tubo en contacto, de modo que la resistencia al aplastamiento y la capacidad de las juntas condicionan el límite máximo admisible de carga. Para el dimensionamiento del empuje directo se parte del cálculo de la superficie comprimida de la unión entre tubos, denotada como  $A_c$ , que corresponde al área efectiva sometida a esfuerzos de compresión perpendicular a las caras extremas de los tubos. Esta área se obtiene a partir de la diferencia de diámetros exterior e interior del tubo mediante la expresión:

$$A_c = \frac{(d_e^2 - d_i^2) \cdot \pi}{4}$$

*Fórmula 1.-Superficie comprimida de la unión entre tubos.*

donde  $d_e$  es el diámetro exterior del tubo y  $d_i$  el diámetro interior. Sobre esta superficie actúa la fuerza máxima perpendicular  $F_{j\max}$ , la cual está limitada por la resistencia característica del material del tubo (habitualmente hormigón), expresada mediante el coeficiente  $f_{ck}$ . Para garantizar la seguridad estructural, se aplica un coeficiente de seguridad de 1,67, obteniéndose una resistencia de cálculo equivalente a aproximadamente el 60% de la resistencia característica:

$$F_{j\max} = 0,6 f_{ck} A_c$$

*Fórmula 3.-Fuerza máxima perpendicular.*

Este valor determina la carga máxima que puede soportar el extremo del tubo, siempre bajo la premisa de un contacto uniforme y perfectamente alineado entre caras. Cualquier desviación en el paralelismo produce tensiones excéntricas y reduce la capacidad resistente. A partir de esta condición límite de empuje, se distinguen dos escenarios operativos definidos por el tipo de unión entre tubos:

### Caso de unión cerrada

Corresponde a tuberías con juntas que permiten un apoyo de cara completa entre los extremos. En este caso, la fuerza máxima admisible en la junta  $F_{cj}$  se limita al 50% del empuje máximo calculado:

$$F_{cj} \leq 0,5 F_{j\max} \Rightarrow F_{cj} = 0,5 F_j \leq 0,3 f_{ck} A_c$$

*Fórmula 5.-Unión cerrada*

### Caso de unión abierta

En esta condición, el contacto entre extremos no ocurre en toda la superficie, sino solo en una fracción de ella debido a holguras, geometría o juntas tipo campana, lo cual se expresa mediante un coeficiente de excentricidad  $e \leq 1$ . La fuerza máx. soportable se reduce proporcionalmente a:

$$F_{oj} \leq 0,3 e f_{ck} A_c \text{ donde } F_{oj} = e F_{cj}$$

*Fórmula 7.-Unión abierta*

Este caso es más desfavorable, siendo crítico en hincas de alta longitud o cuando existe riesgo de apertura de junta por variaciones geométricas o asentamientos diferenciales.

En términos operativos, el empuje transmitido debe ser controlado para que el valor real aplicado por los gatos hidráulicos nunca supere la resistencia mínima entre ambas situaciones.

Mediante la aplicación continua de inyección de bentonita incluso a presiones muy bajas, puede crearse una interfaz entre la lechada de bentonita y una tubería de hormigón, y que esta interfaz de bentonita es capaz de reducir significativamente el coeficiente de fricción hasta aproximadamente un 10 % del coeficiente de fricción (Namli & Guler, 2017). Asimismo, el diseño debe considerar las pérdidas de carga por fricción entre tubo y terreno, la presencia de lubricación anular para reducir estas fuerzas, y la posible necesidad de estaciones intermedias de empuje si la distancia de hinca excede el límite admisible de carga estructural en los tubos. En la actualidad, la estimación de la fuerza de empuje (*jacking force*) suele realizarse mediante métodos empíricos. El uso de estos métodos empíricos puede conducir a un sobredimensionamiento innecesario de la fuerza de empuje, lo que incrementa de manera significativa los costes globales de un proyecto de hinca. (Ji et al., 2019).

#### **3.5.1.2. Estaciones intermedias.**

Las estaciones intermedias de empuje (IJS) son dispositivos hidráulicos instalados entre tramos de tubería dentro del tren de hinca, cuya función principal es redistribuir el esfuerzo de empuje y reducir las cargas axiales transmitidas al tubo líder o cabeza de perforación durante la ejecución del microtúnel. Se emplean cuando la longitud de hinca supera el límite estructural admisible de la tubería —habitualmente entre 80 y 200 m, dependiendo del diámetro, material, rozamiento anular y existencia de lubricación—, o cuando se prevé un aumento significativo de fricción debido a

curvaturas, asentamientos o terrenos abrasivos. Cuando las fuerzas de empuje superan la capacidad de alguno de estos elementos, debe reducirse la distancia entre los pozos de arranque y recepción, o bien deben instalarse estaciones de empuje intermedias a intervalos regulares en la línea de tuberías para superar las fuerzas excesivas. (Namli & Guler, 2017).

En un proceso de *pipe jacking*, si el empuje total es ejercido únicamente desde el pozo de ataque, la carga axial se transmite a lo largo de todo el tren de tubos, incrementándose progresivamente con la distancia y pudiendo superar la resistencia admisible en juntas y secciones. Las IJS actúan como puntos de empuje suplementarios, generando una nueva sección de carga más próxima a la cabeza de excavación. De esta forma se evita la sobretensión por compresión y el riesgo de fisuración longitudinal o rotura de juntas.

Cada estación está compuesta por:

- Cilindros hidráulicos anulares o segmentos con varios pistones radiales,
- Anillo de transmisión de carga (acero o madera con junta de goma),
- Cámara sellada entre tubos para asegurar estanquidad,
- Válvula de inyección de lubricante para reducir fricción en juntas,
- Sistema de alimentación hidráulica flexible, conectado al pozo principal mediante mangueras

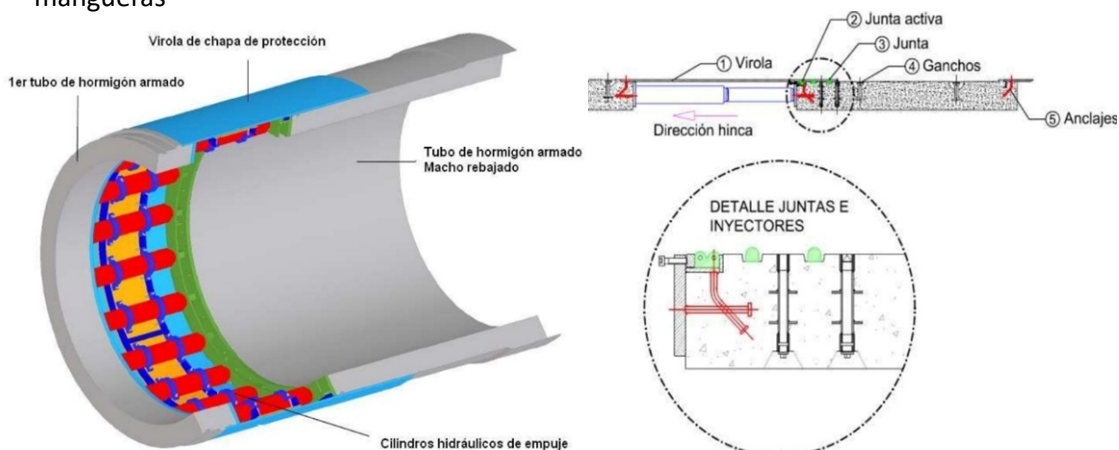


Figura 64. Detalle de estación intermedia. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.

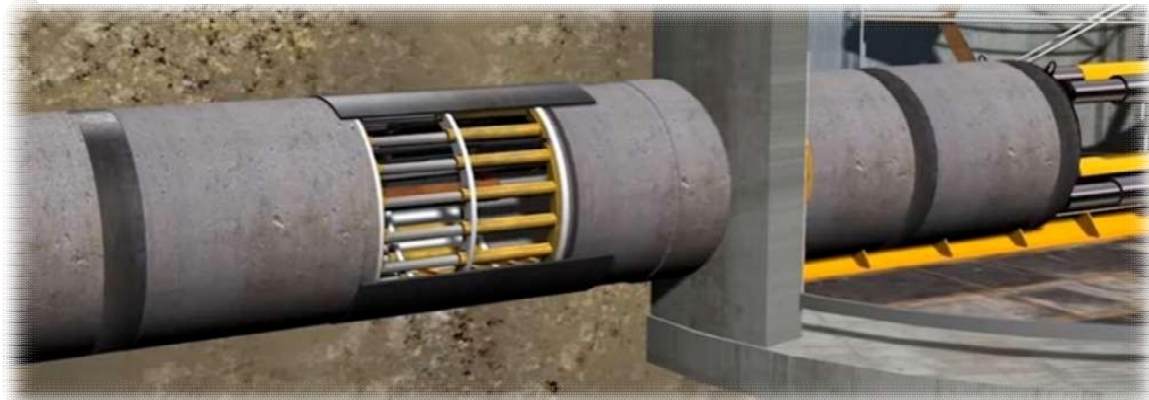


Figura 65. Vista de instalación de estación intermedia en línea de empuje. Herrenknecht 2025.

La excavación de pozos adicionales no solo puede resultar costosa, sino que también provoca perturbaciones en la superficie, lo cual puede no ser aceptable en determinados entornos. (Namli & Guler, 2017)

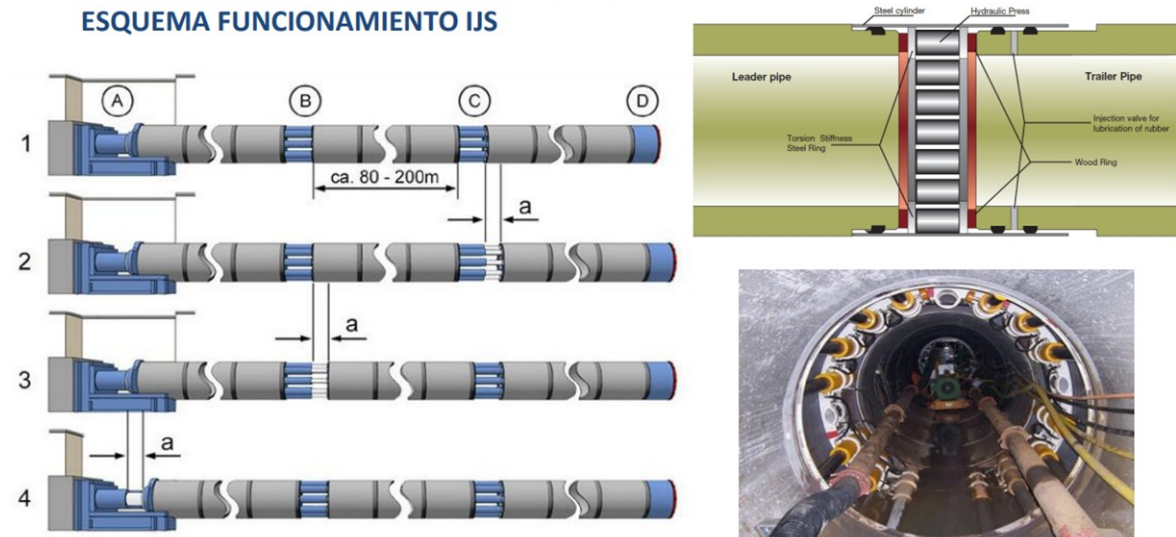


Figura 66. Esquema de funcionamiento de una estación intermedia. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.

El funcionamiento se entiende en cuatro fases:

#### Inicio – Empuje desde pozo de ataque (posición 1)

Los gatos principales del bastidor impulsan todo el tren de tuberías. La IJS permanece retraída, sin carga.

#### Transferencia de carga (posición 2)

Al alcanzarse el recorrido máximo de los gatos principales, los cilindros de la IJS se presurizan, apoyándose entre los tubos y reteniendo el avance ya conseguido. En este momento, el tren queda "bloqueado" temporalmente mediante la estación intermedia.

#### Retracción del sistema principal (posición 3)

Los gatos principales en el pozo se retraen para permitir la inserción de una nueva tubería. Durante esta fase, es la IJS la que sostiene el empuje acumulado, impidiendo retrocesos.

#### Reinicio del empuje (posición 4)

Una vez insertado el nuevo tubo, los gatos principales vuelven a empujar, la IJS se despresuriza y el proceso se repite cíclicamente hasta completar el microtúnel.

La distancia entre estaciones suele determinarse mediante cálculo de fricción lineal:

$$F_{fr} = \mu \cdot p \cdot \pi d \cdot L$$

*Fórmula 9.-Fricción lineal*

donde  $\mu$  es el coeficiente de fricción,  $p$  la presión radial de contacto,  $d$  el diámetro y  $L$  la longitud acumulada. Cuando  $F_{fr} \geq F_{adm}$ , es obligatoria la colocación de una IJS.

La fuerza de empuje (jacking force) puede determinarse sumando la resistencia por fricción y la presión de tierras actuando sobre el frente del escudo. (Ji et al., 2019)

Las IJS deben usarse conjuntamente con un sistema de lubricación anular, mediante inyección de bentonita, polímeros o emulsiones en el espacio entre tubo y terreno, para minimizar coeficiente de fricción y evitar sobrecargas en la estación o en las juntas. Una lubricación eficaz puede reducir considerablemente las fuerzas de empuje, permitiendo alcanzar longitudes de avance significativamente mayores. (Namli & Guler, 2017). Las estaciones intermedias de empuje permiten multiplicar el alcance de una hinca y proteger estructuralmente la conducción al generar puntos auxiliares de empuje, evitando concentraciones de carga y posibilitando ejecuciones de largo alcance con control de tensiones. Las estaciones intermedias de empuje conllevan complicaciones operativas que incrementan significativamente tanto el costo total del proyecto como el tiempo de construcción. (Namli & Guler, 2017).

El término *Long Distance Microtunneling* se emplea para describir ejecuciones de microtunelación cuyo alcance supera la longitud convencional de avance en una sola fase de empuje, generalmente por encima de 150–200 m, pudiendo alcanzar tramos superiores a 600–1.000 m, dependiendo del diámetro, terreno, materiales de la conducción y los recursos auxiliares instalados. La principal complejidad técnica asociada a estos trabajos radica en el incremento exponencial de la fricción entre el tubo y el terreno a medida que avanza la hinca, así como la necesidad de mantener la alineación y estabilidad geométrica del trazado durante longitudes significativas y bajo condiciones geotécnicas variables. Para hacer viable este tipo de ejecuciones es imprescindible el empleo de sistemas auxiliares de control de carga, dentro de los cuales destacan las estaciones intermedias de empuje (Intermediate Jacking Stations – IJS), que redistribuyen el esfuerzo y evitan que la totalidad de la carga axial recaiga únicamente sobre el primer tramo de tubería. En longitudes extremas se puede incorporar lubricación secuencial, sectorizada por fases o monitorizada mediante caudalímetros y sensores de presión para optimizar su rendimiento.

Este tipo de intervenciones exige también un control milimétrico de la trayectoria mediante sistemas avanzados de guiado láser y orientación, siendo necesario prever la absorción de desviaciones mediante correcciones activas en la cabeza de corte.

### 3.5.2. *Sistemas de guiado.*

Durante el proceso de hincado, la cabeza de corte presenta algunos problemas, como fuerza desigual, oscilación mecánica y lechada desigual, lo que provoca que la trayectoria de hincado se desvíe del diseño previsto (Qiu et al., 2025). El éxito de una excavación mediante microtunelación depende, además de la estabilidad del frente y la capacidad de empuje, de la precisión geométrica con la que la microtuneladora (MTBM) sigue la alineación proyectada. La tecnología de guiado en hincado permite obtener la trayectoria de ejecución mediante la recopilación de información sobre la actitud (orientación) y la posición de la máquina tuneladora de hincado. Con ello se garantiza que la desviación entre la trayectoria real y la alineación proyectada en los planos de diseño se mantenga dentro de los límites admisibles, evitando daños a infraestructuras y servicios existentes provocados por desviaciones durante la construcción (Qiu et al., 2025). A diferencia de otros métodos sin zanja, en los que la desviación se corrige posteriormente, la microtunelación requiere un control continuo de posición y dirección durante toda la ejecución, dado que la tubería instalada constituye la conducción definitiva y no admite ajustes posteriores sin intervención destructiva. Para ello, las máquinas de microtunelación incorporan sistemas de guiado y posicionamiento que permiten conocer en tiempo real la ubicación tridimensional del escudo, detectar desviaciones respecto al eje teórico y transmitir órdenes de corrección mediante cilindros de orientación integrados en la cabeza de corte. Existen muchas ventajas en el uso de la microtunelación. Mediante cabezales mecánicos controlados de forma remota y guiados con haces láser, puede alcanzarse una precisión muy alta (normalmente menor a 2 cm por cada 100 m) tanto en alineación como en rasante (Ueki et al., 1999)

Los sistemas de guiado pueden apoyarse en referencias externas —como el rayo láser proyectado desde el pozo de ataque— o en referencias autónomas internas, basadas en sensores inerciales o giroscópicos que permiten determinar orientación y recorrido en condiciones donde la visibilidad directa no es posible (como longitudes elevadas, curvas o presencia de agua o suspensión). La selección del sistema adecuado depende de factores como la longitud de hincado, curvatura del trazado, clase de terreno, nivel freático, y requisitos de precisión de proyecto. En condiciones estándar y en trazados rectos, el guiado se realiza mediante láser directo; mientras que, para distancias largas o geometrías no rectilíneas, se emplean giroscopios, sensores inerciales y sistemas para curvas tridimensionales que permiten controlar la posición del MTBM en ausencia de visibilidad o en geometrías complejas.

### 3.5.2.1. Láser directo.

El sistema de guiado por láser directo constituye el método más empleado en microtunelación para control geométrico cuando el trazado es recto y la línea de visión entre el pozo de ataque y la cámara trasera del MTBM permanece libre y estable. Su principio de



Figura 67. Vista interior de láser. Fuente propia.

funcionamiento se basa en la proyección de un haz láser colimado desde un instrumento ubicado en el pozo de ataque, el *láser*, hacia el interior del escudo, donde es recibido y medido mediante un sensor óptico de posición.

En el sistema con prisma único, las coordenadas ingenieriles se transfieren desde el punto de control en el pozo de ataque hasta el prisma objetivo montado en la TBM mediante varias RTS, con el fin de obtener las coordenadas de ingeniería del centro de la cola de la TBM(Pan & Fan, 2020).

La máquina interpreta la desviación del punto láser respecto al centro geométrico definido, enviando órdenes a los cilindros de orientación de la cabeza para corregir la trayectoria.

El sistema se compone fundamentalmente de cuatro elementos:

1.-Emisor láser: Equipo instalado sobre un trípode o bancada rígida en el pozo de ataque, alineado según el eje teórico de diseño. Emite un haz láser de baja divergencia que define físicamente la trayectoria prevista. Requiere un proceso previo de nivelación y ajuste fino mediante colimación con instrumentos topográficos.



Figura 68. Emisor láser anclado a bancada. Herrenknecht 2025.

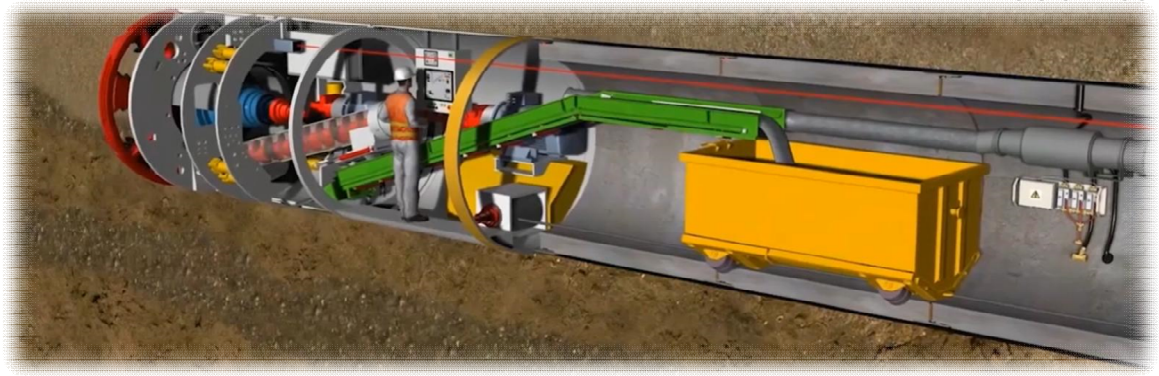


Figura 69. Vista laser del interior de la MTBM sobre diana receptora. Herrenknecht 2025.

2.-Placa o diana receptora: Ubicada en la parte posterior del MTBM, normalmente en la zona de cola del escudo o en el interior de un marco protegido, intercepta el haz láser. Puede incorporar celdas fotoeléctricas, sensores CCD o matrices ópticas que detectan la posición relativa del punto láser en dos coordenadas (plano horizontal y vertical).

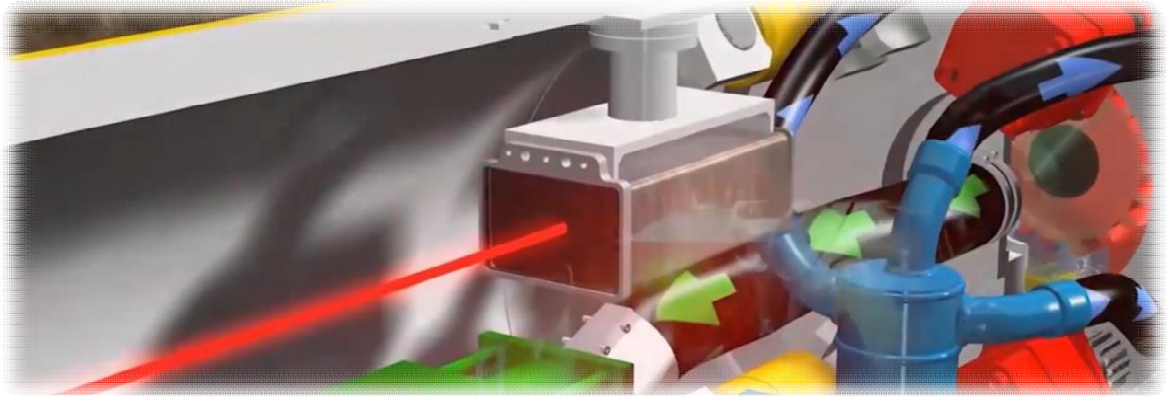


Figura 70. Diana receptora. Herrenknecht 2025.

4.-Unidad de procesamiento y transmisión de datos: Recibe la información de la diana y la convierte en coordenadas de desviación respecto al eje teórico. Envían estos valores al panel de control del operador, permitiendo una visualización en tiempo real del error angular y de la distancia lateral o vertical respecto al diseño.

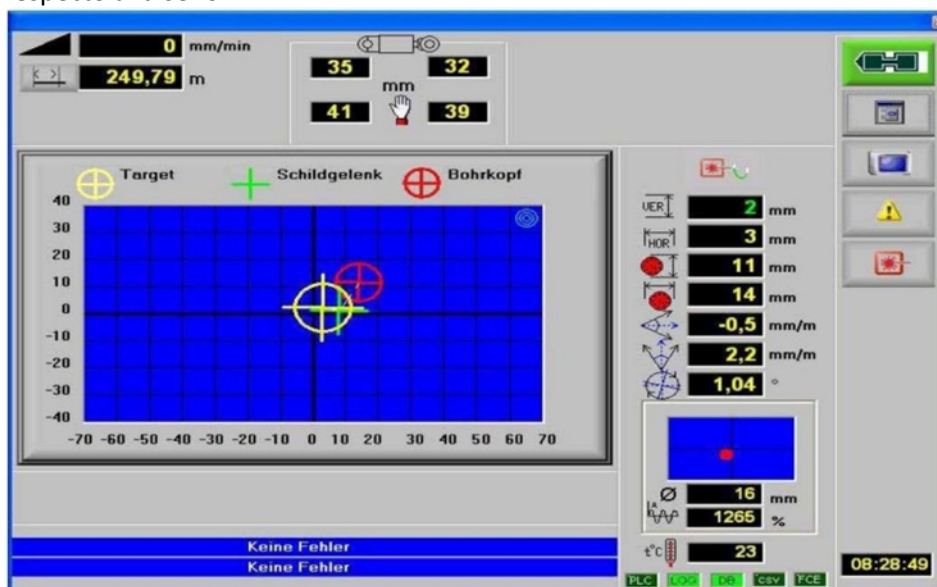


Figura 71. Interface de sistema de control de guiado. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.

Durante la operación, el operador supervisa continuamente la posición del punto láser sobre la diana. Una desviación en el plano vertical indica necesidad de corrección en pendiente, mientras que un desplazamiento en el plano horizontal refleja una deriva lateral. Al medir con precisión la trayectoria, el personal de obra puede conocer con exactitud la actitud y la posición de la máquina de hincado, lo que puede ayudarles a identificar y abordar posibles riesgos de seguridad a tiempo y garantizar la seguridad en la construcción.(Qiu et al., 2025).

El láser directo requiere condiciones geométricas estables: presencia de túnel inundado, vapor, presencia de bentonita en suspensión, o curvas pueden dispersar el haz y generar pérdida de señal. constituye la técnica más simple y precisa dentro de condiciones estables.

Los últimos avances permiten efectuar guiados laser incluso en tramos curvos, tal y como se puede ver en las siguientes figuras.

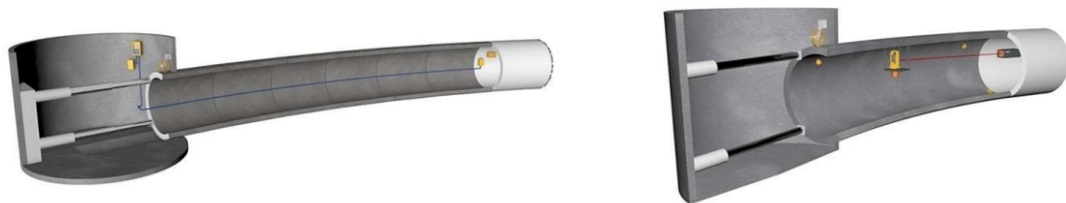


Figura 72. Sistema de guiado laser en alineación curva. TuNis Navigation. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.

### 3.5.2.2. Giroscopio.

El guiado por giroscopio se emplea en microtunelación cuando no es posible mantener una línea de visión directa para sistemas láser, por ejemplo, en longitudes superiores a 150–200 m, presencia de curvas, pozos con atmósfera cargada de lodos o vapor, o condiciones en las que la suspensión bentonítica interfiera con el rayo láser. Su principio se basa en la medición de la orientación angular absoluta del escudo mediante un sensor giroscópico de alta precisión, que permite determinar la dirección de avance aun en ausencia de referencias externas.

El sistema se fundamenta en un giroscopio de precisión, que detecta el cambio de orientación respecto a un eje de referencia inicial mediante el principio de conservación del momento angular. Durante la puesta en marcha, el giroscopio se calibra y orienta topográficamente en el pozo de ataque, estableciendo una dirección absoluta (azimut). Una vez iniciado el avance, el sensor registra variaciones angulares en tres ejes espaciales, enviando datos en tiempo real a la unidad de control

Tendencia horizontal: es la diferencia entre la dirección de la máquina y el eje teórico DTA (mm/m).  
Rotación: es el giro de la máquina (grados decimales) que se puede determinar utilizando una plomada en la parte lateral del giroscopio.  
Tendencia vertical: es la diferencia entre la inclinación de

la máquina menos la inclinación del eje teórico DTA (mm/m). Punto métrico: es la distancia recorrida por la máquina desde un punto de referencia (m).

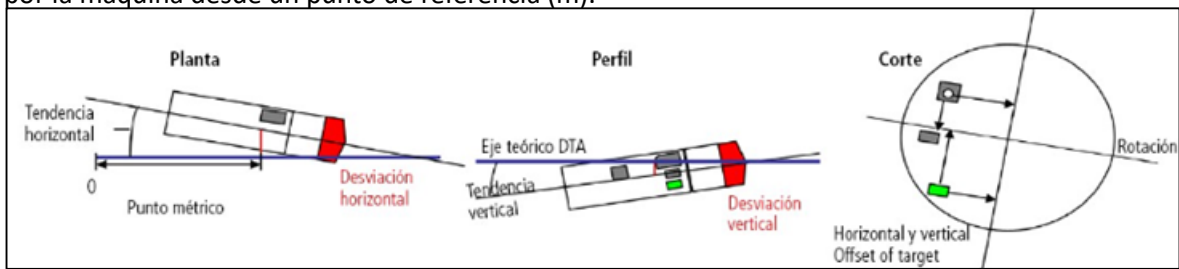


Figura 73. Sistema de medición con giroscopio. <https://www.smig.org.mx/revista-digital-smig/266/microtunel.php>

Los principales componentes del sistema son:

- 1.-Giroscopio principal: Sensor interno encapsulado en un módulo sellado, diseñado para operar en condiciones de vibración y humedad. Proporciona mediciones continuas de heading, roll y pitch, esenciales para conocer la orientación espacial del escudo.
- 2.-Unidad de medición auxiliar: dispositivo que registra la distancia lineal recorrida, necesario para transformar los cambios angulares en posición tridimensional acumulada.
- 3.-Unidad de control y procesamiento: Microprocesador que integra señales del giroscopio y del odómetro, aplica filtros y calcula la desviación real frente al diseño. El sistema puede almacenar histórico y generar alertas si se superan tolerancias.
- 4.-Interfaz operativo-corrección de trayectoria: panel donde el operador visualiza la posición y ordena correcciones mediante cilindros hidráulicos radiales de orientación.

Se debe realizar la corrección de la dirección real de la máquina (DRIFT), debido a que la tuneladora se desplaza en una dirección o eje diferente del eje longitudinal de diseño. En tramos rectos es fácil de realizar, porque se determina en función de los resultados de las comprobaciones de los controles y se ingresa al sistema UNS como una corrección; difícil es aproximarla en un trazo curvo. Es importante instalar el giroscopio desde la lumbrera de trabajo al inicio del túnel con trazo curvo, para calcular los valores iniciales que se toman en la parte externa de la microtuneladora y para realizar la corrección de la dirección real de la máquina.

El giroscopio presenta ciertas limitaciones: su precisión disminuye con el tiempo debido a la deriva acumulada, lo que obliga a realizar recalibraciones periódicas desde superficie mediante referencias topográficas o puntos de control. No obstante, su capacidad para funcionar sin visibilidad y en cualquier condición lo convierte en el método más fiable para microtunelación.

### 3.5.2.3. Sensor Inercial.

El guiado mediante sensor inercial se basa en el uso de una Unidad de Medición Inercial (IMU – Inertial Measurement Unit) instalada en el interior del escudo del MTBM, este sensor es capaz de determinar la posición y orientación tridimensional de la máquina mediante el registro continuo de aceleraciones lineales y rotacionales. Su funcionamiento se basa en los principios de dinámica de Newton y del efecto Coriolis: cuando la máquina sufre desplazamientos o giros, el sensor detecta variaciones de aceleración y velocidad angular, las integra matemáticamente y reconstruye así la trayectoria recorrida en ausencia de una referencia externa.

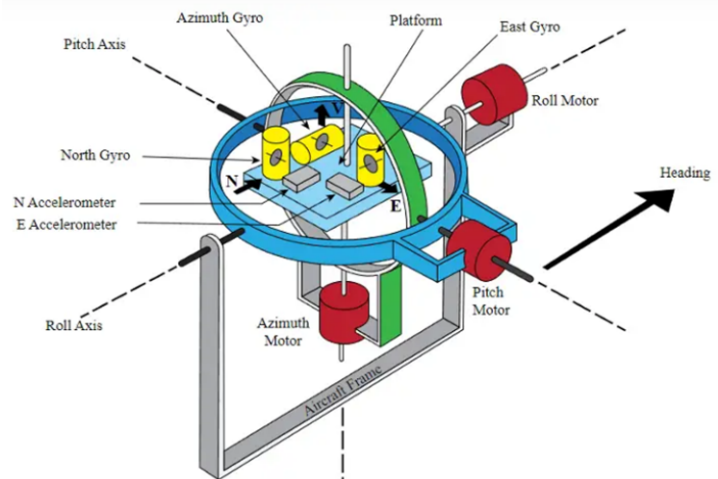


Figura 74. Sistema INS.

<https://www.dextermag.com/es/markets/defense/missiles/ine>

El sistema está constituido principalmente por tres componentes internos:

- 1.-Acelerómetros triaxiales: Dispositivos que miden aceleraciones en los tres ejes cartesianos (X, Y, Z). Permiten conocer movimientos lineales del escudo, cambios en pendiente y hundimientos o levantamientos del eje del túnel.
- 2.-Giroscopios MEMS o FOG integrados: Sensores que captan velocidades angulares y rotaciones alrededor de cada eje. Basan su funcionamiento en microestructuras vibrantes o tecnología de fibra óptica capaz de detectar el efecto Coriolis para cuantificar giros. Estos datos son críticos para definir la orientación espacial del MTBM.

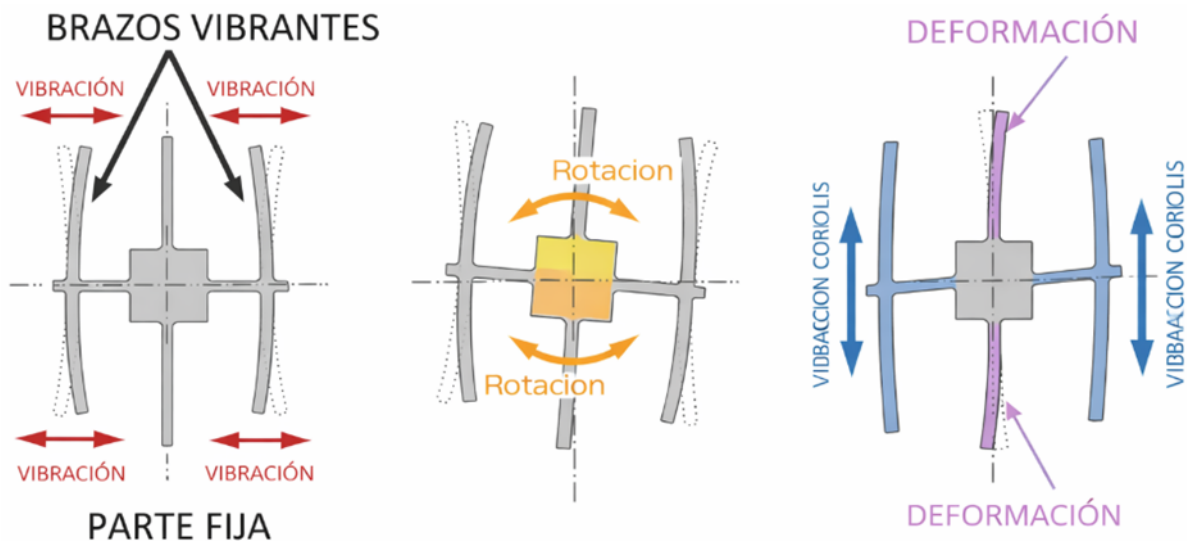


Figura 75. Esquema de giroscopios MEMS o FOG. <https://www.luisllamas.es/como-usar-un-giroscopio/>

**3.-Unidad de cálculo y fusión de datos:** Microcontrolador que combina las señales de acelerómetros y giroscopios mediante filtros avanzados (generalmente filtros de Kalman) para compensar ruido electrónico, vibraciones de la máquina y deriva acumulada. La unidad transmite al panel de control una posición estimada en coordenadas tridimensionales y un vector de orientación en tiempo real.

A diferencia del láser y el giroscopio autónomo, el sensor inercial no requiere una referencia visual o topográfica continua; es completamente independiente del entorno, pudiendo operar incluso bajo lodos, ausencia total de visibilidad, presencia de agua subterránea o recorridos curvos. Sin embargo, su precisión disminuye con el tiempo debido al fenómeno de deriva acumulada, causado por la integración sucesiva de pequeñas imprecisiones de medición. Por este motivo, el uso del sensor inercial suele combinarse con recalibraciones periódicas, referencias externas puntuales o correcciones realizadas en intervalos, especialmente en hincas de gran longitud.

En los últimos años, el método de guiado inercial ha sido ampliamente estudiado, sin considerar la curvatura y la distancia de la tubería en construcción. En aplicaciones de ingeniería práctica, cuando las condiciones de construcción son más exigentes, como diámetros pequeños, curvas y largas distancias, resulta difícil que un solo método cumpla con la precisión requerida y se adapte a todos los entornos de construcción en el ámbito de los métodos de guiado para la hincas de tuberías.(Qiu et al., 2025).

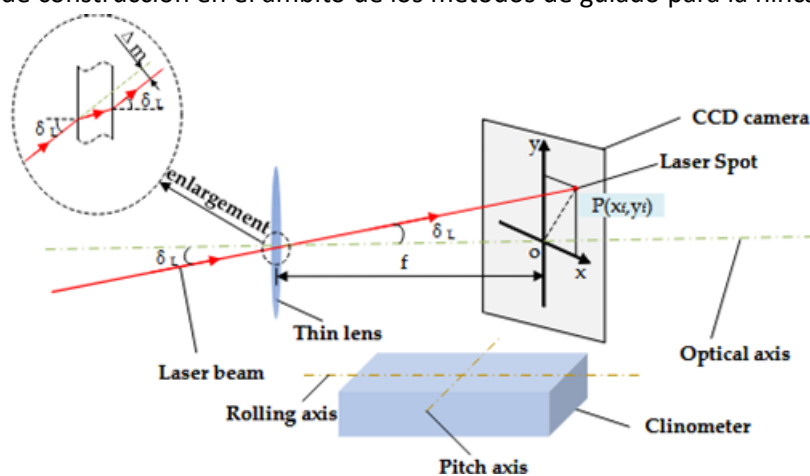


Figura 76. Esquema de sistema híbrido de guiado. Laser+ IMU. Qiu et al.,2025.

La estructura del objetivo láser está compuesta por múltiples componentes. Todo el equipo del objetivo láser se coloca dentro de una caja metálica herméticamente sellada, cuyo interior contiene lentes delgadas, una cámara CCD y un inclinómetro de doble eje, entre otros elementos. Dado que la distancia entre la superficie fotosensible y la lente delgada corresponde a la distancia focal  $f$  de dicha lente, el haz láser formará un punto con un radio uniforme determinado sobre la superficie fotosensible después de atravesarla. La cámara CCD registra la posición del punto láser, denotada como  $P(xf, yf)$ . El ángulo de acimut se calcula utilizando relaciones espaciales, mientras que el inclinómetro de doble eje captura los ángulos de cabeceo y de alabeo.(Qiu et al., 2025)

#### 3.5.2.4. Curvas tridimensionales. Sistemas de navegación avanzados.

En microtunelación moderna, la ejecución de conducciones no rectilíneas, especialmente curvas en planta y en alzado simultáneamente, requiere el empleo de sistemas de navegación avanzados, capaces de determinar con precisión la posición espacial del MTBM en tiempo real dentro de un modelo tridimensional. Estos sistemas permiten abandonar la geometría tradicional recta asociada al guiado por láser directo y posibilitan trazados curvos continuos, condición indispensable en entornos urbanos complejos donde deben evitarse interferencias con servicios enterrados, cimentaciones o infraestructuras existentes.

El principio de funcionamiento se basa en combinar un modelo digital del eje teórico del túnel, generado previamente mediante software CAD/GIS o modelos BIM, con un sistema de guiado tridimensional embarcado en la tuneladora. Este sistema utiliza la posición y orientación en tiempo real del escudo para compararla con la “línea 3D de diseño”, generando continuamente el error de posición y enviando instrucciones al sistema de orientación hidráulica para corregir la trayectoria.

Los componentes principales de estos sistemas son:

1.-Modelo digital de alineación 3D: Es el archivo matemático donde se define el trazado del túnel en tres dimensiones: coordenadas X–Y–Z, radios de curvatura, pendientes y transiciones geométricas. Constituye la base de referencia contra la cual se compara la posición real del MTBM.

2.-Unidad de medición de posición y orientación (INS/IMU): Constituida por sensores inerciales y giroscópicos de alta precisión, registra aceleraciones y rotaciones en los tres ejes espaciales. Su misión es proporcionar la ubicación instantánea estimada del escudo dentro del espacio tridimensional. En algunas versiones, el INS se complementa con un odómetro láser o encoder de avance, que ayuda a calcular distancia recorrida.

3.-Software de navegación tridimensional: Procesa los datos de los sensores y los compara con el modelo digital. Implementa algoritmos de filtrado, corrección de deriva y cálculo de desviaciones geométricas. Muestra al operador en pantalla la posición relativa del MTBM respecto al diseño, incluyendo desplazamientos en planta, alzado y vector de rumbo.

A nivel operativo, cuando se produce una desviación respecto al diseño 3D, el sistema calcula el error espacial mínimo y determina la corrección óptima para volver a la trayectoria teórica sin generar curvaturas secundarias no previstas. Todo ello debe ejecutarse sin exceder la curvatura mínima admisible del tubo instalado, que depende de su material, espesor, junta y radio de flexión permitido para no comprometer su integridad estructural.

### *3.6. Condicionantes para tener en cuenta en la elección de la tecnología.*

La selección del método constructivo en microtunelación e hinca de tuberías constituye una decisión crítica dentro del diseño y planificación de infraestructuras soterradas mediante tecnologías sin zanja. Dicha elección no puede abordarse únicamente desde la perspectiva técnica de la maquinaria disponible, sino que debe responder a un análisis integral donde convergen factores geotécnicos, hidrogeológicos, geométricos, ambientales, económicos y operativos propios de cada proyecto. La variabilidad de las condiciones del terreno, la presencia de nivel freático, la longitud y curvatura del trazado, el diámetro de la conducción, la disponibilidad de espacios auxiliares en superficie, así como los riesgos asociados a interferencias con servicios existentes, son determinantes que influyen de manera directa en el rendimiento, viabilidad y seguridad de la ejecución.

Asimismo, en un contexto donde las exigencias de control del impacto urbano y ambiental son cada vez mayores, la tecnología seleccionada debe garantizar no sólo la estabilidad del frente de excavación y la idoneidad del sistema de extracción del material, sino también la minimización de la afección superficial, la optimización de los recursos y el cumplimiento de criterios de sostenibilidad. En consecuencia, este apartado presenta y desarrolla los condicionantes claves que deben ser evaluados de manera sistemática antes de definir la tecnología de microtunelación a emplear, con el objetivo final de apoyar una toma de decisión fundamentada que reduzca incertidumbres, minimice riesgos y favorezca la eficiencia técnica y económica de la actuación.

#### *3.6.1. Condicionantes geométricos del trazado.*

Los condicionantes geométricos del trazado constituyen uno de los factores decisivos en la selección de la tecnología de microtunelación, ya que determinan la viabilidad geométrica de la perforación y la capacidad del sistema para ejecutar el alineamiento previsto. En microtunelación, la conducción debe instalarse siguiendo con precisión la planta y el alzado definidos en proyecto, con tolerancias reducidas.

La evaluación anticipada de los condicionantes geométricos permite seleccionar la tecnología más adecuada, así como perfilar la necesidad de parámetros clave como el número de estaciones intermedias, el sistema de guiado y las medidas de control de desviación

##### *3.6.1.1. Diámetro exterior del tubo.*

El diámetro nominal constituye un condicionante geométrico decisivo en la selección del método de microtunelación, ya que condiciona tanto las restricciones físico-mecánicas de la tecnología

como las posibilidades de transporte de material, el tipo de frente presurizado y el nivel de control geométrico alcanzable. El diámetro, además, influye en parámetros clave como el esfuerzo de hinca acumulado, la magnitud de asentamientos potenciales y el grado de accesibilidad interna para mantenimiento o inspección.

En términos tecnológicos, la relación entre diámetro y tipo de sistema es especialmente significativa:

- Microtunelación de pequeño diámetro (DN < 800–1000 mm)

Límites geométricos y constructivos impiden incorporar cabezales voluminosos o sistemas mecánicos de extracción como tornillo sinfín para EPB. Predominan las MTBM tipo Slurry, donde el transporte del material excavado se realiza mediante suspensiones hidráulicas. La compactación volumétrica del conjunto máquina–tubería exige radios de curvatura amplios y guiado por láser directo, condicionado por la línea de visión.

- Diámetros medios (DN 1000–1600 mm)

Se amplía el rango de tecnologías disponibles, pudiendo emplearse EPB, Slurry o equipos híbridos. La mayor sección permite integrar sensores internos, cámaras, sistemas de articulación para curvas y equipos de bombeo con mejores prestaciones. En este rango, el diámetro también comienza a tener un impacto significativo en la progresión del rozamiento tubería–suelo, pudiendo ser necesarios sistemas de lubricación multietapa o estaciones de empuje intermedio en longitudes mayores.

- Grandes diámetros (DN > 1600–1800 mm)

En diámetros grandes (> 1600–1800 mm), el diámetro condiciona no sólo la tecnología, sino también la escala estructural del proyecto. La sección disponible permite implementar sistemas de frente presurizado avanzados. La posibilidad de acceso interior para inspección y mantenimiento transforma además la estrategia operativa, pero también incrementa exponencialmente la cantidad de material excavado y la carga de hinca requerida, generando la necesidad de lubricación intensiva y/o estaciones de empuje intermedias.

Es precisamente en este rango de diámetros grandes donde se vuelve viable la alternativa opuesta dentro del espectro tecnológico: los frentes no presurizados mediante escudo abierto, en los que la excavación y el desescombro se realizan con sistemas mecánicos incorporados en el propio escudo tal y como vimos en puntos anteriores. En diámetros inferiores a aproximadamente 1,8–2,0 m, dichas configuraciones no son operativamente posibles por la falta de espacio para alojar estos

sistemas dentro del escudo. Sin embargo, por encima de aproximadamente 2,2–2,5 m, la excavación mediante escudo abierto con equipos mecánicos integrados se vuelve técnicamente viable y competitiva, especialmente en terrenos estables donde no se requiere equilibrio activo de presiones para garantizar la estabilidad del frente.

Cuando el diámetro de la conducción se sitúa por debajo del rango operativo de la microtuneladora (aprox. < 400–500 mm, según fabricante y configuración), el empleo de un escudo empujado con frente mecanizado o presurizado deja de ser viable. En estos casos, la ejecución suele abordarse mediante tecnologías alternativas de carácter dirigido o semidirigido, entre las que destacan el auger boring —sistema de perforación por tornillo sinfín alojado en camisa, en el que la evacuación del terreno se realiza mediante transporte helicoidal continuo— y las técnicas tipo PHD (Pipe Jacking Directional / Pilot Hole Drilling), consistentes en la perforación previa de un taladro piloto guiado que posteriormente se ensancha y reemplía para permitir la hinca o inserción de la tubería final. Estos métodos presentan una menor capacidad de control geométrico y un alcance más limitado, pero resultan idóneos en diámetros reducidos donde no es posible habilitar una cámara frontal, una cabeza mecanizada o sistemas de guiado basados en sensores internos. Su aplicación es habitualmente recomendada para longitudes moderadas, alineamientos sin radios de curvatura estrictos y terrenos con comportamiento estable, actuando como solución de continuidad técnica cuando la microtunelación convencional ya no es aplicable por condicionantes dimensionales.

El diámetro actúa como filtro tecnológico: cuanto menor es la sección, más limitada es la gama de métodos posibles; cuanto mayor, más opciones existen, pero a costa de mayores esfuerzos mecánicos, mayores exigencias sobre la integridad estructural del tubo y mayor complejidad operativa.

Existen publicaciones donde se relaciona el riesgo tanto con el diámetro y la tecnología a emplear.







Excavation technique	<1.2m	1.2m	1.5m	1.8m	>1.8m		
Pipejack - machine (remote operation from surface)	Low risk					 <b>LOW RISK</b> Designers and Contractors should undertake a robust assessment of the risks associated with pipejacking and tunnelling, in addition to site specific risks and specify the appropriate mitigation measures.	
Pipejack - machine (operator controlled below ground)		Medium risk					 <b>MEDIUM RISK</b> Designers and Contractors should undertake a robust technical assessment and risk assessment in addition to site specific risks and specify the appropriate mitigation measures to justify their decisions to deviate from LOW RISK criteria.
Pipejack - hand dig		Medium risk					
Pipejack - machine operator controlled (+ mechanical erector)			Medium risk		Low risk	 <b>NOT ACCEPTABLE</b> Where a method requires routine personnel access and is below 1.2m ID, Designers and Contractors should not specify pipejacking/tunnelling of this size and construction method. An alternative design solution should be sought.	
Pipejack - hand dig (+ mechanical erector)			Medium risk				
Timber heading - hand dig		Medium risk					

Figura 77. Tabla de selección de tecnología por diámetro y riesgo. *Tunnelling and Pipejacking: Guidance for Designers. London, UK.2015.*

El diámetro condiciona la seguridad y determina si puede entrar personal humano.

- Con diámetros < 1.2 m no existen condiciones seguras para presencia humana, solo técnicas robotizadas son admisibles.
- Entre 1.2 y 1.8 m, métodos con personal dentro son técnicamente posibles, pero implican riesgo medio, por restricciones de ventilación, evacuación y ergonomía.
- Para diámetros >1.8 m se abre la puerta a excavación manual asistida o cámaras habitable, actividades más convencionales y mantenimiento más sencillo.

El diámetro interno mínimo puede venir determinado por la necesidad de permitir evacuación y maniobra segura del personal, antes incluso que por criterios hidráulicos o funcionales de la conducción.(Health & Safety Executiv et al., 2015).

### 3.6.1.2. Numero de drives previsto.

La relación entre el diámetro de la conducción y la longitud máxima de hinca constituye un parámetro geométrico clave en la planificación de microtunelaciones y pipe-jacking. A mayor sección interior, aumenta la superficie de contacto entre tubería y suelo, y con ello la fricción movilizada y el empuje requerido. Al mismo tiempo, diámetros mayores permiten alojar equipos de excavación más robustos, articulaciones para control geométrico, instalación de estaciones de empuje intermedias y sistemas de lubricación multietapa, lo que habilita mayores distancias de avance sin comprometer la integridad estructural del tubo ni los límites de reacción del muro de empuje.

El gráfico publicado por (Health & Safety Executiv et al., 2015) sintetiza esta interacción mediante una matriz que vincula diferentes técnicas de excavación con rangos de diámetro interior y longitudes indicativas de hinca aceptables desde un punto de vista operativo y de seguridad. El gráfico establece una correlación directa entre el diámetro nominal interno de la conducción y la longitud máxima de hinca aconsejable para cada técnica de excavación, con el fin de garantizar la viabilidad operativa, el control de empujes y la seguridad en obra. Se observa que, para sistemas totalmente mecanizados con operación remota desde superficie, la hinca es la más favorable en términos de alcance, llegando a 250 m para diámetros de 1,2 m, 500 m para 1,5 m, 750 m para 1,8 m y más de 1000 m cuando el diámetro supera los 1,8 m. En contraste, técnicas con operación asistida desde el interior del tubo reducen sustancialmente su alcance debido a limitaciones de espacio y riesgos de confinamiento, disminuyendo a valores de referencia como 125 m para diámetros de 1,2 m, 300 m en 1,5 m y 750 m para 1,8 m. Las técnicas con intervención manual, incluso asistidas por erector mecánico, presentan longitudes mucho más restringidas, como 50 m a

dos longitudes de tubo en diámetros de 1,2 m, 75 m en 1,5 m y un máximo aproximado de 100 m cuando supera los 1,8 m, debido al mayor riesgo operativo y al tiempo improductivo asociado a accesos, ventilación, manipulación de herramientas y evacuación.

Excavation technique	<1.2m	1.2m	1.5m	1.8m	>1.8m
Pipejack - machine (remote operation from surface)	Non Man Entry; distance limited by equipment capability	<250m	<500m	<750m	<750m
Pipejack - machine (operator controlled below ground)	⊘	250m to 500m (see Note 7)	to 750m (see Note 7)	>750m (see Note 7)	1000m + (see Note 7)
Pipejack - hand dig	⊘	*50m – 2 drive lengths	*75m – 2 drive lengths	*100m (plan to use mini-digger if over 2.1m dia)	
Pipejack - machine operator controlled (+ mechanical erector)	⊘	⊘	*250m	*500m	>500m (see Note 7)
Pipejack - hand dig (+ mechanical erector)	⊘	⊘	*50m	*100m (plan to use mini-digger if over 2.1m dia)	
Timber heading - hand dig	⊘	*25m - Minimum cross section inside frames to be subject to rigorous risk assessment with consideration for rescue (absolute minimum of 1.2m high x 1.0m wide to be provided)			

Figura 78 Recomendación de técnicas en base a longitudes de avance indicativas y número máximo de avances. *Tunnelling and Pipejacking: Guidance for Designers. London, UK.2015.*

El gráfico evidencia, por tanto, que el aumento del diámetro no sólo incrementa el espacio útil disponible para equipos, sino que posibilita mayores longitudes de empuje continuo antes de requerir pozos intermedios o estaciones de empuje adicionales, siendo este criterio decisivo.

En particular, la resistencia por fricción suelo–tubería aumenta con la distancia de hincas, la profundidad de enterramiento, el diámetro de la tubería y la complejidad de la trayectoria de avance.(Wen et al., 2024).

### 3.6.1.3. Radio de curvatura admisibles.

Con el incremento en la densificación de tuberías subterráneas urbanas, las nuevas líneas de tuberías ya no son solo trayectos cortos y rectos; la construcción de líneas de larga distancia y curvas se ha convertido en uno de los requisitos importantes de la hincas de tuberías, lo que plantea exigencias más rigurosas para el sistema de guiado. (Qiu et al., 2025).

El radio de curvatura constituye uno de los condicionantes geométricos más determinantes en la selección y diseño de una metodología de microtunelación. La capacidad de una máquina para describir alineaciones curvas depende principalmente de: (i) el tipo de frente de excavación (Presurizado o no presurizado), (ii) el diámetro nominal del tubo, (iii) el sistema de articulación del escudo, (iv) la rigidez estructural del conjunto tubo–empuje y (v) el mecanismo de extracción del material excavado. En términos operativos, el radio mínimo admisible busca evitar esfuerzos excesivos en las juntas, pérdidas de presión de confinamiento, desviaciones geométricas y, especialmente, incrementos no controlados del rozamiento tubería–suelo.

Especialmente en la construcción de hincas curvas de larga distancia, dado que la tubería debe avanzar siguiendo una curva compleja, la trayectoria de medición debe calcularse con precisión para garantizar que la tubería pueda ser hincada conforme al radio y la longitud de la curva.(Qiu et al., 2025).

Escudos abiertos.

presentan una capacidad limitada para ejecutar curvaturas debido a la baja articulación disponible en el escudo y a la transferencia rígida del empuje desde cabeza a tubería. En la práctica, los radios mínimos admisibles suelen situarse entre  $R \geq 300\text{--}500$  veces el diámetro (aprox. 150–300 m en diámetros  $>1.5$  m), siendo habitual trabajar con trazados prácticamente rectilíneos. Cuando el sistema integra retroexcavadora o pico mecanizado en el escudo, la desviación depende exclusivamente del control manual del operador, aumentando la incertidumbre geométrica y requiriendo radios todavía más amplios para no comprometer la estabilidad del frente y evitar contacto asimétrico tubo–suelo.

Sistemas cerrados tipo Slurry (hidráulicos).

Presentan una mayor capacidad para asumir curvaturas reducidas debido a que el transporte de detritos se realiza hidráulicamente mediante suspensión, sin necesidad de sinfín axial rígido. Además, su escudo articulado (cuando equipado) permite correcciones angulares entre anillos consecutivos. Para diámetros entre 800 mm y 1600 mm, se admiten radios típicos del orden de 150–300 m, mientras que en grandes diámetros ( $>2000$  mm) pueden alcanzarse radios entre 250–500 m. La capacidad del Slurry para mantener una presión uniforme alrededor del frente reduce el riesgo de pérdida de confinamiento en curvas y evita la ovalización del escudo, permitiendo así radios menores respecto a sistemas EPB rígidos.

EPB (Earth Pressure Balance).

Presentan mayores limitaciones para ejecutar curvas cerradas debido a la presencia del tornillo sinfín longitudinal, que introduce una componente rígida y limita el ángulo de deflexión entre el cabezal y el escudo. En microtunelación de diámetro medio (1.0–1.6 m) los radios rondan en torno a 250–500 m. En diámetros menores ( $<1.2$  m), la incorporación del sinfín reduce severamente esta capacidad, y en la práctica la mayoría de EPB  $<1.2$  m operan sobre trazados rectos, salvo en configuraciones especiales. El uso de articulaciones hidráulicas múltiples permite, en casos avanzados, radios de 200 m, si bien con incremento del riesgo de desviación y reducción de la estabilidad del frente.

### Tecnologías híbridas EPB + Slurry.

En los sistemas híbridos el material se condiciona mecánicamente, pero se extrae mediante bombeo hidráulico, lo que genera una solución con gran flexibilidad para trazados más exigentes. La ausencia de un sinfín rígido facilita la absorción de ángulos mayores, alcanzándose radios mínimos en torno a 150–200 m, llegando incluso a alcanzar radios <150 m en diámetros >2.0 m.

### Auger Boring

El sistema Auger Boring es extremadamente rígido debido al sinfín continuo y a la ausencia de articulación en el escudo. En consecuencia, no permite radios de curvatura, siendo en la práctica un método unidireccional y rectilíneo, con únicamente microajustes axiales admisibles del orden de 0,1–0,3° entre tramos, pero sin capacidad para describir curvas reales. Cualquier cambio de eje debe resolverse mediante pozos intermedios y reinicio del alzado.

Tecnología	Capacidad de curvatura	Radio típico mínimo
Escudo abierto	Muy limitada	(≈300–600 m)
Slurry	Alta	(≈200–400 m)
EPB	Media-baja	250–400 D (≈250–500 m)
EPB híbrido + Slurry	Muy alta	(≈150–300 m)
Auger Boring	Nula	Recto únicamente
PHD piloto–ensanche	Media	(≈100–300 m según diámetro)

Tabla 3. Rango de curvatura admisible según tecnología. Elaboración propia.

El radio de curvatura admisible actúa también como filtro tecnológico: cuanto más reducida sea la curva requerida, más complejo y costoso será el sistema necesario —frecuentemente forzando la transición hacia Slurry o híbridos— mientras que métodos rígidos como Auger Boring quedan descartados en trazados no rectilíneos.

#### 3.6.1.4. Pendiente longitudinal.

La pendiente longitudinal del trazado constituye un condicionante geométrico esencial en el diseño de obras ejecutadas mediante microtunelación, ya que afecta directamente al equilibrio hidrogeotécnico en el frente, al control del alineamiento mediante guiado y, especialmente, al comportamiento del circuito de extracción o transporte del material excavado (slurry, tornillo sinfín o transporte en vacío). El grado de inclinación admisible está fuertemente vinculado al tipo de tecnología empleada y al medio de soporte y transporte, dado que una pendiente excesiva puede generar acumulación de detritos en el interior, pérdidas del control de presión en el frente, retorno de lodos o deslizamientos incontrolados.

#### Escudos abiertos.

Al no existir control de presión, la pendiente queda condicionada por la estabilidad geotécnica del terreno. En suelos competentes (roca blanda, arenas densas parcialmente cementadas) puede alcanzarse hasta  $\pm 4-5\%$ , mientras que en suelos sueltos o con presencia de agua la pendiente debe limitarse a  $\pm 1,5-2\%$  para evitar desprendimientos puntuales o caída libre de material al interior del tubo. Este tipo de tecnología exige bombeo auxiliar para el desagüe cuando la pendiente generase entrada de agua hacia el frente.

#### Sistemas cerrados tipo Slurry (hidráulicos).

Este sistema presenta la mayor tolerancia a pendientes pronunciadas, ya que el transporte del escombros se realiza mediante bomba hidráulica. Son habituales pendientes de  $\pm 6\%$ , llegando incluso a valores superiores (hasta  $\pm 10-12\%$ ) en condiciones favorables y longitudes reducidas, siempre que se garantice una presión uniforme en el circuito y una salida de bypass adecuada. En pendientes descendentes es crítico evitar el sifonamiento del lodo y garantizar un sellado estanco entre tubo y terreno.

#### EPB (Earth Pressure Balance).

El material excavado es extraído mediante tornillo sinfín, lo que limita el desnivel máximo para mantener flujo continuo y evitar deslizamiento o bloqueo de cámara. Normalmente se consideran pendientes de  $\pm 3-4\%$  como rango óptimo, pudiendo alcanzar eventualmente  $\pm 6\%$  en equipos de gran diámetro y suelos cohesivos. Pendientes mayores pueden requerir modificación del paso del sinfín, aditivos o ventilación adicional para controlar la reología del material.

#### Tecnologías híbridas EPB + Slurry.

Combinan capacidades de ambos sistemas y permiten abordar variaciones locales, situándose su rango práctico en  $\pm 4-6\%$ , dependiendo del modo operativo. Se utilizan especialmente cuando el trazado presenta alternancia de estratos saturados y secos o cambios bruscos de rigidez.

#### Auger Boring

Presenta una clara restricción de pendiente, siendo recomendable mantener valores inferiores a  $\pm 2\%$ , preferentemente  $\pm 1\%$ , para asegurar el transporte del suelo sin segregación ni atasco. Su utilización en pendientes superiores compromete la limpieza interna y exige incrementos de potencia del motor, reduciendo la eficiencia y aumentando desgaste y riesgo de fallo.

Cuanto más sofisticado y presurizado sea el sistema de microtunelación, mayor será la pendiente longitudinal admisible, al disponer de mecanismos activos de estabilización y transporte del producto excavado. En tecnologías de bajo control frontal, la pendiente debe mantenerse mínima para preservar la estabilidad geotécnica y la continuidad de la excavación.

#### 3.6.1.5. Profundidad de la clave.

La profundidad de la clave (cover depth) constituye un condicionante geométrico fundamental en la selección de la tecnología de microtunelación, debido a su influencia directa sobre la estabilidad del frente, el riesgo de asentamientos superficiales y el estado tensional en la tubería durante el empuje. La clave materializa el espesor de confinamiento geotécnico disponible para equilibrar las presiones en el frente y evitar el “breakout”, así como para minimizar el levantamiento del terreno y la aparición de patologías en estructuras colindantes.

Se considera que la relación entre diámetro del tubo y profundidad de clave es un indicador crítico. Práctica internacional (BTS – Pipe Jacking Guide, BS 6164) establece que, para garantizar un confinamiento adecuado, la clave mínima debe situarse en el rango de 1,0–1,5 veces el diámetro exterior para microtunelación con frente presurizado (Slurry o EPB), pudiendo reducirse hasta 0,7–1,0·D en suelos competentes (roca blanda) o trazados cortos y rígidamente controlados. En cambio, para tecnologías no presurizadas, como escudo abierto en suelos no cohesivos, Auger Boring, la profundidad mínima debe incrementarse sensiblemente debido al mayor riesgo de pérdida de volumen y subsidencia, recomendándose valores  $\geq 2,0 \cdot D$ , y en algunos casos incluso superiores, cuando existen infraestructuras sensibles a escaso recubrimiento.

La profundidad de clave condiciona igualmente el control operativo durante la puesta en obra. Una clave reducida dificulta la estabilización del frente (especialmente en limos y arenas saturadas), obliga a aumentar la presión de lodos, incrementa el riesgo de sobrepresurización y puede derivar en escape de lodo hacia superficie (“blowout”). Por el contrario, una clave excesiva incrementa la sobrecarga vertical. Las formas de sección transversal de las tuberías empleadas en hinca sin zanja son principalmente circular y rectangular. Bajo la condición de iguales dimensiones útiles interiores, la sección rectangular puede ahorrar más de un tercio del espacio subterráneo en comparación con la sección circular, y además permite reducir significativamente la profundidad del túnel y aumentar el espesor de la capa de terreno superior.(Wen et al., 2024).

Además, la interacción con el nivel freático requiere especial atención: cuando la clave se sitúa por debajo del plano freático, la presión hidrostática condiciona el método constructivo, siendo

prácticamente obligatoria la ejecución con frente presurizado o con sistemas de despresurización temporal.

La profundidad de clave actúa como parámetro de equilibrio entre riesgo geotécnico y eficiencia constructiva: claves reducidas exigen tecnologías altamente controladas y sistemas presurizados, mientras que claves elevadas incrementan el coste estructural y los esfuerzos de hincas, pero permiten flexibilizar la elección del método.

### **3.6.2. Condicionantes del terreno. Geológicos y geotécnicos.**

Las condiciones del terreno constituyen el factor más determinante en la selección y dimensionamiento de la tecnología de microtunelación. La naturaleza geológica del macizo, su comportamiento geotécnico bajo excavación y la presencia de agua subterránea condicionan de forma directa la estabilidad del frente, el método de sostenimiento requerido, el sistema de extracción de tierras y la presión operativa necesaria para evitar asentamientos o roturas en superficie. Desde el punto de vista geológico, la microtunelación puede atravesar una amplia variedad de litologías, desde suelos blandos no cohesionados, como arenas limpias, gravas o limos, hasta materiales cohesivos como arcillas y margas, y en algunos casos materiales parcialmente cementados o roca blanda. El medio circundante puede ser suelo o roca, pero en la mayoría de los casos se trata de suelos naturales (Wen et al., 2024).

#### **3.6.2.1. Criterios de rotura del suelo**

El comportamiento mecánico del terreno adquiere una relevancia fundamental, ya que la excavación altera el estado tensional inicial y puede dar lugar a fenómenos de rotura, inestabilidad del frente, pérdidas de terreno o asentamientos en superficie. La correcta predicción de estos mecanismos depende en gran medida del criterio de rotura adoptado, entendido como el modelo que define las condiciones bajo las cuales el suelo o el macizo rocoso pierde su capacidad resistente.

El estudio de los criterios de rotura resulta especialmente importante en microtunelación debido a la variabilidad de los materiales atravesados, que pueden incluir suelos granulares, arcillas, materiales cohesivos y, en determinados casos, macizos rocosos de distinta calidad. Cada uno de estos medios presenta un comportamiento resistente diferente, lo que hace necesario seleccionar un criterio de rotura adecuado que permita representar de forma realista la relación entre tensiones normales y cortantes en condiciones próximas a la rotura.

La elección del criterio de rotura influye directamente en los cálculos de estabilidad del frente de excavación, en la estimación de las presiones de soporte necesarias, en la evaluación de las cargas

transmitidas al revestimiento y en el análisis de las deformaciones inducidas en el terreno circundante.

Criterios ampliamente utilizados, como Mohr–Coulomb para suelos o Hoek–Brown para macizos rocosos, permiten adaptar el modelo al tipo de terreno atravesado, proporcionando una base coherente para el análisis comparativo de diferentes escenarios geotécnicos.

#### 3.6.2.1.1. Criterio de rotura de Mohr Coulomb.

El criterio de Mohr–Coulomb, ampliamente desarrollado por (Jiménez Salas, 1975), constituye la base del análisis resistente del suelo en numerosos problemas de ingeniería geotécnica.

El criterio de rotura de Mohr–Coulomb es uno de los modelos constitutivos más utilizados en geotecnia para describir la resistencia al corte de los suelos. Su relevancia se debe a su formulación sencilla, a que sus parámetros tienen una interpretación física clara y a que pueden obtenerse a partir de ensayos geotécnicos habituales.

En términos generales, el criterio establece que la rotura ocurre cuando la tensión cortante movilizada sobre un plano alcanza una combinación crítica de cohesión y rozamiento interno dependiente de la tensión normal efectiva.

el criterio se expresa mediante una relación lineal entre la tensión cortante en rotura  $\tau_f$  y la tensión normal efectiva  $\sigma'_n$  sobre el plano potencial de deslizamiento:

$$\tau_f = c' + \sigma'_n \tan \varphi'$$

*Fórmula 11.-Tensión cortante en rotura.*

donde:

- $\tau_f$  es la tensión cortante en rotura,
- $\sigma'_n$  es la tensión normal efectiva sobre el plano,
- $c'$  es la cohesión efectiva,
- $\varphi'$  es el ángulo de rozamiento interno efectivo.

El uso de tensiones efectivas es fundamental en mecánica de suelos, ya que la resistencia al corte está controlada por la parte de la tensión que actúa en el esqueleto del suelo. La tensión efectiva se define como  $\sigma' = \sigma - u$ , siendo  $\sigma$  la tensión total y  $u$  la presión de poros. En condiciones drenadas, la evolución de  $u$  es controlada por el flujo de agua; en condiciones no drenadas, puede desarrollarse presión intersticial adicional, modificando el estado tensional efectivo.

El criterio combina dos mecanismos resistentes:

1. Componente cohesiva ( $c'$ ): representa una resistencia al corte que existe incluso cuando la tensión normal efectiva es nula. En arcillas puede asociarse a fuerzas electroquímicas y a la estructura del suelo; en suelos granulares limpios, en condiciones drenadas, suele ser aproximadamente cero ( $c' \approx 0$ ), salvo efectos aparentes por cementación o succión.
2. Componente friccional ( $\sigma'_n \tan \phi'$ ): representa la contribución del rozamiento y del enclavamiento entre partículas, aumentando la resistencia al corte a medida que crece la tensión normal efectiva.

El criterio se interpreta gráficamente mediante los círculos de Mohr. Cada estado tensional en un punto puede representarse por un círculo en el plano  $\sigma - \tau$ . La envolvente de rotura de Mohr-Coulomb es una recta cuya intersección con el eje  $\tau$  es  $c'$  y cuya pendiente es  $\tan \phi'$ . La rotura ocurre cuando el círculo de Mohr es tangente a dicha recta, lo que indica que existe algún plano dentro del material en el que se alcanza la resistencia al corte.

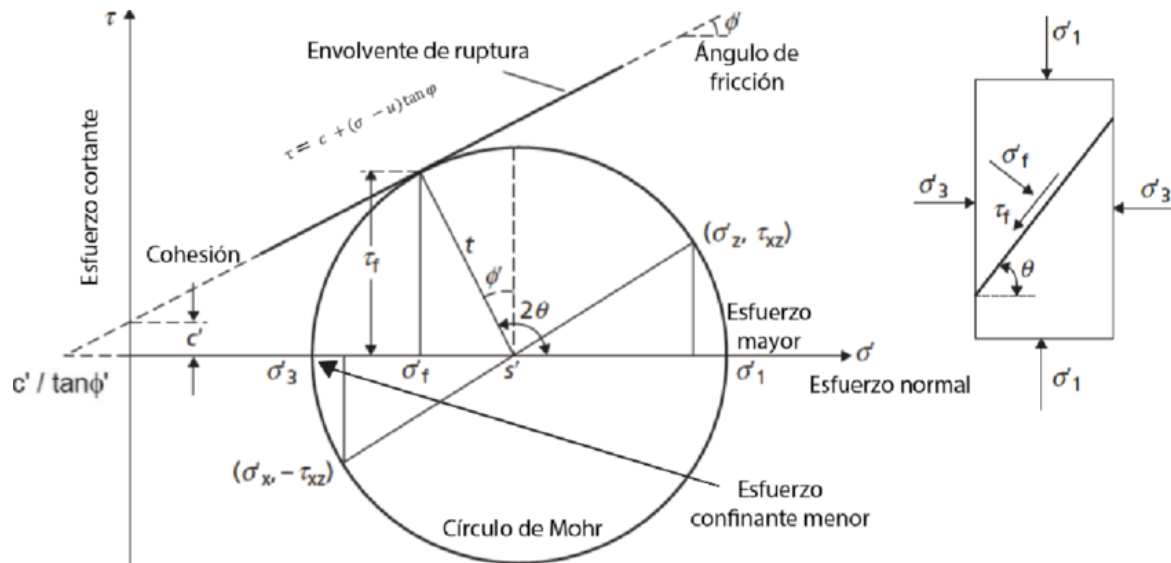


Figura 79. Ejemplo de círculo de Mohr. Jiménez Salas, 1975.

Esta representación es especialmente útil para entender que el criterio no describe un único plano de rotura predefinido, sino que determina la condición global a partir de la cual aparece un plano crítico en el que se moviliza la resistencia máxima.

En problemas geotécnicos resulta habitual trabajar con tensiones principales efectivas  $\sigma'_1$  (mayor) y  $\sigma'_3$  (menor). Para el estado de rotura en compresión triaxial (condición típica en ensayos), el criterio puede expresarse como:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} + \frac{2c' \cos \phi'}{1 - \sin \phi'}$$

Fórmula 13.- Esfuerzo principal mayor

Esta forma permite relacionar directamente el confinamiento  $\sigma'_3$  con la tensión desviadora necesaria para alcanzar la rotura. En la práctica, facilita la obtención de  $c'$  y  $\varphi'$  a partir de resultados de ensayos triaxiales drenados o no drenados con medida de presión de poros.

En el análisis de obras subterráneas, incluida la microtunelación, es clave distinguir entre comportamiento drenado y no drenado:

- Análisis drenado: se utilizan parámetros efectivos  $c'$  y  $\varphi'$ , suponiendo que las presiones de poros tienen tiempo de disiparse o se mantienen controladas. Es habitual para arenas y para arcillas a largo plazo.
- Análisis no drenado: en arcillas saturadas sometidas a cargas rápidas puede ser apropiado emplear resistencia no drenada  $s_u$ .

$$\tau_f = s_u$$

*Fórmula 14.- Criterio de falla en condiciones no drenadas*

La elección entre un enfoque drenado o no drenado debe basarse en la permeabilidad del suelo, la velocidad del proceso constructivo y el camino tensional impuesto por la excavación y la presión de sostenimiento.

Los parámetros de Mohr–Coulomb se determinan mediante ensayos de laboratorio y/o correlaciones de campo:

- Ensayo de corte directo: proporciona una relación  $\tau_f - \sigma'_n$  para diferentes tensiones normales, a partir de la cual se ajustan  $c'$  y  $\varphi'$ .
- Ensayo triaxial (CD, CU, UU): permite controlar drenaje y confinamiento, ofreciendo una caracterización más completa. En particular, el triaxial CD es apropiado para parámetros drenados efectivos, mientras que CU con medida de presión de poros permite obtener parámetros efectivos y/o no drenados.
- Ensayos in situ (SPT, CPTu, presiómetro): suelen aportar estimaciones indirectas de  $\varphi'$ , rigideces y, en arcillas,  $s_u$ . Para un modelo Mohr–Coulomb es habitual combinar estas correlaciones con resultados de laboratorio.

#### 3.6.2.1.2. Criterio de rotura de Hoek-Brown.

El criterio de rotura de Hoek–Brown es un modelo empírico desarrollado específicamente para describir el comportamiento resistente de los macizos rocosos, teniendo en cuenta su carácter discontinuo y la influencia del grado de fracturación. A diferencia de los criterios clásicos empleados en mecánica de suelos, este criterio reconoce que la resistencia de un macizo rocoso no depende

únicamente de las propiedades de la roca intacta, sino también de la estructura geológica, la presencia de diaclasas y el estado de alteración del material.

El criterio de Hoek–Brown se expresa en términos de tensiones principales efectivas y adopta una formulación no lineal de la siguiente forma:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

Fórmula 16.-Tensión principal mayor efectiva en rotura

Donde:

- $\sigma'_1$  es la tensión principal mayor efectiva en rotura.
- $\sigma'_3$  es la tensión principal menor efectiva.
- $\sigma_{ci}$  es la resistencia a compresión simple de la roca intacta.
- $m_b, s$  y  $a$  son parámetros empíricos que dependen de la calidad del macizo rocoso.

Esta formulación permite representar de forma continua la evolución de la resistencia del macizo desde estados de bajo confinamiento hasta situaciones de confinamiento elevado, algo que no es posible con criterios lineales como Mohr–Coulomb.

Los parámetros  $m_b, s$  y  $a$  se obtienen a partir de:

- el parámetro  $m_i$ , propio de la roca intacta.
- el Índice Geológico de Resistencia (GSI).
- y un factor de alteración asociado al proceso constructivo.

Criterio de rotura empírico		Constantes del macizo: $m$ y $s$ .					
$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m\sigma_3(\sigma_3 + s\sigma_{ci}^2)}$ $\sigma_1$ y $\sigma_3$ : esfuerzos principales mayor y menor $\sigma_{ci}$ : esfuerzo compresivo uniaxial de la matriz rocosa $m$ y $s$ : constantes empíricas del macizo rocoso		Constantes del macizo: $m$ y $s$ .	Rocas carbonatadas: dolomitas, calizas y mármol.	Rocas arcillosas: argilinas, limolitas, lutitas y pizarra.	Rocas areniscas: areniscas y cuarcitas.	Rocas ígneas de grano fino: andesitas, dioritas, diabasas y ríolitas.	Rocas cristalinas ígneas de grano grueso: andesitas, gabros, granitos, gneisos, granodioritas y gneissos.
Valores para el macizo rocoso alterado o afectado por voladoras ( <i>disturbed</i> )							
Valores para el macizo rocoso sin alterar ( <i>undisturbed</i> )							
<b>Muestras de roca intacta</b>							
Muestras de tamaño de probeta de laboratorio sin discontinuidades.	$m$	7,0	10,0	15,0	17,0	25,0	
RMR = 100	$s$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	
Q = 500	$s$	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	
<b>Macizo rocoso de muy buena calidad</b>							
Bloque de roca sana. Juntas sin meteorizar y con espaciado de 1 a 3 m.	$m$	2,40	3,43	5,14	5,82	8,56	
RMR = 85	$s$	0,082	0,082	0,082	0,082	0,082	
Q = 100	$s$	4,10	5,85	8,78	9,95	14,63	
<b>Macizo rocoso de calidad buena</b>							
Bloques de roca sana o ligeramente meteorizada, con juntas espaciadas de 1 a 3 m.	$m$	0,575	0,821	1,231	1,395	2,052	
RMR = 65	$s$	0,00293	0,00293	0,00293	0,00293	0,00293	
Q = 10	$s$	2,006	2,865	4,298	4,871	7,163	
<b>Macizo rocoso de calidad media</b>							
Varias familias de discontinuidades moderadamente meteorizadas con espaciados de 0,3 a 1 m.	$m$	0,128	0,183	0,275	0,311	0,458	
RMR = 44	$s$	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009	0,00009	
Q = 1	$s$	0,947	1,353	2,030	2,301	3,383	
<b>Macizo rocoso de calidad mala</b>							
Numerosas juntas meteorizadas con algo de relleno. Brechas compactas sin rellenos. Espaciado de 0,03 a 0,5 m.	$m$	0,029	0,041	0,061	0,069	0,102	
RMR = 23	$s$	0,000003	0,000003	0,000003	0,000003	0,000003	
Q = 0,1	$s$	0,447	0,639	0,959	1,087	1,598	
<b>Macizo rocoso de calidad muy mala</b>							
Macizo rocoso muy fracturado formado por bloques angulosos y redondeados, con alto contenido de finos.	$m$	0,00019	0,00019	0,00019	0,00019	0,00019	

ÍNDICE GEOLÓGICO DE RESISTENCIA GSI ( <i>geological strength index</i> )		CONDICIÓN DEL FRENTE		
A partir de la clasificación obtenida en la Figura 3.94 seleccionar el cuadro correspondiente en este ábaco y obtener el valor medio del índice GSI.		MUY BUENA (MB) Superficies muy rugosas sin alterar	BUENA (B) Superficies ligeramente alteradas, con patinas de oxidación	MEDIA (M) Superficies suaves moderadamente alteradas
<b>ESTRUCTURA</b>				
	<b>BLOQUES REGULARES (BR)</b> Macizo rocoso sin alterar. Bloques en contacto de forma cúbica formados por tres familias de discontinuidades ortogonales, sin relleno.	80	70	
	<b>BLOQUES IRREGULARES (BI)</b> Macizo rocoso parcialmente alterado. Bloques en contacto de forma angular formados por cuatro o más familias de discontinuidades con rellenos con baja proporción de finos.		60	
	<b>BLOQUES Y CAPAS (BC)</b> Macizo alterado, plegado y fracturado con múltiples discontinuidades que forman bloques angulosos y con baja proporción de finos.			50
	<b>FRACTURACIÓN INTENSA (FI)</b> Macizo rocoso muy fracturado formado por bloques angulosos y redondeados, con alto contenido de finos.			40

Tabla 4. Relaciones aproximadas entre la calidad de los macizos rocosos y los valores de las constantes  $m$  y  $s$ . Valores del índice GSI. Hoek y Brown, 1988.

El GSI permite cuantificar de forma sistemática la calidad del macizo rocoso en función de su estructura y del estado de las discontinuidades. De este modo, el criterio de Hoek–Brown integra información geológica y geomecánica en una única expresión resistente, lo que constituye una de sus principales ventajas frente a otros modelos.

A medida que la calidad del macizo disminuye (menor GSI), los parámetros del criterio reflejan una pérdida progresiva de resistencia y un comportamiento más dependiente del confinamiento.

El criterio de Hoek–Brown describe una envolvente de rotura no lineal en el espacio de tensiones principales. Esta envolvente es especialmente adecuada para macizos rocosos, donde la resistencia no aumenta de forma proporcional a la tensión normal, sino que está condicionada por la apertura, cierre y deslizamiento de discontinuidades.

El criterio no define explícitamente un plano de rotura, sino que establece la condición global de fallo del material, lo que resulta coherente con el comportamiento complejo y tridimensional de los macizos rocosos fracturados.

En el ámbito de la microtunelación, el criterio de Hoek–Brown resulta especialmente relevante cuando el trazado atraviesa roca blanda o media, macizos rocosos fracturados, tramos de transición suelo–roca.

### 3.6.2.2. Tipos de suelo.

Las técnicas de microtunelación pueden emplearse en diversos tipos de suelos, en un amplio rango de diámetros y para grandes longitudes de perforación.(Ueki et al., 1999). No obstante, cada tipo de suelo presenta riesgos diferenciales: los suelos granulares con alta permeabilidad generan gradientes de filtración y potenciales fenómenos de inestabilidad del frente, mientras que las arcillas, aunque permiten mejor contención, pueden provocar elevadas fuerzas de fricción y fenómenos reológicos como tixotropía que dificultan el arranque tras

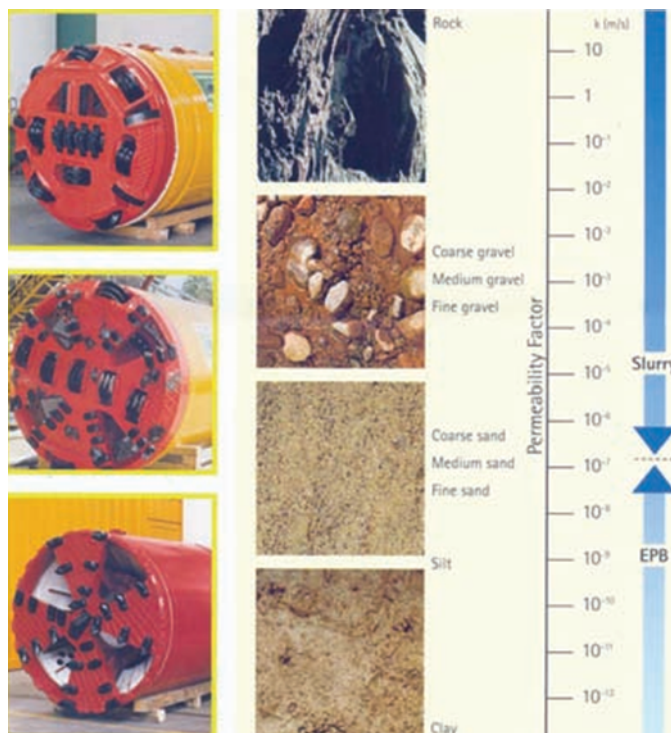


Figura 80. Recomendación para la elección de tecnología en base a rango de permeabilidad y tipo de suelo. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.

paradas prolongadas. En suelos heterogéneos o estratificados, especialmente cuando existen transiciones sand–clay o inclusiones de bolos y gravas, los riesgos geotécnicos aumentan y pueden requerir sistemas híbridos EPB-slurry, herramientas de corte específicas o cambios en presión y composición del lodo durante operación.

Los parámetros geotécnicos más influyentes para la elección de tecnología son: el ángulo de fricción interna ( $\phi$ ), la cohesión ( $c$ ), la permeabilidad ( $k$ ), el grado de saturación, la compresibilidad y la resistencia no drenada ( $su$ ) en suelos cohesivos. Estos parámetros determinan si la estabilidad del frente puede garantizarse mediante un equilibrio mecánico tipo EPB (compresión del terreno en la cámara) o si es imprescindible un sistema hidráulico con lodos presurizados tipo slurry. Asimismo, la resistencia del macizo afecta a la selección del tipo de cabeza de corte (fresas con picas, discos, cortadores mixtos), al consumo energético y al desgaste prematuro de herramientas.

La correcta caracterización mediante ensayos in situ (SPT, CPTu, permeabilidad) y laboratorio (triaxiales, corte directo, reometría de lodos) es esencial para alimentar modelos de predicción de empuje, definición de presiones de frente y elección final de la técnica constructiva.

#### 3.6.2.2.1. Suelos cohesivos.

Dentro de la ingeniería geotécnica, y siguiendo la clasificación clásica utilizada por autores como Jiménez Salas, Terzaghi o las normas UNE–EN ISO 14688, los suelos cohesivos se clasifican atendiendo principalmente a su granulometría, plasticidad, estado de consistencia y origen, ya que estos factores condicionan directamente su comportamiento mecánico y su respuesta frente a excavaciones como la microtunelación.

Desde el punto de vista granulométrico, los suelos cohesivos son aquellos en los que predominan partículas finas (diámetro inferior a 0,063 mm), clasificándose fundamentalmente en limos (ML, MH) y arcillas (CL, CH). Los limos presentan una cohesión aparente reducida, baja plasticidad y son especialmente sensibles a la pérdida de resistencia por remoldeado o incremento de presión intersticial, mientras que las arcillas muestran una cohesión más marcada, mayor plasticidad y una respuesta mecánica fuertemente dependiente de su estructura y del contenido de agua.

Desde el punto de vista de la plasticidad, los suelos cohesivos se clasifican en función de los límites de Atterberg, distinguiéndose arcillas y limos de baja, media y alta plasticidad. Las arcillas de alta plasticidad (CH) presentan un comportamiento marcadamente dependiente del tiempo (fluencia, tixotropía y consolidación lenta), lo que resulta especialmente relevante en microtunelación por la

evolución de las presiones sobre el frente y las cargas transmitidas al revestimiento durante paradas o avances prolongados.

GRUPOS		SIMBOLO DE GRUPO	NOMBRE DE GRUPO	CRITERIOS DE CLASIFICACION
<b>SUELOS DE GRANO FINO</b> (50 % ó mas pasa el tamiz No 200)  <b>≥50% Pasa Nº 200</b>	<b>LIMOS Y ARCILLAS</b> Limite Liquido < 50%	CL	Arcilla de baja plasticidad	IP >7 y cae en ó sobre la línea A
		ML	Limo	IP < 4 ó cae bajo la línea A
		CL-ML	Arcilla limosa	4 ≤ IP ≤ 7, Simbolo dual: Finos se ubican en la zona de signo doble (CL-ML).
		OL	arcilla ó limo orgánico	Ubicar IP en Carta Plasticidad y verificar que : LL (secado al horno) / LL (sin secado al horno) < 0.75
	<b>LIMOS Y ARCILLAS</b> Limite Liquido ≥ 50%	CH	Arcilla de alta plasticidad	IP cae en ó sobre la línea A
		MH	Limo elástico	IP cae bajo de la línea A
		OH	arcilla ó limo orgánico	Ubicar IP en Carta Plasticidad y verificar que : LL (secado al horno) / LL (sin secado al horno) < 0.75

Figura 81. Suelos cohesivos. Sistema unificado de clasificación SUCS. ASTM D2487.

Desde el punto de vista del estado de consistencia, los suelos cohesivos pueden encontrarse en estado blando, medio, firme, rígido o muy rígido, en función de su índice de consistencia o resistencia al corte no drenado. Este criterio es fundamental para la selección de la tecnología de microtunelación, ya que las arcillas blandas o muy blandas requieren sistemas de frente presurizado (EPB o slurry) para garantizar la estabilidad, mientras que arcillas firmes o rígidas pueden permitir el uso de escudos abiertos con excavación mecánica integrada, siempre que el control de deformaciones sea aceptable.

Por último, la genética y estructura de los suelos cohesivos permite diferencias entre arcillas normalmente consolidadas, sobreconsolidadas, arcillas sensibles y arcillas fisuradas o estratificadas. Las arcillas sobreconsolidadas suelen presentar mayor resistencia inicial pero un comportamiento frágil al alcanzar el estado límite, mientras que las arcillas sensibles pueden experimentar pérdidas abruptas de resistencia al ser remoldeadas, lo que constituye un factor crítico en microtunelación. Las arcillas fisuradas o laminadas, por su parte, introducen anisotropías que afectan tanto a la estabilidad del frente como a la transmisión de esfuerzos a lo largo de la hinca.

Los suelos cohesivos, constituyen uno de los grupos de terreno de mayor relevancia en la toma de decisiones vinculadas a la selección del método de microtunelación. Las propiedades físico-químicas de las arcillas, específicamente su plasticidad, actividad y comportamiento tixotrópico, condicionan su capacidad de deformación y de resistencia al corte bajo distintos estados de esfuerzos. (Jiménez Salas, 1975)

Su principal rasgo distintivo es la presencia dominante de partículas finas ( $d < 0,002$  mm), cuya estructura coloidal y fuerzas electroquímicas generan cohesión (c) apreciable y un comportamiento mecánico controlado por el estado de saturación y el régimen de drenaje. La plasticidad de los

suelos finos, reflejada en sus límites de Atterberg y su índice de plasticidad, representa su capacidad para deformarse sin ruptura, siendo un parámetro esencial en la predicción del comportamiento en obra (Jiménez Salas, 1975). Estos materiales suelen presentar baja permeabilidad ( $k < 10^{-6} - 10^{-9}$  m/s), lo que condiciona la disipación lenta de presiones intersticiales y, por tanto, una respuesta gobernada por resistencia no drenada ( $c_u$ ) durante la excavación, parámetro clave para garantizar la estabilidad del frente. El agua desempeña un papel clave en los suelos cohesivos, modificando la tensión efectiva y, por tanto, la resistencia al corte y la estabilidad del terreno conforme varía el grado de saturación y la presión de poro. (Jiménez Salas, 1975).

En microtunelación, los suelos cohesivos proporcionan una cierta ventaja respecto a materiales granulares, debido a su capacidad inherente para mantener la forma del frente cuando se aplica presión mecánica. Esta propiedad los hace especialmente compatibles con tecnologías tipo EPB (Earth Pressure Balance), donde la cámara de presión compacta y plastifica el propio terreno excavado para generar el tapón equilibrante que controla filtraciones y previene inestabilidades. En arcillas de baja a media plasticidad (CL–CI), el EPB puede operar prácticamente sin lodos externos, requiriendo únicamente acondicionamiento puntual mediante espumas o polímeros para reducir pegajosidad, mejorar flujo por el tornillo sinfín y minimizar acumulación de torque. En arcillas altamente plásticas (CH), la tixotropía puede inducir fenómenos críticos como pegado al cabezal, bloqueo del tornillo o aumento drástico de empuje tras paradas, por lo que la operación exige ciclos de avance continuos y, en casos severos, adición de polímeros lubricantes o lodos híbridos para controlar reología. En suelos altamente plásticos, la resistencia al esfuerzo cortante depende tanto de la cohesión intrínseca como de la estructura interna del material, lo que implica un comportamiento reológico singular frente a cambios de carga (Jiménez Salas, 1976)

Respecto a sistemas Slurry con equilibrio hidráulico, estos son poco habituales en arcillas puras debido al reducido nivel de permeabilidad y baja capacidad de mezcla eficiente entre el lodo bentonítico y el material excavado. Sin embargo, pueden ser recomendables en materiales cohesivos con presencia de fracción arenosa o limos arenosos (CL–ML) para garantizar extracción hidráulica y reducir desgaste, siendo además una opción necesaria cuando el frente se encuentra bajo carga hidrostática crítica. En estas litologías, la separación de sólidos en planta exige considerar alta proporción de finos, lo que implica ciclones secundarios, hidrociclones de alta eficiencia o sistemas de filtrado de malla fina, con impacto económico notable.

En relación con escudos abiertos con herramienta integrada (retro/pico), su aplicabilidad en cohesivos es muy limitada, pues la baja permeabilidad y cohesión favorecen fenómenos de

desprendimiento irregular y riesgo de colapso, especialmente en presencia de nivel freático. Este tipo de excavación solo se considera viable en diámetros grandes (> 1800–2000 mm), zonas fuera del nivel freático o arcillas firmes y desecadas, donde la accesibilidad física del operador permite sostenimiento parcial y control manual del frente.

### 3.6.2.2.2. Suelos no cohesivos.

Los suelos no cohesivos se caracterizan por la ausencia de cohesión verdadera entre partículas y por un comportamiento mecánico gobernado fundamentalmente por el rozamiento interno, la estructura granular y el estado tensional efectivo.

Desde el punto de vista granulométrico, los suelos no cohesivos se dividen fundamentalmente en arenas y gravas, en función del tamaño predominante de las partículas. Las arenas, constituidas por granos de tamaño intermedio, presentan una respuesta mecánica más sensible a cambios de densidad y presión intersticial, mientras que las gravas, formadas por partículas de mayor tamaño, suelen mostrar mayor capacidad drenante y una respuesta más estable bajo cargas elevadas. En microtunelación, las arenas sueltas representan uno de los escenarios más críticos debido a su tendencia al flujo y a la inestabilidad del frente, mientras que las gravas, especialmente cuando se presentan limpias y bien graduadas, pueden generar problemas asociados al desgaste de herramientas, bloqueos del sistema de extracción y elevada fricción periférica.

GRUPOS		SÍMBOLO DE GRUPO	NOMBRE DE GRUPO	CRITERIOS DE CLASIFICACION		
<b>SUELOS DE GRANO GRUESO</b> (mas del 50 % es retenido en el tamiz No 200)	<b>GRAVAS</b> (mas de la mitad de la fracción gruesa es mayor que el tamiz No 4)	Gravas Limpias (menos de 5% de finos)	<b>GW</b> <b>GP</b>	Grava bien graduada Grava pobremente graduada	Solo Granulometría	Cu > 4 y 1 < Cc < 3 Cu < 4 y/ó 1 > Cc > 3
		Gravas con finos (mas de 12% de finos)	<b>GM</b> <b>GC</b>	Grava limosa Grava arcillosa		Los finos se ubican en la zona de LIMOS (ML) en la Carta de Plasticidad de Casagrande Los finos se ubican en la zona de ARCILLA (CL) en la Carta de Plasticidad de Casagrande
			<b>GC-GM</b>	Grava limosa arcillosa	Simbolo dual: Finos se ubican en la zona de signo doble (CL ML) de la carta de plasticidad de Casagrande.	
			Gravas con 5 a 12% de finos (simbolo dual)	<b>GW-GM</b> <b>GW-GC</b> <b>GP-GM</b> <b>GP-GC</b>	Grava bien graduada con limo Grava bien graduada con arcilla Grava pobremente graduada con limo Grava pobremente graduada con arcilla	Granulometría( Cc, Cu) y plasticidad ( Carta de Plasticidad) Simbolo dual
		<b>ARENAS</b> (mas de la mitad de la fracción gruesa es menor que el tamiz No 4)		Arenas Limpias (poco o ningun fino)	<b>SW</b> <b>SP</b>	Arena bien graduada Arena pobremente graduada
	Arenas con finos (mas de 12% de finos)		<b>SM</b> <b>SC</b> <b>SC-SM</b>	Arena limosa Arena arcillosa Arena limosa arcillosa	Los finos se ubican en la zona de LIMOS (ML) en la Carta de Plasticidad de Casagrande Los finos se ubican en la zona de ARCILLA (CL) en la Carta de Plasticidad de Casagrande Simbolo dual: Finos se ubican en la zona de signo doble (CL ML) de la carta de plasticidad de Casagrande.	
			Arenas con 5 a 12 % de finos ( simbolo dual)	<b>SW-SM</b> <b>SW-SC</b> <b>SP-SM</b> <b>SP-SC</b>	Arena bien graduada con limo Arena bien graduada con arcilla Arena pobremente graduada con limo Arena pobremente graduada con arcilla	Granulometría( Cc, Cu) y plasticidad ( Carta de Plasticidad) Simbolo dual

Figura 82. Suelos no cohesivos. Sistema unificado de clasificación SUCS. ASTM D2487.

Otra clasificación a la que se puede recurrir para suelos no cohesivos es en base a su densidad relativa, distinguiéndose estados muy sueltos, sueltos, medianamente densos, densos y muy densos. Este criterio resulta especialmente relevante en microtunelación, ya que la densidad controla el ángulo de rozamiento interno. Arenas sueltas y medianamente densas presentan un riesgo elevado de colapso del frente y licuefacción estática bajo condiciones saturadas, lo que hace imprescindible el uso de frentes presurizados tipo slurry o EPB. Por el contrario, arenas densas pueden permitir soluciones más flexibles, siempre que se mantenga el control del agua y del confinamiento.

Desde el punto de vista hidráulico, los suelos no cohesivos se caracterizan por su elevada permeabilidad, aunque con variaciones significativas en función de la granulometría. Arenas limpias y gravas abiertas presentan coeficientes de permeabilidad elevados, favoreciendo la infiltración del agua y del fluido de soporte en el frente, lo que puede reducir las tensiones efectivas y comprometer la estabilidad. En suelos no cohesivos con menor permeabilidad o con fracción fina significativa, el control hidráulico es más sencillo, aunque sigue siendo un factor determinante en el diseño.

Finalmente, los suelos no cohesivos pueden clasificarse según su origen y estructura, distinguiéndose entre depósitos aluviales recientes, rellenos antrópicos, depósitos fluviales estratificados o materiales residuales. Los rellenos y depósitos heterogéneos presentan una alta variabilidad espacial y un comportamiento impredecible, lo que incrementa el riesgo geotécnico en microtunelación y obliga a adoptar sistemas de excavación altamente controlados, con capacidad de adaptación rápida a cambios locales del terreno.

En los suelos no cohesivos la resistencia al corte no procede de una cohesión verdadera entre partículas, sino del rozamiento interno y del estado tensional efectivo, siendo el agua un factor decisivo en la estabilidad del conjunto (Jiménez Salas, 1976). En microtunelación, estos materiales presentan una problemática específica, ya que su estabilidad depende casi exclusivamente del equilibrio entre las tensiones efectivas, la presión intersticial y el confinamiento proporcionado por el terreno y por el sistema de excavación.

Desde el punto de vista mecánico, los suelos no cohesivos presentan una resistencia al corte controlada por el ángulo de rozamiento interno, con valores muy sensibles a la densidad relativa, la distribución granulométrica y el grado de saturación. En condiciones drenadas, las arenas densas pueden mostrar una respuesta estable, mientras que arenas sueltas o limos arenosos saturados pueden experimentar fenómenos de inestabilidad del frente, flujo de terreno o incluso licuefacción estática, especialmente en excavaciones poco profundas o bajo nivel freático elevado. En capas de

arena suelta y limo, debido a este mecanismo, el colapso puede ser relativamente rápido y dar lugar a la licuefacción estática del suelo situado delante de la tuneladora. Este fenómeno puede producir sobre excavaciones incontroladas y asentamientos extremos en superficie.(Broere, 2014).

En el contexto de la microtunelación, la principal dificultad asociada a los suelos no cohesivos es la estabilidad del frente de excavación, dado que la ausencia de cohesión impide la autosustentación del terreno. Por este motivo, en arenas y gravas sueltas o medianamente densas resulta generalmente imprescindible el uso de escudos de frente presurizado, donde la presión ejercida en el frente compense las tensiones del terreno y limite la entrada de material y agua. Los sistemas slurry y EPB correctamente condicionados son los más empleados, siendo el primero especialmente adecuado en suelos granulares gruesos y altamente permeables.

La presencia de agua constituye un factor crítico en estos suelos. En condiciones saturadas, la infiltración del fluido de soporte o del agua subterránea puede reducir las tensiones efectivas, favoreciendo la inestabilidad del frente y el colapso progresivo del terreno. En este sentido, el uso de suspensiones bentoníticas con suficiente esfuerzo umbral y control reológico resulta esencial para evitar la pérdida de estabilidad granular, especialmente en arenas uniformes o capas propensas a licuefacción. En sistemas slurry, la calidad del lodo y su capacidad para formar una torta filtrante en el frente es un elemento clave del diseño.

Desde el punto de vista constructivo, los suelos no cohesivos imponen limitaciones relevantes sobre los radios de curvatura, las longitudes de hincas y el control geométrico, debido a la elevada sensibilidad del terreno a desviaciones del eje y a sobreexcavaciones locales. Además, el rozamiento tubería-suelo suele ser elevado y variable, haciendo habitual la necesidad de lubricación intensiva, inyecciones multietapa y, en longitudes elevadas, el empleo de estaciones de empuje intermedias.

En determinadas condiciones favorables, como por ejemplo arenas densas, baja permeabilidad, nivel freático controlado y recubrimientos suficientes— pueden emplearse escudos abiertos con excavación mecánica integrada, especialmente en diámetros medios o grandes. No obstante, esta solución requiere una evaluación geotécnica muy rigurosa, ya que cualquier pérdida de confinamiento puede desencadenar inestabilidades rápidas y difíciles de controlar. Los suelos granulares carecen de capacidad de autosostenimiento frente a excavaciones abiertas, por lo que requieren confinamiento o sostenimiento continuo para evitar desprendimientos y colapsos locales (Jiménez Salas, 1975).

### 3.6.2.2.3. Suelos mixtos.

Los suelos mixtos corresponden a materiales en los que coexisten, en proporciones variables, fracciones granulares (arenas y/o gravas) y fracciones finas cohesivas (limos y arcillas). Los suelos que combinan fracciones granulares y finas no presentan un comportamiento mecánico puro, sino transicional, dependiendo su resistencia y deformabilidad tanto del rozamiento interno como de la cohesión aparente aportada por los finos (Jiménez Salas, 1976). Esta combinación confiere a estos suelos un comportamiento geotécnico altamente complejo y cambiante, que no puede asimilarse de forma directa ni al de los suelos puramente cohesivos ni al de los no cohesivos. En microtunelación, los suelos mixtos representan uno de los escenarios más exigentes desde el punto de vista del diseño, la selección tecnológica y la gestión del riesgo.

Desde el punto de vista mecánico, los suelos mixtos presentan una resistencia al corte que depende simultáneamente del rozamiento interno de la fracción granular y de la cohesión aparente aportada por los finos, siendo esta última especialmente sensible al contenido de agua, al grado de remoldeado y a la presión intersticial. En determinadas condiciones, los finos pueden actuar como un elemento estabilizador, proporcionando una cierta capacidad de autosustentación del frente; sin embargo, esta estabilidad suele ser temporal y frágil, pudiendo perderse bruscamente ante incrementos de presión de poro, vibraciones o cambios en el régimen de excavación. En suelos con contenido significativo de finos, la resistencia puede disminuir bruscamente cuando se altera la estructura del material o aumentan las presiones intersticiales, aun cuando inicialmente presenten una estabilidad aparente (Jiménez Salas, 1976).

Desde el punto de vista hidráulico, los suelos mixtos muestran un comportamiento intermedio y muy variable. La permeabilidad puede cambiar de forma significativa con pequeñas variaciones en el contenido de finos, dando lugar a situaciones en las que coexisten zonas drenantes y zonas parcialmente impermeables. Este comportamiento favorece fenómenos de infiltración localizada, sobrepresiones intersticiales y migración de finos, lo que puede provocar inestabilidades en el frente, pérdidas de material y dificultades en el control de la presión de soporte. En microtunelación, esta condición obliga a un control muy preciso del fluido de soporte y del balance de presiones. La presencia de agua en suelos granulares con finos modifica sustancialmente su comportamiento mecánico, reduciendo las tensiones efectivas y alterando el equilibrio entre fricción y cohesión aparente. (Jiménez Salas, 1975).

En cuanto a la estabilidad del frente, los suelos mixtos suelen admitir un rango de soluciones más amplio que los suelos no cohesivos puros, pero con un margen de seguridad reducido. En estos

materiales, los sistemas de frente presurizado tipo EPB resultan especialmente adecuados, ya que permiten aprovechar la fracción fina del terreno excavado para generar un tapón plástico estable, siempre que el acondicionamiento mediante espumantes, agua o polímeros sea el adecuado. En condiciones de elevada permeabilidad o fracción gruesa dominante, los sistemas slurry o híbridos EPB–slurry ofrecen mayores garantías de estabilidad y control hidráulico.

Los suelos mixtos constituyen un escenario geotécnico intermedio, pero de alta complejidad, en el que la selección de la tecnología de microtunelación debe basarse en un análisis detallado de la proporción y distribución de finos, el régimen hidráulico y la estabilidad esperable del frente. Los terrenos de comportamiento intermedio exigen soluciones constructivas que permitan adaptarse a variaciones locales del material y del régimen tensional (Jiménez Salas, 1975).

#### **3.6.2.2.4. Suelos con bloques o cantos rodados.**

Los suelos con presencia de bloques de roca, bolos o cantos rodados de gran tamaño constituyen uno de los escenarios más complejos y limitantes para la microtunelación. Este tipo de terrenos se caracteriza por una elevada heterogeneidad granulométrica, en la que coexisten fracciones finas o medias con elementos de gran tamaño, cuya distribución espacial, frecuencia y proporción volumétrica condicionan de forma decisiva la excavabilidad del terreno y la continuidad del proceso constructivo.

Uno de los principales problemas asociados a estos materiales es la imposibilidad de transporte hidráulico del material excavado cuando los tamaños de los bloques superan ciertos umbrales. En este sentido, debe destacarse la aportación de la tecnología de microtunelación con escudos presurizados tipo slurry para afrontar terrenos con bloques o gravas de gran tamaño, que impiden el transporte hidráulico de la mezcla lodo–escombros por medios convencionales (Mendaña Saavedra y Fernández Martínez, 2011). No obstante, esta solución presenta limitaciones claras cuando la proporción de tamaños grandes en el frente es elevada.

En terrenos inestables y saturados con presencia de bolos, el problema sólo puede abordarse mediante el empleo de un hidroescudo, si bien su eficacia se ve comprometida cuando el porcentaje de tamaños grandes en el frente alcanza valores significativos (Mendaña Saavedra y Fernández Martínez, 2011). En la práctica, la rueda de corte del hidroescudo tiende a desplazar lateralmente una parte de los bloques, de modo que el machaqueo previo solo debe aplicarse al resto; sin embargo, cuando el porcentaje medio de bloques de gran tamaño supera valores del orden del 15 % al 20 % del volumen total excavado, los rendimientos dejan de ser asumibles, se pierde la

continuidad del avance y la viabilidad técnica del sistema se ve seriamente comprometida (Mendaña Saavedra y Fernández Martínez, 2011).

Cuando se superan estos porcentajes críticos, resulta imprescindible recurrir a tratamientos previos del terreno, tales como inyecciones de masa o la implantación de pilotes de mortero, con el objetivo de rellenar al menos un 50 % del volumen ocupado por los bolos. Estas actuaciones permiten consolidar el terreno, inmovilizar los tamaños grandes y posibilitar su corte mecánico mediante las herramientas de la rueda del hidroescudo. Esta solución se aplica habitualmente cuando aparecen franjas localizadas de bloques o cantos rodados, si bien no es posible establecer límites universales mediante cifras orientativas, ya que deben evaluarse conjuntamente la frecuencia, el tamaño y la distribución de estos elementos a lo largo del trazado (Mendaña Saavedra y Fernández Martínez, 2011).

En aquellos casos en los que se prevé que la presencia de bloques de gran tamaño sea elevada en la mayor parte del trazado, es necesario realizar un análisis específico y detallado del caso, ya que puede alcanzarse no solo el límite de aplicación de los hidroescudos y, en general, de la excavación mecanizada mediante tuneladora, sino incluso comprometer la viabilidad económica global del proyecto (Mendaña Saavedra y Fernández Martínez, 2011). En estos escenarios, la decisión tecnológica debe apoyarse en una caracterización geotécnica exhaustiva y en estudios de riesgo específicos, valorando alternativas constructivas o soluciones de tratamiento previo intensivo del terreno.

#### 3.6.2.2.5. Roca blanda.

Se denominan rocas blandas aquellas que, aun conservando estructura rocosa, presentan resistencias reducidas y un comportamiento mecánico próximo al de los suelos muy rígidos (Jiménez Salas, 1976). La roca blanda constituye un material de transición entre los suelos y las rocas duras, caracterizándose por una resistencia mecánica reducida, una elevada deformabilidad y, en muchos casos, una marcada sensibilidad a la presencia de agua y al estado de tensiones. Desde el punto de vista geotécnico, este grupo engloba materiales como margas, arcillolitas, lutitas, yesos, calizas muy alteradas, areniscas poco cementadas o rocas meteorizadas, cuya respuesta frente a la excavación mecanizada presenta particularidades relevantes en microtunelación.

Desde el punto de vista mecánico, la roca blanda suele presentar una resistencia a compresión simple baja a media, con valores que pueden situarse en rangos solapados con los de suelos muy rígidos. Su comportamiento puede variar desde un modo predominantemente frágil, con rotura por planos de debilidad, hasta un comportamiento más plástico cuando existe un elevado contenido

arcilloso o un alto grado de alteración. Esta variabilidad condiciona directamente el tipo de herramienta de corte, el empuje necesario y la estabilidad del frente durante la excavación.

En términos de estabilidad del frente, la roca blanda puede ofrecer una cierta capacidad de autosostenimiento a corto plazo, especialmente en condiciones secas y con baja fracturación. No obstante, esta estabilidad suele ser temporal, pudiendo degradarse rápidamente por efectos de humectación, relajación tensional o alteración progresiva del macizo. Muchas rocas blandas, especialmente las de naturaleza arcillosa o margosa, experimentan una notable pérdida de resistencia y rigidez al aumentar su grado de humedad (Jiménez Salas, 1976). La alteración por meteorización o por humectación puede transformar una roca blanda en un material de comportamiento claramente terroso (Jiménez Salas, 1976). En microtunelación, estas circunstancias obligan a evaluar cuidadosamente la necesidad de sistemas de sostenimiento del frente.

Desde el punto de vista hidrogeológico, muchas rocas blandas presentan una sensibilidad elevada al agua. Materiales como margas o lutitas pueden experimentar reblandecimiento, hinchamiento o pérdida de resistencia al entrar en contacto con el agua, incrementando el riesgo de convergencias, sobreexcavación y aumento del rozamiento tubería–terreno. En estos casos, el control del agua y la elección del sistema de excavación resultan críticos.

En cuanto a la excavabilidad, la roca blanda permite generalmente el empleo de herramientas de corte más simples que en roca dura, como picas, discos de pequeño diámetro o combinaciones de herramientas de trituración y corte. No obstante, la presencia de niveles más cementados o intercalaciones duras puede generar esfuerzos puntuales elevados, desgaste irregular de las herramientas y dificultades en el control geométrico del trazado. Esta heterogeneidad exige una selección cuidadosa del cabezal y una capacidad de adaptación del sistema de excavación.

La excavación en roca blanda puede generar cargas de hinca elevadas debido al rozamiento periférico y a la interacción con el terreno alterado alrededor del tubo. En tramos largos, suele ser necesario recurrir a lubricación perimetral, control del sobrecorte y, en determinados casos, estaciones de empuje intermedias para mantener los esfuerzos dentro de límites admisibles. Asimismo, la previsión de radios de curvatura y pendientes debe tener en cuenta la capacidad del terreno para admitir deformaciones sin pérdida de estabilidad.

#### 3.6.2.2.6. Roca dura.

La roca dura engloba materiales de elevada resistencia mecánica, baja deformabilidad y estructura predominantemente intacta, tales como granitos, basaltos, cuarcitas, calizas compactas, dolomías y areniscas fuertemente cementadas. Desde el punto de vista geotécnico, se caracteriza por valores elevados de resistencia a compresión simple, un comportamiento generalmente frágil y una respuesta frente a la excavación dominada por la fracturación del macizo más que por la deformación del material intacto. En microtunelación, la presencia de roca dura condiciona de forma decisiva la tecnología de excavación, el tipo de herramientas de corte y la viabilidad técnica y económica del proyecto.

Desde el punto de vista mecánico, la roca dura presenta una elevada resistencia al corte y a compresión, con deformaciones generalmente pequeñas antes de la rotura. La excavación se produce principalmente por rotura frágil, mediante trituración, fracturación o corte del material, lo que implica esfuerzos elevados en el cabezal de excavación y un desgaste significativo de las herramientas. En este contexto, según indica (Jiménez Salas, 1976) la excavabilidad no depende únicamente de la resistencia del material intacto, sino también de la calidad del macizo rocoso, la orientación y espaciamiento de las discontinuidades, y el grado de alteración o meteorización.

En términos de estabilidad del frente, la roca dura puede ofrecer una elevada capacidad de autosostenimiento, especialmente cuando el macizo es masivo y poco fracturado. En estas condiciones, es posible la utilización de escudos abiertos o incluso soluciones sin presurización del frente, siempre que el recubrimiento sea suficiente y el control geométrico adecuado. No obstante, en macizos muy fracturados, diaclasados o con presencia de fallas, la estabilidad del frente puede verse comprometida, siendo necesario recurrir a escudos cerrados, presurización puntual o medidas de sostenimiento complementarias.

La influencia del agua en roca dura suele estar asociada principalmente a la red de discontinuidades. Aunque la matriz rocosa presenta baja permeabilidad, las fracturas pueden actuar como conductos preferentes, generando entradas de agua localizadas, sobrepresiones o erosión de rellenos de discontinuidades. En microtunelación, estas condiciones pueden afectar tanto a la estabilidad del frente como al rozamiento tubería–terreno.

En cuanto a la excavabilidad y selección tecnológica, la microtunelación en roca dura requiere el empleo de cabezales de corte específicos, equipados con discos cortadores, picas reforzadas o herramientas de alta resistencia al desgaste, en función de la resistencia y abrasividad del material. La excavación en roca dura requiere elevados esfuerzos de rotura, lo que implica mayores consumos

de energía y desgaste de herramientas (Jiménez Salas, 1976). Los sistemas tipo rock slurry o microtuneladoras con cabezal de roca son los más adecuados en estos escenarios, especialmente en diámetros medios y grandes. La velocidad de avance suele ser inferior a la obtenida en suelos, y los costes asociados al desgaste y reposición de herramientas adquieren un peso significativo en la viabilidad económica del proyecto.

La excavación en roca dura suele generar cargas de hincas elevadas, especialmente en tramos largos, debido al contacto directo entre el tubo y el macizo rocoso y a la limitada capacidad de deformación del terreno circundante. En estos casos, resulta habitual la necesidad de sobrecorte controlado, inyecciones de lubricación perimetral y, cuando las longitudes lo requieren, la instalación de estaciones de empuje intermedias para limitar los esfuerzos transmitidos a la tubería y al pozo de empuje.

Para el análisis de excavaciones subterráneas en roca (Jiménez Salas, 1976) destaca la necesidad de clasificar el macizo rocoso atendiendo a su estructura, fracturación y estado tensional.

En el ámbito de la excavación subterránea, existe una clara analogía entre la clasificación geotécnica de macizos rocosos aplicada en túneles convencionales y su aplicación en proyectos de microtunelación, ya que los principios mecánicos que gobiernan el comportamiento del macizo rocoso son esencialmente los mismos, independientemente de la escala del diámetro excavado. Sistemas de clasificación ampliamente consolidados como el RMR de Bieniawski, el Índice Q de Barton o el RMR corregido de Romana (SMR) permiten evaluar de forma sistemática la calidad del macizo rocoso a partir de parámetros como la resistencia de la roca intacta, la frecuencia y orientación de las discontinuidades, el estado de las juntas y la influencia del agua.

Estas clasificaciones, desarrolladas originalmente para túneles de gran sección, sirven de orientación en microtunelación, si bien deben interpretarse considerando las particularidades propias de los pequeños diámetros, como la mayor sensibilidad a desviaciones geométricas, la menor capacidad de adaptación del frente y la mayor influencia relativa de discontinuidades individuales.

En este sentido, los criterios derivados de Bieniawski, Barton o Romana pueden tomarse de referencia para apoyar la decisión de la tecnología de microtunelación cuando hablamos de macizos rocosos siendo también muy útiles a la hora de elegir el tipo de cabezal de corte, la necesidad de presurización del frente y la evaluación de la estabilidad durante el avance, etc.,

1	Resistencia de la matriz rocosa (MPa)	Ensayo de carga puntual	>10	10-4	4 - 2	2 - 1	Compresión simple (MPa)		
		Compresión simple	>250	250 - 100	100 - 50	50 - 25	25-5	5-1	<1
	Puntuación		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	<25%		
	Puntuación		20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas		> 2m	0,6 - 2 m	0,2 - 0,6 m	0,06-0,2 m	<0,06 m		
	Puntuación		20	15	10	8	5		
4	Estado de las discontinuidades	Longitud de la discontinuidad	< 1m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	>20 m		
		Puntuación	6	4	2	1	0		
		Abertura	Nada	< 0,1 mm	0,1 - 1,0 mm	1 - 5 mm	>5 mm		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Rugosidad	Muy rugosa	Rugosa	Ligeramente rugosa	Ondulada	Suave		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
		Relleno	Ninguno	Relleno duro <5 mm	Relleno duro >5 mm	Relleno blando <5 mm	Relleno blando >5 mm		
		Puntuación	6	4	2	1	0		
		Alteración	Inalterada	Ligeramente alterada	Moderadamente alterada	Muy alterada	Descompuesta		
		Puntuación	6	5	3	1	0		
5	Agua freática	Caudal por 10 m de túnel	Nulo	<10 litros/min	10 25 litros/min	25 - 125 litros/min	>125 litros/min		
		Relación: Presión de agua/tensión principal mayor	0	0 - 0,1	0,1 - 0,2	0,2 - 0,5	>0,5		
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteando	Agua fluyendo		
		Puntuación	15	10	7	4	0		
<b>Corrección por la orientación de las discontinuidades</b>									
Dirección y buzamiento		Muy favorables	Favorables	Medias	Desfavorables	Muy desfavorables			
Puntuación	Túneles	0	-2	-5	-10	-12			
	Cimentaciones	0	-2	-7	-15	-25			
	Taludes	0	-5	-25	-50	-60			

Tabla 5. Clasificación geomecánica de Bieniawski. Parámetros de la clasificación (Bieniawski, 1.989).

### 3.6.2.2.7. Parámetros geotécnicos claves a considerar para cada tipo de suelo.

La correcta elección de la tecnología de microtunelación está directamente condicionada por un conocimiento detallado de los parámetros geológicos y geotécnicos del terreno, los cuales determinan la excavabilidad, la estabilidad del frente, los mecanismos de transporte del material excavado y el comportamiento del suelo frente a la interacción con la máquina y la tubería. La bibliografía técnica especializada y las guías de diseño internacionales coinciden en que no todos los parámetros resultan igualmente relevantes para todos los tipos de terreno, por lo que su análisis debe realizarse de forma selectiva y coherente con la tecnología prevista.

En suelos no cohesivos (arenas y gravas), adquieren especial relevancia parámetros como la distribución granulométrica, el ángulo de rozamiento interno, la abrasividad, la permeabilidad y la

naturaleza de los flujos de agua subterránea, ya que estos condicionan de manera crítica la estabilidad del frente y la necesidad de presurización mediante sistemas slurry o híbridos. Asimismo, la presencia, frecuencia y características físicas de cantos, bolos o fragmentos gruesos resulta determinante para evaluar la viabilidad del transporte hidráulico del material excavado y el diseño del cabezal de corte.

En suelos cohesivos, como arcillas y limos, cobran mayor importancia la cohesión, los índices de plasticidad (LL, LP, IP) y la sensibilidad a la remoción, ya que influyen directamente en el comportamiento reológico del material excavado, la tendencia a la adhesión en el cabezal y los sistemas de extracción, y la idoneidad de tecnologías EPB frente a sistemas slurry. En este tipo de terrenos, la caracterización de la humedad natural, el peso específico y la posible presencia de gases o constituyentes agresivos también resulta fundamental para garantizar la seguridad y la continuidad del avance.

En suelos mixtos, donde coexisten fracciones cohesivas y granulares, el análisis debe ser especialmente exhaustivo, combinando parámetros de ambos grupos. En estos casos, pruebas como ensayos de desintegración y mezcla, así como estudios mineralógicos y de composición, permiten anticipar comportamientos complejos del frente y justificar la selección de tecnologías más versátiles, como equipos híbridos o slurry con tratamiento avanzado del lodo.

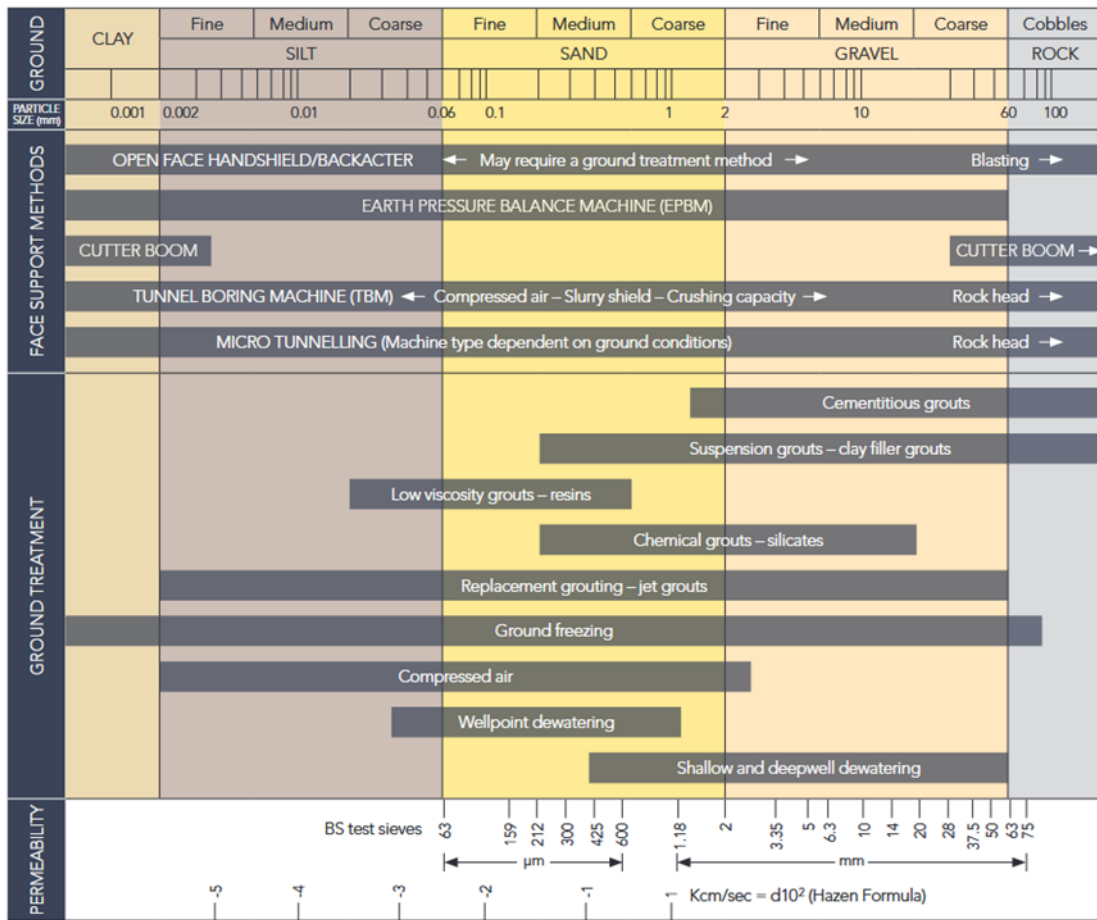
Por último, en terrenos rocosos, la selección tecnológica depende principalmente de parámetros como la resistencia a compresión simple, la resistencia a tracción, la calidad del macizo rocoso (RQD), la estructura y discontinuidades identificadas mediante testificación de testigos (TCR, SCR, FI) y la excavabilidad específica.

TEST	Non-cohesive	Cohesive	Mixed Soils	Fill Material	Rock
Unit weight and moisture content	•	•	•	•	•
Angle of friction	•		•	•	
Particle size distribution	•	•	•	•	
Abrasivity	•	•	•	•	•
Cohesion		•	•	•	
Types and proportions of minerals	•	•	•	•	•
Standard penetration tests	•	•	•	•	
Permeability and nature of ground water flows (seasonal/tidal changes)	•		•	•	•
Toxic/hazardous constituents in the ground/groundwater	•	•	•	•	•
Frequency and physical properties of boulders, cobbles or flints	•	•	•	•	•
Pump down tests	•		•	•	•
Presence of gases				•	•
Compressive strength					•
Rock quality designation (RQD)					•
Core logging (TCR, SCR, FI)					•
Tensile strength					•
Specific energy (excavatability)					•
Slake durability					•
Geological description	•	•	•		•
Plasticity indicees (SL, PL, PI)		•	•		
Disaggregation mixing test*		•	•		
RF (x-ray fluorescence) mixing test		•	•		

Tabla 6. Parámetros geotécnicos que considerar según tipo de suelo. Pipe Jacking Association.2017.

3.6.2.2.8. Aplicabilidad de las tecnologías según los tipos de suelos.

La selección de la tecnología de microtunelación no puede realizarse de forma independiente a las características geológicas y geotécnicas del terreno atravesado. La bibliografía técnica especializada y diversas guías de diseño internacionales coinciden en establecer criterios de idoneidad entre los distintos métodos sin zanja y los tipos de suelo, basados en la excavabilidad, la estabilidad del frente, el comportamiento frente al agua subterránea y la capacidad de control geométrico del sistema. En este sentido, existen tablas de aplicabilidad ampliamente aceptadas, como las recogidas en manuales norteamericanos y europeos, que relacionan de forma sistemática las condiciones del terreno con la conveniencia de emplear tecnologías como microtunelación con lodo (slurry), EPB Earth Pressure balance, etc.



Note: Whilst open face handshield and compressed air are referred to above, these are only used in special circumstances. Reference The Work in Compressed Air Regulations 1996 and British Tunnelling Society (BTS) Guidance on the Work in Compressed Air Regulations 1996.

Figura 83. Gráfico para selección de tecnología de microtunelación según tipo de suelo. Pipe Jacking Asociación 2017.

No existe una tecnología universalmente válida, sino que la elección óptima debe basarse en una correlación rigurosa entre el tipo de terreno y las capacidades técnicas de cada método, apoyándose en guías de aplicabilidad contrastadas como la mostrada, que constituyen una herramienta fundamental en la fase de planificación y diseño de proyectos de microtunelación.

### 3.6.3. Condicionantes hidrogeológicos.

La microtunelación es una técnica de excavación subterránea altamente dependiente de las condiciones del terreno y, de forma muy significativa, del régimen hidrogeológico existente. La presencia de agua subterránea, su presión, permeabilidad y relación con los materiales atravesados condicionan tanto el diseño del proyecto como la elección del método constructivo, la maquinaria empleada y las medidas de control durante la ejecución.

Desde el punto de vista hidrogeológico, el trazado de un microtúnel puede intersectar distintos acuíferos, niveles freáticos o zonas de circulación preferente del agua, lo que implica riesgos asociados como inestabilidad del frente de excavación, pérdidas de terreno, infiltraciones incontroladas.

La presión intersticial del agua juega un papel clave en el equilibrio del frente de excavación. En microtunelación, es imprescindible garantizar un balance adecuado entre la presión del terreno y la presión de sostenimiento aplicada por la tuneladora.

Las condiciones hidrogeológicas influyen directamente en aspectos constructivos como la selección del sistema de bombeo, el diseño de los pozos de ataque y recepción, la gestión de los fluidos de excavación y la necesidad de tratamientos previos del terreno (inyecciones, congelación, rebajamiento del nivel freático, entre otros). Por ello, la caracterización hidrogeológica detallada del emplazamiento constituye una fase fundamental en la planificación de proyectos de microtunelación, permitiendo anticipar riesgos, optimizar soluciones técnicas y garantizar la viabilidad técnica y económica de la obra.

#### 3.6.3.1. Presencia del nivel freático.

La presencia del nivel freático (NF) y, en general, del régimen de agua subterránea constituye uno de los condicionantes más relevantes en microtunelación por su impacto directo en: (i) el estado tensional efectivo del terreno, (ii) la estabilidad del frente y del contorno excavado, (iii) la interacción suelo-agua-fluido de sostenimiento, y (iv) los mecanismos de deformación y potenciales afecciones en superficie. En términos prácticos, el NF condiciona tanto el método de excavación, como los parámetros de operación, el diseño de pozos y las medidas preventivas/correctoras.

Nivel freático: superficie equipotencial que separa la zona saturada de la no saturada en un acuífero libre. Su posición puede variar estacionalmente, por bombeos cercanos, lluvias torrenciales o por obras (pantallas, excavaciones).

La zona no saturada, situada por encima del nivel freático, se caracteriza por la presencia simultánea de aire y agua en los poros del suelo, estando el agua sometida a presiones negativas debidas a fenómenos de capilaridad y succión. Aunque esta zona suele tener una influencia limitada en microtunelación, adquiere relevancia en excavaciones someras o en las fases iniciales de ejecución de los pozos de ataque y recepción.

La zona saturada es aquella en la que los poros del terreno se encuentran completamente llenos de agua y la presión intersticial es positiva, aumentando con la profundidad. Esta condición es especialmente crítica en microtunelación, ya que la presencia de agua en el terreno influye de manera directa en la estabilidad del frente de excavación y en el comportamiento tensional del conjunto suelo–estructura.

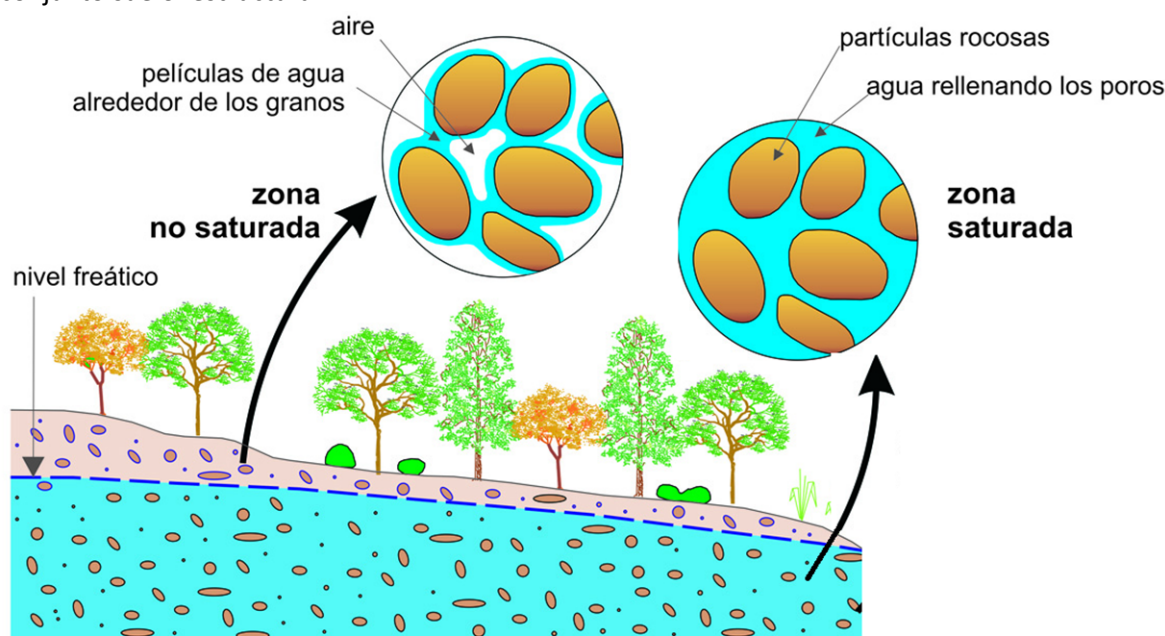


Figura 84. Nivel freático y saturación del suelo. <https://medioambientedecalidad.wordpress.com/tag/suelos/>

No obstante, en el ámbito de la microtunelación resulta fundamental distinguir entre nivel freático y nivel piezométrico, especialmente cuando el trazado atraviesa acuíferos confinados o semiconfinados. El nivel piezométrico representa la altura hasta la que ascendería el agua en un tubo conectado hidráulicamente con el acuífero y puede situarse por encima de la cota del terreno, dando lugar a condiciones artesianas. En estos casos, la presión del agua en el frente de excavación puede ser significativamente superior a la esperada si únicamente se considera la posición geométrica del nivel freático, lo que incrementa de forma notable el riesgo de inestabilidad hidráulica.

Presión de poros: en un punto de la zona saturada, la presión intersticial  $u$  puede aproximarse por:

$$u = \gamma_w h$$

Fórmula 18.-Presión de poro.

donde  $\gamma_w$  es el peso específico del agua y  $h$  la carga piezométrica (altura de columna de agua equivalente por encima del punto).

En la zona saturada, el agua ejerce una presión intersticial o presión de poros sobre la estructura del suelo, la cual se relaciona con la carga hidráulica existente en cada punto. La excavación con una microtuneladora (TBM) a través de un acuífero generará presiones excesivas de agua en los poros del suelo alrededor del frente del túnel (Xu et al., 2021). Dicha presión depende de la cota piezométrica y del peso específico del agua, y actúa como una carga desestabilizadora adicional en el frente y el contorno excavado. Variaciones del nivel freático o del nivel piezométrico, ya sean estacionales o inducidas por actividades antrópicas, se traducen directamente en cambios en la presión de poros, afectando al equilibrio del terreno durante la excavación del microtúnel.

Tensiones efectivas: el comportamiento resistente y deformacional del suelo viene gobernado por:

$$\sigma' = \sigma - u$$

*Fórmula 20.- Tensiones efectivas*

Por tanto, a igualdad de tensión total  $\sigma$ , un incremento de  $u$  reduce  $\sigma'$  y con ello la resistencia al corte disponible (y típicamente aumenta deformaciones y riesgo de inestabilidad).

Las presiones intersticiales excesivas generadas reducen las tensiones efectivas en el suelo. Esto puede resultar problemático en capas de arena no cohesiva, donde la falta de microestabilidad de los granos individuales puede conducir a un colapso lento, gradual y continuo del frente del túnel. En arenas sueltas con baja densidad relativa, este mecanismo puede ser relativamente rápido y dar lugar a la licuefacción estática del suelo frente a la TBM. Esto puede resultar en una sobreexcavación inicialmente no detectada y en asentamientos extremadamente grandes en la superficie (Broere, 2014).

Asimismo, la excavación del microtúnel provoca una reducción local de las tensiones totales en el contorno excavado, generando redistribuciones tensionales que, combinadas con elevadas presiones de poros, pueden dar lugar a inestabilidades del frente, deformaciones excesivas o pérdidas de terreno si no se compensa adecuadamente mediante la presión de sostenimiento aplicada por la tuneladora.

La presencia del nivel freático implica, además, la existencia potencial de flujo de agua subterránea hacia la excavación, impulsado por gradientes hidráulicos generados entre el terreno y el vacío excavado. En función de la permeabilidad y de la continuidad hidráulica de las formaciones atravesadas, este flujo puede dar lugar a infiltraciones significativas, arrastre de finos y fenómenos de erosión interna. En microtunelación, el frente de excavación y el contorno del túnel actúan como

superficies de descarga preferente, incrementando localmente el gradiente hidráulico y, con ello, el riesgo de sifonamiento o inestabilidad hidráulica, especialmente en suelos granulares saturados. La presencia de agua y las fuerzas de filtración reducen significativamente la estabilidad del frente del túnel. (L'Amante & Fantauzzi, 2023)

El nivel freático no debe considerarse únicamente como una cota geométrica, sino como un parámetro hidrogeológico que condiciona las presiones intersticiales, los gradientes hidráulicos y el estado tensional efectivo del terreno. Un conocimiento detallado de estos aspectos resulta imprescindible para el correcto diseño del proceso de microtunelación, la selección del método constructivo más adecuado y la definición de los parámetros de control necesarios para garantizar la estabilidad y seguridad de la excavación.

Existen publicaciones donde en las que se recomiendan el uso de ciertas tecnologías y diámetros en base de si el suelo está saturado o no saturado.

EXCAVATION METHOD	PIPELINE INTERNAL DIAMETER	DRY GROUND (Dry cohesive, dry non-cohesive and dry mixed and fill conditions)		WET GROUND (Wet cohesive, wet non-cohesive and wet mixed and fill conditions)	
		FACE SUPPORT	REMARKS	FACE SUPPORT	REMARKS
Open face TBM	1200-3000	None	Only applicable to stable face conditions, including rock	Chemical stabilisation Suspension grouts Well points Deep wells	Only applicable to stable face conditions
Cutter boom shield			Only applicable to strong cohesive soils and soft rock		-
Backact shield			Only applicable to stable face conditions		-
Pressurised slurry machine	1400-3000	In-built method	-	In-built method	-
Earth pressure balance machine			-	Additives in certain ground conditions	Limited to water pressure head
Microtunnelling			-	Dependant on type of machine	-
Open hand shield	1200-3000	Consider face boards and soil trays	Limited by safety considerations and exposure to HAVS (see note b)	Chemical stabilisation Suspension grouts Well points Deep wells	Subject to ground conditions. Limited by safety considerations and exposure to HAVS (see note b)

Tabla 7. Recomendación del uso de tecnología en base a la saturación del suelo. Pipi Jacking Associate.2017

### 3.6.3.2. Presencia intersticial prevista en el frente.

La presencia de agua intersticial en el frente de excavación constituye uno de los factores críticos que condicionan la estabilidad del frente y el correcto desarrollo de la excavación en obras de microtunelación. Dicha presencia está directamente relacionada con la posición del nivel freático o piezométrico respecto a la cota del eje del microtúnel, así como con las propiedades hidrogeológicas del terreno atravesado, tales como la permeabilidad, la continuidad hidráulica y la estratificación del medio.

Cuando el frente de excavación se sitúa por debajo del nivel freático, el terreno se encuentra en condiciones saturadas y sometido a una presión intersticial positiva. En este contexto, el frente está expuesto a la acción simultánea de las tensiones del terreno y de la presión del agua contenida en los poros, lo que reduce las tensiones efectivas disponibles y, por tanto, la resistencia al corte del suelo.

La magnitud de la presión intersticial prevista en el frente depende fundamentalmente de la carga hidráulica existente en el entorno del trazado, que puede expresarse como función de la diferencia de cota entre el nivel piezométrico y el punto considerado. En condiciones hidrogeológicas estáticas, la presión de poros puede aproximarse mediante una distribución hidrostática; no obstante, durante la excavación se generan perturbaciones en el campo de presiones debido a la descarga hidráulica que supone el avance del frente, a la posible infiltración de fluidos de excavación y a la aplicación de presión de sostenimiento. Se observan con frecuencia incrementos de carga de presión de poros frente al frente del túnel durante excavaciones con escudos de lodos.(Zizka et al., 2017). Estas perturbaciones pueden dar lugar a presiones intersticiales transitorias superiores a las naturales, incrementando el riesgo de inestabilidad si no se controlan adecuadamente.

La presencia de agua intersticial en el frente condiciona de forma directa la presión de sostenimiento que debe aplicarse mediante la tuneladora de microtunelación. Dicha presión debe ser, como mínimo, suficiente para equilibrar la presión del agua y del terreno en el frente, manteniendo un estado tensional compatible con la estabilidad. Un déficit de presión puede provocar entradas de agua y material, mientras que una sobrepresión excesiva puede inducir fracturación hidráulica del terreno, levantamientos del terreno o pérdidas hacia la superficie a través de vías preferentes.

A efectos operativos, se suele trabajar con el criterio de que la presión aplicada en el frente  $p_f$  debe ser suficiente para equilibrar:

- el empuje del terreno (tensiones totales),
- la presión de poros  $u$ ,
- y proporcionar un margen de seguridad frente a inestabilidades (colapso) y frente a sobrepresiones (fractura hidráulica/levantamiento).

De forma simplificada, el rango “objetivo” de presiones en frente puede conceptualizarse como:

$$p_{min} \lesssim p_f \lesssim p_{max}$$

*Fórmula 22.- Rango de presiones en frente*

donde:

- $p_{min}$  se asocia a evitar colapso del frente y entradas de agua/material.
- $p_{max}$  se limita para evitar fractura hidráulica, heave (levantamiento) y pérdidas a superficie (blow-out, piping hacia huecos preferentes).

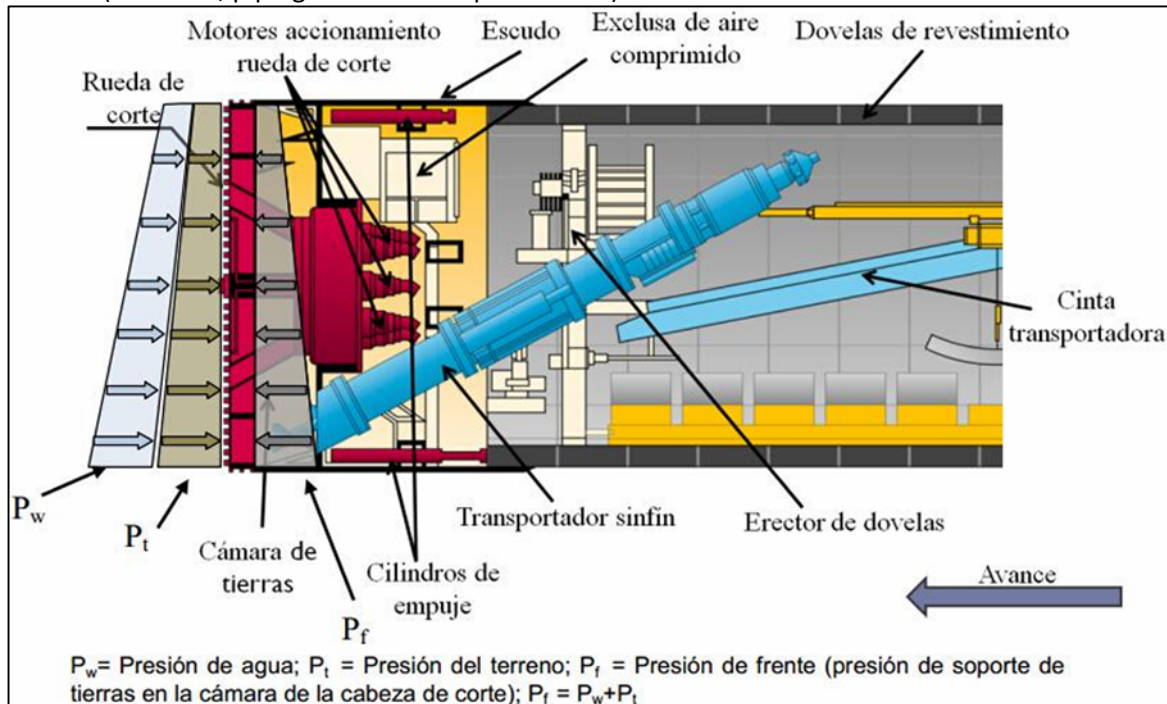


Figura 85. Ejemplo de control de presión del frente en EPB. Sun, 2015.

En suelos granulares saturados (arenas, gravas), el riesgo crítico suele ser la inestabilidad hidráulica (piping/sifonamiento) y el lavado de finos; en suelos finos saturados (limos/arcillas), el control se centra más en mantener equilibrio de presiones para limitar deformaciones y evitar “boiling” local si existen intercalaciones permeables.

En función del grado de presencia intersticial previsto y de la permeabilidad del terreno, resulta determinante la selección del sistema de excavación y sostenimiento. En terrenos saturados y altamente permeables, los sistemas de frente presurizado mediante lodos bentoníticos permiten una mejor transmisión de la presión hidrostática y un control más eficaz de las infiltraciones. En cambio, en terrenos de menor permeabilidad, los sistemas de equilibrio de presión de tierras pueden ser viables, siempre que se garantice la capacidad del material excavado para transmitir la presión necesaria y se adopten medidas de acondicionamiento adecuadas.

Asimismo, la presencia intersticial prevista en el frente obliga a extremar el control y la auscultación durante la ejecución. El seguimiento de la presión en cámara, de los caudales de entrada de agua y de la turbidez del material extraído permite detectar de forma temprana desviaciones respecto a las condiciones previstas. Complementariamente, la instrumentación piezométrica en el entorno

del trazado proporciona información valiosa sobre la evolución de las presiones intersticiales y sobre la interacción entre el proceso de excavación y el régimen hidrogeológico del terreno.

### 3.6.3.3. Flujos subterráneos significativos.

La existencia de flujos subterráneos significativos en el entorno del trazado normalmente son consecuencia de la generación de gradientes hidráulicos naturales o inducidos, asociados a la presencia de acuíferos permeables, a la proximidad de masas de agua superficiales o a alteraciones del régimen hidrogeológico provocadas por la propia excavación. Una estimación precisa del influjo de agua subterránea hacia un túnel constituye una de las tareas más desafiantes pero esenciales en el diseño y la construcción de túneles mecanizados. La mayoría de las soluciones analíticas o numéricas desarrolladas ignoran las condiciones de filtración y los cambios en el potencial hidráulico a lo largo del trazado durante el proceso de excavación, lo que conduce a predicciones inexactas de las tasas de entrada de agua.(Golian et al., 2018). Los métodos numéricos muestran ventajas claras para abordar problemas a escala real con condiciones geológicas complejas. Un gran número de métodos numéricos se han utilizado para predecir el influjo de agua hacia los túneles con mayor precisión(Hu et al., 2024).

Cuando el microtúnel se ejecuta por debajo del nivel freático o intercepta formaciones con elevada permeabilidad, el frente de excavación y el contorno del túnel actúan como superficies de descarga preferente, dando lugar a un flujo convergente del agua subterránea hacia la excavación. La predicción precisa de la entrada de agua en túneles es crucial para el avance de la construcción y la seguridad estructural (Z. Chen et al., 2024).

En excavaciones realizadas con escudos abiertos, el frente se encuentra total o parcialmente expuesto, sin un sistema activo de equilibrado de presiones. En presencia de flujos subterráneos significativos, esta configuración resulta especialmente desfavorable, ya que el frente excavado actúa como un punto de descarga directa del acuífero. Como consecuencia, se producen entradas continuas de agua hacia la excavación, incrementándose los gradientes hidráulicos y las fuerzas de filtración sobre el terreno. En suelos granulares saturados, estas condiciones pueden dar lugar a fenómenos de sifonamiento, arrastre de finos y pérdida de estabilidad del frente, con el consiguiente riesgo de colapso y sobreexcavación. Por este motivo, el uso de escudos abiertos queda generalmente limitado a terrenos de baja permeabilidad o a situaciones en las que el nivel freático se sitúa claramente por debajo de la cota del frente.

Por el contrario, los escudos cerrados incorporan sistemas de sostenimiento del frente capaces de equilibrar las presiones del terreno y del agua subterránea, lo que los convierte en la solución

preferente en presencia de flujos subterráneos relevantes. En los escudos de tipo EPB (Earth Pressure Balance), el control del flujo de agua hacia el frente se basa en la capacidad del material excavado, adecuadamente acondicionado, para transmitir la presión necesaria y limitar la permeabilidad del frente. No obstante, en terrenos con elevada permeabilidad y flujos subterráneos importantes, el drenaje rápido del agua a través del terreno puede dificultar el mantenimiento de la presión efectiva en la cámara, incrementando el riesgo de entradas de agua y pérdida de control del frente.

En estos casos, los escudos cerrados de lodos (slurry shield) ofrecen un mayor grado de seguridad frente a flujos subterráneos significativos. La utilización de un fluido de excavación presurizado permite transmitir de forma homogénea la presión hidrostática al frente, compensando los gradientes hidráulicos existentes y reduciendo el caudal de agua que fluye hacia la excavación. Asimismo, la formación de un “cake” filtrante en el contorno del frente contribuye a disminuir la permeabilidad efectiva del terreno, limitando la infiltración y estabilizando el frente incluso en acuíferos altamente permeables.

La elección entre escudo abierto y escudo cerrado debe basarse, por tanto, en una evaluación rigurosa de los flujos subterráneos previstos, considerando no solo la permeabilidad media del terreno, sino también la presencia de niveles acuíferos localizados, discontinuidades hidráulicas y posibles variaciones espaciales y temporales del régimen de flujo. En situaciones en las que se prevean flujos elevados o gradientes hidráulicos significativos en el frente, el uso de escudos cerrados con control activo de la presión resulta esencial para garantizar la estabilidad del frente y minimizar los riesgos constructivos.

La capacidad de respuesta ante variaciones imprevistas del flujo es significativamente mayor en los escudos cerrados, lo que refuerza su idoneidad en contextos hidrogeológicos complejos.

#### 3.6.3.4. Necesidad de despresurización o drenajes previos.

La necesidad de despresurización del terreno o de la ejecución de drenajes previos constituye un aspecto clave en proyectos de microtunelación cuando concurren presiones intersticiales elevadas, flujos subterráneos significativos o condiciones hidrogeológicas desfavorables que no pueden ser controladas de forma segura únicamente mediante la presión de sostenimiento del escudo. En estos escenarios, la reducción previa de la carga hidráulica resulta fundamental para garantizar la estabilidad del frente de excavación, la seguridad del proceso constructivo y la integridad del entorno.

La despresurización del terreno tiene como objetivo principal disminuir la presión de poros y los gradientes hidráulicos en el entorno del frente y del trazado del microtúnel. Al reducir la presión intersticial, se incrementan las tensiones efectivas del terreno, mejorando su resistencia al corte y reduciendo el riesgo de fenómenos de inestabilidad hidráulica tales como sifonamiento, erosión interna, arrastre de finos o levantamientos del terreno. Esta medida resulta especialmente relevante en suelos granulares saturados y en acuíferos confinados, donde las presiones de agua pueden alcanzar valores elevados.

La necesidad de recurrir a drenajes previos se identifica generalmente cuando la presión de sostenimiento requerida en el frente para equilibrar las presiones del terreno y del agua se aproxima a los límites operativos de la MTBM, o cuando se prevé que pequeñas desviaciones de presión puedan dar lugar a pérdidas de terreno o a entradas de agua no controladas. Esta situación es frecuente en microtunelación bajo nivel freático en suelos granulares permeables o en presencia de acuíferos confinados, donde las presiones intersticiales pueden ser elevadas incluso a profundidades moderadas.

En el ámbito de la microtunelación, las técnicas de despresurización más habituales incluyen el rebajamiento temporal del nivel freático mediante bombeo desde pozos verticales ubicados en los pozos de ataque o en su proximidad, así como la ejecución de drenes horizontales o subhorizontales desde dichos pozos para aliviar la presión intersticial en la zona del frente. Estas soluciones presentan la ventaja de ser compatibles con el reducido diámetro del microtúnel y de permitir un control localizado del régimen hidráulico, minimizando el radio de influencia del bombeo.

El diseño de los sistemas de drenaje previo debe considerar las restricciones propias de la microtunelación, tales como la necesidad de mantener la estabilidad del pozo, la interacción con infraestructuras existentes y la imposibilidad de intervenir directamente en la frente una vez iniciada la excavación. Asimismo, es imprescindible evaluar los efectos secundarios del rebajamiento del nivel freático, como asentamientos por consolidación en suelos compresibles o alteraciones del régimen hidrogeológico local, que pueden resultar especialmente críticos en entornos urbanos donde se desarrollan habitualmente este tipo de obras. (Pujades-Garnes et al., 2024) proponen que la integración de una caracterización geológica e hidrogeológica detallada con modelización numérica y evaluación analítica permite diseñar sistemas de despresurización eficientes, aumentando la seguridad y mitigando los impactos del bombeo de agua subterránea. El seguimiento continuo de los niveles piezométricos y de los caudales bombeados permite verificar la eficacia de la despresurización y ajustar los parámetros de excavación en función de la respuesta real del terreno.

La despresurización o el drenaje previo deben considerarse como medidas complementarias de control hidrogeológico en proyectos de microtunelación que atraviesen terrenos saturados o sometidos a presiones intersticiales elevadas.

#### 3.6.3.5. *Sensibilidad a la descompresión del terreno.*

El paso de una microtuneladora implica inevitablemente una alteración del estado tensional del terreno, incluso cuando el proceso constructivo se desarrolla bajo condiciones de aparente estabilidad. La excavación del túnel redistribuye las tensiones en el terreno circundante, influenciando regiones extensas, y que el asentamiento del terreno ocurre principalmente sobre y alrededor del túnel (Yun et al., 2025). Esta alteración se traduce en una descompresión local del terreno en el entorno inmediato de la excavación, que puede manifestarse en forma de pequeños asientos en superficie, especialmente en contextos urbanos donde la microtunelación se emplea habitualmente y donde los umbrales de deformación admisibles son reducidos. Los túneles poco profundos en áreas urbanas producen asientos en superficie debidos a la tunelación, que pueden afectar infraestructuras circundantes (Niu et al., 2024).

Desde un punto de vista geotécnico, la excavación del microtúnel conlleva una descarga radial del terreno circundante, asociada a la eliminación del material excavado y a la redistribución de tensiones hacia un nuevo estado de equilibrio. Aunque el sostenimiento del frente y la inyección del espacio anular están diseñados para minimizar esta descarga, la descompresión no puede eliminarse completamente, sino únicamente reducirse y controlarse. La respuesta del terreno a esta descarga depende fundamentalmente de su rigidez, de su estado tensional inicial y de la capacidad del sistema constructivo para mantener el equilibrio presión–volumen durante el avance.

El origen de los pequeños asientos en superficie puede explicarse como la respuesta deformacional acumulada del terreno ante pérdidas de volumen muy reducidas pero continuas, que se producen durante el avance de la microtuneladora. En microtunelación, incluso pérdidas de volumen inferiores al 1 % pueden ser suficientes para generar asientos medibles en superficie, dado el reducido diámetro de excavación y la limitada profundidad de recubrimiento en muchos proyectos. Estas pérdidas suelen estar asociadas a una combinación de efectos, entre los que destacan el déficit puntual de presión en el frente, la sobreexcavación geométrica necesaria para el avance, y la gestión del espacio anular entre el terreno y la tubería instalada.

La descompresión del terreno alrededor del contorno excavado induce deformaciones hacia el vacío, que se propagan progresivamente desde el nivel del microtúnel hasta la superficie, configurando un cuenco de asientos de pequeña magnitud y extensión limitada. La forma y

amplitud de este cuenco dependen de la estratigrafía, del comportamiento mecánico del suelo y del grado de confinamiento proporcionado durante la excavación. En suelos de baja rigidez, como arcillas blandas o limos saturados, la descompresión puede dar lugar a deformaciones relativamente mayores, mientras que en suelos más rígidos o parcialmente cementados los asientos suelen ser más reducidos, pero pueden concentrarse de forma más localizada.

El efecto del régimen hidráulico es especialmente relevante en la generación de asientos asociados a la descompresión. Cuando el agua subterránea es el factor predominante, tanto los asientos sobre la clave del túnel como en la superficie del terreno muestran una tendencia significativa al aumento debido al ablandamiento de la litología al contacto con agua.(Liu et al., 2025). En suelos saturados, una reducción del confinamiento total sin un control adecuado de la presión intersticial provoca una disminución de la tensión efectiva, favoreciendo deformaciones adicionales. Asimismo, la presencia de drenaje local ya sea intencionado o accidental, puede inducir procesos de consolidación que incrementen los asientos a medio y largo plazo, incluso cuando el paso de la microtuneladora se ha realizado sin incidencias aparentes. En este sentido, los pequeños asientos observados en superficie no siempre son exclusivamente inmediatos, sino que pueden presentar una componente diferida asociada a la disipación de presiones de poros.

Desde el punto de vista constructivo, la gestión del espacio anular constituye uno de los factores más determinantes en la limitación de asientos por descompresión. Un retraso en la inyección, una presión de inyección insuficiente o una lechada con propiedades reológicas inadecuadas permiten que el terreno se relaje hacia el vacío creado por el paso del escudo, generando pérdidas de volumen que, aunque pequeñas, se traducen en asientos en superficie.

Los movimientos en superficie producidos por el paso de una tuneladora corresponden idealmente a los que se muestran a continuación:

Siendo la componente (x) la distancia del eje del microtúnel en la dirección longitudinal, (y) la componente en la

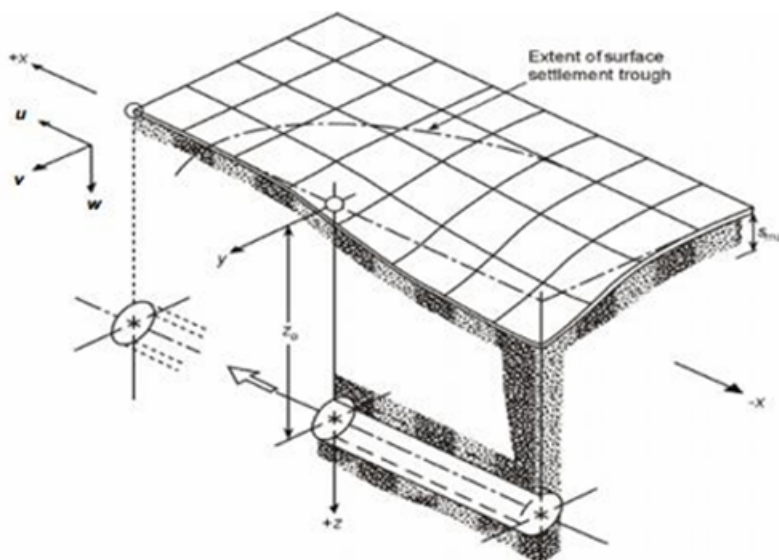


Figura 86. Geometría de asientos inducida por la excavación de un túnel. (Attewell y Yeates et al. 1986)

dirección transversal del avance del microtúnel y la (z) representa el movimiento vertical desde la superficie hacia el túnel.

El origen de coordenadas se considera en el frente de la rueda de corte de la máquina. También se definen los desplazamientos verticales ( $S_v$ ), desplazamientos horizontales, tanto en la dirección longitudinal al túnel ( $S_{hx}$ ) como en la transversal ( $S_{hy}$ ). (Sun, 2015).

Los movimientos inducidos en el terreno por la excavación de un túnel en condiciones *greenfield* presentan una clara anisotropía espacial, manifestándose de forma diferenciada en las direcciones transversal y longitudinal respecto al eje del túnel. Esta diferenciación responde tanto al mecanismo de excavación como a la redistribución progresiva de tensiones y deformaciones asociadas al avance de la tuneladora.

En la dirección transversal, los movimientos están dominados por la redistribución radial del terreno hacia la cavidad excavada. Tal como mostró Peck (1969), el asiento vertical en superficie puede representarse adecuadamente mediante una distribución gaussiana. En la dirección longitudinal, el comportamiento del terreno refleja el carácter progresivo de la excavación. A diferencia de la sección transversal, donde los movimientos pueden considerarse cuasi-simultáneos una vez alcanzado el régimen estacionario, los asientos longitudinales se desarrollan de forma gradual a medida que el frente de excavación se aproxima, atraviesa y se aleja de un punto dado en superficie. Attewell y Woodman (1982) demostraron que este proceso puede describirse de manera razonable mediante una función de probabilidad acumulada, lo que pone de manifiesto el carácter incremental y continuo de los asientos a lo largo del eje del túnel.

El perfil longitudinal de asientos muestra que una fracción significativa del asiento total se produce antes de que el frente de excavación haya pasado por debajo del punto considerado, especialmente en suelos cohesivos blandos. Este hecho tiene una gran relevancia desde el punto de vista del control de deformaciones, ya que implica que parte de los movimientos son consecuencia directa de la descompresión del terreno en el frente y no únicamente del paso completo de la tuneladora y la instalación del revestimiento.

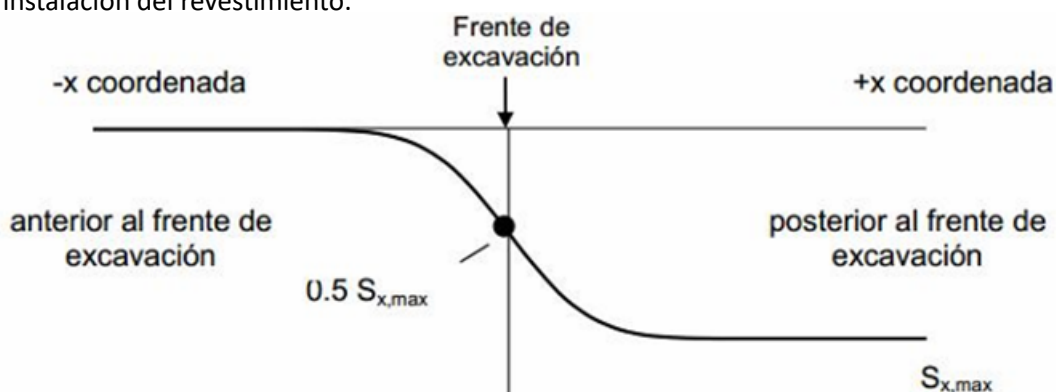


Figura 87. Perfil de asientos longitudinales. Yubero, 2013.

Se han propuesto varios métodos teóricos y empíricos para estimar la cubeta de asientos en superficie causada por la tunelación, la comparación de resultados calculados y medidos demuestra que el método empírico es eficaz (Wang, 2021).

Los pequeños asientos inducidos por descompresión no suelen comprometer la estabilidad global del terreno ni la integridad del microtúnel, pero pueden resultar críticos en entornos urbanos sensibles, donde afectan a pavimentos, servicios enterrados o estructuras superficiales. Por ello, la evaluación de la sensibilidad del terreno a la descompresión debe incluir no solo criterios de estabilidad, sino también criterios de deformación admisible, integrando la predicción de asientos como parte del diseño geotécnico.

#### **3.6.4. Condicionantes estructurales y del tubo a instalar.**

En los proyectos de microtunelación, el tubo a instalar no constituye únicamente el elemento funcional final de la infraestructura, sino que desempeña un papel estructural fundamental durante la fase constructiva, actuando como elemento resistente frente a las acciones transmitidas por el terreno, el agua y el propio proceso de empuje. Por ello, el diseño del tubo y la evaluación de sus condicionantes estructurales deben abordarse de forma integrada con el método constructivo y las condiciones geotécnicas e hidrogeológicas del trazado.

El tubo instalado se encuentra sometido a dos estados de carga claramente diferenciados: uno transitorio, correspondiente a la fase de hincas o empuje, y otro permanente, asociado a las condiciones de servicio una vez finalizada la excavación. Ambos estados deben ser considerados en el dimensionamiento, ya que pueden gobernar diferentes modos de fallo y condicionar la selección del material, la geometría y los detalles constructivos del tubo.

El tubo debe resistir las fuerzas axiales de empuje transmitidas desde el pozo de ataque, necesarias para vencer la fricción del terreno, el rozamiento con el escudo y las resistencias concentradas en cambios de alineación. Estas fuerzas axiales pueden alcanzar valores elevados, especialmente en longitudes importantes, terrenos cohesivos con alto rozamiento lateral o trazados con radios de curvatura reducidos. Los cambios de alineación y la fricción suelo-tubería incrementan significativamente las tensiones axiales en tuberías de hormigón armado (Ayun et al., 2024).

En este contexto, la resistencia a compresión del material del tubo y la capacidad portante de las juntas adquieren una importancia crítica, ya que cualquier pérdida de alineación o fallo local puede comprometer la continuidad del avance.

Las acciones radiales externas vienen derivadas de las presiones del terreno y del agua subterránea. Estas acciones generan esfuerzos de compresión diametral y flexión, cuya magnitud depende del recubrimiento, de la rigidez del terreno, del nivel freático y del grado de contacto efectivo entre el tubo y el terreno circundante. En microtunelación, la correcta inyección del espacio anular resulta determinante para garantizar una distribución uniforme de estas cargas y evitar concentraciones de tensiones que puedan provocar fisuración o deformaciones excesivas del tubo. El material inyectado en el espacio anular controla la transferencia de cargas radiales del terreno al revestimiento de hormigón, y una inyección deficiente puede generar concentraciones de tensiones responsables de fisuración o deformaciones excesivas del tubo.(Benato et al., 2023). Se pueden utilizar tuberías que incorporan sensores que proporcionen mediciones en tiempo real de presiones de tierra, presiones de agua de poros, deformaciones axiales y deformaciones circunferenciales; sin embargo, el número de tales estudios reportados en la literatura es pequeño y el potencial de la instrumentación en proyectos rutinarios está en gran medida sin explotar.(Wadood et al., 2025)

La rigidez estructural del tubo constituye un condicionante clave tanto desde el punto de vista estructural como geotécnico. Tubos muy rígidos, como los de hormigón armado o prefabricado de alta resistencia, tienden a atraer mayores cargas, mientras que tubos más flexibles, como los de acero o ciertos materiales compuestos, permiten una mayor redistribución de esfuerzos.

#### 3.6.4.1. Material.

##### 3.6.4.1.1. Hormigón.

Las tuberías de hormigón constituyen una de las soluciones más empleadas en proyectos de microtunelación, debido a su elevada resistencia estructural, durabilidad y capacidad para soportar importantes esfuerzos. El hormigón armado y, en particular, el hormigón armado de alta resistencia permite alcanzar valores elevados de capacidad portante axial, lo que hace a estas tuberías especialmente adecuadas para tramos largos de empuje. No obstante, el dimensionamiento debe considerar no solo la resistencia del fuste del tubo, sino también el comportamiento de las juntas, que suelen ser el elemento más crítico frente a la transmisión de cargas axiales. Una distribución no uniforme de las presiones en las juntas puede dar lugar a concentraciones de tensiones y a daños localizados.

Desde el punto de vista dimensional, los diámetros interiores más habituales para microtunelación con tuberías de hormigón armado se sitúan generalmente en el rango aproximado de DN 400 a DN 3000, siendo especialmente frecuentes los diámetros comprendidos entre DN 800 y DN 2000.

DIÁMETRO INTERIOR	CLASE I		CLASE II			CLASE III			CLASE IV			CLASE V									
	Espesor B		Espesor B		Espesor C	Espesor B		Espesor C		Espesor B		Espesor C		Espesor B		Espesor C					
	Armadura Circular		Armadura Circular		Armadura Circular	Armadura Circular		Armadura Circular		Armadura Circular		Armadura Circular		Armadura Circular		Armadura Circular					
	Int.	Ext.	Int.	Ext.	Int.	Ext.	Int.	Ext.	Int.	Ext.	Int.	Ext.	Int.	Ext.	Int.	Ext.	Int.	Ext.			
	$f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$		$f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$			$f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$			$f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$			$f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$			$f_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$			$f_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$			
300	-	-	2,0 <sup>b</sup>	-	2,0 <sup>b</sup>	-	2,0 <sup>b</sup>	-	2,0 <sup>b</sup>	-	2,0 <sup>b</sup>	-	2,0 <sup>b</sup>	-	2,0 <sup>b</sup>	-	2,1	-	2,0 <sup>b</sup>	-	
400	-	-	2,0 <sup>b</sup>	-	2,0 <sup>b</sup>	-	2,0 <sup>b</sup>	-	2,0 <sup>b</sup>	-	2,4	-	2,0 <sup>b</sup>	-	3,3	-	2,0 <sup>b</sup>	-	-	-	
500	-	-	2,0 <sup>b</sup>	-	2,0 <sup>b</sup>	-	2,0 <sup>b</sup>	-	2,0 <sup>b</sup>	-	3,8	-	2,0 <sup>b</sup>	-	4,7	-	2,1	-	-	-	
600	-	-	2,0 <sup>b</sup>	-	2,0 <sup>b</sup>	-	2,0 <sup>b</sup>	-	2,0 <sup>b</sup>	-	5,7	-	2,0 <sup>b</sup>	2,0 <sup>b</sup>	6,4	-	2,5	2,0 <sup>b</sup>	-	-	
700	-	-	2,9	-	2,0 <sup>b</sup>	-	3,5	-	2,0 <sup>b</sup>	-	6,9	-	2,0 <sup>b</sup>	2,0 <sup>b</sup>	8,2	4,9	3,3	2,0 <sup>b</sup>	-	-	
800	-	-	3,1	-	2,0 <sup>b</sup>	-	4,1	-	2,4	-	5,5	3,3	2,2	2,0 <sup>b</sup>	9,4	5,6	4,5	2,7	-	-	
900	-	-	2,5	2,0 <sup>b</sup>	2,0 <sup>b</sup>	-	3,6	2,2	2,0 <sup>b</sup>	2,0 <sup>b</sup>	6,3	3,8	3,0	2,0 <sup>b</sup>	10,6	6,4	5,7	3,4	-	-	
1 000	-	-	3,0	2,0 <sup>b</sup>	2,0 <sup>b</sup>	2,0 <sup>b</sup>	4,1	2,5	2,2	2,0 <sup>b</sup>	7,0	4,2	3,8	2,3	12,0	7,2	7,0	4,2	-	-	
1 100	-	-	3,4	2,2	2,4	2,0 <sup>b</sup>	4,6	2,8	2,8	2,0 <sup>b</sup>	7,9	4,7	4,6	2,8	13,6	8,2	8,4	5,0	-	-	
1 200	-	-	3,8	2,3	3,0	2,0 <sup>b</sup>	5,1	3,1	3,4	2,0 <sup>b</sup>	8,9	5,3	5,5	3,3	15,5	9,3	9,9	5,9	-	-	
1 300	-	-	4,4	2,6	3,4	2,1	5,8	3,5	4,1	2,4	10,0	6,0	6,6	4,0	*	*	11,5	6,9	-	-	
1 400	-	-	4,9	2,9	4,0	2,4	6,5	3,9	4,7	2,8	11,2	6,8	7,7	4,6	*	*	13,1	7,9	-	-	
											$f_{ck} = 35 \text{ N/mm}^2$										
1 500	4,4	2,6	5,3	3,2	4,7	2,8	7,2	4,3	5,3	3,2	12,5	7,5	8,7	5,2	*	*	14,8	8,9	-	-	
1 600	5,0	3,0	6,2	3,7	5,1	3,1	8,5	5,1	6,2	3,7	13,9	8,4	10,1	6,1	*	*	16,8	10,1	-	-	
											$f_{ck} = 35 \text{ N/mm}^2$										
1 800	6,1	3,7	7,4	4,4	6,4	3,8	10,4	6,2	7,6	4,6	16,7	10,0	12,9	7,7	*	*	21,0	12,6	-	-	
2 000	7,1	4,3	8,9	5,3	7,8	4,7	12,6	7,6	9,5	5,7	*	*	16,0	9,6	*	*	*	*	-	-	
2 200	8,4	5,4	10,4	6,7	9,7	6,3	14,1	9,6	11,7	7,9	*	*	20	13,7	*	*	*	*	-	-	
	$f_{ck} = 35 \text{ N/mm}^2$		$f_{ck} = 35 \text{ N/mm}^2$			$f_{ck} = 35 \text{ N/mm}^2$			$f_{ck} = 35 \text{ N/mm}^2$			$f_{ck} = 35 \text{ N/mm}^2$			$f_{ck} = 35 \text{ N/mm}^2$			$f_{ck} = 35 \text{ N/mm}^2$			
2 500	10,8	6,5	13,6	8,2	12,6	7,6	18,1	10,9	16,7	10,0	*	*	*	*	*	*	*	*	-	-	
2 800	11,9	8	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	-	-
3 000	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	-	-

Tabla 8. Tabla de armado de tubería de hormigón según diámetro. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.

El espesor del tubo aumenta de forma significativa con el diámetro y con las cargas previstas, lo que repercute directamente en el peso unitario del tubo y, por tanto, en las fuerzas de empuje necesarias. Por este motivo, en diámetros grandes se presta especial atención al diseño del armado y a la resistencia de las juntas, ya que estas suelen constituir el punto crítico durante la ejecución.



Figura 88. Proceso de disposición de armadura para tubo hincado. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.

No obstante, estas tuberías emplean hormigones de mayor clase resistente y armados optimizados, permitiendo incrementar la capacidad de carga axial sin aumentar de forma excesiva el espesor o el peso del tubo.

CLASE RESISTENTE PARA TUBOS DE HINCA - CLASIFICACION TIPO A	
Unidades (kN/m <sup>2</sup> )	Clase resistente tipo A
Carga de comparación ≤ 65	Clase III
65 < Carga de comparación ≤ 100	Clase IV
100 < Carga de comparación ≤ 140	Clase V

CLASE RESISTENTE PARA TUBOS DE HINCA - CLASIFICACION TIPO E	
Unidades (kN/m <sup>2</sup> )	Clase resistente tipo E
Carga de comparación ≤ 60	Clase 90

Tabla 9. Tabla de clases resistente para tubos de hinca. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.

Las tuberías de hormigón presentan un comportamiento estructural rígido, lo que implica una menor capacidad de adaptación a deformaciones del terreno en comparación con tuberías más flexibles. Esta característica debe ser tenida en cuenta en terrenos con previsión de asientos diferenciales o deformaciones post-constructivas, ya que una rigidez elevada puede traducirse en mayores solicitaciones internas.

Las tuberías de hormigón ofrecen una alta durabilidad frente a acciones mecánicas y ambientales, siempre que se seleccionen adecuadamente los materiales y recubrimientos en función del entorno. En microtunelación, resulta especialmente importante considerar la agresividad química del suelo y del agua subterránea, así como las condiciones hidráulicas internas de la conducción, que pueden influir en la vida útil del sistema.

Otra tipología específica de la microtunelación es la de tuberías de hormigón con camisa o refuerzo metálico, diseñadas expresamente como *jacking pipes*. En este caso, el tubo incorpora una camisa de acero total o parcial, generalmente integrada en el hormigón, que mejora sustancialmente su comportamiento frente a la compresión axial y reduce el riesgo de fisuración durante el empuje. Estas tuberías se emplean principalmente en diámetros grandes (habitualmente  $DN \geq 1200$ ) y en trazados con condiciones exigentes, como longitudes de hincas muy elevadas o terrenos con alto rozamiento lateral.

En el ámbito de la microtunelación con tuberías de hormigón, las virolas y los puntos de izaje constituyen elementos auxiliares de gran relevancia, ya que influyen tanto en la seguridad durante la manipulación y el montaje como en el comportamiento estructural del tubo durante la fase de empuje. Aunque su función principal no es resistente en fase de servicio, un diseño inadecuado puede dar lugar a daños prematuros en el tubo o a problemas durante la ejecución.

Las virolas son elementos metálicos, generalmente anillos o refuerzos de acero embebidos o anclados en el extremo del tubo, cuya función principal es garantizar una transmisión homogénea de las fuerzas de empuje entre tubos consecutivos durante la hincas.

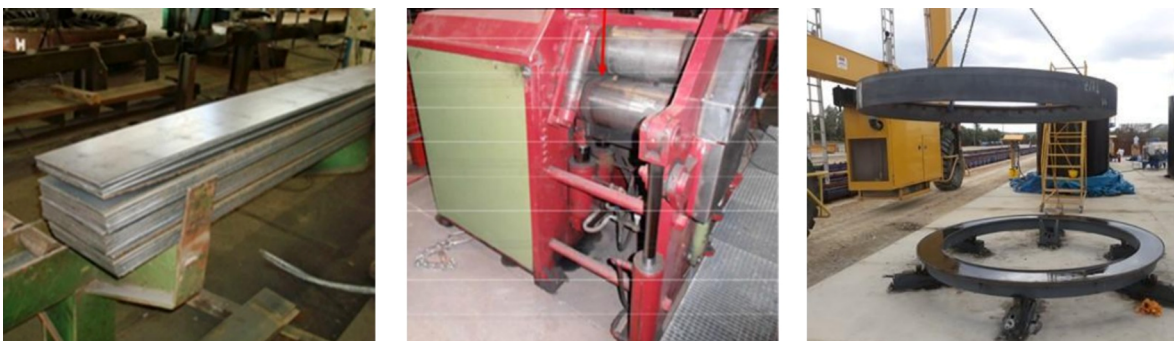


Figura 89. Proceso de fabricación y colocación de virolas en tubos. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.

Los puntos de izaje, por su parte, están diseñados para permitir la manipulación segura de las tuberías durante las operaciones de carga, descarga, almacenamiento y colocación en el pozo de ataque. En tuberías de hormigón para microtunelación, estos puntos suelen materializarse mediante anclajes metálicos embebidos, casquillos roscados o sistemas de ganchos certificados, dimensionados para soportar el peso propio del tubo con los coeficientes de seguridad establecidos en la normativa aplicable.



Figura 90. XI Ed. Izaje de tubos de hormigón y puntos de izaje. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.

Su correcta disposición y dimensionamiento es esencial para evitar daños estructurales durante la manipulación, tales como fisuras por flexión excesiva o tensiones locales concentradas.

El diseño debe contemplar los estados límite de servicio, controlando la fisuración y las deformaciones para garantizar la funcionalidad hidráulica y estructural a largo plazo.

El control de calidad de las tuberías de hormigón destinadas a microtunelación constituye un aspecto fundamental para garantizar su comportamiento estructural durante la fase de empuje y su durabilidad en servicio. Dado que estos tubos actúan simultáneamente como elementos resistentes temporales y permanentes, cualquier defecto de fabricación puede traducirse en un aumento significativo del riesgo durante la ejecución o en patologías a medio y largo plazo.

Los ensayos de control más habituales incluyen pruebas de resistencia mecánica, ensayos de estanqueidad de juntas, comprobaciones dimensionales y, cuando procede, ensayos de carga diametral. En tuberías destinadas a microtunelación, resulta especialmente relevante verificar la capacidad frente a cargas axiales.

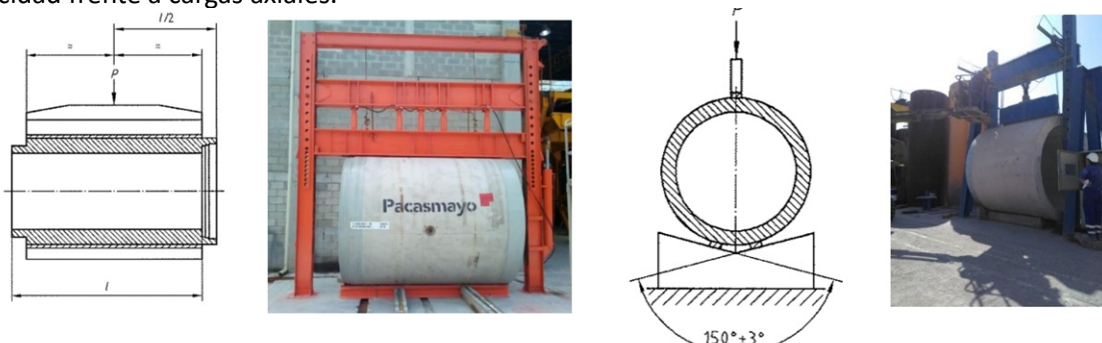


Figura 91. Ensayo de aplastamiento. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.

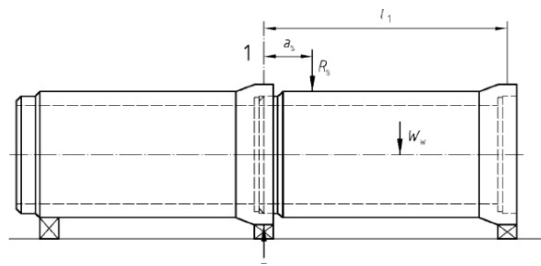


Figura 92. Ensayos de estanqueidad. XI Ed. Curso Postgrado. Especialista tecnología sin zanja 2025. IBSTT.

Entre las patologías más habituales asociadas a defectos de fabricación en tuberías de hormigón para microtunelación destacan las fisuraciones prematuras, que pueden aparecer debido a retracciones excesivas, curado inadecuado o una disposición deficiente del armado. Otra patología frecuente es la presencia de coqueras o vacíos internos, originados por una compactación insuficiente del hormigón.



Figura 93. Patologías típicas de tuberías de hormigón. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.

#### 3.6.4.1.2. Acero

Las tuberías de acero han sido utilizadas tradicionalmente en determinadas técnicas sin zanja, especialmente en auger boring y, en menor medida, en escudos abiertos, donde las longitudes de hinca y las fuerzas de empuje suelen ser más moderadas. Desde el punto de vista del material, el acero presenta una elevada resistencia mecánica; sin embargo, en técnicas de microtunelación que requieren *pipe jacking*



Figura 94. Tubería de acero de 1200 mm. Fuente propia. 2025.

continuo, como los métodos slurry o EPB, su uso resulta menos frecuente. Esta limitación no se debe a la resistencia última del acero, sino a su menor rigidez axial en comparación con las tuberías de hormigón, lo que implica una mayor deformabilidad del conjunto tubo-junta bajo grandes fuerzas de empuje acumuladas. Esta mayor flexibilidad puede traducirse en pérdida de alineación, ovalización local o concentración de tensiones, especialmente en trazados largos o con radios de curvatura reducidos, lo que dificulta el control geométrico durante la fase constructiva.

Un ejemplo en el que el uso de tuberías de acero resulta especialmente conveniente es la ejecución de cruces ferroviarios o viarios de corta longitud mediante técnicas de *auger boring*, típicamente en tramos inferiores a 30–40 m y en suelos cohesivos estables o arenas medianamente compactas. En este contexto, las fuerzas de empuje son moderadas y el control geométrico exigido es menos estricto que en microtunelación slurry o EPB, lo que permite aprovechar la elevada resistencia mecánica del acero con espesores reducidos. Además, el acero presenta una buena tolerancia frente a cargas excéntricas y condiciones constructivas menos controladas, siendo habitual su empleo cuando el tubo actúa simultáneamente como elemento resistente y revestimiento, sin que la menor rigidez axial del conjunto tubo-junta suponga una limitación crítica para la fase de hinca.



*Figura 95. Vista área de cruce bajo FCC y vial en suelo cohesivo. Tubería de acero. Fuente propia.2025.*

El Real Decreto 929/2020, que incorpora las Directivas europeas de interoperabilidad y seguridad del sistema ferroviario, obliga a que las infraestructuras y sus componentes, incluidos los cruces con servicios de terceros, cumplan especificaciones técnicas que garantizan la seguridad operacional y la integridad estructural del subsistema de infraestructura ferroviaria. Estas especificaciones se desarrollan en las Instrucciones Ferroviarias para el proyecto y la construcción del subsistema de infraestructura, que son de aplicación para obtener autorizaciones de entrada en servicio, y en las Normas Técnicas internas de ADIF que regulan la ubicación y protección de instalaciones que atraviesan la plataforma ferroviaria. En muchos casos, esta regulación técnica exige la adopción de

medidas de protección, tales como el uso de elementos de protección metálica o encamisados, para garantizar la integridad de los servicios y la infraestructura ferroviaria frente a acciones externas. (*Instrucción ferroviaria para el proyecto y construcción del subsistema de infraestructura. IFI 2025, 2025*)

### 3.6.4.1.3. PRFV.

Las tuberías de PRFV se caracterizan por su ligereza, resistencia a la corrosión y buen comportamiento hidráulico en fase de servicio; no obstante, su aplicación en microtunelación con *pipe jacking* es muy limitada. Desde el punto de vista estructural, el PRFV presenta una rigidez axial y radial sensiblemente inferior a la del hormigón, además de un comportamiento anisótropo que

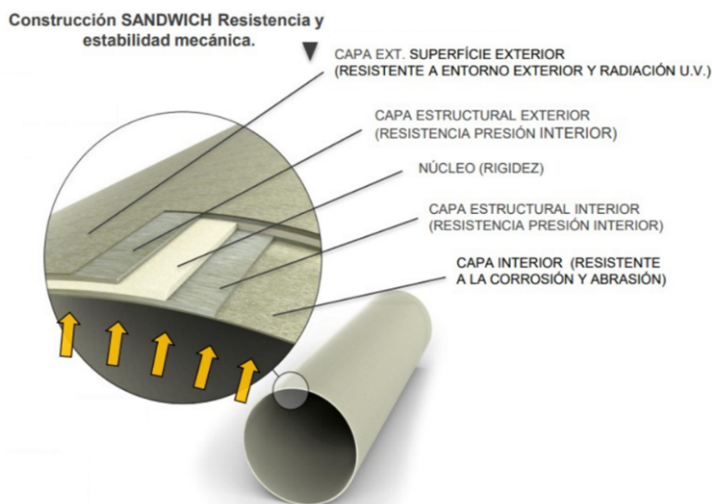


Figura 96. Composición de tubo de PRFV. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.

dificulta la transmisión uniforme de esfuerzos de compresión axial. En consecuencia, estas tuberías muestran una capacidad reducida para soportar fuerzas de empuje elevadas, especialmente cuando se concentran en las juntas o se producen excentricidades durante la hinca. Por este motivo, su uso queda generalmente restringido a empujes reducidos, diámetros pequeños o aplicaciones muy específicas. Pueden resultar adecuadas en microtunelaciones de pequeño diámetro destinadas a redes de saneamiento, con longitudes y empujes reducidos, especialmente en entornos urbanos donde exista una alta agresividad química del terreno o del fluido transportado. En estas aplicaciones, la ligereza del material y su excelente resistencia a la corrosión constituyen ventajas significativas, siempre que el proceso constructivo esté cuidadosamente controlado. No obstante, su utilización queda condicionada a situaciones en las que las fuerzas de empuje durante la hinca sean limitadas, ya que la menor rigidez axial y el comportamiento anisótropo del PRFV reducen su capacidad para transmitir de forma uniforme grandes esfuerzos de compresión, lo que restringe su uso en microtunelación slurry o EPB de mayor exigencia estructural.

### 3.6.4.2. Resistencia a compresión del tubo.

En los proyectos de microtunelación, la resistencia a compresión de los tubos constituye uno de los parámetros estructurales más relevantes durante la fase constructiva, ya que actúa como elemento

estructural sometido a importantes esfuerzos axiales derivados del proceso de empuje. En la microtunelación las fuerzas de empuje se transmiten de forma acumulativa a lo largo de toda la cadena de tubos, lo que puede dar lugar a niveles elevados de compresión axial, especialmente en trazados largos, terrenos con alto rozamiento lateral o condiciones constructivas desfavorables.

La capacidad resistente a compresión del tubo depende fundamentalmente de las propiedades mecánicas del material, de la sección transversal y del estado tensional combinado al que se ve sometido durante la hinca. En el caso de las tuberías de hormigón armado o prefabricado de alta resistencia, el material presenta un comportamiento especialmente favorable frente a esfuerzos de compresión, lo que permite movilizar de forma eficiente la resistencia del conjunto tubo-junta. No obstante, la compresión axial raramente actúa de manera pura, ya que suele combinarse con momentos flectores, esfuerzos cortantes y excentricidades asociadas a pequeñas desviaciones de alineación, tolerancias geométricas o heterogeneidades del terreno. Las tuberías experimentan compresión axial no uniforme durante la hinca debido a variaciones en la fuerza de hinca o esfuerzos internos.(Asad et al., 2025).

Un aspecto clave en el análisis de la resistencia a compresión es la capacidad portante de las juntas entre tubos, ya que el empuje se transmite generalmente a través de contactos localizados en las superficies de junta. Si la transmisión de cargas no es uniforme, pueden generarse concentraciones de tensiones que reduzcan significativamente la capacidad resistente efectiva del sistema, incluso cuando el material del tubo presenta una elevada resistencia característica.

La respuesta de las tuberías puede diferir a lo largo del tramo debido a la distribución variable de lubricación, colapso localizado del túnel, cambios en condiciones geológicas, excentricidad de la fuerza de hinca y desalineaciones de la tubería(Asad et al., 2025).La resistencia a compresión del tubo debe verificarse teniendo en cuenta la interacción con el terreno circundante, ya que las presiones radiales del suelo y del agua subterránea pueden inducir estados de compresión diametral y flexión que se superponen a la compresión axial. En este contexto, la correcta ejecución de la inyección del espacio anular resulta determinante para asegurar una distribución homogénea de las cargas externas y limitar la aparición de tensiones adicionales que puedan comprometer la capacidad resistente del tubo durante o después de la fase de empuje.

En consecuencia, el dimensionamiento a compresión de los tubos en microtunelación no debe limitarse a la comprobación de la resistencia última del material, sino que debe abordarse desde una perspectiva global del sistema, considerando la combinación de acciones axiales y radiales, el comportamiento de las juntas, las condiciones geométricas del trazado y las características

geotécnicas del terreno. Se recomienda utilizar tres o más tuberías instrumentadas distribuidas a lo largo de la hincada para maximizar el aprendizaje derivado de proyectos instrumentados de PJ.(Asad et al., 2025).

#### 3.6.4.3. Resistencia a cargas externas. Cargas de tierra, tráfico, edificación.

La resistencia a cargas externas de los tubos en microtunelación viene determinada principalmente por las condiciones geotécnicas e hidrogeológicas del entorno, así como por la presencia de sobrecargas externas asociadas a infraestructuras existentes, tales como edificios colindantes o tráfico viario y ferroviario. A diferencia de otras técnicas sin zanja, en microtunelación estas acciones pueden alcanzar valores elevados y resultar determinantes en el dimensionamiento estructural del tubo, tanto durante la fase constructiva como en la fase de servicio.

Las cargas derivadas del terreno están directamente relacionadas con el tipo de suelo, su rigidez, su grado de consolidación y el recubrimiento existente sobre la clave del microtúnel. En suelos cohesivos poco competentes o en terrenos granulares sueltos, la redistribución de tensiones alrededor de la excavación puede dar lugar a incrementos significativos de presión sobre el tubo, especialmente si se producen pérdidas de terreno o una relajación del macizo. (Tang et al., 2023). En estos casos, la capacidad del tubo para resistir compresiones diametrales y momentos flectores adquiere una importancia crítica, siendo necesario considerar hipótesis de carga conservadoras que tengan en cuenta posibles asimetrías en la transmisión de esfuerzos.

El nivel freático constituye otro factor determinante en la evaluación de las cargas externas. Cuando el tubo se sitúa por debajo del nivel del agua subterránea, las presiones hidrostáticas actúan de forma continua sobre la sección, incrementando las tensiones radiales y pudiendo generar estados tensionales desfavorables en combinación con las cargas del terreno. Además, en suelos saturados, la reducción de la tensión efectiva puede disminuir la capacidad portante del terreno circundante, lo que incrementa la dependencia del tubo como elemento estructural resistente. En terrenos saturados, la presencia de agua subterránea genera presiones hidrostáticas significativas y reduce la tensión efectiva del suelo, lo que incrementa la dependencia del revestimiento como elemento estructural resistente durante la excavación. (Broere, 2013)

A las acciones geotécnicas e hidrogeológicas se suman las sobrecargas externas debidas a edificaciones próximas, que pueden transmitir esfuerzos adicionales al terreno y, por ende, al tubo. Estas cargas son especialmente relevantes en entornos urbanos densos, donde la proximidad de cimentaciones superficiales o profundas puede modificar el campo de tensiones alrededor del microtúnel. En estos casos, el tubo debe dimensionarse considerando no solo las cargas geostáticas,

sino también las sobrecargas inducidas por edificaciones, evaluando su efecto sobre la sección y verificando la resistencia frente a flexión y fisuración.

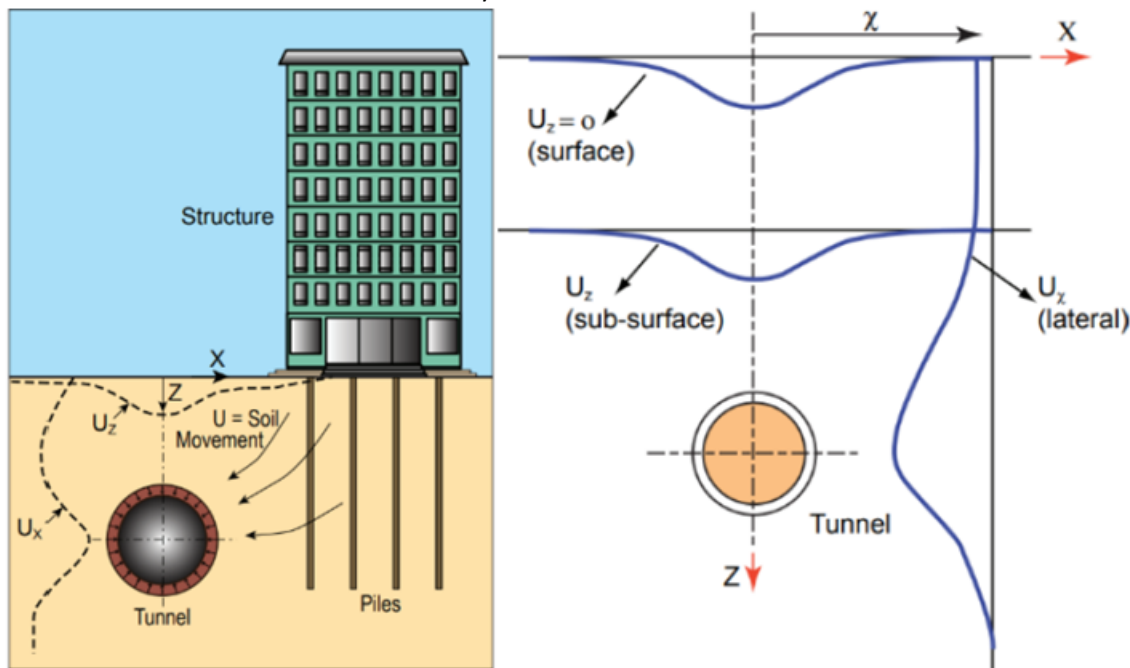


Figura 97. Influencia de cargas sobre tubería debido a edificaciones colindantes. Ghazali et al., 2025

De manera análoga, los tráficos viarios y ferroviarios generan sobrecargas dinámicas y cuasiestáticas que pueden resultar significativas, particularmente en microtuneles situados a pequeña profundidad bajo carreteras o líneas ferroviarias. En el caso del tráfico ferroviario, las exigencias son especialmente elevadas debido a la magnitud de las cargas por eje, su carácter repetitivo y los estrictos criterios de seguridad asociados a la infraestructura. La microtunelación bajo corredores ferroviarios activos implica sobrecargas elevadas y repetitivas, que deben ser consideradas explícitamente en el diseño estructural del tubo y en el control de deformaciones del terreno. (Ghazali et al., 2025).

En muchos proyectos de microtunelación, la fase constructiva representa la condición más exigente desde el punto de vista estructural, siendo imprescindible verificar separadamente los estados de carga durante la hinca y en servicio. (Sterling, 2020b). La verificación de la resistencia a cargas externas debe realizarse considerando tanto la fase constructiva como la fase de servicio, ya que las condiciones de apoyo y confinamiento pueden variar significativamente entre ambas.

#### 3.6.4.4. Tipo de junta. Machihembrado, junta elástica, junta rígida.

En los proyectos de microtunelación con *pipe jacking*, las juntas entre tubos constituyen uno de los elementos más críticos desde el punto de vista estructural, ya que a través de ellas se transmite la totalidad de la fuerza de empuje aplicada desde el pozo de ataque. La capacidad de las juntas para

transmitir de forma segura las fuerzas de empuje axial es un aspecto fundamental del diseño, ya que las juntas constituyen los puntos más vulnerables frente a concentraciones de tensión, desalineaciones y fallos locales durante la hinca (Sterling, 2020b). A diferencia de la fase de servicio, en la que las juntas trabajan principalmente garantizando la estanqueidad y la continuidad estructural, durante la fase de hinca deben resistir elevadas cargas axiales de compresión, a menudo combinadas con excentricidades, momentos flectores y rotaciones relativas entre tubos consecutivos.

La problemática asociada a las juntas durante el empuje se debe a que la transmisión de la carga no siempre se produce de forma perfectamente uniforme sobre toda la sección resistente. Pequeñas desviaciones de alineación, tolerancias geométricas, irregularidades en las superficies de contacto o variaciones en la rigidez del terreno pueden provocar concentraciones locales de tensiones, especialmente en los bordes de la junta. Durante el proceso de empuje, las rotaciones relativas entre tubos consecutivos generan estados tensionales complejos en las juntas, produciendo concentraciones de esfuerzos que pueden controlar el comportamiento estructural del conjunto, incluso cuando las tensiones medias en el tubo permanecen en límites admisibles (Ma et al., 2023).

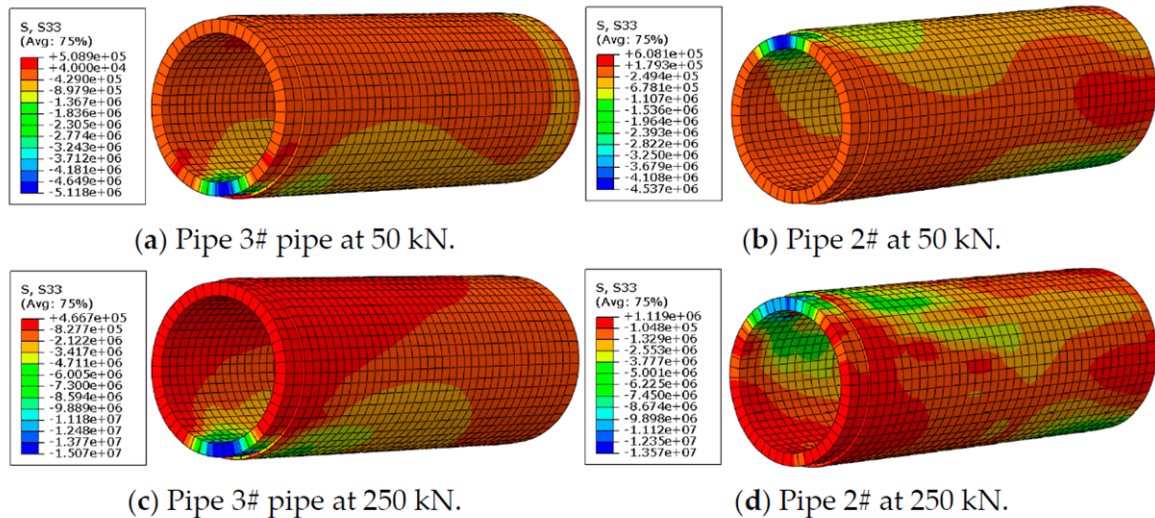


Figura 98. Distribución de tensiones axiales en uniones de tuberías bajo diferentes cargas axiales. He et al., 2024.

Estas concentraciones pueden dar lugar a aplastamientos locales del hormigón, fisuración, daños en los elementos de estanqueidad o pérdida progresiva del control geométrico del trazado.

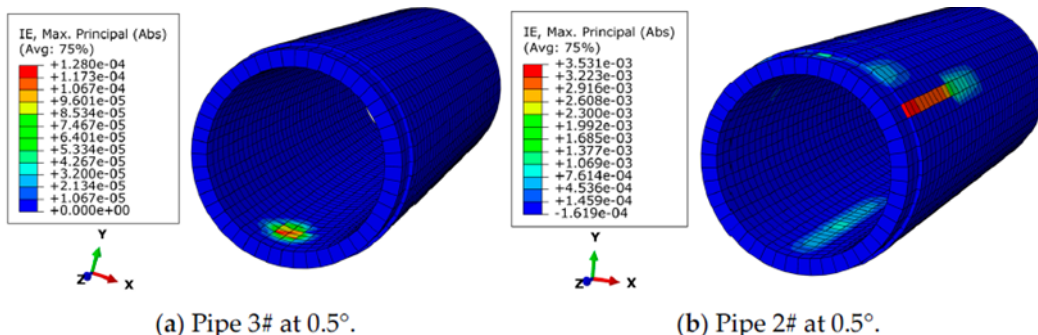


Figura 99. Distribución de deformación plástica en uniones de tuberías diferentes ángulos de deflexión. He et al., 2024.

Desde el punto de vista del diseño y del comportamiento estructural, las juntas utilizadas en microtunelación pueden clasificarse, de forma simplificada, en juntas machihembradas, juntas elásticas y juntas rígidas, cada una con características y limitaciones específicas frente al empuje.

Las juntas machihembradas se basan en un sistema geométrico de encaje entre tubos consecutivos, generalmente mediante un resalte (macho) y un alojamiento (hembra), que permite una transmisión directa de la carga axial a través del contacto hormigón–hormigón. Este tipo de junta ofrece una alta capacidad portante frente al empuje, ya que la carga se reparte sobre una superficie relativamente amplia y bien definida. No obstante, su comportamiento es poco tolerante a desalineaciones y rotaciones, de modo que pequeñas excentricidades pueden concentrar tensiones en zonas reducidas del machihembrado, aumentando el riesgo de fisuración o aplastamiento local. Por este motivo, las juntas machihembradas suelen emplearse en trazados rectilíneos o con radios de curvatura amplios, donde el control geométrico es elevado.

Las juntas elásticas incorporan elementos deformables, habitualmente juntas de goma o elastómeros, cuyo objetivo principal es garantizar la estanqueidad frente al agua y permitir pequeñas rotaciones o desplazamientos relativos entre tubos. Desde el punto de vista del empuje, estas juntas presentan una menor rigidez axial que las juntas puramente geométricas, por lo que la transmisión de la carga suele realizarse a través de superficies de contacto auxiliares o elementos estructurales complementarios. Su principal ventaja es la mayor tolerancia a desviaciones de alineación, lo que las hace adecuadas para trazados curvos o condiciones geotécnicas complejas. Sin embargo, si no están específicamente diseñadas para *pipe jacking*, pueden resultar críticas frente a empujes elevados, ya que la deformabilidad del material elástico puede provocar concentraciones de carga en zonas localizadas o daños en los elementos de estanqueidad.

Las juntas rígidas se caracterizan por una unión prácticamente monolítica entre tubos, ya sea mediante morteros, resinas o sistemas de unión estructural continua. Este tipo de junta proporciona una elevada rigidez axial y una buena capacidad de transmisión de cargas, reduciendo la deformabilidad del conjunto tubo-junta. La rigidez axial del sistema tubo–junta influye directamente en la distribución de tensiones durante el empuje, y juntas con capacidad limitada de acomodar rotaciones incrementan la concentración de esfuerzos en secciones locales, especialmente en trazados curvos(He et al., 2024). No obstante, su escasa capacidad de acomodar rotaciones o desplazamientos relativos las hace especialmente sensibles a errores geométricos y a movimientos diferenciales inducidos por el terreno. En microtunelación, su uso es menos habitual durante la fase

de empuje continuo, ya que una rigidez excesiva puede amplificar los efectos de excentricidad y aumentar el riesgo de fisuración del tubo.

Los daños estructurales observados durante el *pipe jacking* se concentran frecuentemente en las juntas de las tuberías, lo que pone de manifiesto la necesidad de diseños de junta específicamente concebidos para resistir elevadas fuerzas de empuje y rotaciones relativas. (Wadood et al., 2025)

#### 3.6.4.5. Longitud de tubo.

La longitud individual de los tubos de hinca influye directamente en el comportamiento estructural del conjunto, en la transmisión de las fuerzas de empuje y en la operatividad del proceso de excavación. La elección de la longitud del tubo no responde únicamente a criterios de fabricación o logística, sino que debe abordarse de forma integrada con el método constructivo, las condiciones geotécnicas y las exigencias geométricas del trazado. La elección de la longitud de los tubos de jacking influye directamente en el número de juntas, el control geométrico del trazado y la distribución de esfuerzos durante la hinca. Tubos más largos reducen el número de juntas, pero incrementan la sensibilidad a desviaciones de alineación, mientras que tubos más cortos permiten una mejor adaptación geométrica (Sterling, 2020a).

Tubos de mayor longitud permiten reducir el número total de juntas, lo que en principio resulta favorable, dado que las juntas constituyen puntos potenciales de concentración de tensiones y pérdida de alineación. Sin embargo, un aumento de la longitud del tubo implica también una mayor rigidez longitudinal de cada elemento, lo que reduce la capacidad del conjunto para acomodar pequeñas desviaciones geométricas o heterogeneidades del terreno. En estas condiciones, los errores de alineación tienden a acumularse, incrementando los momentos flectores en las juntas y las tensiones locales durante la hinca. El aumento de la longitud individual de los tubos amplifica los efectos de pequeñas desalineaciones, dando lugar a mayores rotaciones relativas en las juntas y a incrementos de momentos flectores locales durante el proceso de empuje (Ma et al., 2023). Este tipo de tubos requieren mayores espacios en el pozo de ataque, sistemas de manipulación más robustos y un control más preciso durante la colocación, lo que puede limitar su uso en entornos urbanos confinados.

Tubos de menor longitud incrementan el número de juntas a lo largo del trazado, lo que puede facilitar una mejor adaptación geométrica, especialmente en trazados curvos o en terrenos con comportamiento variable. Esta mayor “articulación” del conjunto tubo–junta permite absorber pequeñas rotaciones relativas entre tubos consecutivos, reduciendo la aparición de esfuerzos secundarios. No obstante, el aumento del número de juntas conlleva una mayor complejidad

constructiva, incrementa los puntos críticos desde el punto de vista estructural y puede aumentar el riesgo de daños en las juntas bajo empujes elevados. Parámetros constructivos como la **longitud del tubo**, el tipo de junta y la secuencia de empuje influyen de forma decisiva en la **estabilidad del proceso de hincado**, afectando tanto a la magnitud de las fuerzas internas como al control geométrico del microtúnel (Wadood et al., 2025)

### 3.6.4.6. Coefficiente de fricción tubo-Terreno.

La resistencia por fricción se genera como consecuencia del contacto entre la superficie exterior de la tubería y el terreno circundante, y puede expresarse, de forma simplificada como el producto de la fuerza normal actuando alrededor de la circunferencia de la tubería y el coeficiente de fricción en la interfaz (Ji et al., 2019).

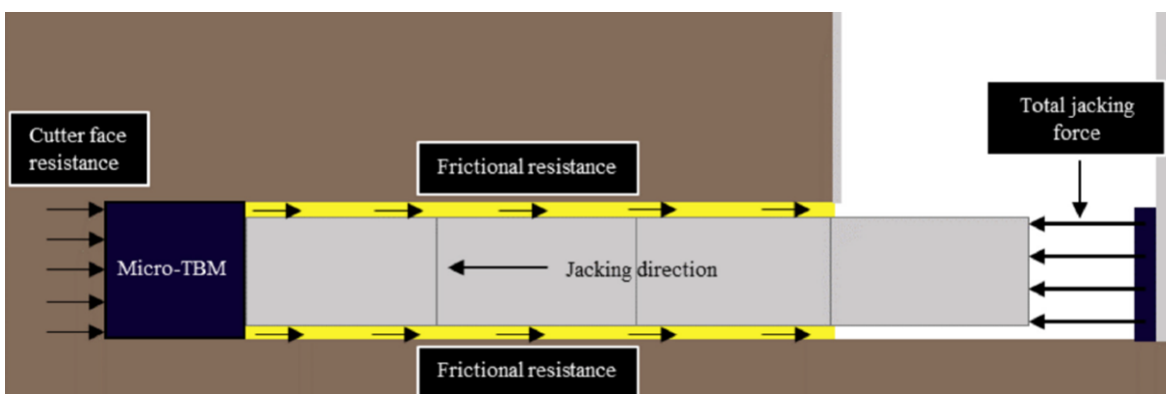


Figura 100. Esquema de fuerzas de fricción durante el empuje. Wadood et al., 2025.

En hincas de gran longitud, esta resistencia se acumula progresivamente a lo largo del trazado y puede llegar a gobernar el dimensionamiento del sistema de empuje y de las propias tuberías.

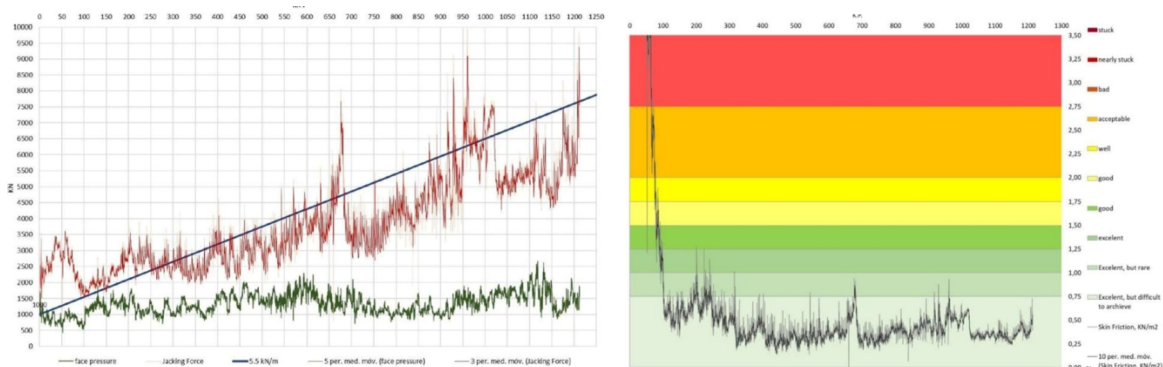


Figura 101. Incremento de la fuerza de empuje-fricción a lo largo del proceso de hincado. XI Ed. curso postgrado Especialista sin zanja. 2025.

El valor del coeficiente de fricción tubo-suelo no es una constante única, sino que depende de múltiples factores, entre los que destacan el tipo de suelo, su estado de compactación o consolidación, el contenido de agua, la rugosidad superficial del tubo y las condiciones de contacto existentes durante la hinca. En suelos granulares, la fricción suele estar dominada por mecanismos

de rozamiento y enclavamiento de partículas, mientras que en suelos cohesivos el comportamiento está más relacionado con la adhesión y la resistencia al corte no drenada. Estas diferencias hacen que el coeficiente de fricción pueda variar de forma significativa a lo largo del trazado, especialmente en terrenos heterogéneos.

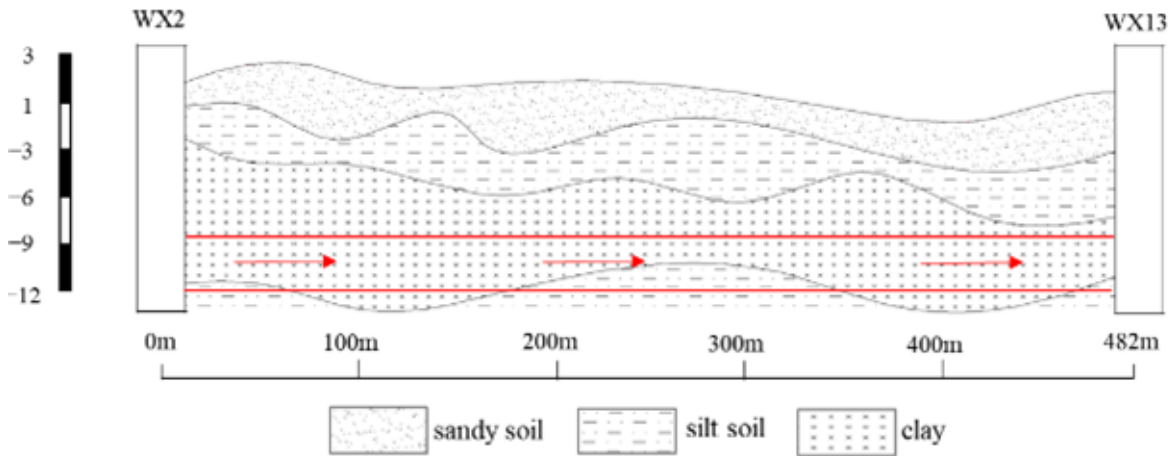


Figura 102. Transcurso de tubería por diferentes composiciones geológicas. Jin et al., 2023.

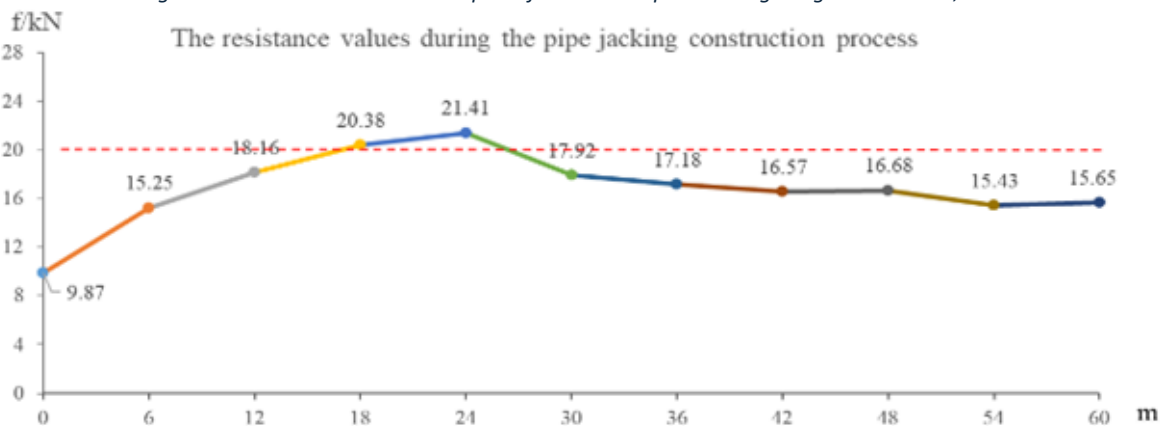


Figura 103. Registro de fuerza de fricción en KN en diferentes puntos. Jin et al., 2023.

En microtunelación, las condiciones reales de contacto entre el tubo y el terreno raramente corresponden a un contacto directo y uniforme. En la práctica ingenieril, la resistencia friccional se suele mitigar empleando dos estrategias comunes: La instalación estratégica de estaciones de empuje intermedias en la línea de tuberías a intervalos regulares, y la inyección de lubricantes en el espacio anular existente entre la tubería y el macizo rocoso-terreno. Entre ambos métodos, la lubricación es la opción preferida, ya que las estaciones intermedias son costosas, generan impacto ambiental y complican la operación (Jin et al., 2023). En la mayoría de los casos, se recurre a la inyección de lodos lubricantes, generalmente de naturaleza bentonítica o tixotrópica, con el objetivo de reducir el coeficiente de fricción efectivo. En el proceso de hinca de tuberías de gran longitud y gran diámetro, se suele inyectar lodo tixotrópico en la superficie exterior de la pared de la tubería para reducir la resistencia por fricción entre la tubería y el suelo (Li et al., 2022). La presencia de una capa de lubricante entre el tubo y el terreno modifica sustancialmente el mecanismo de interacción,

disminuyendo tanto la fricción movilizada como la fuerza normal efectiva actuante sobre la tubería. No obstante, la eficacia de esta lubricación depende de que el lodo forme una capa continua y estable, condición que no siempre se alcanza debido a pérdidas de terreno, infiltración del lodo en el suelo o desviaciones geométricas durante la hinca. Con la aplicación continua y constante de inyección de bentonita, el coeficiente de fricción puede reducirse aproximadamente al 10% del coeficiente de fricción en la interfaz suelo–tubería de hormigón. (Namli & Guler, 2017). Para lograr una reducción del 90% del coeficiente de fricción en la interfaz, es suficiente aplicar bentonita con una presión mínima de inyección, siempre que la lubricación sea eficiente. (Namli & Guler, 2017). En la hinca mediante slurry (*slurry pipe jacking*), el escenario ideal consiste en que no exista infiltración mutua entre el lodo y el suelo, o que dicha infiltración se detenga, de manera que la tubería quede totalmente rodeada por una cavidad generada por la capa de lodo (véase Figura 1a). Sin embargo, el contacto tubería–suelo puede producirse debido a diversos factores, tales como: diseño geométrico y tolerancias del trazado, cantidad de lodo inyectado, velocidad de hinca, desviaciones del alineamiento longitudinal o vertical, deformaciones irregulares del suelo circundante, e incluso fenómenos de interpenetración suelo–slurry. Por ello, el escenario que se presenta con mayor frecuencia en la práctica es aquel en el que el túnel excavado se mantiene estable, pero parte de la superficie de la tubería entra inevitablemente en contacto con el suelo (véase Figura 1b). (Jin et al., 2023).

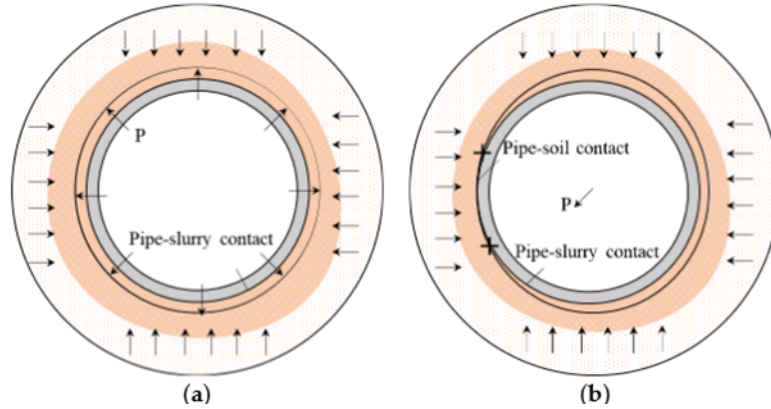


Figura 104. (a) Diagrama esquemático de contacto completo y (b) modelo de contacto parcial tubería-suelo en lechada. Jin et al., 2023.

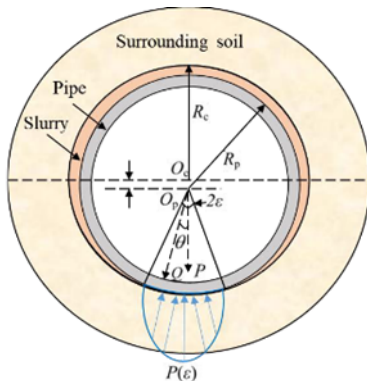


Figura 105. Fricciones en zona de contacto tubo-suelo. Jin et al., 2023

Como consecuencia de lo anterior, el coeficiente de fricción efectivo en microtunelación suele situarse entre dos situaciones límite: un límite superior, correspondiente al contacto directo tubo–suelo sin lubricación, y un límite inferior, asociado a un escenario ideal en el que el tubo se encuentra prácticamente “flotando” dentro de una cavidad lubricada. En la práctica, la situación real se encuentra habitualmente en un régimen

intermedio, caracterizado por un contacto parcial tubo–suelo–lodo, lo que introduce una notable incertidumbre en la estimación de la fricción y hace necesario adoptar hipótesis de cálculo conservadoras.

La correcta estimación del coeficiente de fricción tubo–suelo resulta esencial para predecir la evolución de la fuerza de empuje, evaluar la necesidad de medidas complementarias —como estaciones de empuje intermedias— y definir estrategias de lubricación adecuadas. Con el fin de reducir la resistencia friccional en el proceso de *pipe jacking*, se propone de manera innovadora un sistema automatizado de identificación y alerta de la resistencia a la fricción. Este sistema emplea sensores de resistencia al empuje para identificar y monitorizar la fricción en tiempo real durante la hinca (Jin et al., 2023). Cuando la resistencia medida supera un umbral determinado, el sistema emite alertas inmediatas, lo que permite a los operarios ajustar la dosificación reológica del lodo lubricante en función de las condiciones del terreno presentes. (Jin et al., 2023).

En el proceso real de hinca de la tubería, pueden producirse estancamientos de obra por múltiples motivos, como daños en los equipos. Durante ese periodo de detención, las propiedades mecánicas de la interfaz tubería–suelo cambian, ocasionando que la fuerza de empuje aumente drásticamente cuando la hinca se reanuda, en comparación con el final de la etapa anterior. En tal situación, la tubería puede romperse o los equipos pueden verse dañados debido a una estimación incorrecta de la fuerza de empuje requerida. (Li et al., 2022).

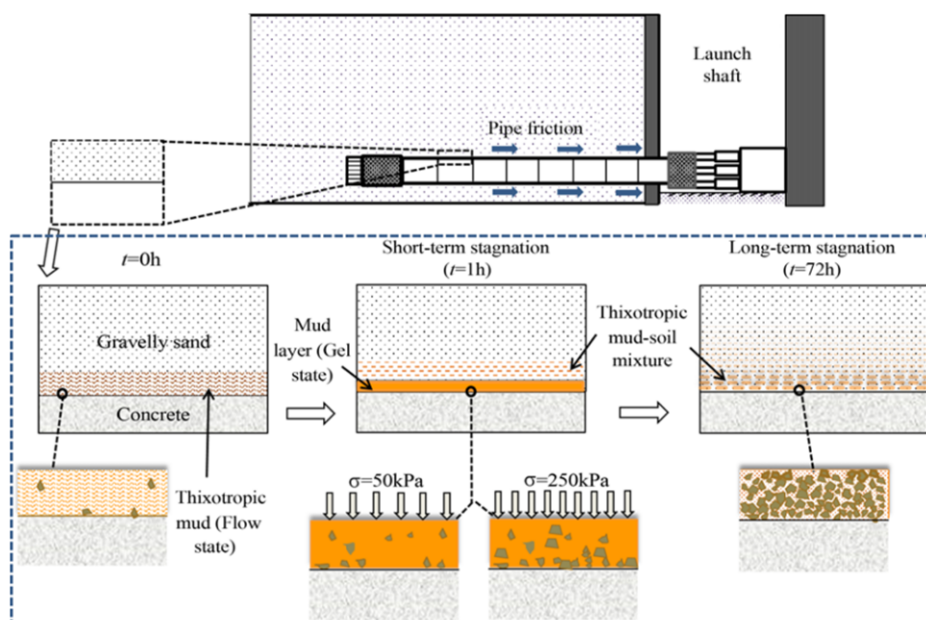


Figura 106. Incremento de la fricción con el paso del tiempo. Li et al., 2022.

A medida que aumenta el tiempo de estancamiento, el ángulo de fricción pasa gradualmente a ser el factor predominante en el incremento del coeficiente de fricción. (Li et al., 2022).

### 3.6.5. *Condicionantes de puesta en obra.*

La puesta en obra de un proyecto de microtunelación está fuertemente condicionada por una serie de factores constructivos y operativos que influyen de manera decisiva en la planificación, ejecución y rendimiento del proceso. Más allá de los aspectos puramente geotécnicos o estructurales, la viabilidad real de la microtunelación depende en gran medida de la capacidad de implantar en el entorno los medios auxiliares necesarios, así como de gestionar de forma adecuada las operaciones asociadas al avance del microtúnel.

Uno de los principales condicionantes constructivos lo constituyen los pozos de ataque y de recepción, que requieren excavaciones de entidad, estructuras de contención específicas y un diseño que permita albergar el equipo de microtunelación, los sistemas de empuje y las operaciones de montaje y desmontaje. La ejecución de estos pozos puede resultar especialmente compleja en entornos urbanos, donde las limitaciones de espacio, la proximidad de edificaciones, la presencia de servicios afectados y las restricciones de acceso condicionan tanto el método constructivo como la geometría y profundidad de estos.

Otro aspecto operativo relevante es la implantación de las instalaciones auxiliares, en particular las estaciones de tratamiento de lodos en los métodos slurry o EPB. Estas instalaciones requieren superficies considerables para albergar equipos de separación, decantación y almacenamiento, así como zonas de circulación para maquinaria y transporte. En ámbitos urbanos o ambientalmente sensibles, la disponibilidad de espacio suele ser limitada, lo que puede obligar a soluciones complejas, como instalaciones compactas, ubicaciones alejadas del trazado o incluso la adaptación del método constructivo para reducir las necesidades de tratamiento.

La gestión del material excavado constituye asimismo un condicionante operativo de primer orden. La salida, transporte y evacuación del material procedente del frente de excavación deben planificarse teniendo en cuenta la capacidad de los sistemas de extracción, la logística de transporte y las posibles restricciones de tráfico o de horarios. En microtunelación, el material excavado suele mezclarse con lodos o fluidos de excavación, lo que incrementa la complejidad de su manipulación y tratamiento, y puede generar condicionantes adicionales relacionados con la clasificación, reutilización o eliminación del material conforme a la normativa vigente.

### 3.6.5.1. Ejecución de pozos de ataque y salida.

La microtunelación siempre requiere un par de pozos: un pozo de ataque (también llamado pozo de empuje, jacking o de lanzamiento) y un pozo de recepción. (Ueki et al., 1999). Uno de los principales condicionantes durante la ejecución de los pozos es el comportamiento del terreno, tanto desde el punto de vista resistente como deformacional. En suelos cohesivos blandos o en terrenos granulares poco densos, la excavación del pozo puede dar lugar a inestabilidades en las paredes, pérdidas de terreno o deformaciones excesivas que afecten a estructuras próximas. En estos casos, la selección del sistema de sostenimiento ya sean pantallas de pilotes, muros pantalla, cajones o entibaciones, resulta determinante, debiendo adaptarse a la profundidad del pozo, al diámetro requerido y a las condiciones locales del terreno. La heterogeneidad estratigráfica y la presencia de rellenos antrópicos incrementan la incertidumbre durante la excavación y pueden obligar a modificar el procedimiento constructivo inicialmente previsto.

La presencia de agua subterránea introduce condicionantes adicionales de gran relevancia. La excavación por debajo del nivel freático exige controlar las filtraciones, evitar fenómenos de sifonamiento y garantizar la estabilidad del fondo del pozo frente a levantamientos hidráulicos. La necesidad de sistemas de achique, well-pointing, bombeos profundos o tratamientos del terreno condiciona tanto la secuencia constructiva como la duración y el coste de la obra. Además, los descensos del nivel freático inducidos por el bombeo pueden provocar asentamientos en superficie, especialmente en entornos urbanos, lo que obliga a un control estricto del proceso y, en algunos casos, a la adopción de medidas compensatorias. Existen publicaciones donde se han recogido recomendaciones para su ejecución relativas a las tipologías habituales limitaciones de profundidad y geometría, así como necesidad de llevar a cabo tratamiento del terreno.

WET GROUND: Wet Cohesive, Wet Non-Cohesive and Wet Mixed and Fill Conditions				
Type	Size and shape	Depth	Ground treatment	Remarks
Segmental	2.4m dia and above	Limited by ground treatment	Wet caisson method	Grab excavation below water, generally 50m depth
			Well pointing	Up to 7 metres depth
			Deep well dewatering Compressed air Suspension grout Chemical stabilisation Ground freezing	Depth dependant on ground conditions and water level
Sheet piled	Any	Generally Up to 15m	Well pointing	Up to 7 metres depth
			Deep well dewatering	Depth dependent on water table draw down and pile cut-off level
Secant piled	Any	Generally Up to 20m	May be required for base stability	Needs large working area
Trench sheeted	-	-	-	Not recommended
Pre-cast caisson	2.4 to 4m dia	Generally Up to 15m	May be required for base stability	Suitable for microtunnelling
Cast insitu caisson	Any	Generally Up to 15m	May be required for base stability	Self weight can overcome skin friction and flotation
Battered excavation	-	-	-	Not applicable
Ground anchorages	Any	Surface level	Ground treatment and/or piling may be required to provide jacking reaction	Generally used for drives through embankments

Tabla 10. Recomendaciones para la ejecución de pozos de ataque y salida en condiciones saturadas del terreno. Pipe Jacking Associates. 2017.

DRY GROUND: Dry Cohesive, Dry Non-Cohesive and Dry Mixed and Fill Conditions				
Type	Size and shape	Depth	Ground treatment	Remarks
Segmental	2.4m dia and above	Unlimited	Not required	Diameter dependent on pipe jacking method, rig and depth considerations
Sheet piled	Any	Generally Up to 15m	Not required	
Secant piled	Any	Generally Up to 20m	Not required	Needs large working area
Trench sheeted	Any	Up to 6m	Not required	Not recommended
Pre-cast caisson	2.4 to 4m dia	Generally Up to 15m	Not required	Suitable for microtunnelling
Cast insitu caisson	Any	Unlimited	Not required	Can be water retaining and flotation resistant
Battered excavation	Any	Shallow	Needed if angle of repose of soil exceeded	
Ground anchorages	Any	Surface level	Not required	For shallow work only

Tabla 11. Recomendaciones para la ejecución de pozos de ataque y salida en condiciones no saturadas del terreno. Pipe Jacking Associate. 2017.

Los pozos deben diseñarse para resistir empujes de tierras y presiones hidrostáticas en todas las fases de su vida útil, incluidas las etapas transitorias de excavación, montaje del equipo y empuje inicial. Durante la instalación del sistema de hinca, el pozo de ataque debe ser capaz de transmitir elevadas fuerzas de reacción sin experimentar deformaciones excesivas que comprometan la alineación del microtúnel. Este requisito puede condicionar el espesor y armado de los elementos estructurales del pozo, así como la necesidad de anclajes o refuerzos adicionales.

Los pozos de ataque deben dimensionarse no solo en función del diámetro del microtúnel, sino también para permitir la instalación de la microtuneladora, los gatos de empuje, los sistemas de guiado, los equipos auxiliares y las operaciones de manipulación de tubos. En entornos urbanos confinados, las limitaciones de espacio pueden dificultar la ejecución del pozo, restringir el acceso de maquinaria pesada y condicionar la secuencia de montaje del equipo. De forma análoga, los pozos de salida deben permitir la recuperación segura de la cabeza de excavación, lo que puede resultar especialmente complejo cuando el pozo se sitúa a gran profundidad o bajo infraestructuras existentes.



Figura 107. Pozo de ataque. Pipe Jacking Associate. 2017.

En contextos urbanos o ambientalmente sensibles, la ejecución de los pozos está condicionada por restricciones externas, como limitaciones de ruido y vibraciones, ocupación del espacio público, afecciones al tráfico o proximidad de edificaciones y servicios existentes. Estos factores pueden imponer horarios de trabajo restringidos, métodos constructivos específicos o sistemas adicionales de monitorización. La excavación de pozos adicionales no solo resulta costosa, sino que también produce alteraciones en la superficie, lo que puede no ser aceptable en ciertos entornos. (Namli & Guler, 2017).

### 3.6.5.2. Espacio disponible para instalación de planta de separación de lodos.

En los proyectos de microtunelación que emplean sistemas de excavación con lodo, como los métodos slurry y, en determinados casos, EPB en modo slurry, la instalación de una planta de separación y tratamiento de lodos constituye un condicionante constructivo y operativo de primer orden. La disponibilidad de espacio en superficie para implantar esta planta influye de forma directa en la viabilidad del método constructivo.

La planta de separación de lodos debe albergar un conjunto de equipos que incluyen, entre otros, cribas vibratorias, ciclones, desarenadores, deslimadores, tanques de almacenamiento, bombas, tuberías de impulsión y retorno.

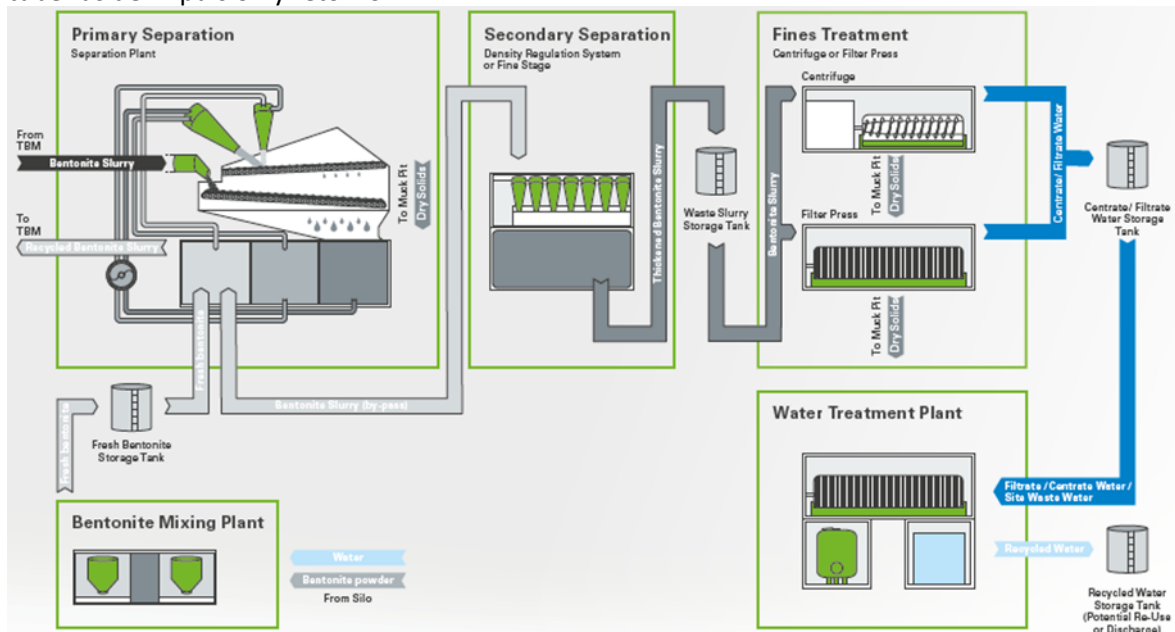


Figura 108. Esquema de una planta de separación de lodos. Herrenknecht 2025.

Todo ello requiere una superficie considerable, con accesos adecuados para maquinaria, suministro de materiales y retirada de residuos. En función del diámetro del microtúnel, del caudal de excavación y de las características del terreno, las dimensiones de la planta pueden incrementarse significativamente, lo que acentúa la importancia del espacio disponible. El uso de coagulantes como el cloruro férrico combinado con floculantes poliméricos puede mejorar la eficiencia de separación de los lodos generados, permitiendo una reducción rápida del volumen de lodo y transformándolo en material sólido con cierta resistencia, lo que reduce los requisitos de espacio para almacenamiento temporal en superficie. (Jiang et al., 2022). En entornos urbanos densos, la implantación de la planta de separación suele verse limitada por la escasez de espacio libre, la ocupación del dominio público, la proximidad de edificaciones y la coexistencia con otras infraestructuras o servicios.



Figura 109. Diferentes composiciones para los elementos de separación primaria. Herrenknecht 2025.

Estas restricciones pueden obligar a soluciones complejas, como la disposición compacta de equipos, la implantación de la planta en parcelas alejadas del pozo de ataque. La distancia entre la planta de separación y el pozo de ataque constituye asimismo un factor relevante. A mayor distancia, se incrementan las longitudes de las conducciones de lodo, lo que repercute en el consumo energético, en el control de las propiedades reológicas del fluido y en la fiabilidad del sistema.

Desde el punto de vista ambiental y social, la ubicación de la planta de separación debe considerar aspectos como el ruido, las vibraciones, los vertidos, la gestión de residuos y el impacto visual, especialmente cuando la obra se desarrolla en zonas habitadas.

### 3.6.5.3. Logística de entrada/salida del material excavado.

A diferencia de los métodos tradicionales a cielo abierto, en microtunelación el material excavado se transporta desde el frente hasta la superficie a través de sistemas cerrados, cuya eficiencia y fiabilidad resultan determinantes para evitar interrupciones del proceso.

El sistema logístico adoptado depende en gran medida del método de excavación empleado. En técnicas slurry, el material excavado se transporta hidráulicamente mediante un circuito de lodos hasta la superficie, donde es separado y tratado en la planta correspondiente. En métodos EPB, el material suele extraerse mediante tornillo sinfín y sistemas de transporte mecánico o hidráulico, mientras que en técnicas como *auger boring* el transporte se realiza a través de hélices continuas. En todos los casos, la capacidad de los sistemas de extracción debe ser coherente con el ritmo de excavación previsto, ya que cualquier cuello de botella en la evacuación del material obliga a reducir o detener el avance.

En entornos urbanos, la logística de salida del material excavado se ve condicionada por restricciones externas como la limitación de accesos, el tráfico viario, los horarios de transporte y las normativas ambientales. El transporte del material tratado suele requerir una flota continua de camiones, lo que implica zonas de carga, maniobra y espera en superficie. El sistema de transporte y eliminación del material excavado (*muck transport and disposal*) está íntimamente ligado al sostenimiento del frente y la selección de la tuneladora, y puede tener un impacto fuerte en la productividad y el coste de un proyecto de microtunelación (Sterling, 2020b). La falta de espacio o la imposibilidad de garantizar una evacuación fluida puede generar acumulaciones de material, obligando a reducir el ritmo de excavación o a adoptar soluciones provisionales de almacenamiento, con el consiguiente incremento de costes y riesgos operativos.



Figura 110. Acopio de lodos tras pasar por separador compacto. Herrenknecht 2025.

### 3.6.6. Condicionantes ambientales y urbanos.

La ejecución de trabajos de microtunelación se desarrolla, en la mayoría de los casos, en entornos urbanos consolidados o en zonas con elevada sensibilidad ambiental, lo que introduce una serie de condicionantes adicionales que deben ser considerados desde las fases iniciales del proyecto. Aunque la

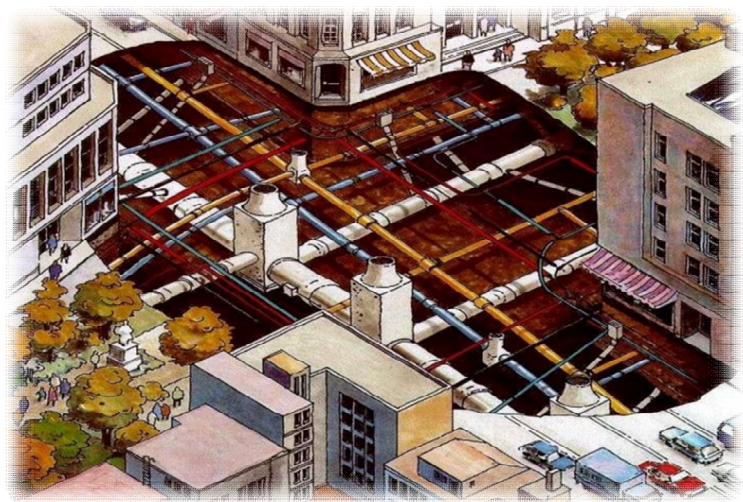


Figura 111. Entorno urbano típico en microtunelación. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.

microtunelación se caracteriza por minimizar las afecciones en superficie en comparación con los métodos tradicionales a cielo abierto, su puesta en obra no está exenta de impactos ambientales y urbanos que pueden condicionar de forma significativa la planificación, la organización y el desarrollo de los trabajos. La microtunelación es una técnica eficaz de construcción sin zanja para instalar infraestructura de servicios subterráneos en áreas urbanas y zonas sensibles, ya que reduce las interrupciones en la superficie y permite instalaciones de redes sin la necesidad de excavaciones extensivas (Yoganathan et al., 2025).

Desde el punto de vista ambiental, la microtunelación debe compatibilizarse con exigencias estrictas en materia de ruido, vibraciones, polvo y vertidos, especialmente cuando la obra se desarrolla en zonas habitadas. Las obras subterráneas generan impactos ambientales variados, que incluyen efectos directos sobre las aguas subterráneas así como impactos más amplios que afectan el paisaje y valores intangibles de las ciudades, lo que hace necesario un enfoque integral de evaluación ambiental en proyectos urbanos (Bobylev, 2011). La operación de maquinaria pesada, bombas, plantas de separación de lodos y sistemas de transporte del material excavado puede generar molestias a la población, lo que obliga a adoptar medidas de mitigación como cerramientos acústicos, control de vibraciones, sistemas de limpieza de viales y planes específicos de gestión de residuos. En muchos casos, estas exigencias se traducen en restricciones operativas que afectan directamente al rendimiento de la obra.

#### 3.6.6.1. Riesgos de asentamientos en superficie.

En los proyectos de microtunelación ejecutados en entornos urbanos, el riesgo de asentamientos en superficie adquiere una relevancia especial cuando el trazado discurre en las proximidades de edificaciones, infraestructuras viarias y ferroviarias, o redes de servicios existentes. En estos contextos, incluso deformaciones de pequeña magnitud pueden generar afecciones significativas, debido a la alta sensibilidad de los elementos urbanos frente a movimientos diferenciales del terreno. Los análisis de campo y simulaciones muestran que la deformación superficial inducida por *pipe jacking* es sensible a la geometría del túnel (diámetro y profundidad), a las presiones de tierra y a la interacción entre tubería-suelo-lodo; la predicción precisa de asentamientos es crucial para la seguridad de elementos urbanos existentes (Qian et al., 2023).

La excavación de un microtúnel induce una redistribución del campo de tensiones en el macizo, que puede dar lugar a deformaciones verticales y horizontales del terreno. Cuando estas deformaciones se producen bajo estructuras existentes, el comportamiento del conjunto terreno–estructura se ve

condicionado por la rigidez relativa de ambas, pudiendo aparecer asientos diferenciales, giros o esfuerzos adicionales en los elementos estructurales.

La distancia entre el eje del microtúnel y las estructuras colindantes, así como el recubrimiento existente, influyen de forma decisiva en la magnitud del riesgo. En situaciones de trazados poco profundos o con recubrimientos reducidos, la zona de influencia de la excavación puede interceptar directamente las cimentaciones existentes, incrementando la probabilidad de que los asientos en superficie se transmitan a la estructura. Este riesgo se ve acentuado en suelos blandos, poco consolidados o con comportamiento predominantemente deformacional, donde pequeñas pérdidas de volumen pueden traducirse en desplazamientos apreciables.

La evaluación previa del riesgo de asientos en superficie mediante estudios geotécnicos detallados y análisis de interacción terreno–estructura resulta imprescindible en proyectos urbanos. Durante la ejecución, la implantación de sistemas de monitorización de asentamientos, tanto en superficie como en las estructuras colindantes, permite detectar de forma temprana comportamientos no previstos y adoptar medidas correctoras antes de que se produzcan daños relevantes.

Es un hecho comprobado en las últimas obras españolas de la red ferroviaria de Alta Velocidad que con los Escudos EPB de última generación se han conseguido asientos mínimos (< 5mm) en la excavación de túneles en suelos con materiales cohesivos de muy diversas granulometrías. (Mendaña Savedra & Fernández Martínez, 2011)

### 3.6.6.2. Proximidad a estructuras sensibles.

La ejecución de microtúneles en entornos urbanos se encuentra cada vez más condicionada por la creciente densidad y complejidad de los elementos existentes en el subsuelo y en superficie, como edificaciones, redes de servicios, infraestructuras viarias y ferroviarias, y sistemas de transporte metropolitano. El desarrollo histórico de las ciudades ha dado lugar a una superposición de infraestructuras de distintas épocas, con trazados a menudo poco documentados, lo que reduce los márgenes de maniobra disponibles para nuevas actuaciones subterráneas.



Figura 112. Perfil transversal de una microtunelación en un entorno urbano. XI Ed. Curso Postgrado 2025. Especialista en tecnologías sin zanja. IBSTT.

### 3.6.6.2.1. Edificaciones, vías ferroviarias, colectores existentes, viales etc.

Un exceso de fuerza de empuje puede dañar los tramos de tubería, los muros de reacción y las edificaciones próximas (Jin et al., 2023). Los edificios pueden presentar comportamientos estructurales muy heterogéneos, en función de su tipología, antigüedad, sistema resistente y tipo de cimentación. Los asentamientos, y en particular los asentamientos diferenciales, pueden generar redistribuciones de esfuerzos no previstas en la estructura, dando lugar a fisuración en elementos portantes y no portantes, deformaciones excesivas o incluso a la pérdida de capacidad resistente en casos desfavorables. Este riesgo resulta especialmente elevado en edificaciones con cimentaciones superficiales, estructuras históricas o construcciones con escasa capacidad de deformación, lo que obliga a extremar el control del proceso constructivo y a establecer criterios estrictos de auscultación y seguimiento cuando el microtúnel discurre bajo o en las proximidades de edificios existentes. Las infraestructuras viarias y ferroviarias constituyen un caso particularmente sensible, ya que presentan límites admisibles de deformación muy estrictos, tanto por razones de seguridad como de funcionalidad. Asentamientos diferenciales o deformaciones longitudinales pueden afectar al confort, al drenaje o incluso a la estabilidad de la infraestructura, lo que obliga a un control exhaustivo del proceso constructivo cuando el microtúnel discurre bajo este tipo de elementos.



Figura 113. Caso práctico. Microtunelación Santiago de Compostela. Cruce con edificaciones y vial existente. Eurohinca. Asimismo, la presencia de redes de servicios urbanos —como conducciones de agua, saneamiento, gas o telecomunicaciones— introduce condicionantes adicionales. Estos elementos suelen

presentar una menor tolerancia a deformaciones diferenciales y pueden sufrir roturas o pérdidas de estanqueidad incluso ante movimientos moderados del terreno, lo que incrementa el riesgo de incidencias durante la ejecución. Los túneles someros en áreas urbanas están cerca de edificaciones colindantes y conducciones municipales; los asentamientos superficiales debidos a la excavación de túneles pueden causar daños en estas estructuras, lo que requiere métodos precisos de predicción y control (Niu et al., 2024).

#### 3.6.6.3. Nivel de vibraciones admisibles.

La ejecución de microtúneles en entornos urbanos puede generar vibraciones inducidas por la actividad constructiva, asociadas principalmente al funcionamiento de la microtuneladora, a los sistemas de empuje de tuberías, a la excavación del frente y a la operación de maquinaria auxiliar en superficie. Aunque la microtunelación se considera, en general, una técnica de baja afección vibratoria en comparación con otros métodos de excavación, el control del nivel de vibraciones admisibles resulta un condicionante clave cuando el trazado discurre en proximidad a edificaciones sensibles, infraestructuras ferroviarias, instalaciones industriales o elementos patrimoniales.

La vibración transmitida por el suelo debido a obras mecanizadas, como la construcción de microtúneles, es un problema común en áreas urbanas edificadas; las estructuras antiguas o deterioradas son especialmente susceptibles a daños por vibración tanto por amplitud como por frecuencia.(Stolarik et al., 2019).

Las vibraciones transmitidas al terreno pueden propagarse hasta la superficie y afectar tanto a la integridad estructural de los elementos existentes como al confort de los usuarios. En este sentido, resulta fundamental distinguir entre vibraciones con potencial de daño estructural y aquellas que, aun sin causar daños, pueden generar molestias perceptibles para las personas. En entornos urbanos densos, especialmente en zonas residenciales, hospitales, centros educativos o áreas con actividad ferroviaria, los límites admisibles suelen estar condicionados por criterios de servicio y confort más restrictivos que los puramente estructurales. Los proyectos de microtunelación en entornos urbanos suelen requerir la definición previa de umbrales de vibración admisibles, habitualmente expresados en términos de velocidad pico de partícula (PPV), así como la implantación de sistemas de monitorización vibratoria continua durante la ejecución.

#### 3.6.6.4. Nivel de ruidos permitidos.

La ejecución de microtúneles en entornos urbanos conlleva inevitablemente la generación de ruido asociado a las actividades constructivas, tanto en superficie como en el interior de los pozos de

ataque y salida. Aunque la microtunelación presenta ventajas significativas frente a los métodos tradicionales a cielo abierto en términos de reducción de afecciones acústicas, el control del nivel de ruidos permitidos constituye un condicionante ambiental clave, especialmente cuando la obra se desarrolla en zonas residenciales, próximas a edificaciones sensibles o en áreas con restricciones horarias estrictas. Las principales fuentes de ruido durante la microtunelación se asocian al funcionamiento de la microtuneladora, los sistemas hidráulicos y eléctricos, los gatos de empuje, la extracción y transporte del material excavado, así como a la operación de maquinaria auxiliar en superficie, como bombas, plantas de separación de lodos, generadores y equipos de ventilación.

El nivel de ruido admisible viene generalmente determinado por la normativa ambiental aplicable, que establece límites máximos en función del uso del suelo (residencial, terciario, sanitario o educativo) y del periodo temporal considerado (diurno, vespertino o nocturno).

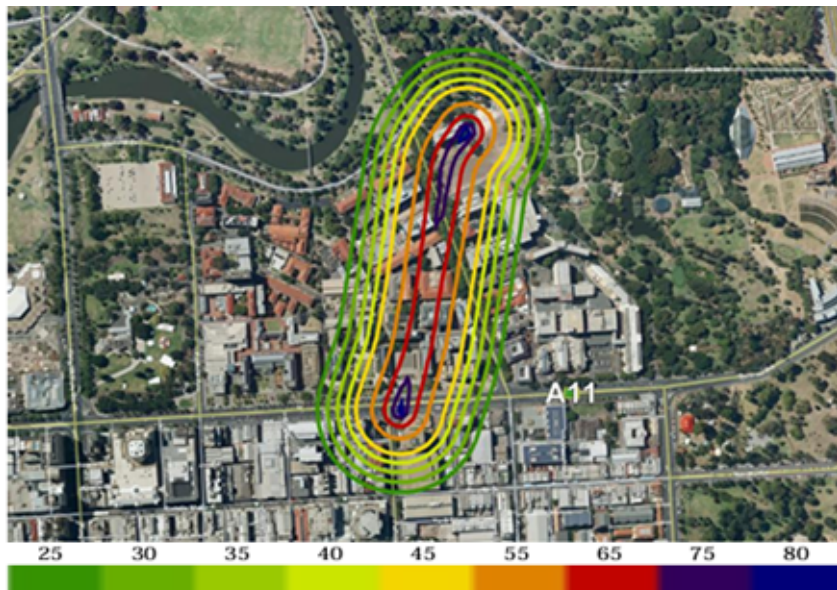


Figura 114. Ámbito de afección sonora [dB] en un caso de estudio de microtunelación. Lyons.,2009.

El ruido transmitido por el suelo causado por las operaciones de microtunelación puede resultar en molestias significativas para la comunidad, y los modelos tridimensionales permiten predecir tanto la ubicación como la duración del impacto acústico generado por el uso de máquinas (Lyons, 2009).

Para minimizar esta problemática se pueden incluir encapsulamientos acústicos de equipos, la instalación de pantallas o barreras acústicas, o el uso de maquinaria de baja emisión sonora y la optimización de los procesos operativos para reducir picos de ruido. La monitorización acústica en tiempo real permite verificar el cumplimiento de los límites establecidos y adoptar medidas correctoras de manera inmediata en caso de superación de los valores admisibles.

#### 3.6.6.5. Riesgo de afloramiento de lodos.

El afloramiento de lodos en superficie constituye un riesgo asociado a la ejecución de microtúneles mediante técnicas presurizadas, como la microtunelación con frente en equilibrio (*slurry* o EPB). Este fenómeno se produce cuando el fluido de excavación o el lodo inyectado en el espacio anular

encuentra una vía de escape hacia la superficie o hacia cavidades subterráneas existentes, generando surgencias visibles que pueden comprometer la seguridad, el entorno urbano y la continuidad del proceso constructivo.

El riesgo de afloramiento está estrechamente vinculado a las condiciones geotécnicas e hidrogeológicas del terreno, así como al control de las presiones de excavación e inyección. El fluido de bentonita en excavación con MTBM se inyecta para formar un 'film' de baja permeabilidad que estabiliza el frente del túnel; sin embargo, la infiltración del slurry puede también modificar el flujo de agua subterránea y aumentar la presión de poros, lo que podría facilitar la migración de lodo más allá del frente si no se controla adecuadamente.(Qin et al., 2023). En suelos granulares poco cohesivos, con alta permeabilidad o con presencia de niveles freáticos elevados, el lodo puede migrar con mayor facilidad a través del macizo. De igual modo, la existencia de estratos heterogéneos, rellenos antrópicos, fisuras, antiguas excavaciones o servicios enterrados puede favorecer la formación de caminos preferentes para el ascenso del fluido.

El afloramiento de lodos suele estar asociado a un exceso de presión en el frente de excavación o en la inyección del espacio anular, especialmente cuando estas presiones superan la tensión efectiva del terreno suprayacente. El control de las propiedades reológicas del lodo, como la viscosidad y la capacidad de sellado, desempeña un papel clave para limitar su migración no deseada. El comportamiento de infiltración del slurry (bentonita) ha sido investigado experimentalmente, mostrando que diferentes formulaciones y condiciones de prueba afectan cómo el fluido migra a través del suelo (Qin et al., 2024). En situaciones de recubrimiento reducido, frecuentes en entornos urbanos, el margen de seguridad frente a este tipo de fenómenos se ve notablemente disminuido, incrementando la probabilidad de que el lodo alcance la superficie o se infiltre en estructuras colindantes. En el subsuelo, el lodo puede infiltrarse en redes de servicios, sótanos o infraestructuras existentes, generando incidencias adicionales. Estos episodios suelen obligar a detener el avance, ajustar parámetros de excavación y, en casos extremos, a ejecutar medidas correctoras urgentes. En entornos urbanos, la prevención de este riesgo debe apoyarse además en un conocimiento detallado del subsuelo, incluyendo la localización de servicios existentes, estructuras enterradas y posibles discontinuidades del terreno.

### **3.6.7. Condicionantes económicos y logísticos.**

La microtunelación es una técnica de excavación sin zanja que, si bien presenta importantes ventajas desde el punto de vista técnico y ambiental en entornos urbanos, está fuertemente condicionada por factores económicos y logísticos que influyen de manera decisiva en la viabilidad

del proyecto. Estos condicionantes deben evaluarse de forma integrada desde las fases iniciales de diseño, ya que afectan tanto a los costes directos de ejecución como a la planificación y organización de la obra.

Desde el punto de vista económico, la microtunelación se caracteriza por una elevada inversión inicial, asociada principalmente a la adquisición o alquiler de equipos especializados (microtuneladora, estaciones de empuje, sistemas de guiado, plantas de tratamiento de lodos, equipos de control y monitorización), así como a la ejecución de los pozos de ataque y recepción.

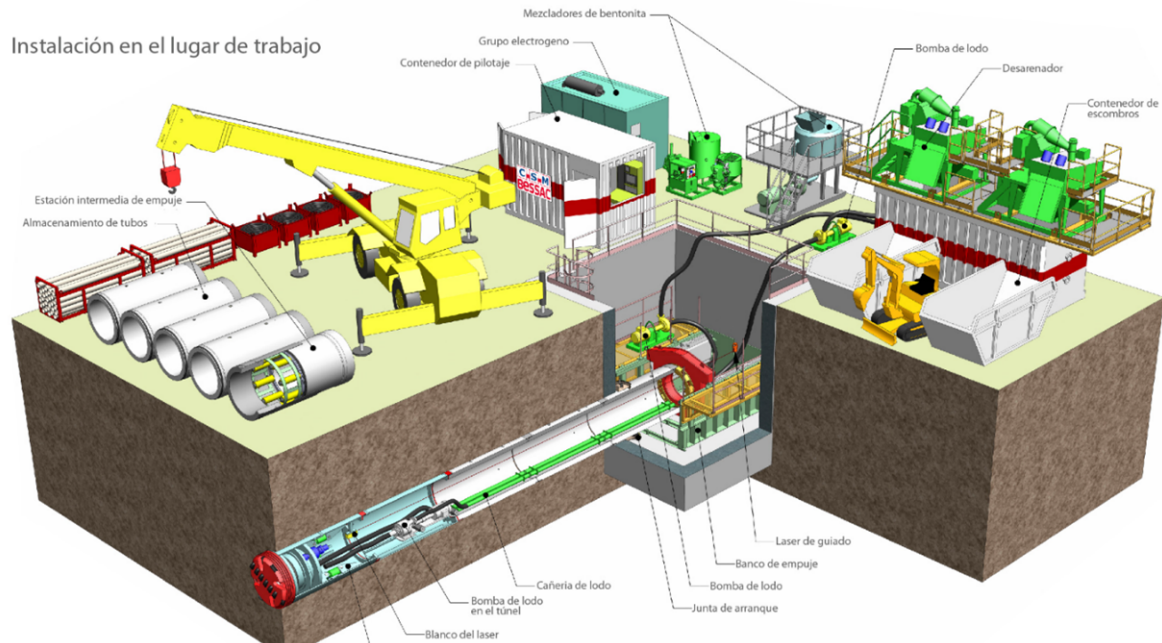


Figura 115. Conjunto de equipos necesarios para la ejecución de técnicas de microtunelación.  
<https://www.bessac.com.mx/bessac/Microtuneles>.

Estos costes fijos hacen que la técnica resulte especialmente sensible a la longitud del tramo a ejecutar, siendo generalmente más competitiva en tramos medios o largos, donde el coste inicial puede amortizarse adecuadamente frente a soluciones alternativas. Los métodos sin zanja, tales como microtunelación, suelen tener un coste inicial superior al de métodos tradicionales de excavación, pero presentan ventajas al evitar interrupciones de carreteras y otros servicios; factores como tipo de suelo, ubicación y método de construcción deben valorarse para determinar su viabilidad económica. (Jorjam et al., 2023).

A estos costes se suman los derivados de la gestión de lodos y del material excavado, que incluyen la implantación de plantas de separación, el consumo de bentonita u otros aditivos, el transporte de residuos y su tratamiento o eliminación en vertedero autorizado.

La logística de transporte constituye otro condicionante relevante. La entrada de tuberías, equipos y consumibles, así como la salida continua del material excavado, debe coordinarse cuidadosamente

para evitar interferencias con el tráfico viario, el transporte público y la actividad urbana. Las limitaciones de horarios, tonelaje y accesos pueden reducir la productividad diaria y afectar al rendimiento global.

La evaluación económica de la microtunelación debe realizarse mediante un análisis global del ciclo de vida del proyecto, y no únicamente en términos de coste unitario de excavación.

#### 3.6.7.1. Coste de instalación de la planta de Slurry.

El coste asociado a la planta de slurry incluye, en primer lugar, la adquisición o alquiler de los equipos principales, tales como unidades de desarenado y deslimado (hidrociclones, cribas vibratorias), bombas de impulsión, tanques de almacenamiento, sistemas de dosificación de bentonita y aditivos, así como equipos de control y automatización. La capacidad de tratamiento requerida, directamente relacionada con el diámetro del microtúnel, el ritmo de avance y el tipo de terreno, condiciona de forma significativa la dimensión y el coste global de la instalación.

A estos costes se suman los derivados de la implantación física de la planta en obra, que comprenden la preparación de la plataforma, cimentaciones provisionales, redes eléctricas y de agua, canalizaciones auxiliares y sistemas de contención ambiental. En entornos urbanos, donde la disponibilidad de espacio es limitada, la necesidad de soluciones compactas o instalaciones distribuidas puede incrementar de forma notable los costes de montaje y adaptación.

El transporte, montaje y desmontaje de la planta de slurry representa otro factor económico relevante, especialmente en obras de corta duración o en proyectos con tramos aislados. En estos casos, el peso y volumen de los equipos, así como la complejidad de su ensamblaje, pueden suponer un porcentaje significativo del presupuesto, reduciendo la competitividad económica de la técnica frente a alternativas constructivas más simples.

Deben considerarse también los costes de puesta en marcha y ajuste del sistema, que incluyen la preparación inicial del lodo, la calibración de los equipos de separación y el ajuste de los parámetros de funcionamiento para adaptarlos a las condiciones reales del terreno.

La viabilidad económica depende en gran medida de la longitud del tramo a ejecutar y de la posibilidad de amortizar estos costes fijos.

#### 3.6.7.2. Coste de lodos bentónicos o polímeros.

El consumo de lodos de excavación constituye uno de los principales costes variables en los proyectos de microtunelación con frente presurizado, influyendo de forma directa en el coste de

explotación de la obra. La selección del tipo de lodo, bentonítico, polimérico o mixto, condiciona no solo el comportamiento técnico del sistema, sino también el coste específico asociado a los materiales, su preparación, mantenimiento y gestión posterior.

La bentonita es el material más utilizado como base de los lodos en microtunelación, debido a su elevada disponibilidad, comportamiento tixotrópico y capacidad para formar un filtro de baja permeabilidad frente al terreno. Desde el punto de vista económico, su coste unitario es relativamente moderado; sin embargo, el consumo total de bentonita puede resultar elevado, especialmente en terrenos permeables, tramos largos o situaciones donde se producen pérdidas de fluido. A ello se suma el coste asociado a la preparación del lodo, el mantenimiento de sus propiedades reológicas y la gestión del material una vez separado del suelo excavado, lo que incrementa el coste global del sistema bentonítico.

Los lodos poliméricos presentan, en general, un coste unitario por kilogramo superior al de la bentonita, pero permiten trabajar con menores concentraciones y menores volúmenes totales de fluido, lo que puede traducirse en una reducción del consumo global de aditivos. Además, los polímeros suelen facilitar la separación sólido-líquido y mejorar la eficiencia de la planta de tratamiento, reduciendo los costes operativos asociados a la gestión de residuos. No obstante, su comportamiento es más sensible a las condiciones químicas del terreno y del agua, lo que puede exigir un mayor control técnico y ajustes frecuentes.

La sepiolita, aunque menos empleada que la bentonita en microtunelación, se utiliza en determinadas aplicaciones como material alternativo o complementario debido a su elevada capacidad de absorción y estabilidad reológica. Desde el punto de vista económico, la sepiolita suele presentar un coste unitario superior al de la bentonita, y su disponibilidad es más limitada, lo que puede afectar a la logística de suministro.

El coste total de los lodos no depende únicamente del precio unitario del material empleado, sino también de factores como el tipo de terreno, la longitud del tramo, el diámetro del microtúnel, las pérdidas de fluido, la eficiencia de la planta de separación y la posibilidad de reutilización del lodo.

### **3.6.7.3. Disponibilidad de maquinaria en el mercado local.**

La disponibilidad de maquinaria especializada constituye un condicionante clave en la ejecución de proyectos de microtunelación, con implicaciones directas tanto en los costes como en la planificación y los plazos de obra. La productividad en proyectos de microtunelación está influenciada por múltiples factores, incluyendo la disponibilidad y rendimiento del equipamiento

especializado, así como la experiencia del operador y las condiciones del suelo, subrayando la importancia de contar con maquinaria adecuada y disponible para optimizar costos y tiempos (Hegab & Salem, 2010b).

A diferencia de técnicas convencionales de excavación, la microtunelación requiere equipos altamente especializados, como microtuneladoras de frente presurizado (slurry o EPB), estaciones de empuje, sistemas de guiado y control, y plantas auxiliares de gestión de lodos, cuya disponibilidad en el mercado local puede variar significativamente de una región a otra.

En muchos casos, estos equipos deben solicitarse con antelación significativa, importarse desde otros países o regiones, o contratarse a través de terceros especializados, lo que puede implicar costes adicionales de transporte, seguros y logística internacional.

La dependencia de proveedores globales de maquinaria especializada también introduce incertidumbre frente a variaciones en la cadena de suministro. La disponibilidad de componentes de repuesto, consumibles y servicios técnicos de mantenimiento puede estar limitada, especialmente en mercados con menor volumen de obras de microtunelación.

#### 3.6.7.4. Costes de mantenimiento del cabezal.

El cabezal de excavación de una microtuneladora, también denominado cutterhead o rueda de corte, constituye uno de los elementos de mayor desgaste y, por tanto, uno de los componentes cuyo mantenimiento genera costes significativos durante la ejecución de un proyecto de microtunelación. Estos costes de mantenimiento no solo se derivan de la sustitución de los elementos de corte, sino también del desgaste de componentes estructurales, sistemas hidráulicos y unidades de tracción vinculadas al cabezal.

El mantenimiento del cabezal abarca esencialmente dos categorías de costes: preventivos y correctivos. Los costes preventivos incluyen actividades planificadas como inspecciones periódicas, renovación de discos de corte o dientes de excavación antes de que alcancen el final de su vida útil, lubricación de componentes críticos, revisiones programadas de los sistemas hidráulico y de transmisión, y paradas técnicas programadas para evaluar el estado general del cabezal.

Los costes correctivos surgen de fallos no planificados o averías durante la operación, que pueden requerir intervenciones urgentes para substituir componentes dañados, reparaciones fuera de secuencia o, en casos graves, el reemplazo total del cabezal. Estos eventos suelen implicar un alto coste por varias razones: la complejidad de acceder al cabezal dentro del túnel, la necesidad de

equipos auxiliares para desmontaje/montaje, horas extraordinarias de personal técnico altamente especializado y, frecuentemente, la aceleración de suministro de repuestos.

La frecuencia de mantenimiento del cabezal es muy dependiente de varios factores operativos y geotécnicos. Terrenos abrasivos, como arenas con altos contenidos de sílice o gravas angulosas, aceleran el desgaste de discos, cortadores y segmentos de corte, reduciendo su vida útil y aumentando la frecuencia de sustitución. De igual manera, condiciones de terreno heterogéneas, presencia de inclusiones rocosas o variaciones en resistencia del macizo pueden hacer que el deterioro del cabezal se produzca de forma no uniforme, dificultando la planificación del mantenimiento preventivo y encareciendo los costes correctivos.

Entre los elementos de corte más comunes se encuentran los discos cortadores, las picas y los rastriles, cada uno de ellos diseñado para cumplir una función específica dentro del proceso de excavación.

Los discos cortadores se emplean principalmente en la excavación de roca o terrenos de elevada consistencia. Están formados por discos metálicos de diferentes durezas, seleccionadas en función de la resistencia y abrasividad del terreno. Estos discos se fijan al cabezal mediante soportes que permiten su giro sobre el propio eje, facilitando la rotura del material por compresión y cizalladura. Debido a su elevado coste unitario y a las exigencias mecánicas a las que están sometidos, su desgaste tiene un impacto directo en los costes de mantenimiento del cabezal.

Las **picas**, distribuidas a lo largo de la superficie del cabezal, se utilizan principalmente en suelos poco consistentes o de naturaleza granular. Su funcionamiento se basa en la acción combinada de la compresión y el giro del cabezal, que permite desagregar progresivamente el terreno para su posterior extracción. Estas herramientas presentan una mayor fragilidad frente a condiciones heterogéneas o a la presencia de inclusiones duras, por lo que requieren inspecciones y sustituciones frecuentes, incrementando los costes de mantenimiento en determinados tipos de terreno.

Por su parte, los rastriles se sitúan en la zona más exterior del cabezal y tienen como misión principal conducir el material excavado hacia la cámara de excavación, facilitando su evacuación mediante el sistema de transporte interno de la microtuneladora. Aunque su función no es estrictamente de corte, están sometidos a desgaste abrasivo continuo, especialmente en suelos arenosos o con alto contenido en finos, lo que contribuye también a los costes de mantenimiento global del cabezal. La combinación y disposición de estas herramientas debe optimizarse en función del terreno previsto,

ya que una selección inadecuada puede acelerar el desgaste, aumentar la frecuencia de intervenciones de mantenimiento y provocar paradas no planificadas de la excavación.



Figura 116. Elementos de corte en microtunelación con escudos cerrados. <https://www.microtunnel.com/equipos-auxiliares>

El mantenimiento del cabezal tiene un impacto en la productividad y en el plazo de ejecución. Paradas técnicas prolongadas para mantenimiento preventivo o correctivo reducen el ritmo de avance de la tuneladora, lo que se traduce en costos de oportunidad asociados a la demora en el cumplimiento de hitos contractuales y, en algunos casos, penalizaciones por retrasos.

#### 3.6.7.5. Costes energéticos.

El principal consumo energético en microtunelación está asociado al funcionamiento de la microtuneladora, incluyendo la rotación del cabezal de excavación, los sistemas hidráulicos de empuje, los equipos de guiado y control, y los sistemas auxiliares de ventilación y refrigeración. La potencia demandada por estos equipos depende directamente del diámetro del microtúnel, del tipo de terreno excavado y de la velocidad de avance, incrementándose notablemente en terrenos duros, abrasivos o heterogéneos, donde el esfuerzo de corte y empuje es mayor.

La demanda de potencia de las microtuneladoras mecanizadas está directamente relacionada con las condiciones geotécnicas del terreno. En materiales duros o heterogéneos se incrementan los esfuerzos de corte y empuje, lo que conlleva un aumento sustancial del consumo energético durante la excavación.(X. Chen et al., 2024).

Un segundo foco de consumo energético relevante corresponde a la planta de tratamiento de lodos, en el caso de microtunelación con slurry. Las bombas de impulsión y recirculación, los sistemas de separación sólido-líquido, los agitadores de tanques y los equipos de dosificación de aditivos requieren un suministro eléctrico continuo durante la excavación. La capacidad instalada de la planta, así como su grado de eficiencia, influyen de forma directa en el coste energético.

En entornos urbanos, donde las distancias de transporte interno pueden ser mayores o donde se imponen restricciones operativas, estos consumos pueden incrementarse respecto a condiciones más favorables.

### 3.6.7.6. Costes de gestión de lodos y residuos.

La gestión de lodos y residuos constituye una partida de coste relevante dentro del presupuesto global de la obra. Estos costes no solo dependen del volumen excavado, sino también de la naturaleza del terreno, del sistema de excavación empleado y de las exigencias normativas y ambientales del entorno de actuación.

La generación de lodos procede fundamentalmente de la mezcla del material excavado con el fluido bentonítico o polimérico utilizado para la estabilización del frente y el transporte del detritus. Dichos lodos deben ser tratados en una planta de separación sólido-líquido, donde se recupera parcialmente el fluido reutilizable y se obtiene un residuo sólido que requiere una gestión específica. Los costes asociados a esta fase incluyen la operación y mantenimiento de la planta de tratamiento, el consumo de energía eléctrica, la reposición de aditivos, así como la mano de obra necesaria para su funcionamiento continuo.

Una vez separados, los residuos sólidos generados deben ser transportados y gestionados conforme a la normativa vigente. Este proceso implica costes de carga, transporte a vertedero o planta de valorización, tasas de vertido y, en determinados casos, tratamientos previos si el material presenta características especiales (contenido en finos, humedad elevada o posible contaminación). La distancia al punto de destino final y la disponibilidad de infraestructuras adecuadas influyen de manera significativa en el coste unitario por metro cúbico excavado.

### 3.7. Riesgos asociados a la técnica.

Las tecnologías de microtunelación presentan numerosas ventajas frente a los métodos tradicionales de excavación a cielo abierto, especialmente en entornos urbanos. No obstante, su aplicación conlleva una serie de riesgos técnicos, operativos, ambientales y económicos que deben ser identificados y gestionados adecuadamente durante las fases de proyecto y ejecución.

Desde el punto de vista geotécnico, uno de los principales riesgos está relacionado con la incertidumbre del terreno. Variaciones no previstas en la litología, la presencia de bloques, niveles de roca dura, estratos heterogéneos o cambios bruscos en las condiciones hidrogeológicas pueden provocar incrementos en el par y empuje de la microtuneladora, reducciones en la velocidad de avance e incluso bloqueos del equipo. Estos factores pueden derivar en sobreesfuerzos mecánicos, desgaste prematuro del cabezal de corte y mayores necesidades de mantenimiento.

Los sistemas de guiado y control constituyen elementos clave para garantizar la precisión del trazado. Errores en la instrumentación, en la calibración de los sensores o en la interpretación de

los datos pueden ocasionar desviaciones del eje del microtúnel, dificultando la colocación de las tuberías y, en casos extremos, obligando a realizar trabajos correctivos de elevado coste.

Aún existen riesgos, sin embargo, tales como cambios inesperados en el suelo y la presencia de obstáculos desconocidos. Por lo tanto, una planificación cuidadosa y la selección del método adecuado, en caso de usarse, resultan críticas. Un método y una herramienta de decisión documentados —que respalden las decisiones de los diseñadores mediante una verificación exhaustiva y cálculos sobre la disponibilidad y limitaciones de los métodos de microtunelación— serían de gran utilidad para los responsables de toma de decisiones con poca experiencia en esta tecnología.(Ueki et al., 1999)

### *3.7.1. Riesgos de colapso del frente.*

El colapso del frente de excavación constituye uno de los riesgos geotécnicos más críticos en la ejecución de microtuneles, debido a sus potenciales consecuencias estructurales, operativas y de seguridad.

Este fenómeno se produce cuando el equilibrio tensional del terreno situado por delante del frente excavado se ve alterado y la capacidad resistente del suelo o macizo rocoso resulta insuficiente para soportar las tensiones inducidas por la excavación, especialmente en ausencia de un adecuado control de presión. La estabilidad de la cara de excavación en microtuneladoras es un aspecto crítico para una ejecución segura y controlada. La falta de un adecuado soporte del frente puede llevar a un colapso súbito, con grandes asentamientos en superficie.(Broere, 2014)

Un colapso del frente puede causar la entrada masiva de terreno y agua al interior del microtúnel, dificultando o imposibilitando la continuación de la excavación. Este escenario puede derivar en la inmovilización de la microtuneladora, la necesidad de realizar inyecciones de consolidación de emergencia o, en casos extremos, el abandono del equipo. el colapso del frente supone también un riesgo directo para la seguridad del personal, especialmente durante las operaciones de mantenimiento, cambio de herramientas o intervenciones en cámara presurizada.

La solución de un colapso del frente en microtunelación requiere una actuación inmediata, técnica y coordinada. En primer lugar, es imprescindible detener el avance de la microtuneladora y estabilizar las condiciones internas del túnel, ajustando la presión de frente mediante el incremento controlado de la presión de lodos o de tierras, con el objetivo de compensar la pérdida de confinamiento y frenar la entrada de material. Este ajuste debe realizarse de forma gradual para evitar sobrepresiones que puedan provocar levantamientos del terreno o daños en superficie.

En paralelo, resulta fundamental controlar y gestionar la entrada de agua, ya que la presencia de presiones hidrostáticas elevadas puede agravar el colapso y dificultar la consolidación del terreno. Para ello, pueden adoptarse medidas como la reducción temporal del nivel freático mediante bombeos, la ejecución de inyecciones impermeabilizantes o el empleo de aditivos específicos en el slurry que mejoren su capacidad de sellado y soporte.

Una vez recuperada la estabilidad, la reanudación de la excavación debe realizarse de forma progresiva, ajustando los parámetros operativos —empuje, par de corte, velocidad de avance y presión de frente— a las nuevas condiciones del terreno.

### 3.7.2. Riesgos de blow-out. Rotura del frente por exceso de presión.

El fenómeno conocido como *blow-out* corresponde a una rotura del frente de excavación provocada por la aplicación de una presión de soporte superior a la capacidad de confinamiento del terreno situado por delante del frente, lo que da lugar a la expulsión violenta de lodos, terreno y agua hacia la superficie o hacia cavidades adyacentes. Este tipo de fallo representa un riesgo específico y particularmente crítico en tecnologías de microtunelación que emplean control de presión mediante lodos (*slurry*) o sistemas de presión de tierras. La fracturación del slurry en excavación con escudo puede causar que el lodo se desplace a través del suelo, incrementando el riesgo de rupturas ('blow-out') del frente de excavación si la presión de soporte del slurry no se mantiene dentro de límites seguros. (Han et al., 2022).

El *blow-out* se produce cuando la presión aplicada en la cámara de excavación supera la tensión efectiva vertical del terreno y la resistencia al corte de este, especialmente en suelos granulares poco cohesivos, estratos de baja sobrecarga o terrenos altamente permeables. En estas condiciones, el exceso de presión genera un gradiente hidráulico ascendente que puede inducir la fracturación del terreno, la apertura de caminos preferentes y el levantamiento del material, facilitando la migración del slurry hacia niveles superiores.

La problemática asociada a un *blow-out* es especialmente grave en entornos urbanos, donde la rotura del frente puede manifestarse en superficie mediante surgencias de lodo, levantamientos del terreno o la aparición de cráteres, con el consiguiente riesgo para edificaciones y servicios enterrados. Además, la pérdida de material y fluido desde el frente compromete el equilibrio del sistema de excavación, pudiendo generar una posterior inestabilidad del túnel y asentamientos diferidos una vez cesa la sobrepresión.

Un episodio de *blow-out* implica la interrupción inmediata de los trabajos y la necesidad de reducir de forma urgente la presión de frente para restablecer condiciones de equilibrio. No obstante, una

despresurización brusca puede desencadenar fenómenos secundarios de colapso del frente, por lo que la gestión del incidente resulta especialmente compleja.

### **3.7.3. Riesgo de inundaciones del túnel.**

La inundación puede producirse cuando la presión hidrostática del agua subterránea supera la presión de soporte aplicada en el frente, favoreciendo la entrada de agua al interior del microtúnel a través del frente de excavación, de discontinuidades del terreno o de zonas debilitadas. Este fenómeno es especialmente crítico en suelos granulares saturados y en formaciones fisuradas, donde la elevada permeabilidad facilita flujos de agua significativos y difíciles de controlar. Para mantener la estabilidad de la cara de excavación en microtunelación, se utiliza slurry de bentonita como soporte temporal. Además, la presión del slurry se mantiene superior a la presión del agua subterránea para evitar la entrada de agua y garantizar el control del frente. (Yoganathan et al., 2025).

La pérdida de estanqueidad en los sistemas del escudo, en las juntas de los tubos o en las conexiones de los equipos auxiliares puede constituir un punto de entrada de agua. Deficiencias en el sellado de las juntas de empuje, fallos en los sistemas de inyección de lechada tras la colocación de la tubería o daños en las juntas de estanqueidad pueden provocar infiltraciones progresivas que, si no se detectan a tiempo, evolucionan hacia una inundación generalizada del microtúnel.

Una inundación implica la interrupción inmediata de los trabajos y puede derivar en la pérdida de control de la excavación, la inutilización temporal o permanente de la microtuneladora y la necesidad de ejecutar bombeos de emergencia.

### **3.7.4. Riesgo de atasco del escudo.**

Este fenómeno se produce cuando las fuerzas resistentes que actúan sobre el escudo superan la capacidad de empuje disponible, impidiendo el avance o retroceso de la máquina y generando una situación de bloqueo mecánico.

Los atascos del escudo suelen estar asociados a condiciones del terreno desfavorables, como la presencia de suelos cohesivos con alto contenido en arcillas plásticas, materiales expansivos, zonas de transición suelo-roca o estratos heterogéneos. En estos casos, la adherencia del terreno al escudo y el incremento de las presiones laterales pueden provocar un aumento significativo de las fuerzas de rozamiento. Asimismo, en suelos granulares saturados, la pérdida de control de la presión de frente puede inducir colapsos parciales que incrementen el confinamiento del escudo y dificulten su desplazamiento.

Otro factor crítico es la lubricación insuficiente del espacio anular entre el escudo y el terreno excavado. Una inyección inadecuada de bentonita ya sea por fallos en el sistema de inyección o por una dosificación incorrecta, incrementa el rozamiento lateral y favorece el agarrotamiento progresivo del escudo. Este riesgo se acentúa en microtunelaciones de gran longitud, donde la acumulación de rozamiento a lo largo del trazado puede alcanzar valores significativos.

Los atascos también pueden originarse por desviaciones del eje del microtúnel, provocando contactos irregulares entre el escudo y el terreno o la tubería instalada. Errores en el sistema de guiado, asentamientos diferenciales o deformaciones del terreno pueden generar esfuerzos adicionales que dificulten el avance. Una vez que la máquina y los tramos de tubería penetran en el terreno e inicia la operación de hinca, el sistema solo puede avanzar y no retroceder, lo que refuerza la importancia de una estimación precisa de la fuerza de empuje (Wen et al., 2024).

Proyecto	Ubicación	Condiciones del terreno	Causa principal del atasco	Consecuencias	Referencia técnica
Old Mill Drive Storm Sewer (Basement Flooding Protection Program – Phase 4)	Toronto, Canadá	Suelos blandos saturados, nivel freático elevado, presencia de anclajes existentes	Interferencia con anclajes metálicos no detectados + aumento del rozamiento y entrada de agua	Atasco del escudo, inestabilidad del terreno, formación de sinkhole, operaciones complejas de rescate y consolidación	City of Toronto (2016). <i>Report for Action – Old Mill Drive Storm Sewer</i>
Sewerage Improvement Scheme	Kilcock, Co. Kildare, Irlanda	Suelos aluviales y arcillas blandas bajo nivel freático	Incremento progresivo de las fuerzas de empuje por rozamiento lateral y lubricación insuficiente	Paradas prolongadas de la excavación ( <i>stoppages</i> ), necesidad de ajustes operativos y lubricación adicional	McCabe et al. (2015). University of Galway Repository
Sewer Pipeline Construction	Mullingar, Irlanda	Till glaciar y depósitos aluviales heterogéneos	Elevadas fuerzas de empuje debidas a condiciones geotécnicas variables y contacto irregular escudo-terreno	Riesgo de atasco, reducción del avance, necesidad de control estricto de empujes	McCabe et al. (2014). University of Galway Repository
Microtúnel en caliza (diámetro ≈ 760 mm)	Italia	Caliza dura con discontinuidades	Encajamiento mecánico del escudo y elevadas fuerzas de empuje en roca	Atasco del microtuneladora, análisis retrospectivo de fuerzas y condiciones de excavación	Barla, Camusso & Aiassa (2006). <i>Tunnelling and Underground Space Technology</i>

Tabla 12. Proyectos fallidos por atasco. Elaboración propia.

La paralización de la excavación puede obligar a realizar intervenciones correctivas complejas, como inyecciones de alivio, excavaciones de rescate o incluso la ejecución de pozos intermedios. En situaciones extremas, el atasco puede derivar en el abandono de la microtuneladora.

### **3.7.5. *Riesgo de rotura del tubo por empuje.***

Este fenómeno se produce cuando las tensiones inducidas por las fuerzas de empuje transmitidas desde los gatos hidráulicos superan la capacidad resistente del tubo, dando lugar a fisuración, aplastamiento local o fallo estructural del elemento prefabricado.

Los tubos empleados en microtunelación están sometidos principalmente a esfuerzos de compresión axial durante el proceso de empuje. Estas tensiones se ven incrementadas por el rozamiento lateral entre el tubo y el terreno, así como por las presiones normales ejercidas por el terreno circundante. En trazados de gran longitud o en condiciones geotécnicas desfavorables, el empuje requerido puede aumentar de forma significativa, acumulándose a lo largo de la cadena de tubos hasta alcanzar valores críticos en los primeros tramos del empuje. La experiencia práctica muestra que, si la resistencia friccional suelo-tubería es demasiado elevada, pueden desencadenarse accidentes tales como dificultad de hinca, fisuración de la tubería, daños en el muro de reacción del pozo de ataque, entre otros.(Wen et al., 2024).

La resistencia del tubo depende de su tipología (hormigón armado, hormigón con camisa de acero, de su clase resistente y de la calidad de fabricación. Defectos constructivos, daños durante el transporte o una incorrecta disposición de las juntas pueden reducir significativamente la capacidad portante del tubo frente a las cargas de empuje. Un exceso de fuerza de empuje puede dañar los tramos de tubería, los muros de reacción y las edificaciones próximas.(Jin et al., 2023)

Las consecuencias de la rotura del tubo por empuje son especialmente graves, ya que pueden implicar la paralización inmediata de los trabajos, la necesidad de desmontar tramos completos de tubería y la ejecución de trabajos correctivos complejos en un entorno confinado.

La implementación de sistemas eficaces de lubricación, el uso de estaciones de empuje intermedias en trazados largos y la vigilancia de la alineación del microtúnel resultan medidas fundamentales para reducir la probabilidad de rotura del tubo.

### **3.7.6. *Riegos de desviación fuera de tolerancias.***

Durante la ejecución de microtuneles es imprescindible mantener la alineación y pendiente del trazado dentro de los márgenes de tolerancia definidos en el proyecto, ya que la precisión geométrica es un requisito fundamental para garantizar la correcta conexión con los pozos de salida y llegada, así como la funcionalidad estructural y hidráulica de la conducción. La pérdida de control de la trayectoria puede dar lugar a desviaciones en planta y alzado que comprometan el desarrollo de la excavación.

Las desviaciones suelen estar asociadas a la interacción entre la microtuneladora y el terreno excavado. En suelos heterogéneos o en zonas de transición entre materiales con propiedades mecánicas contrastadas, el cabezal de corte puede experimentar resistencias desiguales que inducen avances asimétricos. Asimismo, la presencia de bloques, rellenos antrópicos o discontinuidades geológicas puede generar esfuerzos laterales no previstos que dificultan la corrección de la trayectoria.

El sistema de guiado y control juega un papel determinante en la prevención de este riesgo. Errores en la calibración del láser de referencia, interferencias en la señal, desplazamientos del emisor o fallos en los sensores de inclinación y orientación pueden provocar lecturas incorrectas de la posición de la máquina. Si estas desviaciones no se detectan y corrigen de manera temprana, tienden a acumularse progresivamente a lo largo del trazado, especialmente en microtuneles de gran longitud. La tecnología de guiado en hinca permite obtener la trayectoria de ejecución mediante la recopilación de información sobre la actitud (orientación) y la posición de la máquina tuneladora de hinca. Con ello se garantiza que la desviación entre la trayectoria real y la alineación proyectada en los planos de diseño se mantenga dentro de los límites admisibles, evitando daños a infraestructuras y servicios existentes provocados por desviaciones durante la construcción. (Qiu et al., 2025).

Las consecuencias de una desviación significativa se manifiestan con mayor intensidad en la fase de llegada, cuando la microtuneladora no alcanza el pozo receptor dentro de los márgenes admisibles. En estos casos, pueden ser necesarias soluciones correctivas complejas, como excavaciones auxiliares, ajustes del pozo de llegada o, en situaciones extremas, la inutilización parcial del tramo ejecutado.

### **3.7.7. *Riesgo de desgaste prematuro por abrasividad.***

Las condiciones geotécnicas del terreno atravesado durante la excavación influyen de manera determinante en el comportamiento y la durabilidad de los equipos de microtunelación. En particular, la presencia de materiales altamente abrasivos puede provocar un deterioro acelerado de los elementos en contacto directo con el terreno, afectando al cabezal de corte, las herramientas de excavación y las superficies externas del escudo.

La abrasividad del terreno está relacionada con su composición mineralógica, el tamaño y angulosidad de las partículas y la proporción de minerales duros, como el cuarzo. Suelos granulares con arenas silíceas, gravas o determinadas formaciones rocosas pueden generar tasas de desgaste superiores a las inicialmente previstas, reduciendo significativamente la vida útil de discos, picas y

elementos de protección. Este desgaste acelerado suele traducirse en una pérdida de eficiencia en el proceso de excavación y en un incremento del par de corte necesario para mantener el avance.

Los sistemas auxiliares también pueden verse afectados por la abrasividad del material excavado. En microtunelaciones con slurry, el paso continuo de partículas abrasivas a través de bombas, tuberías y sistemas de separación puede provocar erosión prematura, fugas y fallos mecánicos, comprometiendo la fiabilidad del sistema y aumentando las necesidades de mantenimiento. La abrasividad de la roca influye de forma significativa en el desgaste que sufren las herramientas de excavación; en TBM de lodos, el desgaste afecta también a tuberías y bombas del sistema de transporte. (Ko & Lee, 2020).

El desgaste prematuro obliga a realizar paradas frecuentes para la sustitución de herramientas, que en microtunelación suelen implicar intervenciones complejas debido a las limitaciones de acceso y, en algunos casos, a la necesidad de trabajar en cámara presurizada.

Las repercusiones económicas asociadas a este riesgo incluyen el aumento de los costes de mantenimiento, la reposición de componentes y la pérdida de productividad. En situaciones extremas, un desgaste excesivo no controlado puede comprometer la capacidad de avance de la microtuneladora y obligar a replantear la estrategia de excavación o incluso a sustituir el equipo.

### **3.7.8. Riesgo de colapso durante la descompresión.**

En los trabajos de microtunelación que emplean sistemas de excavación presurizados, la fase de descompresión constituye una etapa crítica desde el punto de vista geotécnico y operativo. La descompresión se produce, principalmente, durante las operaciones de mantenimiento del cabezal, sustitución de herramientas, intervenciones en la cámara de excavación o transiciones operativas en las que es necesario reducir o eliminar la presión aplicada en el frente. Una gestión inadecuada de esta fase puede desencadenar fenómenos de inestabilidad del terreno y colapsos localizados o generalizados.

Desde el punto de vista mecánico, la reducción de la presión de soporte en el frente provoca un incremento inmediato de las tensiones efectivas en el terreno situado por delante de la excavación. En suelos saturados, esta variación rápida de presión puede generar gradientes hidráulicos desfavorables y redistribuciones bruscas de las presiones de poro, reduciendo la resistencia al corte del material. En terrenos granulares poco cohesivos o en formaciones fisuradas, esta pérdida súbita de confinamiento puede dar lugar a mecanismos de rotura progresiva del frente, con migración de finos y colapsos repentinos.

La problemática se ve agravada cuando la descompresión se realiza de forma rápida o no controlada, ya que el terreno no dispone de tiempo suficiente para redistribuir las tensiones de manera estable. En estos casos, pueden producirse fenómenos de entrada incontrolada de terreno y agua en la cámara de excavación, comprometiendo la estabilidad del frente y del entorno inmediato del microtúnel. Asimismo, la presencia de niveles freáticos elevados incrementa el riesgo de colapso al favorecer el flujo de agua hacia la zona de menor presión.

Un colapso durante la descompresión puede provocar la obstrucción de la cámara de excavación, el enterramiento parcial del cabezal y daños en los sistemas mecánicos y de control de la microtuneladora. Estas situaciones suelen requerir actuaciones de emergencia, como la re-presurización del frente, la ejecución de inyecciones de consolidación o, en casos extremos, la paralización prolongada de los trabajos para la recuperación de condiciones de estabilidad.

Las consecuencias de un colapso en esta fase son especialmente críticas en términos de seguridad, ya que las operaciones de descompresión suelen implicar la presencia de personal en zonas próximas al frente o en cámaras presurizadas. Por ello, la mitigación de este riesgo exige la aplicación de procedimientos estrictos de descompresión gradual, el control continuo de presiones y caudales, y una planificación detallada de las intervenciones en el frente.

### 3.8. *Síntesis del estado del arte*

El análisis llevado a cabo del estado del arte permite establecer una visión estructurada y coherente del conocimiento técnico actual en el ámbito de la microtunelación, evidenciando el grado de desarrollo alcanzado por estas tecnologías y la amplitud de enfoques desde los que han sido estudiadas. La literatura técnica y científica disponible aborda la microtunelación como una disciplina compleja, en la que confluyen aspectos geotécnicos, hidráulicos, estructurales, operativos y del lugar, y cuya correcta aplicación exige un conocimiento detallado de la interacción terreno–máquina–tubería.

Desde una perspectiva histórica, la microtunelación se considera como una evolución del hincado de tuberías tradicional, incorporando progresivamente sistemas mecanizados de excavación, control del frente y guiado de alta precisión. Esta evolución ha permitido ampliar de forma significativa los rangos de diámetro, longitud y complejidad geométrica de las actuaciones, consolidando la microtunelación como una solución de referencia para cruces bajo infraestructuras sensibles y entornos urbanos densamente ocupados.

El análisis de las distintas tecnologías disponibles pone de manifiesto que no existe un único sistema universalmente aplicable, sino un conjunto de soluciones diferenciadas —escudos abiertos,

sistemas Slurry, EPB e híbridos— cuya idoneidad depende de manera directa de las condiciones del terreno y del proyecto. La bibliografía revisada establece criterios claros de aplicabilidad en función del tipo de suelo, la presencia y comportamiento del nivel freático, la permeabilidad, la estabilidad del frente y la sensibilidad a los asentamientos, así como de condicionantes geométricos como el diámetro del tubo, la longitud del avance, las pendientes o los radios de curvatura admisibles.

Asimismo, el estado del arte recoge de forma detallada los sistemas auxiliares asociados a la microtunelación, tales como los equipos de empuje, las estaciones intermedias, los sistemas de guiado (láser, giroscópicos e inerciales), las estrategias de lubricación y los tratamientos del terreno. Estos elementos se reconocen como componentes críticos del sistema global, ya que influyen de manera decisiva tanto en la viabilidad técnica de la actuación como en el control de riesgos durante la ejecución.

La literatura también identifica y caracteriza los principales riesgos asociados a la microtunelación, entre los que destacan el colapso del frente, los fenómenos de sobrepresión (blow-out), la entrada incontrolada de agua, el atasco del escudo, el desgaste abrasivo de los elementos de corte, las desviaciones geométricas y la rotura de la tubería por exceso de empuje. Para cada uno de estos riesgos se proponen medidas preventivas y correctoras, generalmente ligadas a una adecuada selección de la tecnología, a la correcta gestión de presiones y a un control continuo de los parámetros operativos.

De forma complementaria, las guías técnicas internacionales analizadas proporcionan recomendaciones de diseño, ejecución y control de calidad, así como modelos teóricos y empíricos para el análisis de variables clave como la estabilidad del frente, las fuerzas de empuje, la fricción tubo-terreno y la gestión de lodos. Estas referencias constituyen una base técnica sólida y ampliamente aceptada por la comunidad profesional, contribuyendo a la estandarización de buenas prácticas en el ámbito de la microtunelación.

En conjunto, el estado del arte muestra que la microtunelación dispone de un cuerpo de conocimiento extenso, detallado y técnicamente maduro, que permite comprender con profundidad el comportamiento de las distintas tecnologías y sus ámbitos de aplicación. Este marco conceptual y técnico proporciona una base robusta sobre la que estructurar metodologías de análisis y selección tecnológica, sirviendo como soporte para el desarrollo de herramientas y enfoques orientados a mejorar la coherencia y fiabilidad de las decisiones adoptadas en la fase de planificación y diseño de este tipo de actuaciones.

#### 4. IDENTIFICACION DE LA NECESIDAD.

El estudio del estado del arte realizado en el marco de este Trabajo Fin de Máster ha permitido constatar que las tecnologías relativas a microtunelación cuentan actualmente con una base bibliográfica amplia. La literatura disponible aborda de manera extensa la descripción de los métodos constructivos (*Slurry*, EPB, híbrido, *pipe jacking*), el comportamiento geotécnico asociado, los parámetros operativos de excavación, los sistemas de guiado y control, y los riesgos inherentes a este tipo de actuaciones (colapso de frente, *blow-out*, atascos de escudo, entradas de agua, desgaste abrasivo, rotura por empuje o asentamientos, entre otros). Asimismo, existen guías técnicas y normativas que establecen recomendaciones de diseño, ejecución y control de calidad, además de modelos teóricos y empíricos para el análisis de variables clave como fuerzas de empuje, estabilidad del frente y gestión de lodos.

A pesar de la existencia de este cuerpo de conocimiento, se ha detectado una carencia práctica relevante: no se ha identificado una herramienta sistemática, accesible y orientada al usuario final que permita transformar la información disponible en un proceso estructurado de toma de decisiones para la selección tecnológica y configuración de la microtunelación. En la práctica profesional, la elección entre una u otra tecnología suele basarse en un conjunto de criterios dispersos, dependientes en gran medida de la experiencia del proyectista o del contratista, y con elevada sensibilidad a condicionantes geotécnicos e hidráulicos locales. Esta circunstancia genera una problemática recurrente: decisiones técnicas críticas se adoptan frecuentemente sin un marco metodológico homogéneo, lo que puede conducir a selección de tecnología no del todo adecuada, incrementos de riesgo, sobrecostes o desviaciones significativas en plazo.

Como resultado directo de este análisis, se identifica una oportunidad clara de innovación aplicada en el ámbito de la ingeniería civil y subterránea: el diseño y desarrollo de una aplicación de soporte a la decisión orientada específicamente al ámbito de la microtunelación. La finalidad de esta herramienta será asistir al usuario de forma objetiva y reproducible en la selección de la técnica de microtunelación más adecuada, así como en la determinación de su configuración auxiliar óptima, integrando criterios geotécnicos, hidráulicos, geométricos, operativos y de riesgo.

En este contexto, el presente TFM se justifica por la necesidad de cubrir el vacío existente entre la bibliografía técnica y la realidad operativa del proyecto. Se plantea como objetivo el desarrollo de una aplicación en la que, a partir de un conjunto de datos de entrada definidos como condicionantes del proyecto (por ejemplo: parámetros geotécnicos e hidrogeológicos, cobertura disponible, diámetro y longitud del micro túnel, tolerancias geométricas, entorno urbano, existencia de

servicios sensibles, restricciones ambientales o logísticas), se obtenga como salida una recomendación técnica completa y estructurada. Entre los resultados esperados se incluyen:

- ✓ La tecnología más recomendable.
- ✓ Las alternativas viables con su justificación.
- ✓ La configuración auxiliar recomendada (tipo de planta de lodos, tratamiento, estaciones intermedias de empuje, estrategia de lubricación, tipo de cabeza de corte/herramientas, control de presión, procedimientos de descompresión, monitorización e instrumentación).
- ✓ Aspectos críticos que considerar para garantizar la ejecución con alta probabilidad de éxito, incluyendo riesgos asociados y medidas preventivas.

El TFM no se limita a recopilar o revisar información técnica, sino que propone un enfoque de ingeniería aplicada orientado a la digitalización del conocimiento experto. La aportación principal radica en estructurar los criterios técnicos existentes en una lógica formalizable, permitiendo su implementación como un sistema de recomendación que mejore la coherencia de la toma de decisiones y reduzca la incertidumbre durante las fases de planificación y diseño.

## **5. PROPUESTA METODOLOGICA.**

Con el fin de dar respuesta a la necesidad identificada durante el estudio del estado del arte, resulta imprescindible definir una metodología clara, sistemática y reproducible. Esta metodología debe actuar como nexo entre el conocimiento técnico existente (bibliografía, guías, experiencia acumulada y criterios de diseño) y su aplicación práctica en procesos reales de decisión, permitiendo además su posterior implementación en una herramienta digital sencilla y operativa.

La metodología propuesta persigue transformar un conjunto de criterios habitualmente dispersos y dependientes del criterio experto en un procedimiento lógico-formal que permita evaluar alternativas de forma coherente. Para ello, se estructura en tres fases diferenciadas y complementarias, cuya secuencia permite progresar desde la conceptualización del proceso de decisión hasta su materialización en una aplicación final.

La primera fase consiste en la elaboración de árboles lógicos de toma de decisiones, mediante los cuales se organizan los condicionantes del proyecto y sus implicaciones técnicas, definiendo rutas de selección tecnológica en función de parámetros clave como las condiciones geotécnicas e hidrogeológicas, el tipo de excavación previsto, el entorno de actuación o las restricciones geométricas. Esta fase permite establecer un marco de decisión jerárquico y coherente, donde la selección de alternativas queda condicionada por reglas técnicas explícitas.

La segunda fase aborda la construcción de una matriz multicriterio, destinada a complementar los árboles lógicos incorporando factores adicionales que, si bien no siempre son estrictamente técnicos, influyen de manera determinante en la elección final. Entre estos pueden incluirse condicionantes económicos, ambientales, de plazo, logísticos, de riesgo operacional o de disponibilidad de medios y proveedores. Esta matriz permite ponderar y comparar alternativas de manera cuantitativa o semi-cuantitativa, reforzando la robustez del proceso de decisión y evitando depender únicamente de un criterio único.

La tercera fase comprende el diseño de la aplicación final, que integra el sistema de decisión derivado de las fases anteriores y lo convierte en una herramienta funcional. Esta aplicación constituye el elemento de materialización práctica de la metodología, permitiendo que, a partir de unos datos de entrada definidos por el usuario, se genere una recomendación tecnológica fundamentada, incluyendo alternativas viables, configuración auxiliar recomendada y aspectos críticos a considerar para garantizar la ejecución con garantías de éxito.

Estas tres fases proporcionan una base sólida para estructurar el proceso de selección tecnológica en microtunelación y garantizar que la aplicación desarrollada se apoye en criterios técnicos justificables, trazables y adaptables a distintos escenarios de proyecto.

#### **5.1. *Generación de un árbol lógico de decisiones mediante el software Bizagi Modeler.***

Con el objetivo de estructurar y formalizar el proceso de selección de tecnologías de microtunelación y su configuración auxiliar, en esta fase de la metodología se procede a la generación de árboles lógicos de toma de decisiones. Estos árboles constituyen la base conceptual del motor de decisión del sistema, ya que permiten transformar el conocimiento técnico recopilado en el estudio del estado del arte en un conjunto ordenado de reglas, capaz de guiar la elección tecnológica de forma coherente, reproducible y trazable.

Para su elaboración se emplea el software Bizagi Modeler, una herramienta orientada al modelado de procesos mediante notación BPMN (*Business Process Model and Notation*). Su uso resulta adecuado en este contexto debido a que facilita la representación gráfica de flujos de decisión complejos, permitiendo incorporar de manera estructurada condiciones, bifurcaciones, reglas lógicas y resultados. A diferencia de un esquema conceptual tradicional, Bizagi permite dotar al árbol de decisiones de una lógica secuencial y condicional, favoreciendo su posterior traducción a un algoritmo implementable en la aplicación final.

El proceso de generación de los árboles en Bizagi se ha llevado a cabo siguiendo una secuencia sistemática:

1.-Definición de variables de entrada: identificación de parámetros relevantes del proyecto, clasificándolos por tipo (geotécnicos, hidráulicos, geométricos, ambientales y operativos).

2.-Establecimiento de reglas lógicas: traducción del conocimiento recopilado (bibliografía, recomendaciones técnicas y criterios habituales de diseño) en reglas condicionales del tipo *SI... ENTONCES...*

3.-El modelado BPMN se lleva a cabo mediante la implementación del flujo en Bizagi a través de los siguientes elementos estándar:

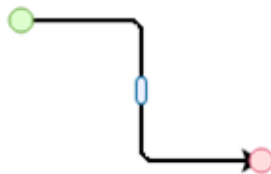
- *Start event* como inicio del proceso de decisión.



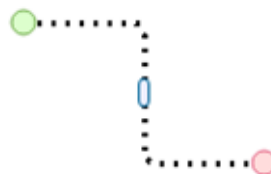
- *Gateways* exclusivos (XOR) para bifurcaciones condicionadas.



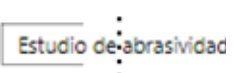
- Flujo de secuencia.



- Asociación.



- *Tasks* como etapas de evaluación técnica.



- *End events* final del proceso.



4.-Validación interna: revisión de coherencia del flujo para evitar contradicciones, bucles innecesarios o recomendaciones incompatibles.

5.-Conversión a lógica implementable: los árboles se diseñan de forma que cada bifurcación pueda ser traducida posteriormente a código en la aplicación, permitiendo convertir la representación gráfica en un motor de reglas.

Los árboles lógicos desarrollados se plantean como un flujo progresivo en el que, a partir de una serie de datos de entrada, se ejecutan sucesivas etapas de filtrado y selección. En cada etapa se evalúan criterios técnicos clave que determinan la viabilidad y conveniencia de las distintas alternativas de microtunelación. De forma general, el árbol está organizado en tres niveles:

1. Nivel de viabilidad tecnológica (filtro eliminador)

Se impone parámetros que excluyen directamente determinadas tecnologías por incompatibilidad con el terreno, por ejemplo:

- Presencia o no de nivel freático.
- Necesidad o no de presión en el frente.

La elección de estos condicionantes como punto de partida responde a que ambos constituyen los factores limitantes primarios en la selección de la tecnología de excavación, ya que determinan de forma directa el tipo de escudo necesario (abierto o cerrado) y, por tanto, las prestaciones y configuración de la microtuneladora.

En microtunelación, el elemento crítico que define la seguridad y viabilidad del avance es la estabilidad del frente de excavación, entendida como la capacidad del terreno para mantener el equilibrio tensional sin sufrir colapso, migración de finos o inestabilidades hidráulicas. Cuando el terreno presenta suficiente cohesión y/o confinamiento natural, y la excavación se desarrolla en condiciones secas o con baja presión intersticial, puede considerarse viable el uso de escudos abiertos, en los que el frente no se encuentra presurizado y el soporte se basa en el comportamiento autoportante del terreno y en el control de la excavación. Sin embargo, cuando la estabilidad del terreno no está garantizada —por ejemplo, en suelos granulares sueltos, rellenos heterogéneos, niveles de baja cohesión o condiciones de permeabilidad elevada— se hace imprescindible implementar un mecanismo activo de soporte en el frente, lo que conduce al empleo de escudos cerrados.

Por otro lado, la presencia o no de nivel freático, actúa como limitante porque la existencia de agua subterránea bajo presión modifica radicalmente las condiciones de excavación: introduce riesgo de

entrada de agua al microtúnel (inundación), lavado de finos (piping), pérdida de volumen, colapso del frente y asentamientos en superficie. En estas circunstancias, incluso un terreno relativamente estable desde el punto de vista mecánico puede volverse inestable por efectos hidráulicos, haciendo inviable o extremadamente arriesgado un escudo abierto. Por ello, en presencia de nivel freático significativo, suele requerirse el empleo de tecnologías que permitan equilibrar presiones en el frente (Escudos cerrado), mediante lodos (slurry) o presión de tierras, asegurando que la presión aplicada contrarreste la presión hidrostática y limite la migración de agua y partículas hacia la excavación.

Ambos condicionantes, se han adoptado como variables de entrada iniciales en los árboles lógicos por ser las que, en primera instancia, separan de forma clara e inequívoca el dominio de aplicación de escudos abiertos frente a escudos cerrados. Su carácter excluyente se debe a que, una vez determinadas estas condiciones, quedan acotadas las alternativas tecnológicas viables, reduciendo significativamente el espacio de decisión y permitiendo que los siguientes niveles del árbol profundicen en la elección del tipo concreto de MTBM y su configuración auxiliar (planta de lodos, control de presión, lubricación, gestión de residuos, etc.) dentro del conjunto de tecnologías técnicamente compatibles con el escenario del proyecto.

A partir de los dos condicionantes excluyentes definidos, se obtiene una matriz binaria de decisión que da lugar a cuatro escenarios operativos posibles, y por tanto a cuatro árboles lógicos independientes.

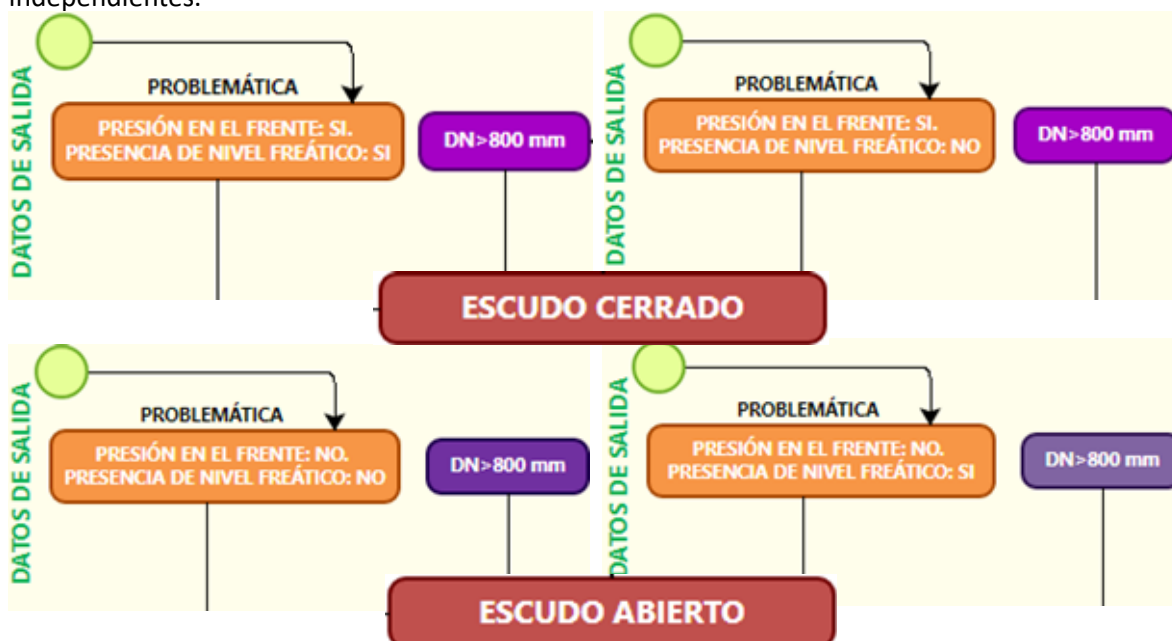


Figura 117. Escenarios operativos base de los árboles lógicos. Elaboración propia.

Esta división no responde únicamente a un criterio organizativo, sino que tiene un fundamento técnico claro: cada combinación implica mecanismos de inestabilidad distintos (mecánicos e

hidráulicos), condiciona la viabilidad de las tecnologías disponibles y modifica de forma sustancial la configuración auxiliar necesaria.

Además de los condicionantes hidrogeológicos y de estabilidad del frente, en la metodología se impone como criterio de partida que el diámetro interno/nominal del túnel sea superior a 800 mm. Esta restricción se justifica porque, por debajo de dicho umbral, el proceso constructivo y el comportamiento del terreno alrededor de la excavación dejan de responder al marco mecánico típico de la microtunelación y se aproximan a otras técnicas *trenchless* de pequeño diámetro (p. ej., *pilot tube*, *pipe ramming*, *impact moling* o perforación dirigida, según el caso), donde la lógica de selección tecnológica, los parámetros operativos y los mecanismos de interacción suelo-túnel presentan diferencias sustanciales.

## 2. Nivel de selección de tecnología principal

Una vez garantizada la viabilidad (Escudo abierto o cerrado), se determina la técnica más adecuada según el escenario, los condicionantes que determinan la tecnología principal son:

- Tipo de terreno y comportamiento mecánico (cohesivo, granular, roca, heterogeneidad, presencia de bolos).
- Recomendación de cabezal/herramientas según abrasividad o resistencia del terreno.
- Condiciones hidrogeológicas (nivel freático, presión hidrostática, permeabilidad).

Comparando alternativas como:

- Microtunelación con frente presurizado mediante *slurry* (MTBM *slurry*).
- Microtunelación tipo EPB
- Tecnologías híbridas

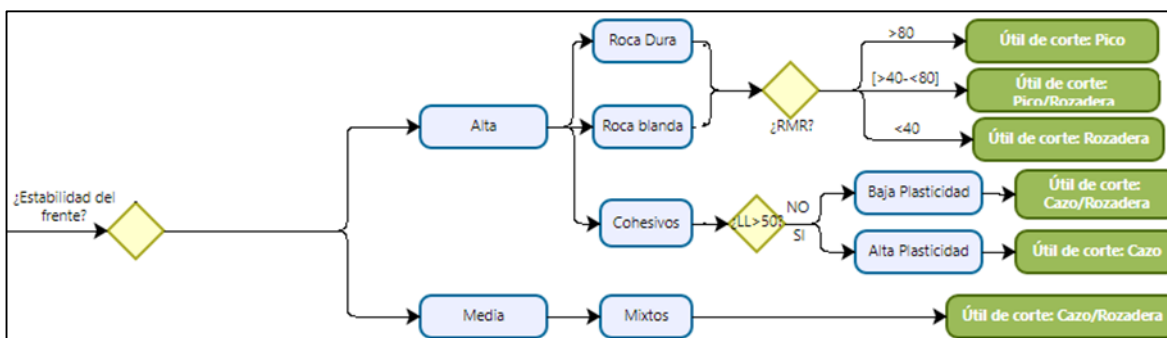


Figura 118. Muestra de árbol lógico para la elección de la tecnología principal. Elaboración propia.

### 3. Nivel de definición de configuración auxiliar (recomendaciones operativas)

Se incorporan decisiones relativas a la configuración óptima para la ejecución, incluyendo:

- Alineación, diámetro y longitud del microtúnel.
- Estrategia de lubricación del espacio anular (tipo y caudal de bentonita/polímeros).
- Uso de estaciones intermedias de empuje (IJS) para tramos largos.
- Condiciones mecánicas y estructurales.
- Cobertura disponible y proximidad a estructuras sensibles.
- Necesidad y dimensionamiento de planta de tratamiento de lodos.
- Medidas preventivas frente a riesgos específicos (blow-out, colapso del frente, atascos, inundación).

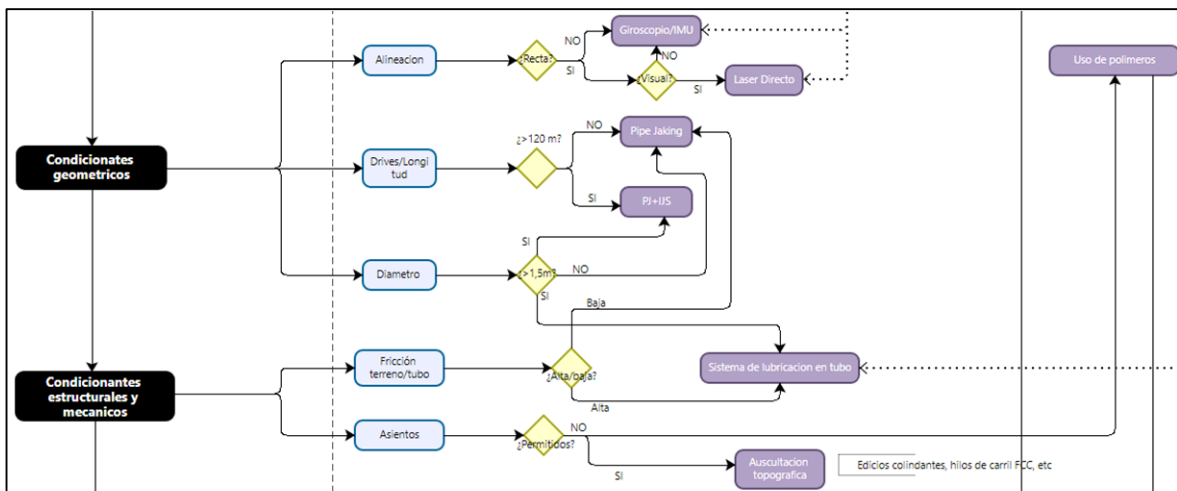
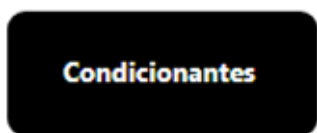


Figura 119. Muestra de árbol lógico par selección de configuración auxiliar. Elaboración propia

Con el objetivo de mejorar la legibilidad, comprensión y trazabilidad de los árboles lógicos de decisión desarrollados en Bizagi Modeler, se ha establecido un código de colores. Esta decisión responde a la necesidad de representar de forma clara un proceso de decisión con múltiples bifurcaciones, evitando ambigüedades en la interpretación de las salidas y permitiendo diferenciar de manera inmediata entre condicionantes, subcondicionantes y resultados recomendados.



El color negro se ha asignado a los condicionantes principales, entendidos como aquellos parámetros de proyecto que gobiernan de forma directa la viabilidad de una u otra tecnología y actúan como variables dominantes en las bifurcaciones del árbol (por ejemplo: necesidad de presión en el frente, presencia de nivel freático, tipo de terreno, longitud/diámetro del tramo, etc.). Su identificación en negro permite reconocer rápidamente cuáles son los criterios “de primer nivel” del modelo.

### Salida Tecnología

Se ha utilizado el color verde para identificar de manera inequívoca las salidas principales relacionadas con la tecnología de microtunelación recomendada, es decir, el resultado del proceso decisional en cuanto al tipo de técnica aplicable. Estas salidas constituyen el núcleo del árbol, ya que representan la decisión final sobre la tecnología a emplear.

### Configuración auxiliar

El color morado se ha reservado para las salidas vinculadas a la configuración auxiliar asociada a la tecnología seleccionada, incluyendo aquellos elementos o subsistemas que, sin definir el método principal, resultan determinantes para garantizar la viabilidad y rendimiento de la actuación. En esta categoría se engloban configuraciones como el tipo de planta de lodos, necesidad de estaciones intermedias de empuje, estrategias de lubricación o sistemas adicionales de control y monitorización.

### Alineación

Por último, el color azul se ha destinado a los subcondicionantes, es decir, aquellos parámetros secundarios o derivados que refinan la decisión una vez definidos los condicionantes principales. Estos elementos permiten aumentar el grado de detalle y precisión del árbol sin perder claridad estructural, actuando como criterios de ajuste que conducen a una recomendación más adecuada y contextualizada.

Dentro del conjunto de variables consideradas para el diseño de los árboles lógicos de toma de decisiones se ha realizado una distinción metodológica entre condicionantes intrínsecos de la técnica y condicionantes no intrínsecos, al objeto de estructurar el proceso decisional de forma coherente y técnicamente justificable. Esta diferenciación resulta especialmente relevante en microtunelación, ya que la viabilidad tecnológica no depende únicamente de parámetros geotécnicos o mecánicos, sino también de aspectos logísticos y constructivos asociados a la implantación de la obra.

Por un lado, se han clasificado como condicionantes intrínsecos aquellos factores que determinan directamente el comportamiento mecánico, operativo y geométrico del proceso de microtunelación y que, por tanto, gobiernan la viabilidad técnica de la excavación. Entre ellos se incluyen variables como la estabilidad del frente de excavación, que condiciona la necesidad o no de trabajar con escudo cerrado y presurización; la alineación y tolerancias geométricas, que influyen en la selección de sistemas de guiado y en la capacidad de control de la trayectoria; la longitud del tramo a ejecutar, que se relaciona con el incremento de rozamientos, la necesidad de estaciones intermedias de empuje y el dimensionamiento de los sistemas hidráulicos; y el diámetro del microtúnel, que afecta

tanto al comportamiento tensional del terreno como a la aplicabilidad real de ciertas tecnologías y configuraciones de equipo. Estos condicionantes se consideran intrínsecos porque, aun en ausencia de limitaciones de implantación en superficie, seguirían determinando qué método es técnicamente posible o recomendable.

Por otro lado, se han identificado condicionantes no intrínsecos a la técnica, que no afectan directamente a la estabilidad del frente o al mecanismo resistente del terreno, pero que sí influyen de manera significativa en la puesta en obra, viabilidad operativa, coste y planificación del proyecto. En este grupo se incluyen, por ejemplo, los requerimientos de disponibilidad de espacio y logística para instalar una planta de separación y tratamiento de lodos, imprescindible en tecnologías tipo *slurry*; la posibilidad de gestionar adecuadamente residuos y transporte de material excavado; o las restricciones asociadas a la ejecución de pozos de ataque y salida, cuya profundidad, diámetro y ubicación pueden verse condicionadas por interferencias urbanas, servidumbres, servicios existentes o limitaciones ambientales y de accesibilidad. Este tipo de condicionantes pueden no invalidar técnicamente una tecnología, pero sí hacerla inviable desde un punto de vista constructivo, obligando a reconsiderar alternativas.

Esta diferenciación ha permitido estructurar los árboles lógicos de manera jerárquica: en primer lugar, se evalúan los condicionantes intrínsecos, asegurando que la solución propuesta es técnicamente compatible con el terreno y los requisitos geométricos del proyecto, y posteriormente se incorporan los condicionantes de puesta en obra, que permiten ajustar o modular la selección en función de la viabilidad real de implantación y ejecución.

Con el fin de mejorar aún más la claridad visual, lectura e interpretación de los árboles lógicos desarrollados, se ha optado por seccionarlos verticalmente diferenciando de forma explícita dos etapas o bloques funcionales. Esta separación permite distinguir de manera inmediata entre la fase de definición de entradas (condicionantes) y la fase donde se desarrolla la lógica de selección, evitando que ambos conceptos queden mezclados en un mismo plano del diagrama y aumentando la trazabilidad del proceso.

#### FASE I: Selección de condicionantes.

Corresponde al bloque inicial del árbol y agrupa todos los parámetros de entrada que caracterizan el escenario del proyecto. En esta fase se identifican y estructuran los condicionantes impuestos y principales (geotécnicos, hidrogeológicos, geométricos, operativos o de implantación), actuando como “filtro de entrada” del sistema decisional. Esta fase no genera todavía una recomendación tecnológica, sino que define el conjunto de variables que alimentarán el proceso posterior.

## FASE II: Proceso de toma de decisiones.

Representa el bloque central y final del árbol, donde se aplica la lógica condicional definida (bifurcaciones, reglas tipo *SI/ENTONCES*, exclusiones y decisiones sucesivas). En esta fase se produce la evaluación progresiva de alternativas y la obtención de las salidas del sistema, incluyendo tanto la selección de la tecnología de microtunelación como la propuesta de configuración auxiliar asociada y consideraciones críticas para una ejecución segura.

Con el fin de reforzar la trazabilidad técnica del proceso y mejorar la robustez del sistema de toma de decisiones, en los árboles lógicos desarrollados se ha incorporado un espacio específico destinado a albergar la documentación de referencia del proyecto de partida. Esta inclusión responde a la necesidad de que el motor lógico no opere únicamente con datos numéricos o cualitativos introducidos manualmente, sino que esté apoyado por evidencias técnicas y documentos base que justifican y condicionan la decisión hacia una u otra alternativa tecnológica.

En el contexto de la microtunelación, un elevado número de condicionantes relevantes no se deriva exclusivamente de parámetros aislados, sino de información contenida en documentación previa del proyecto. Por ejemplo, la caracterización real del terreno, la presencia de niveles acuíferos, la identificación de riesgos de colapso o pérdidas de slurry, o las limitaciones asociadas a servicios urbanos existentes suelen encontrarse descritas en documentos como:

- ✓ Estudios geotécnicos y geológicos (sondeos, ensayos de laboratorio, perfiles estratigráficos, parámetros resistentes, permeabilidades).
- ✓ Informes hidrogeológicos (nivel freático, presiones de poro, gradientes hidráulicos, variabilidad estacional).
- ✓ Planos de servicios afectados y condicionantes urbanos (interferencias, restricciones de implantación, servidumbres).
- ✓ Memorias y anexos constructivos (secciones tipo, criterios de diseño, tolerancias geométricas).
- ✓ Condiciones de contratación / pliegos (restricciones ambientales, limitaciones de horarios, requisitos de control de asientos).

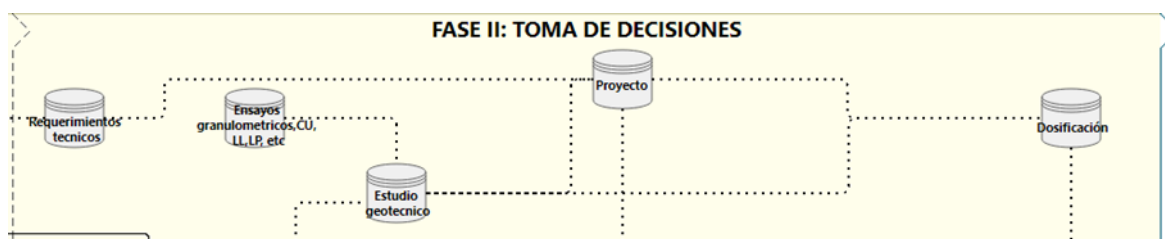


Figura 120. Muestra de FASE I: Toma de decisiones dentro de árbol lógico. Elaboración propia.

La incorporación de este espacio documental dentro del árbol lógico tiene un doble objetivo. En primer lugar, permite que el usuario disponga de un repositorio estructurado de los documentos que sustentan los condicionantes introducidos, facilitando la coherencia entre las decisiones adoptadas y la evidencia disponible. En segundo lugar, este enfoque habilita la posibilidad de que el sistema de decisión evolucione hacia una lógica más avanzada, en la que la documentación no sea únicamente un apoyo visual, sino una fuente directa de información para alimentar el proceso de selección.

El árbol lógico de decisiones desarrollado en esta metodología se ha diseñado incorporando única y exclusivamente factores de carácter técnico, de forma que el proceso de selección tecnológica queda fundamentado en criterios objetivos asociados a la viabilidad constructiva y geotécnica de la microtunelación. En consecuencia, las bifurcaciones y salidas del árbol responden únicamente a condicionantes tales como estabilidad del frente, presencia de nivel freático, tipo de terreno, longitud y diámetro del tramo, tolerancias geométricas, riesgos operativos o requerimientos de configuración auxiliar indispensables para garantizar la ejecución con seguridad.

Esta decisión metodológica se adopta de forma deliberada para evitar que el árbol lógico — concebido como herramienta de filtrado y determinación de viabilidad técnica— se vea distorsionado por variables externas que, si bien influyen en la elección final del proyecto, no determinan por sí mismas la aplicabilidad técnica de una tecnología. Por ello, en el árbol no se incorporan factores como costes, plazos, impacto ambiental, condiciones de mercado, disponibilidad de equipos, restricciones contractuales, ni criterios funcionales o estratégicos del promotor.

Estos aspectos se consideran determinantes en la toma de decisiones real, pero deben evaluarse mediante un enfoque distinto: no actúan como filtros técnicos excluyentes, sino como parámetros comparativos cuya influencia depende del contexto y debe introducirse de manera ponderada. En este sentido, dichos factores se integrarán en la fase posterior de la metodología a través de la matriz multicriterio, donde se analizarán mediante criterios de ponderación y valoración relativa. Esta matriz, desarrollada en el siguiente apartado, permitirá complementar la decisión técnica obtenida en el árbol lógico incorporando factores no técnicos para alcanzar una recomendación final más completa y ajustada al escenario del proyecto.

**CASO 1:**

**1.-Criterios impuestos / condiciones previas (pre-filtro).**

Código / categoría	Elemento	Descripción técnica	Ubicación en el árbol
Criterio impuesto	DN > 800 mm	Se excluyen diámetros inferiores al umbral definido para microtunelación; cambio de comportamiento tensional y dominio tecnológico.	Fase I
Criterio impuesto	Presión en el frente: SI	El árbol concreto corresponde a casos con necesidad de soporte presurizado.	Fase I
Criterio impuesto	Presencia de Nivel Freático (NF): SI	Se parte de hidrogeología con influencia en estabilidad/operación.	Fase I
Tecnología base	<b>ESCUDO CERRADO</b>	Escenario de operación con frente cerrado y control de presiones.	Inicio Fase II

Tabla 13. Análisis de criterios impuestos en árbol lógico CASO 1. Elaboración propia.

**2.-Condicionantes principales (nivel 1 – gobernantes del proceso).**

Bloque de condicionantes (negro)	Condicionante principal	Finalidad en la lógica
Condicionantes geotécnicos e	Estabilidad del frente	Determina tipo de tecnología presurizada y necesidad de control del sostenimiento
Condicionantes geotécnicos e	Nivel freático	Determina riesgos hidráulicos (inrush/inundación), control presión soporte
Condicionantes geométricos	Alineación	Define sistema de guiado requerido (laser directo vs giroscópico/MU)
Condicionantes geométricos	Drive/Longitud	Determina necesidad de IJS / pipe jacking según longitud y empujes acumulados
Condicionantes geométricos	Diámetro	Influye en viabilidad y umbrales de decisión: diámetro asociado a empujes y tecnología
Condicionantes estructurales y	Fricción terreno/tubo	Relacionado con empujes requeridos y estrategia de lubricación
Condicionantes estructurales y	Asientos	Control deformacional del terreno; monitorización y control topográfico

Bloque de condicionantes (negro)	Condicionante principal	Finalidad en la lógica
Condicionantes de puesta en obra	Extracción del material	Condiciona planta lodos / tornillo sinfín / evacuación
Condicionantes de puesta en obra	Pozos de ataque y salida	Condiciona posibilidad constructiva: espacio, tipología de estación, logística de extracción

Tabla 14. Análisis de condicionantes principales árbol lógico CASO 1. Elaboración propia.

### 3.-Subcondicionantes / criterios secundarios (nivel 2 – refinamiento)

Condicionante principal	Subcondicionantes (azul)	Valores/ramas del árbol	Impacto
Estabilidad del frente	Tipo de estabilidad	Alta / Media / Baja / Variable	Condiciona tecnología y control de frente
Estabilidad del frente	Tipo de suelo	Cohesivos / Mixtos / Granulares	Discrimina tipo de máquina (EPB/SS/Híbridos)
Cohesivos	Plasticidad	Baja plasticidad / Alta plasticidad	Condiciona EPB vs Slurry
Granulares	% finos (implícito)	>50% / <50%	Selección EPB/SS según gradación
Alineación	Tipo de trazado	Recta / Variable (curvas)	Laser directo vs Giro/MU
Drive/Longitud	Umbral de longitud	¿> 120 m?	Introducción IJS / Pipe jacking
Diámetro	Umbral (indicativo)	¿> 1,5 m?	Influye en esquema de empujes y configuración
Fricción terreno/tubo	Nivel de fricción	Alta / Baja	Define sistema de lubricación en tubo
Asientos	Riesgo admisible	¿Requiere monitorización?	Control topográfico + afectación entorno urbano
Extracción material	Espacio disponible	Sí/No	Planta separación lodos vs tornillo sinfín

Condicionante principal	Subcondicionantes (azul)	Valores/ramas del árbol	Impacto
Pozos ataque/salida	Espacio disponible	Sí/No	Estación compacta vs no compacta

Tabla 15. Análisis de condicionantes secundarios árbol lógico CASO 1. Elaboración propia.

#### 4) Salidas de tecnología (verde).

Categoría	Tecnología (salida verde)	Cuando aparece / criterio asociado
Tecnología microtunelación	EPB	Suelos cohesivos o granulares con condiciones favorables para presión de tierras
Tecnología microtunelación	SS (Slurry Shield)	Suelos granulares/permeables, NF presente, control presión hidráulica
Tecnología microtunelación	EPB/SS HÍBRIDO	Condiciones mixtas/heterogéneas, transición de suelos o incertidumbre
Tecnología microtunelación	SS-HÍBRIDO	Escenarios complejos en granulares o condiciones hidráulicas variables

Tabla 16. Tipos de salida de la tecnología principal árbol lógico CASO 1. Elaboración propia.

#### 5) Salidas de configuración auxiliar (morado).

Bloque	Elemento auxiliar (morado)	Función dentro del sistema
Lubricación / frente	Lubricante en frente	Reduce fricción, mejora avance, controla adherencia/rozamiento
Control hidráulico	Presión continua y descompresión gradual	Evitar colapso por pérdida de confinamiento, seguridad operativa
Slurry	Bentonita	Fluido soporte del frente y transporte detritus
Slurry	Polímero	Alternativa/soporte según suelo (arenas finas, filtración, pérdidas)
Guiado	Giroscopio/MU	Recomendado en trazados no rectos o imposibilidad de láser directo
Guiado	Láser directo	Alineación recta y condiciones favorables

Bloque	Elemento auxiliar (morado)	Función dentro del sistema
Empuje	Pipe jacking	Drives largos: control empujes y avance
Empuje	PJ IJS (intermediate jacking stations)	Reducción empujes acumulados en grandes longitudes
Lubricación tubo	Sistema de lubricación en tubo	Reducción fricción terreno-tubo y empuje
Control asientos	Auscultación topográfica	Seguimiento de deformaciones (edificios, servicios, vías, etc.)
Gestión material	Planta de separación de lodos	Separación sólido-líquido y recirculación
Gestión material	Tornillo sinfin	Extracción de material sin slurry (condicionado a espacio y tecnología)
Puesta en obra	Estación compacta	Si no hay espacio disponible
Puesta en obra	Estación no compacta	Si hay disponibilidad de implantación
Logística	Cintas / vagonetas	Evacuación según configuración de obra

Tabla 17. Tipos de salida para la configuración auxiliar del árbol lógico CASO 1. Elaboración propia.

## 6) Documentación de referencia integrada (información documental)

Documento	Papel en el árbol
Estudio geotécnico	Base para parámetros de estabilidad de frente, suelo, permeabilidad, etc.
Ensayos granulométricos, Cu, LL/LP	Alimenta plasticidad, % finos y clasificación suelo (EPB/SS)
Requerimientos técnicos / proyecto	Define restricciones geométricas, tolerancias, riesgos
Dosificación	Determina preparación y control de bentonita/polímero y aditivos

Tabla 18. Documentación necesaria para alimentar condicionantes del árbol lógico CASO 1. Elaboración propia.

Arbol de Decision logica para la seleccion de la tecnologia de microtunelaciony su configuracion aux

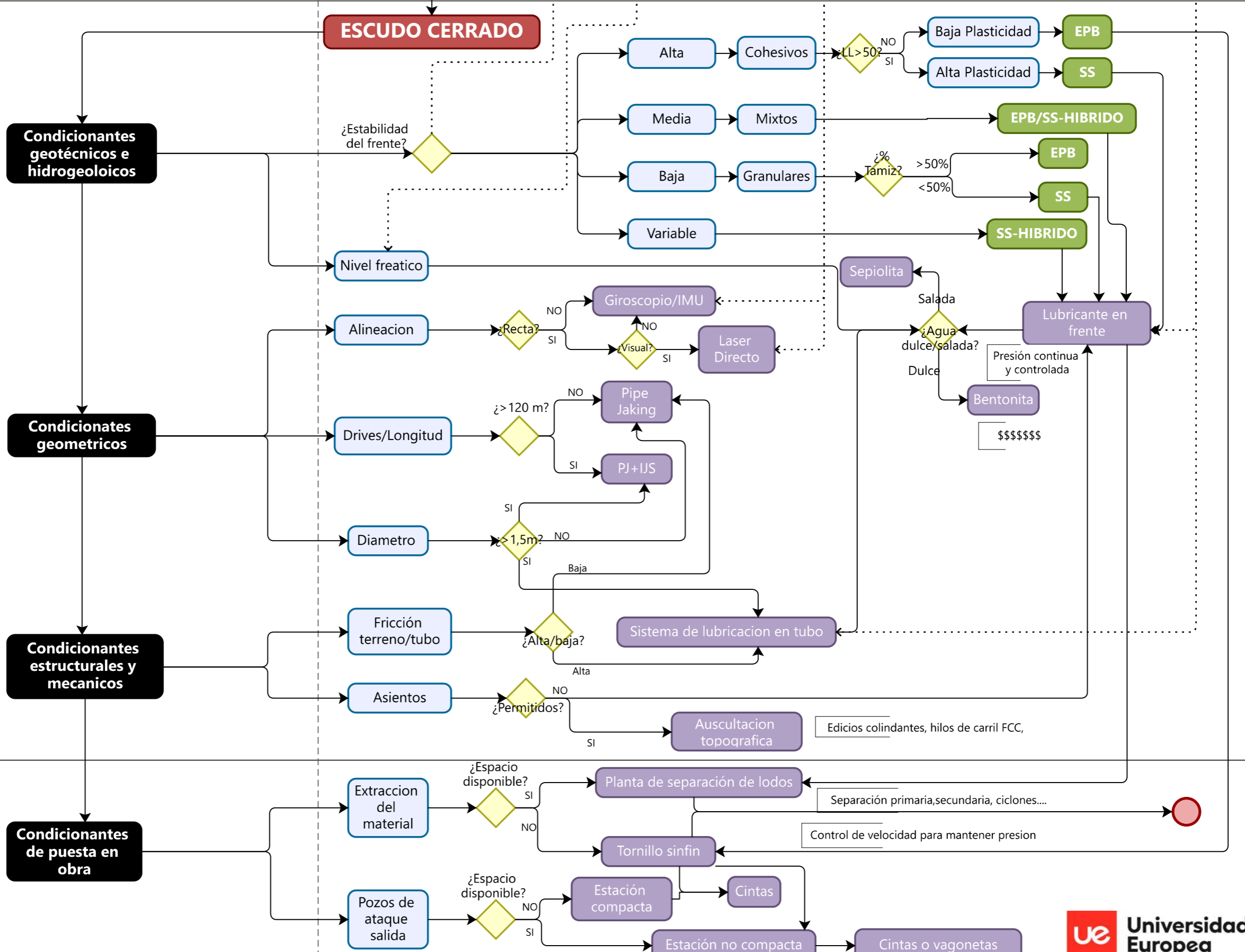
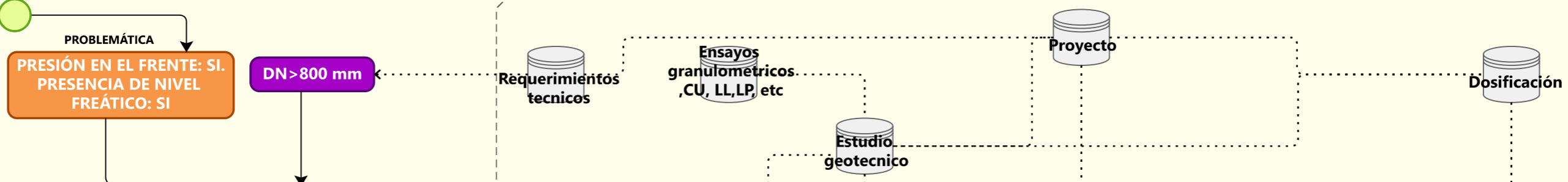
CONDICIONANTES INTRINSECOS DE LA TECNICA

CONDICIONANTES EXTERNOS A LA TECNICA

FASE I: SELECCION DE CONDICIONANTES

FASE II: TOMA DE DECISIONES

DATOS DE ENTRADA



**Caso 2:**

**1.-Criterios impuestos / condiciones previas (pre-filtro).**

Categoría	Elemento	Descripción técnica / implicación	Fase
Criterio impuesto	DN > 800 mm	Se restringe el dominio del modelo a microtunelación (diámetros pequeños excluidos por cambio de comportamiento y tecnologías asociadas).	Fase I
Condición excluyente	Presión en el frente: SÍ	Se requiere frente presurizado → se descartan escudos abiertos.	Fase I
Condición excluyente	Nivel freático: NO	No se considera presión hidrostática como factor dominante; el control de presión se justifica por estabilidad mecánica del frente.	Fase I
Tecnología base	ESCUDO CERRADO	Selección “marco” de tecnología: excavación con frente cerrado y presión controlada.	Inicio Fase II

Tabla 19. Análisis de criterios impuestos en árbol lógico CASO 2. Elaboración propia.

**2.-Condicionantes principales (nivel 1 – gobernantes del proceso).**

Bloque (negro)	Condicionante principal	Papel dentro del árbol
Condicionantes geotécnicos e hidrogeológicos	Estabilidad del frente	Condicionante principal para definir tecnología (EPB/Slurry/Híbrido)
Condicionantes geométricos	Alineación	Determina el sistema de guiado
Condicionantes geométricos	Drive / Longitud	Determina necesidad de estaciones intermedias o estrategia de empuje
Condicionantes geométricos	Diámetro	Factor de escala asociado a esfuerzos, configuración de empuje y fricciones
Condicionantes estructurales y mecánicos	Fricción terreno/tubo	Determina necesidad e intensidad de lubricación
Condicionantes estructurales y mecánicos	Asientos	Determina necesidad de auscultación y gestión del riesgo deformacional
Condicionantes de puesta en obra	Extracción del material	Define sistema logístico y tratamiento del material excavado

Bloque (negro)	Condicionante principal	Papel dentro del árbol
Condicionantes de puesta en obra	Pozos de ataque y salida	Condiciona implantación, logística y equipos auxiliares

Tabla 20. Análisis de condicionantes principales árbol lógico CASO 2. Elaboración propia.

### 3.-Subcondicionantes / criterios secundarios (nivel 2 – refinamiento).

Condicionante principal	Subcondicionantes / bifurcación	Ramas o valores	Resultado técnico
Estabilidad del frente	Nivel de estabilidad	Alta / Media / Baja / Variable	Activa selección del “tipo” de comportamiento del suelo
Estabilidad del frente	Tipo de suelo	Cohesivos / Mixtos /	Deriva a criterios de plasticidad o finos
Cohesivos	Plasticidad	Baja plasticidad / Alta plasticidad	Discrimina EPB vs SS
Granulares	% finos	>50% / <50%	Determina EPB o SS
Alineación	Tipo de trazado	Recta / Variable	Determina Laser directo vs Giroscopio/MU
Drive/Longitud	Umbral de longitud	¿>120 m?	Pipe jacking vs PJ + IJS
Diámetro	Umbral de diámetro	¿>1,5 m? (indicativo en el	Condiciona configuración del empuje (v fricción asociada)
Fricción terreno/tubo	Nivel	Alta / Baja	Activa “Sistema de lubricación en tubo”
Asientos	Perjuicios / entorno	¿Hay riesgo?	Activa “Auscultación topográfica”
Extracción del material	Espacio disponible	Sí / No	Planta de separación o tornillo sinfín
Pozos ataque/salida	Espacio disponible	Sí / No	Estación compacta vs no compacta y tipo de

Tabla 21. Análisis de condicionantes secundarios árbol lógico CASO 2. Elaboración propia.

#### 4) Salidas de tecnología (verde).

Tipo de salida	Tecnología recomendada (verde)	Caso típico según árbol
Tecnología	EPB	Cohesivos (especialmente baja plasticidad), o granulares con suficientes finos
Tecnología	SS (Slurry Shield)	Alta plasticidad o granulares con alta permeabilidad / pocos finos
Tecnología	EPB/SS	Terrenos mixtos/transiciones, incertidumbre o condiciones no netas
Tecnología	SS (alternativa adicional)	Aparece como opción redundante en ramales de granulares
Nota	Aunque NF=NO	Sigue aplicando SS porque la elección responde al comportamiento del suelo y el control mecánico del

Tabla 22. Tipos de salida de la tecnología principal árbol lógico CASO 2. Elaboración propia.

#### 5) Salidas de configuración auxiliar (morado).

Bloque	Elemento auxiliar (morado)	Justificación técnica dentro del árbol
Control de frente	Lubricante en frente	Mejora estabilidad operativa, reduce rozamiento interno
Control de presión	Presión continua y controlada	Mantener sostenimiento mecánico frente (sin necesidad hidráulica por NF)
Guiado	Giroscopio/MU	En trazados variables o donde no sea viable láser
Guiado	Láser directo	En alineaciones rectas con visibilidad y precisión suficiente
Empuje	Pipe jacking	En drives largos: gestión de empujes acumulados
Empuje	PJ + IJS	Para longitudes elevadas para repartir esfuerzos

Bloque	Elemento auxiliar (morado)	Justificación técnica dentro del árbol
Lubricación tubo	Sistema de lubricación en tubo	Reducción de empujes y fricción
Asientos	Auscultación topográfica	Control de movimientos en superficie/infraestructuras
Gestión material	Planta de separación de lodos	Si hay espacio disponible y/o uso slurry
Gestión material	Tornillo sinfín	Alternativa de extracción (en ausencia de planta o limitación de espacio)
Puesta en obra	Estación compacta	Implantación limitada
Puesta en obra	Estación no compacta	Implantación viable
Transporte	Cintas	Evacuación desde estación compacta
Transporte	Cintas o vagonetas	Evacuación desde estación no compacta

Tabla 23. Tipos de salida de la configuración auxiliar árbol lógico CASO 2. Elaboración propia.

#### 6) Documentación de referencia integrada (información documental).

Documento	Uso dentro del proceso
Requerimientos técnicos	Define restricciones y condicionantes del caso base
Estudio geotécnico	Base de clasificación del terreno y parámetros
Ensayos granulométricos (Cu), LL, LP, etc.	Fundamenta plasticidad, granulometría, % finos
Proyecto	Geometría, longitud, trazado, restricciones
Dosificación	Configuración de lodos/aditivos en ejecución

Tabla 24. Documentación necesaria para alimentar condicionantes del árbol lógico CASO 2. Elaboración propia.

Arbol de Decision logica para la seleccion de la tecnologia de microtunelacion y su configuracion aux

CONDICIONANTES INTRINSECOS DE LA TECNICA

CONDICIONANTES EXTERNOS A LA TECNICA

FASE I: SELECCION DE CONDICIONANTES

FASE II: TOMA DE DECISIONES

DATOS DE ENTRADA

PROBLEMÁTICA  
PRESIÓN EN EL FRENTE: SI.  
PRESENCIA DE NIVEL  
FREÁTICO: NO

DN > 800 mm

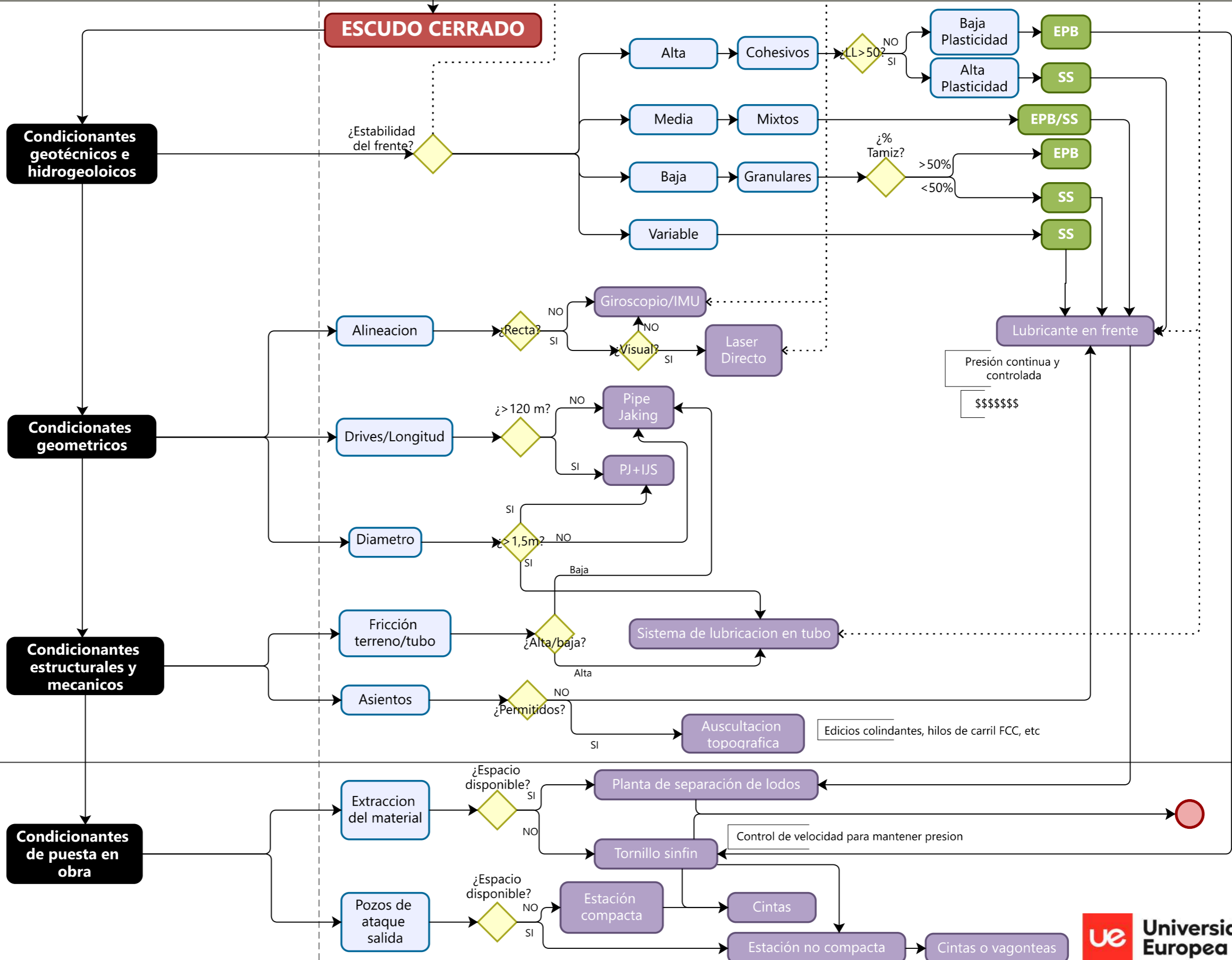
Requerimientos técnicos

Ensayos granulometricos, CU, LL, LP, etc

Estudio geotecnico

Proyecto

Dosificación



**Caso 3:**

**1.-Criterios impuestos / condiciones previas (pre-filtro).**

Categoría	Elemento	Descripción técnica / implicación	Fase
Criterio impuesto	DN > 800 mm	Se limita el dominio del sistema a microtunelación; diámetros inferiores se asocian a técnicas de comportamiento y medios diferentes.	Fase I
Condición excluyente	Presión en el frente: NO	El terreno permite excavación sin presurización; se descartan tecnologías tipo escudo cerrado.	Fase I
Condición excluyente	Nivel freático: NO	No hay condicionante hidrogeológica dominante. Riesgo reducido de inrush/inundación.	Fase I
Tecnología base	ESCUDO ABIERTO	Marco tecnológico: excavación con frente abierto (sin cámara presurizada).	Inicio Fase II

Tabla 25. Análisis de criterios impuestos en árbol lógico CASO 3. Elaboración propia.

**2.-Condicionantes principales (nivel 1 – gobernantes del proceso).**

Bloque (negro)	Condicionante principal	Papel dentro del árbol
Condicionantes geotécnicos e hidrogeológicos	Estabilidad del frente	Evalúa si el terreno es autoportante y define tipo de macizo
Condicionantes geométricos	Alineación	Define si se requiere láser directo o giro/MU
Condicionantes geométricos	Drive / Longitud	Selección del método de empuje y necesidad de IJS
Condicionantes geométricos	Diámetro	Condiciona empujes, rozamientos y configuración de avance
Condicionantes estructurales y mecánicos	Fricción terreno/tubo	Define lubricación anular para reducir empujes
Condicionantes estructurales y mecánicos	Asientos	Determina necesidad de control topográfico
Condicionantes de puesta en obra	Extracción del material	Sistema de extracción (tornillo sinfín)
Condicionantes de puesta en obra	Pozos de ataque y salida	Configuración de estación según disponibilidad de espacio

Tabla 26. Análisis de condicionantes principales árbol lógico CASO 3. Elaboración propia.

### 3.-Subcondicionantes / criterios secundarios (nivel 2 – refinamiento).

Condicionante principal	Subcondicionante / bifurcación (azul)	Ramas / valores	Resultado técnico
Estabilidad del frente	Nivel de estabilidad	Alta / Media	Determina escenario de terreno y tipo de corte
Estabilidad del frente (Alta)	Tipo de macizo/terreno	Roca dura / Roca blanda / Cohesivos	Selección de útiles de corte
Roca	Indicador geomecánico	RMR > 80 / 40–80 / <40	Define útil de corte pico / rodillos / roza
Cohesivos	Plasticidad	Baja / Alta	Útil de corte: cazo/rozadora
Estabilidad del frente (Media)	Tipo de suelo	Mixtos	Selección según % granulares vs cohesivos
Alineación	Trazado	Recta / Variable	Láser directo vs Giroscopio/MU
Drive/Longitud	Umbral	¿>120 m?	Pipe jacking vs PJ + IJS
Diámetro	Umbral de decisión	¿>1,5 m? (indicativo en	Ajuste de estrategia de empuje
Fricción terreno/tubo	Nivel	Alta / Baja	Sistema de lubricación en tubo
Asientos	Riesgo admisible	¿Permisible?	Activa auscultación topográfica
Pozos ataque/salida	Espacio disponible	Sí / No	Estación compacta vs no compacta

Tabla 27. Análisis de condicionantes secundarios árbol lógico CASO 3. Elaboración propia.

### 4) Salidas de tecnología (verde).

Tipo salida	Tecnología / salida verde	Aplicación según árbol
Tecnología de excavación	Útil de corte: Pico	RMR alto / roca competente

Tipo salida	Tecnología / salida verde	Aplicación según árbol
Tecnología de excavación	Útil de corte: Pico/Rozadora	Roca intermedia (40–80)
Tecnología de excavación	Útil de corte: Rodillos	RMR bajo (<40) / condiciones rocosas desfavorables
Tecnología de excavación	Útil de corte: Cazo/Rozadora	Cohesivos (baja/alta plasticidad)
Tecnología de excavación	Útil de corte: Cazo	Cohesivos más plásticos / pegajosos
Tecnología de excavación	Útil de corte: Cazo/Rozadora	Mixtos, según dominante granular/cohesivo

Tabla 28. Tipos de salida de la tecnología principal árbol lógico CASO 3. Elaboración propia.

### **5) Salidas de configuración auxiliar (morado).**

Bloque	Elemento auxiliar (morado)	Función dentro del proceso
Guiado	Giroscopio/MU	Mejora precisión en trazados variables o sin visibilidad de láser
Guiado	Láser directo	Alta precisión en trazados rectos
Empuje	Pipe jacking	Drives largos → gestión de empujes
Empuje	PJ + IJS	Reducción de esfuerzo acumulado en longitudes elevadas
Lubricación	Sistema de lubricación en tubo	Mitigación de rozamiento / reducción empuje
Control asientos	Auscultación topográfica	Monitorización de movimientos en superficie
Extracción material	Tornillo sinfín	Método típico de evacuación en escudo abierto

Bloque	Elemento auxiliar (morado)	Función dentro del proceso
Puesta en obra	Estación compacta	Restricción de espacio en pozo
Puesta en obra	Estación no compacta	Mayor espacio disponible
Logística	Cintas	Transporte desde estación compacta
Logística	Cintas o vagonetas	Alternativa desde estación no compacta
Suelo/fluido	Uso de polímeros	Mejora reología / evacuación / control de adherencia (aunque sin presión)

Tabla 29. Tipos de salida de la configuración auxiliar árbol lógico CASO 3. Elaboración propia.

#### **6) Documentación de referencia integrada (información documental).**

Documento	Función
Requerimientos técnicos	Condicionantes de partida
Ensayos granulométricos, Cu, LL/LP	Definir plasticidad / cohesión / mezcla
Estudio geotécnico	Determina estabilidad y clasificación
Proyecto	Define geometría, alineación, drive
Dosificación	Ajuste del uso de polímeros u otros acondicionantes
Estudio de abrasividad	Alimenta selección de útiles (pico, rodillos, etc.)

Tabla 30. Documentación necesaria para alimentar condicionantes del árbol lógico CASO 3. Elaboración propia.

Arbol de Decision logica para la seleccion de la tecnologia de microtunelaciony su configuracion aux

CONDICIONANTES INTRINSECOS DE LA TECNICA

CONDICIONANTES EXTERNOS A LA TECNICA

FASE I: SELECCION DE CONDICIONANTES

FASE II: TOMA DE DECISIONES

DATOS DE ENTRADA

PROBLEMÁTICA  
PRESIÓN EN EL FRENTE: NO.  
PRESENCIA DE NIVEL  
FREÁTICO: NO

DN > 800 mm

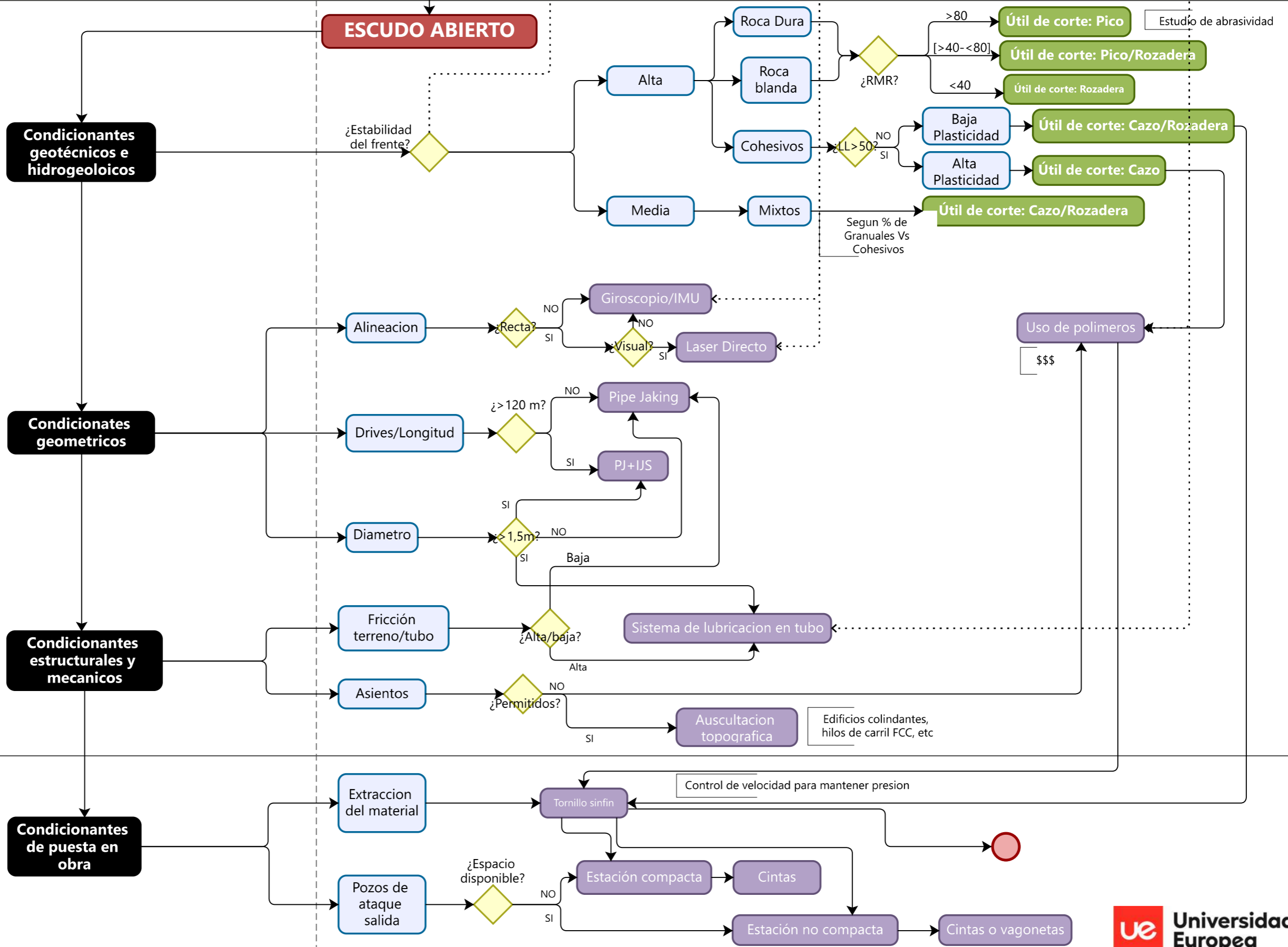
Requerimientos técnicos

Ensayos granulometricos, CU, LL, LP, etc

Estudio geotecnico

Proyecto

Dosificación



**Caso 4:**

**1.-Criterios impuestos / condiciones previas (pre-filtro).**

Categoría	Elemento	Descripción técnica / implicación	Fase
Criterio impuesto	DN > 800 mm	Se acota el dominio a microtunelación; diámetros menores presentan comportamiento tensional y tecnologías asociadas diferentes.	Fase I
Condición excluyente	Presión en el frente: NO	No se requiere sostenimiento presurizado → se descartan tecnologías de escudo cerrado (EPB/Slurry).	Fase I
Condición excluyente	Nivel freático: SÍ	Existe condicionante hidrogeológico relevante; debe controlarse el agua (infiltración/inrush/achique).	Fase I
Tecnología base	<b>ESCUDO ABIERTO</b>	Excavación sin cámara presurizada; mayor sensibilidad a la entrada de agua.	Inicio Fase II

Tabla 31. Análisis de criterios impuestos en árbol lógico CASO 4. Elaboración propia.

**2.-Condicionantes principales (nivel 1 – gobernantes del proceso).**

Bloque (negro)	Condicionante principal	Papel dentro del árbol
Condicionantes geotécnicos e hidrogeológicos	Estabilidad del frente	Evalúa si el terreno es autoportante (viabilidad de escudo abierto)
Condicionantes geotécnicos e hidrogeológicos	Nivel freático	Define medidas hidráulicas: achique y control de caudales
Condicionantes geométricos	Alineación	Define tecnología de guiado
Condicionantes geométricos	Drive / Longitud	Define estrategia de empuje e IJS
Condicionantes geométricos	Diámetro	Influencia sobre esfuerzo y configuración de empuje
Condicionantes estructurales y mecánicos	Fricción terreno/tubo	Define lubricación y control de empuje

Bloque (negro)	Condicionante principal	Papel dentro del árbol
Condicionantes estructurales y mecánicos	Asientos	Control deformacional / afección a entorno
Condicionantes de puesta en obra	Extracción del material	Sistema de evacuación y decantación
Condicionantes de puesta en obra	Pozos de ataque y salida	Implantación, compactación y logística

Tabla 32. Análisis de condicionantes principales árbol lógico CASO 4. Elaboración propia.

### 3.-Subcondicionantes / criterios secundarios (nivel 2 – refinamiento).

Condicionante principal	Subcondicionante / bifurcación (azul)	Ramas	Resultado técnico
Estabilidad del frente	Nivel de estabilidad	Alta / Media	Clasificación inicial del terreno
Estabilidad del frente (Alta)	Tipo macizo	Roca dura / Roca blanda /	Determina útil de corte
Roca	Clasificación geomecánica	RMR >80 / 40–80 / <40	Útil pico / pico+rozadora / rodillos
Cohesivos	Plasticidad	Baja / Alta	Selección de útil tipo cazo/rozadora
Estabilidad del frente (Media)	Tipo suelo	Mixtos	Selección por dominancia granular/cohesiva
Nivel freático	Gestión de agua	—	Activación de medidas de bombeo
Alineación	Trazado	Recta / Variable	Láser directo vs Giroscopio/MU
Drive/Longitud	Umbral de longitud	¿>120 m?	Pipe jacking vs PJ + IJS
Diámetro	Umbral	¿>1,5 m?	Influye en empuje/accesorios

Condicionante principal	Subcondicionante / bifurcación (azul)	Ramas	Resultado técnico
Fricción terreno/tubo	Nivel	Alta/Baja	Sistema de lubricación en tubo
Asientos	¿Permisibles?	Sí/No	Auscultación topográfica
Pozos ataque/salida	Espacio disponible	Sí/No	Estación compacta vs no compacta

Tabla 33. Análisis de condicionantes secundarios árbol lógico CASO 4. Elaboración propia.

#### 4) Salidas de tecnología (verde).

Tipo de salida	Tecnología recomendada (verde)	Caso típico
Tecnología	Útil de corte: Pico	Roca competente (RMR alto)
Tecnología	Útil de corte: Pico/Rozadora	RMR intermedio
Tecnología	Útil de corte: Rodillos	RMR bajo / roca mala
Tecnología	Útil de corte: Cazo/Rozadora	Cohesivos
Tecnología	Útil de corte: Cazo	Alta plasticidad
Tecnología	Útil de corte: Cazo/Rozadora	Mixtos

Tabla 34. Tipos de salida de la tecnología principal árbol lógico CASO 4. Elaboración propia.

#### 5) Salidas de configuración auxiliar (morado).

Bloque	Configuración auxiliar (morado)	Papel / finalidad
Hidrogeología	Bombas de achique	Control del NF en escudo abierto; prevenir inundación y saturación
Guiado	Giroscopio/MU	Trazados no rectos o sin viabilidad de láser
Guiado	Láser directo	Alineaciones rectas
Empuje	Pipe jacking	Drives largos

Bloque	Configuración auxiliar (morado)	Papel / finalidad
Empuje	PJ + IJS	Reparto de empujes y reducción de riesgo de rotura
Lubricación	Sistema de lubricación en tubo	Reducción fricción y empujes
Control asientos	Auscultación topográfica	Seguimiento de edificios/infraestructuras sensibles
Acondicionamiento	Uso de polímeros	Mejora evacuación y comportamiento del terreno (cohesivos/adhesivos)
Extracción material	Tornillo sinfín	Evacuación de detritus
Tratamiento de efluentes	Sistema de decantación	Gestión del agua bombeada/material fino
Puesta en obra	Estación compacta	Restricción de espacio
Puesta en obra	Estación no compacta	Espacio suficiente
Transporte	Cintas	Estación compacta
Transporte	Cintas o vagonetas	Estación no compacta
Vertido / destino	Medio natural / Red de pluviales	Salidas para agua decantada (según condicionantes normativos del proyecto)

Tabla 35. Tipos de salida de la configuración auxiliar árbol lógico CASO 4. Elaboración propia.

## 6) Documentación de referencia integrada (información documental).

Documento / input	Papel
Requerimientos técnicos	Condicionantes del proyecto
Ensayos granulométricos / LL / LP	Definir plasticidad y tipo suelo
Estudio geotécnico	Estabilidad del frente, RMR, permeabilidad
Proyecto	Alineación, longitudes, tolerancias
Dosificación	Uso de polímeros, condicionamiento
Estudio de abrasividad	Selección de útiles de corte

Tabla 36 Documentación necesaria para alimentar condicionantes del árbol lógico CASO 4. Elaboración propia.

Arbol de Decision logica para la seleccion de la tecnologia de microtunelaciony su configuracion aux

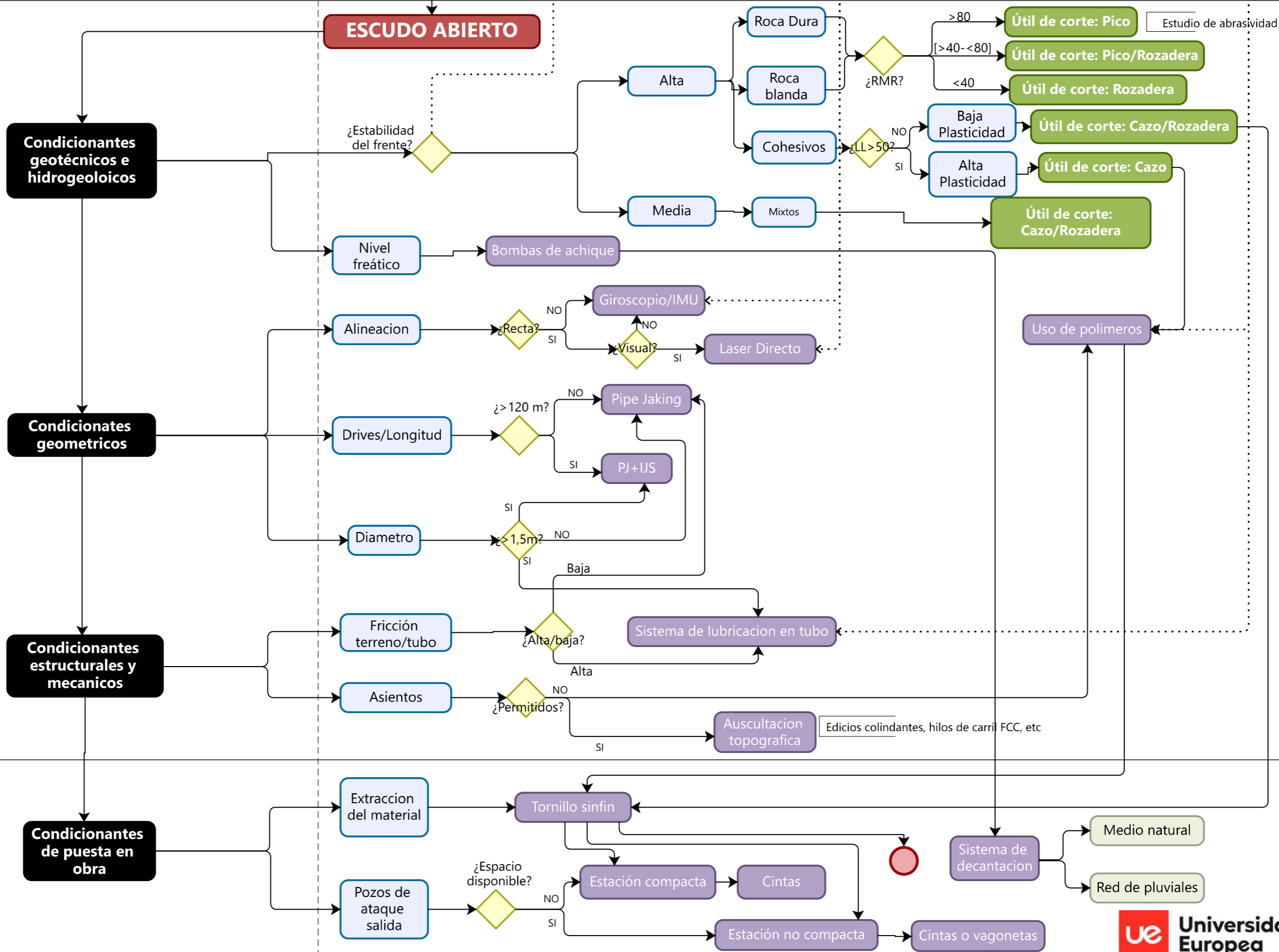
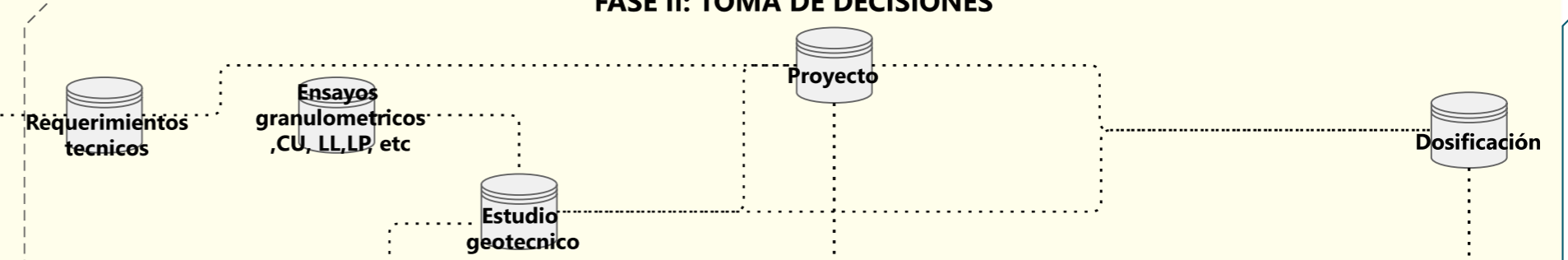
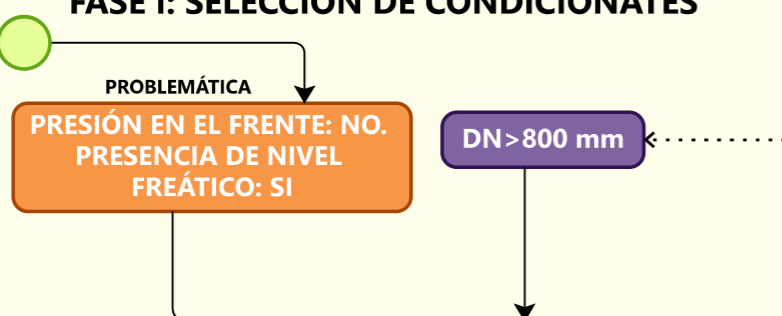
CONDICIONANTES INTRINSECOS DE LA TECNICA

CONDICIONANTES EXTERNOS A LA TECNICA

FASE I: SELECCION DE CONDICIONANTES

FASE II: TOMA DE DECISIONES

DATOS DE ENTRADA



## 5.2. *Creación de matriz multicriterio*

La selección de la tecnología de microtunelación más adecuada para un proyecto determinado constituye un proceso de decisión de elevada complejidad, en el que intervienen múltiples condicionantes de distinta naturaleza. Aunque la viabilidad técnica de una alternativa es un requisito indispensable, esta no garantiza por sí sola que la solución adoptada sea la más adecuada desde un punto de vista global. En la práctica, aspectos económicos, ambientales, sociales y de seguridad y operación influyen de manera significativa en la idoneidad final de la alternativa seleccionada.

La evaluación de la viabilidad técnica de las distintas tecnologías de microtunelación se ha llevado a cabo mediante el desarrollo de una serie de árboles lógicos de decisión, contruidos a partir de condicionantes geométricos, geotécnicos, hidráulicos y del emplazamiento. Este análisis previo permite identificar un conjunto de alternativas técnicamente viables para cada escenario de proyecto. Sin embargo, la alternativa que resulta óptima desde el punto de vista técnico no siempre coincide con la opción más favorable cuando se consideran otros criterios relevantes para la ejecución y desarrollo de la obra.

Con el fin de incorporar de forma sistemática estos criterios adicionales al proceso de selección, se ha desarrollado una matriz de decisión multicriterio aplicada a las alternativas previamente filtradas por viabilidad técnica. Esta metodología permite evaluar comparativamente el desempeño de cada alternativa considerando simultáneamente diferentes aspectos relevantes impuestos de manera externa a la propia ejecución, proporcionando por tanto un marco estructurado y trazable para la toma de decisiones.

La matriz multicriterio se organiza en torno a cuatro criterios principales: económicos, ambientales, sociales y de seguridad y operación. Cada uno de estos criterios se descompone en criterios secundarios que permiten una caracterización más detallada de los impactos asociados a cada alternativa. Entre estos criterios se incluyen, entre otros, el coste de la maquinaria y de los útiles de corte, la gestión de lodos, la generación de vibraciones y ruidos, las interferencias con el entorno urbano y con terceros, así como los riesgos asociados a la seguridad de los trabajadores y a la operación de la obra.

La asignación de pesos a los distintos criterios se ha realizado mediante el método del Proceso Analítico Jerárquico (AHP), lo que permite establecer la importancia relativa de cada criterio a partir de comparaciones por pares basadas en juicio experto. La coherencia de dichas comparaciones se

ha verificado mediante el cálculo de los correspondientes índices de consistencia, asegurando la fiabilidad y robustez de los pesos obtenidos.

La aplicación de esta matriz de decisión multicriterio permite complementar el análisis técnico inicial con una evaluación integral de las alternativas de microtunelación, facilitando la selección de soluciones que no solo sean técnicamente viables, sino también óptimas desde el punto de vista económico, ambiental, social y de seguridad y operación.

### **5.2.1. *Matriz multicriterio. Proceso analítico jerárquico AHP.***

El Proceso Analítico Jerárquico (Analytic Hierarchy Process, AHP) es una metodología de apoyo a la toma de decisiones multicriterio desarrollada para abordar problemas complejos en los que intervienen múltiples criterios, frecuentemente de distinta naturaleza y con diferentes niveles de incertidumbre. El método proporciona un marco estructurado que permite descomponer el problema de decisión, cuantificar la importancia relativa de los criterios y sintetizar las preferencias para obtener una priorización de las alternativas consideradas.

El AHP se fundamenta en la teoría de la decisión y en el álgebra lineal, y destaca por su capacidad para integrar criterios cuantitativos y cualitativos mediante comparaciones por pares, así como por incorporar mecanismos explícitos de verificación de la coherencia de los juicios emitidos.

El primer paso en la aplicación del método AHP consiste en la descomposición del problema de decisión en una estructura jerárquica compuesta por varios niveles. En términos generales, esta jerarquía se organiza de la siguiente forma:

- ✓ **Nivel superior:** definición del objetivo global del proceso de decisión.
- ✓ **Niveles intermedios:** definición de los criterios y, en su caso, subcriterios que influyen en la consecución del objetivo.
- ✓ **Nivel inferior:** conjunto de alternativas a evaluar.

Esta estructuración permite representar de forma clara las relaciones de dependencia entre los distintos elementos del problema, facilitando la evaluación sistemática de su influencia relativa.

Una vez definida la jerarquía, el método AHP establece la realización de comparaciones por pares entre los elementos de un mismo nivel jerárquico con respecto a un elemento del nivel superior. Estas comparaciones permiten expresar la preferencia relativa de un elemento frente a otro en términos de su contribución al objetivo o criterio considerado.

Para ello se emplea la escala fundamental propuesta por Saaty, que asigna valores numéricos discretos comprendidos entre 1 y 9, donde el valor 1 representa igualdad de importancia y el valor

9 una preferencia extrema de un elemento sobre otro. Los valores intermedios permiten matizar los juicios cuando la preferencia no es absoluta.

Las comparaciones por pares se organizan en matrices cuadradas de juicio  $A = [a_{ij}]$ , en las que cada elemento  $a_{ij}$  representa la importancia relativa del elemento  $i$  frente al elemento  $j$ . Estas matrices cumplen la condición de reciprocidad:

$$a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}$$

*Fórmula 24.- Condición de reciprocidad*

A partir de cada matriz de comparación por pares se obtiene un vector de prioridades que representa el peso relativo de cada elemento evaluado. El método clásico de AHP determina dicho vector como el autovector principal asociado al mayor autovalor de la matriz de juicio, resolviendo la expresión:

$$A \cdot \mathbf{w} = \lambda_{\max} \cdot \mathbf{w}$$

*Fórmula 26.- Autovector de prioridades.*

donde  $\mathbf{w}$  es el vector de prioridades y  $\lambda_{\max}$  el mayor autovalor de la matriz  $A$ . El vector resultante se normaliza de forma que la suma de sus componentes sea igual a la unidad.

Este procedimiento permite transformar los juicios cualitativos expresados en las comparaciones por pares en pesos cuantitativos comparables.

En aplicaciones prácticas, y especialmente cuando se implementa el método en herramientas de cálculo, el vector de prioridades puede obtenerse mediante el método de la media geométrica por filas, reconocido en la literatura como una aproximación robusta y coherente con el modelo recíproco del AHP. En este enfoque, para cada fila de la matriz de comparación se calcula su media geométrica, obteniéndose un conjunto de valores proporcionales que representan la importancia relativa no normalizada de cada criterio.

Con el fin de convertir estos valores relativos en un vector de pesos utilizable en el proceso de decisión, se aplica un proceso de normalización, consistente en dividir cada media geométrica por la suma total de las medias geométricas calculadas. De este modo, se obtiene un vector de pesos adimensional, positivo y con suma unitaria, que cumple la condición:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1$$

*Fórmula 28.-Condición de matriz en diagonal igual a la unidad*

La normalización garantiza que los pesos resultantes sean comparables entre sí y puedan integrarse correctamente en la fase de agregación multicriterio, evitando sesgos derivados de la escala de valoración o de la magnitud de los valores intermedios.

Dado que las comparaciones por pares se basan en juicios humanos, el método AHP incorpora un mecanismo para evaluar su coherencia interna. Para ello se define el Índice de Consistencia (CI), calculado como:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$

*Fórmula 30.-Índice de consistencia*

donde  $n$  es el número de elementos comparados. A partir de este índice se calcula el Ratio de Consistencia (CR), definido como:

$$CR = \frac{CI}{RI}$$

*Fórmula 32.- Ratio de consistencia.*

siendo  $RI$  el Índice Aleatorio, obtenido a partir de matrices recíprocas generadas aleatoriamente y tabulado en función del tamaño de la matriz.

De forma general, se considera que una matriz de comparaciones presenta un nivel de consistencia aceptable cuando  $CR < 0,10$ , lo que indica que los juicios emitidos no presentan contradicciones significativas.

Las alternativas se valoran individualmente respecto a cada criterio mediante una escala de puntuación predefinida. “La valoración de alternativas mediante puntuaciones directas constituye una adaptación del marco AHP orientada a reducir la carga de comparaciones, manteniendo la coherencia con la estructura jerárquica del método. La comparación por pares de alternativas no se considera eficiente cuando el número de alternativas es elevado, por lo que se adopta un sistema de puntuación directa. La definición de escalas de puntuación constituye un aspecto crítico del proceso de *scoring*. Las escalas deben ser consistentes, homogéneas y adecuadas a la naturaleza del criterio evaluado.

El *score* global de cada alternativa se obtiene mediante la agregación de sus prioridades locales ponderadas por los pesos de los criterios correspondientes. Este proceso se realiza habitualmente mediante una suma ponderada, que puede expresarse de forma general como:

$$S_k = \sum_{i=1}^n w_i \cdot p_{ik}$$

donde:

*Fórmula 34.-Sumatorio de score por alternativa.*

- $S_k$  es el *score* global de la alternativa  $k$ ,
- $w_i$  es el peso del criterio  $i$ ,
- $p_{ik}$  es la prioridad local de la alternativa  $k$  respecto al criterio  $i$ ,
- $n$  es el número total de criterios considerados.

El resultado de este proceso es una puntuación adimensional que permite ordenar las alternativas de acuerdo con su contribución global al objetivo del modelo de decisión.

El *score* global obtenido no debe interpretarse como una medida absoluta de calidad, sino como un indicador relativo que permite comparar alternativas dentro del conjunto analizado. Diferencias reducidas entre puntuaciones pueden indicar una elevada sensibilidad del resultado a pequeñas variaciones en los pesos o en las valoraciones, por lo que resulta recomendable complementar el análisis con estudios de sensibilidad. El análisis de sensibilidad permite evaluar la robustez de la solución frente a variaciones en los pesos.

### **5.2.2. *Justificación del uso de la matriz multicriterio tipo AHP.***

La toma de decisiones en problemas de carácter multicriterio puede abordarse mediante diversas metodologías, tales como los métodos de suma ponderada, ELECTRE, PROMETHEE, TOPSIS o el propio Proceso Analítico Jerárquico (AHP), entre otros. La elección del método más adecuado depende de la naturaleza del problema, del tipo de criterios considerados y del grado de complejidad del proceso de decisión.

Debido a la casuística y aspectos propios del objetivo de este TFM se optado por la aplicación de una matriz multicriterio basada en el método AHP debido a una serie de ventajas técnicas que lo hacen especialmente adecuado para problemas de ingeniería con múltiples criterios heterogéneos:

- ✓ El método AHP permite estructurar el problema de decisión de forma jerárquica, facilitando la descomposición de un problema complejo en criterios y subcriterios claramente definidos.
- ✓ A diferencia de otros métodos multicriterio, AHP permite integrar simultáneamente criterios cuantitativos y cualitativos, sin necesidad de transformarlos previamente en una misma unidad física.
- ✓ El uso de comparaciones por pares proporciona un marco sistemático para incorporar el juicio experto, evitando la asignación directa y arbitraria de pesos.
- ✓ El método incorpora mecanismos explícitos de verificación de la coherencia interna de los juicios emitidos mediante el cálculo del Ratio de Consistencia, lo que aporta robustez y trazabilidad al proceso de decisión.
- ✓ Desde un punto de vista operativo, AHP es compatible con técnicas de agregación simples, como la suma ponderada, lo que facilita su implementación computacional y su interpretación.

Frente a otros métodos basados en relaciones de dominancia u ordenación parcial, el AHP proporciona una priorización completa y continua de los criterios y alternativas, lo que resulta especialmente útil cuando se requiere comparar soluciones con desempeños similares.

En la formulación clásica del método AHP, tanto los criterios como las alternativas pueden ser comparados por pares con respecto a los distintos niveles de la jerarquía. No obstante, la aplicación directa de comparaciones por pares a las alternativas presenta limitaciones prácticas cuando el número de estas es elevado.

El número de comparaciones necesarias para una matriz AHP de orden  $n$  viene dado por la expresión:

$$N = \frac{n(n-1)}{2}$$

*Fórmula 36.- Dimensión de la matriz.*

lo que implica un crecimiento cuadrático del número de juicios requeridos. Cuando el número de alternativas es elevado, este incremento conduce a:

- ✓ Un aumento significativo de la carga del decisor.
- ✓ Un mayor riesgo de inconsistencias en los juicios emitidos.
- ✓ Una reducción de la fiabilidad global del modelo de decisión.

Por este motivo, la comparación por pares se ha limitado al nivel de los criterios y subcriterios, donde el número de elementos es reducido y conceptualmente estable. En este nivel, la aplicación de AHP resulta especialmente eficaz para capturar la importancia relativa de los distintos factores que influyen en la decisión.

La valoración de las alternativas se realiza, en cambio, mediante un sistema de puntuación directa respecto a cada criterio, utilizando escalas homogéneas y previamente definidas. Este enfoque presenta las siguientes ventajas técnicas:

- ✓ Reduce de forma significativa el número de juicios necesarios sin comprometer la coherencia del modelo.
- ✓ Permite evaluar un número elevado de alternativas de forma sistemática y reproducible.
- ✓ Facilita la incorporación de información cuantitativa objetiva cuando esta se encuentra disponible.
- ✓ Mantiene la compatibilidad con la estructura jerárquica y con los pesos obtenidos mediante AHP.

Este planteamiento puede considerarse una aplicación híbrida del marco AHP, ampliamente empleada en ingeniería debido a la complejidad de los problemas, en la que el método se utiliza

para la obtención rigurosa de los pesos de los criterios, mientras que el *scoring* de las alternativas se realiza mediante técnicas de valoración directa más eficientes desde el punto de vista operativo.

La combinación de AHP para la determinación de los pesos de los criterios y de una matriz de *scoring* para la evaluación de las alternativas permite alcanzar un equilibrio adecuado entre rigor metodológico y viabilidad práctica. Este enfoque garantiza:

- ✓ La coherencia interna del sistema de ponderaciones,
- ✓ La trazabilidad del proceso de decisión,
- ✓ La escalabilidad del método ante un número elevado de alternativas,
- ✓ Y la obtención de resultados interpretables y defendibles desde un punto de vista técnico.

### 5.2.3. *Escala utilizada para la comparación de pares de los criterios de decisión.*

Para la realización de las comparaciones por pares de los criterios principales y secundarios se ha empleado la escala fundamental de Saaty, ampliamente utilizada en el marco del Proceso Analítico Jerárquico (AHP). Esta escala permite traducir juicios cualitativos de preferencia relativa en valores numéricos consistentes.

La escala utilizada se basa en valores enteros comprendidos entre 1 y 9, donde cada valor representa el grado de importancia de un criterio respecto a otro cuando ambos se comparan directamente.

La interpretación de dichos valores es la siguiente:

- ✓ 1 – Igual importancia: ambos criterios contribuyen de forma equivalente al objetivo considerado.
- ✓ 3 – Moderadamente más importante: un criterio presenta una ligera preferencia sobre otro.
- ✓ 5 – Fuertemente más importante: la preferencia de un criterio frente a otro es clara y significativa.
- ✓ 7 – Muy fuertemente más importante: un criterio domina de manera notable sobre el otro.
- ✓ 9 – Extremadamente más importante: la preferencia es absoluta y sin ambigüedad.

1	Igual importancia
3	Moderadamente más importante
5	Fuertemente más importante
7	Muy fuertemente más importante
9	Extremadamente más importante
	2,4,6,8 son valores intermedios

Tabla 37. Escala Saaty para ponderación de pesos de matriz multicriterio tipo AHP. Elaboración propia.

Los valores 2, 4, 6 y 8 se emplean como valores intermedios para reflejar situaciones en las que la preferencia no puede expresarse adecuadamente mediante los valores enteros principales.

La elección de la escala fundamental de Saaty se justifica por las siguientes razones técnicas:

- ✓ Permite expresar relaciones de preferencia relativas de forma sencilla e intuitiva, sin necesidad de recurrir a magnitudes absolutas.
- ✓ Es coherente con la naturaleza multiplicativa de las matrices de comparación AHP.
- ✓ Facilita la obtención de matrices recíprocas consistentes, requisito fundamental para el cálculo fiable de los vectores de prioridad.
- ✓ Está ampliamente contrastada en la literatura científica y en aplicaciones prácticas de ingeniería, lo que refuerza la validez y defendibilidad del método adoptado.

La escala descrita se ha aplicado de manera homogénea tanto en la comparación por pares de los criterios principales como de los criterios secundarios, garantizando la coherencia metodológica a lo largo de toda la jerarquía del modelo. Esta homogeneidad resulta esencial para asegurar que los pesos obtenidos sean comparables entre distintos niveles y puedan integrarse correctamente en la fase de síntesis y evaluación de alternativas.

#### 5.2.4. Escala utilizada para el Score de alternativas.

Una vez determinados los pesos de los criterios y subcriterios mediante el método AHP, la evaluación de las alternativas se lleva a cabo mediante un proceso de *scoring* orientado a cuantificar el nivel de impacto asociado a cada alternativa respecto a cada criterio considerado.

Para este fin se ha definido una escala ordinal discreta de cinco niveles, que permite traducir valoraciones cualitativas de impacto en puntuaciones numéricas enteras comprendidas entre 1 y 5.

La escala adoptada se interpreta de la siguiente manera:

- ✓ 5 – Mucho impacto: la alternativa presenta un impacto muy elevado respecto al criterio considerado.
- ✓ 4 – Alto impacto: la alternativa genera un impacto significativo.
- ✓ 3 – Impacto medio: la alternativa presenta un impacto moderado o asumible.
- ✓ 2 – Bajo impacto: la alternativa genera un impacto reducido.
- ✓ 1 – Muy poco impacto: la alternativa presenta una afección mínima o prácticamente despreciable.

Muy alto	5
Alto	4
Medio	3
Bajo	2
Muy Bajo	1

Tabla 38. Escala Score. Elaboración propia.

Esta escala permite caracterizar de forma sistemática la magnitud del impacto asociado a cada alternativa, manteniendo un equilibrio adecuado entre capacidad de discriminación y simplicidad operativa.

La elección de una escala de cinco niveles orientada a la evaluación del impacto se fundamenta en las siguientes consideraciones técnicas:

- ✓ Permite representar de forma clara la intensidad relativa de los impactos, sin necesidad de recurrir a magnitudes físicas difíciles de homogeneizar.
- ✓ Facilita la comparación entre alternativas cuando los impactos tienen distinta naturaleza (económica, ambiental, social o de seguridad).
- ✓ Reduce la incertidumbre y la dispersión de juicios, al limitar el número de categorías posibles.
- ✓ Es adecuada para la evaluación de un número elevado de alternativas, manteniendo la trazabilidad del proceso.

#### 5.2.5. *Definición de los criterios principales a introducir en la matriz*

Con el fin de evaluar de forma integral las alternativas consideradas en el proceso de decisión, la matriz multicriterio se estructura en torno a un conjunto de criterios principales que agrupan los factores más relevantes que influyen en la idoneidad global de una solución. Estos criterios representan dimensiones diferenciadas del problema de decisión y permiten incorporar de manera sistemática aspectos de carácter técnico, económico, ambiental, social y operativo.

En este contexto, se han definido cuatro criterios principales: criterio económico, criterio ambiental, criterio social y criterio de seguridad y operación. Cada uno de ellos se descompone posteriormente en criterios secundarios que permiten una evaluación más detallada y específica.

##### Criterio económico.

El criterio económico agrupa aquellos aspectos relacionados con los costes asociados a la implantación y ejecución de las alternativas evaluadas. Su objetivo es analizar la viabilidad económica de cada opción y su impacto en el presupuesto global del proyecto. Este criterio permite considerar no solo los costes directos iniciales, sino también otros factores económicos relevantes a lo largo del ciclo de vida de la solución, tales como los costes de explotación, mantenimiento y posibles sobrecostes derivados de condicionantes técnicos u operativos. La inclusión de este criterio

resulta fundamental para garantizar que la alternativa seleccionada sea compatible con las restricciones económicas del proyecto y con los objetivos de eficiencia en el uso de los recursos.

#### Criterio ambiental.

El criterio ambiental engloba los impactos potenciales de cada alternativa sobre el medio ambiente, durante la fase de ejecución. Este criterio tiene como finalidad evaluar el grado de afección ambiental asociado a cada solución y su compatibilidad con los principios de sostenibilidad y protección del entorno.

Dentro de este criterio se consideran aspectos como la generación de residuos, emisiones, consumo de recursos naturales, alteraciones del medio físico y posibles afecciones a elementos ambientales sensibles. La evaluación ambiental permite identificar aquellas alternativas que minimizan los impactos negativos y favorecen una integración más adecuada en el entorno, en línea con la normativa ambiental vigente y las buenas prácticas de ingeniería.

#### Criterio social

El criterio social recoge los efectos que la ejecución de las alternativas puede tener sobre la población y el entorno social en el que se desarrolla el proyecto. Este criterio permite incorporar en el proceso de decisión aspectos relacionados con la convivencia con el entorno urbano, la aceptación social y las molestias generadas a terceros.

Se incluyen dentro de este criterio factores como las interferencias con actividades existentes, las afecciones a la movilidad, la generación de molestias temporales y la percepción social de la actuación. La consideración del criterio social resulta especialmente relevante en proyectos desarrollados en entornos urbanizados o con presencia significativa de población, donde la minimización de impactos sociales puede ser determinante para la viabilidad global de la solución.

#### Criterios de seguridad y operación.

El criterio de seguridad y operación agrupa los aspectos relacionados con la seguridad de las personas y con la fiabilidad operativa de las alternativas evaluadas. Su objetivo es analizar los riesgos asociados a la fase de ejecución, así como la complejidad operativa de cada solución.

Este criterio permite evaluar, entre otros aspectos, los riesgos para los trabajadores, la seguridad de terceros, la facilidad de control y supervisión de los procesos, y la robustez de la alternativa frente a condiciones adversas. La inclusión de este criterio garantiza que la alternativa seleccionada no solo sea viable desde un punto de vista técnico y económico, sino también segura y operativamente eficiente.

### 5.2.5.1. Ponderación de los pesos para los criterios principales

La ponderación de los criterios principales se ha realizado a partir de la matriz de valoración por pares, en la que se compara la importancia relativa de cada criterio frente al resto. Esta matriz recoge los juicios emitidos utilizando la escala fundamental de Saaty, de modo que cada elemento  $a_{ij}$  representa la importancia del criterio de la fila  $i$  respecto al criterio de la columna  $j$ .

La matriz presenta diagonal unitaria, al compararse cada criterio consigo mismo, y cumple la propiedad de reciprocidad, de forma que los valores situados por debajo de la diagonal principal corresponden al inverso de los valores situados por encima de la misma. Esta estructura garantiza la coherencia formal exigida por el método AHP.

	Económicos	Ambientales	Sociales	Seguridad y Operación
Económicos	1	3	3	0,2
Ambientales	0,33	1	1	0,33
Sociales	0,33	1	1	0,2
Seguridad y Operación	5	3	5	1

Tabla 39. Matriz de valoración para criterios principales de decisión. Elaboración propia.

A partir de la matriz de valoración por pares se ha calculado el vector de prioridades mediante el método de la media geométrica por filas. Para cada criterio se obtiene un valor proporcional a su importancia relativa, calculado como la media geométrica de los elementos de su fila en la matriz de comparación.

Dado que estos valores representan únicamente importancias relativas no normalizadas, se ha aplicado un proceso de normalización por suma, consistente en dividir cada media geométrica entre la suma total de todas ellas. Este procedimiento transforma el vector de prioridades en un conjunto de pesos adimensionales, positivos y directamente comparables, cuya suma es igual a la unidad.

Como resultado del proceso descrito, se obtienen los siguientes pesos normalizados de los criterios principales:

Pesos resultantes normalizados:	
Seguridad y Operación	0,579
Económicos	0,22
Ambientales	0,11
Sociales	0,092
	1

Tabla 40. Resumen de pesos normalizados por criterio principal. Elaboración propia.

Estos valores reflejan la contribución relativa de cada criterio al proceso de decisión global. El criterio de Seguridad y Operación concentra el mayor peso, lo que indica su papel predominante en la evaluación multicriterio. El criterio Económico ocupa una posición intermedia, mientras que los criterios Ambiental y Social presentan una influencia menor pero no despreciable en la ponderación final.

Con el objetivo de validar la fiabilidad de los juicios recogidos en la matriz de valoración, se ha realizado un **análisis de consistencia** de acuerdo con el método AHP.

Consistencia	
Landa Max	4,264
CI	0,088
Para n-4	RI-0,90
CR	CI/RI

Tabla 41. Análisis de consistencia de criterios principales. Elaboración propia.

A partir de la matriz se ha calculado el autovalor máximo ( $\lambda_{\max}$ ), cuyo valor es 4,264.

Este valor se ha utilizado para determinar el Índice de Consistencia (CI), obteniéndose un valor de 0,088. A continuación, se ha calculado el Ratio de Consistencia (CR) mediante la relación entre el CI y el Índice Aleatorio (RI) correspondiente a una matriz de orden 4, cuyo valor es 0,90. El valor resultante del Ratio de Consistencia es:

$$CR = 0,0978$$

Dado que el valor de CR es inferior al umbral de referencia de 0,10, se considera que la matriz de comparación por pares presenta un nivel de consistencia aceptable, lo que confirma que los juicios emitidos no presentan contradicciones significativas y que los pesos obtenidos son fiables.

#### 5.2.6. *Definición de los criterios secundarios a introducir en la matriz*

Los criterios principales definidos en la matriz multicriterio se descomponen a su vez en una serie de criterios secundarios con el objetivo de detallar y caracterizar de forma más precisa los distintos aspectos que intervienen en el proceso de decisión. Esta desagregación jerárquica permite evaluar cada dimensión del problema con un mayor nivel de detalle, facilitando una valoración más objetiva y estructurada de las alternativas consideradas.

Los criterios secundarios se agrupan bajo cada criterio principal, manteniendo la coherencia con la estructura jerárquica del modelo de decisión y permitiendo identificar de forma explícita los factores que contribuyen al impacto global de cada alternativa. En los apartados siguientes se describen los criterios secundarios asociados a cada uno de los criterios principales definidos.

## 1.-Criterios secundarios económicos.

Los criterios secundarios de carácter económico permiten descomponer el criterio económico en componentes específicos que influyen directamente en el coste global de las alternativas evaluadas. Estos criterios recogen tanto los costes asociados a la inversión inicial como aquellos derivados de la ejecución, proporcionando una visión detallada del impacto económico de cada solución.

### 1.1.-Coste de la maquinaria

Este criterio evalúa el coste asociado a la maquinaria principal necesaria para la ejecución de la alternativa considerada. Incluye los costes de adquisición o alquiler, amortización, disponibilidad y posible necesidad de equipos especializados.

La valoración de este criterio permite diferenciar entre alternativas que requieren maquinaria de elevada complejidad técnica o alto coste frente a aquellas que emplean equipos más convencionales o de menor inversión.

### 1.2.-Coste de la configuración auxiliar

Este criterio recoge los costes derivados de la configuración auxiliar necesaria para el correcto funcionamiento de la alternativa. Se incluyen los sistemas complementarios de apoyo tales como instalaciones auxiliares, equipos de control, sistemas de alimentación, bombeo, ventilación u otros elementos necesarios para la operación.

Su consideración permite evaluar el impacto económico asociado a la complejidad del sistema y a la necesidad de infraestructuras adicionales.

### 1.3.-Coste de la necesidad de emplear lodos

Este criterio valora el impacto económico asociado al uso de lodos u otros fluidos auxiliares durante la ejecución de los trabajos. Incluye los costes de preparación, suministro, mantenimiento, tratamiento y gestión de dichos lodos, así como los costes derivados de su transporte y disposición final.

Este aspecto resulta especialmente relevante en aquellas alternativas en las que el empleo de lodos constituye un elemento esencial del proceso constructivo.

### 1.4.-Coste del desgaste de los útiles de corte

Este criterio considera los costes asociados al desgaste y reposición de los útiles de corte empleados durante la excavación. Se tienen en cuenta la frecuencia de sustitución, el coste unitario de los elementos de corte y la influencia de las condiciones del terreno en su vida útil.

La valoración de este criterio permite reflejar el impacto económico derivado del consumo de elementos fungibles a lo largo del proceso de ejecución.

#### 1.5.-Coste de la extracción del material excavado

Este criterio evalúa los costes asociados a la extracción, transporte y gestión del material excavado. Incluye los medios necesarios para la evacuación del material, su manipulación, almacenamiento temporal y transporte hasta su destino final, así como los posibles costes de tratamiento o vertido.

La inclusión de este criterio permite analizar el impacto económico derivado tanto del volumen de material excavado como de la logística asociada a su gestión.

#### 2.-Criterios secundarios ambientales.

Los criterios secundarios de carácter ambiental permiten descomponer el criterio ambiental en factores específicos relacionados con las posibles afecciones al medio físico y al entorno durante la ejecución y operación de las alternativas consideradas. Estos criterios tienen como objetivo evaluar el grado de impacto ambiental asociado a cada solución, considerando tanto efectos directos como indirectos, temporales o permanentes.

La inclusión de estos criterios en la matriz multicriterio permite incorporar de forma sistemática los principios de sostenibilidad y minimización de impactos ambientales en el proceso de toma de decisiones.

##### 2.1.-Afección hidrogeológica

Este criterio evalúa el impacto potencial de cada alternativa sobre el régimen hidrogeológico del entorno, incluyendo posibles afecciones a acuíferos, niveles freáticos y flujos subterráneos.

Se consideran aspectos como la alteración del equilibrio hidráulico, el riesgo de drenajes no deseados, la posible contaminación de aguas subterráneas y la necesidad de medidas de control o protección hidrogeológica. La valoración de este criterio resulta especialmente relevante en zonas con presencia de acuíferos sensibles o con usos del agua subterránea significativos.

##### 2.2.-Generación de vibraciones

Este criterio analiza la magnitud de las vibraciones inducidas por la ejecución de los trabajos y su posible transmisión al entorno. Se tienen en cuenta tanto las vibraciones generadas por la maquinaria como las asociadas a los procesos constructivos empleados.

La valoración de este criterio permite evaluar el riesgo de afección a estructuras existentes, infraestructuras próximas y elementos sensibles, así como el cumplimiento de los límites establecidos por la normativa aplicable en materia de vibraciones.

### 2.3.-Generación de ruidos

Este criterio considera el impacto acústico derivado de la ejecución de las alternativas evaluadas. Incluye la generación de ruidos procedentes de la maquinaria, los equipos auxiliares y las operaciones asociadas al proceso constructivo.

La evaluación de este criterio permite analizar la afección al entorno, especialmente en áreas urbanas o con presencia de receptores sensibles, así como la necesidad de adoptar medidas correctoras para el cumplimiento de los niveles sonoros admisibles.

### 2.4.-Aporte de CO<sub>2</sub> a la atmósfera

Este criterio evalúa las emisiones de dióxido de carbono asociadas a cada alternativa, tanto de forma directa como indirecta. Se consideran las emisiones derivadas del consumo energético de la maquinaria, del transporte de materiales y de la gestión de residuos, así como aquellas asociadas a los procesos auxiliares necesarios para la ejecución de los trabajos.

La inclusión de este criterio permite incorporar el impacto climático en el proceso de decisión, favoreciendo la selección de alternativas con menor huella de carbono y alineadas con los objetivos de reducción de emisiones y sostenibilidad ambiental.

## 3.-Criterios secundarios sociales.

Los criterios secundarios de carácter social permiten descomponer el criterio social en factores específicos relacionados con la interacción de las alternativas con el entorno humano y las actividades existentes. Su objetivo es evaluar el grado de afección que la ejecución y operación de cada alternativa puede generar sobre los usuarios, la población y los usos del entorno, incorporando estos aspectos en el proceso de decisión multicriterio.

### 3.1.-Molestias a los usuarios.

Este criterio evalúa el nivel de molestias generadas a los usuarios y a la población afectada como consecuencia de la ejecución de las alternativas consideradas. Se incluyen dentro de este criterio las afecciones derivadas de la ocupación del espacio público, las restricciones temporales de accesos, las alteraciones de la movilidad, así como las incomodidades asociadas a la presencia de obras y maquinaria.

Asimismo, se consideran las molestias indirectas relacionadas con la duración de los trabajos, la frecuencia de las interferencias y la percepción social del impacto de la actuación. La valoración de este criterio permite discriminar entre alternativas que generan afecciones sociales más intensas o prolongadas y aquellas que presentan una mejor integración con el entorno y los usuarios.

#### 4.-Criterios secundarios de seguridad y operación.

Los criterios secundarios asociados al criterio de seguridad y operación permiten evaluar los riesgos y condicionantes relacionados con la protección de las personas, la integridad de las infraestructuras existentes y la fiabilidad operativa de las alternativas consideradas. Estos criterios tienen como objetivo analizar la capacidad de cada solución para garantizar una ejecución segura, controlada y técnicamente robusta, minimizando la probabilidad de incidentes y fallos operativos.

La consideración de estos aspectos resulta fundamental en proyectos de ingeniería, ya que una alternativa técnicamente viable puede no ser aceptable si presenta niveles elevados de riesgo o una complejidad operativa excesiva.

##### 4.1.-Seguridad de los trabajadores

Este criterio evalúa los riesgos asociados a la seguridad y salud de los trabajadores durante la ejecución de los trabajos. Se consideran factores como la exposición a riesgos geotécnicos, mecánicos y ambientales, la necesidad de trabajos en espacios confinados, la interacción con maquinaria pesada y la complejidad de las operaciones a realizar.

La valoración de este criterio permite identificar aquellas alternativas que ofrecen mayores condiciones de seguridad operativa y menores probabilidades de accidentes laborales, favoreciendo soluciones que reduzcan la exposición al riesgo y faciliten la implantación de medidas preventivas eficaces.

##### 4.2.-Posible afección a infraestructuras existentes

Este criterio analiza el riesgo de afección a infraestructuras existentes como consecuencia de la ejecución de la alternativa evaluada. Se incluyen posibles impactos sobre edificaciones, redes de servicios, infraestructuras lineales y otros elementos presentes en el entorno de actuación.

La evaluación considera tanto la probabilidad de que se produzcan afecciones como la gravedad potencial de las mismas, permitiendo discriminar entre alternativas con mayor o menor riesgo de generar daños estructurales, interferencias o alteraciones en el funcionamiento de infraestructuras en servicio.

#### 4.3.-Riesgo de atascamiento

Este criterio valora la probabilidad de que se produzcan situaciones de atascamiento o bloqueo de la maquinaria durante la ejecución de los trabajos. Se tienen en cuenta factores como las condiciones del terreno, la complejidad del proceso constructivo, la sensibilidad de la tecnología empleada y la capacidad de control y corrección de desviaciones durante la operación.

La consideración de este criterio resulta clave para evaluar la robustez operativa de cada alternativa y su capacidad para mantener la continuidad de los trabajos sin interrupciones prolongadas o incidentes críticos.

#### 4.4.-Dificultad de ejecutar pozos de ataque y salida

Este criterio evalúa la complejidad técnica y operativa asociada a la ejecución de los pozos de ataque y salida necesarios para la implantación de la alternativa considerada. Se analizan aspectos como las condiciones geotécnicas, la profundidad de los pozos, la disponibilidad de espacio, la afección al entorno y la necesidad de sistemas auxiliares especiales.

La valoración de este criterio permite identificar aquellas alternativas que requieren soluciones constructivas más complejas o con mayores riesgos asociados en la fase de implantación, influyendo de manera directa en la seguridad y viabilidad operativa global del proyecto.

#### **5.2.6.1. Ponderación de los pesos para los criterios secundarios**

Los pesos de los criterios secundarios se han determinado siguiendo el mismo procedimiento metodológico aplicado a los criterios principales, mediante comparaciones por pares en el marco del método AHP. Para cada grupo de criterios secundarios dependientes de un mismo criterio principal, se ha construido su correspondiente matriz de valoración, utilizando la escala fundamental de Saaty. A partir de dichas matrices se ha calculado el vector de prioridades mediante el método de la media geométrica por filas, procediendo posteriormente a su normalización para obtener los pesos ponderados. Asimismo, se ha llevado a cabo el análisis de consistencia de cada matriz mediante el cálculo del Índice de Consistencia (CI) y del Ratio de Consistencia (CR), con el fin de verificar la coherencia de los juicios emitidos. A continuación, se presentan las matrices de valoración, los pesos normalizados resultantes y el análisis de consistencia correspondiente a cada uno de los conjuntos de criterios secundarios considerados.

<b>Económicos</b>	<b>Máquina</b>	<b>Auxiliares</b>	<b>Útiles corte</b>	<b>Extracción</b>	<b>Lodos</b>
<b>Máquina</b>	1	3	5	3	5
<b>Auxiliares</b>	0,3	1	3	3	3
<b>Útiles corte</b>	0,2	0,3	1	0,3	0,3
<b>Extracción</b>	0,3	0,3	3	1	3
<b>Lodos</b>	0,2	0,3	3	0,3	1

Tabla 42. Matriz de valoración para criterios secundarios de decisión económicos. Elaboración propia.

<b>Pesos resultantes normalizados:</b>	
<b>Máquina</b>	0,46
<b>Auxiliares</b>	0,25
<b>Extracción</b>	0,16
<b>Lodos</b>	0,09
<b>Útiles corte</b>	0,04
	1

Tabla 43. Resumen de pesos normalizados por criterio secundarios de decisión económicos. Elaboración propia.

<b>Consistencia</b>	
<b>Landa Max</b>	5,3554
<b>CI</b>	0,0888
<b>Para n-5</b>	RI-1,12
<b>CR</b>	CI/RI

Tabla 44. Análisis de consistencia de criterios secundarios de decisión económicos. Elaboración propia.

0,0793	CR Menor que 0,01---CONSISTENCIA ESTABLE
--------	--

Tabla 45. Estabilidad de la consistencia de los criterios secundarios de decisión económicos. Elaboración propia.

<b>Ambientales</b>	<b>Hidrogeológica</b>	<b>Acústica</b>	<b>Vibraciones</b>	<b>CO<sub>2</sub></b>
<b>Hidrogeológica</b>	1	5	7	3
<b>Acústica</b>	0,2	1	3	0,3
<b>Vibraciones</b>	0,142	0,3	1	0,2
<b>CO<sub>2</sub></b>	0,3	3	5	1

Tabla 46. Matriz de valoración para criterios secundarios de decisión ambientales. Elaboración propia.

<b>Pesos resultantes normalizados:</b>	
<b>Hidrogeológica</b>	0,564
<b>CO<sub>2</sub></b>	0,263
<b>Acústica</b>	0,118
<b>Vibraciones</b>	0,055
	1

Tabla 47. Resumen de pesos normalizados por criterio secundarios de decisión ambientales. Elaboración propia.

Consistencia	
Landa Max	4,117
CI	0,039
Para n-4	RI-0,9
CR	CI/RI

Tabla 48. Análisis de consistencia de criterios secundarios de decisión ambientales. Elaboración propia

0,043	CR Menor que 0,01---CONSISTENCIA MUY BUENA
-------	--

Tabla 49. Estabilidad de la consistencia de los criterios secundarios de decisión ambientales. Elaboración propia.

Sociales	UNICA VARIABLE	0,092	1
----------	----------------	-------	---

Tabla 50. Pesos para criterios secundarios de decisión sociales. Elaboración propia.

Seguridad y operación	Trabajadores	Infraestructuras	Atascamiento	Pozos
Trabajadores	1	3	5	5
Infraestructuras	0,3	1	3	5
Atascamiento	0,2	0,3	1	3
Pozos	0,2	0,2	0,3	1

Tabla 51. Matriz de valoración para criterios secundarios de decisión seguridad y operación. Elaboración propia.

Pesos resultantes normalizados	
Trabajadores	0,564
Infraestructuras	0,263
Atascamiento	0,134
Pozos	0,067
	1

Tabla 52. Resumen de pesos normalizados por criterio secundarios de decisión seguridad y operación. Elaboración propia.

Consistencia	
Landa Max	4,096
CI	0,0321
Para n-4	RI-0,9
CR	CI/RI

Tabla 53. Análisis de consistencia de criterios secundarios de decisión seguridad y operación. Elaboración propia

0,036	CR Menor que 0,01---CONSISTENCIA EXCELENTE
-------	--

Tabla 54. Estabilidad de la consistencia de los criterios secundarios de decisión seguridad y operación. Elaboración propia

El análisis de consistencia realizado sobre las matrices de comparación evidencia que los valores del Ratio de Consistencia (CR) obtenidos son, en todos los casos, inferiores al umbral de referencia de 0,10 establecido en el método AHP. En particular, los valores calculados se sitúan claramente por debajo de dicho límite, lo que indica un alto grado de coherencia interna en los juicios emitidos durante el proceso de comparación por pares.

**5.2.6.2. Justificación de los valores saaty dados a los criterios.**

La justificación explícita de los valores asignados en la escala de Saaty a los distintos subcriterios de decisión constituye un elemento esencial para garantizar la rigurosidad, transparencia y trazabilidad del proceso de toma de decisiones mediante AHP. Dado que estas valoraciones representan comparaciones relativas entre subcriterios y condicionan directamente los pesos obtenidos y, en consecuencia, el ordenamiento final de las alternativas resulta imprescindible que cada asignación esté respaldada por un razonamiento técnico coherente. La justificación permite evidenciar que los valores no son arbitrarios, sino que responden a un análisis sistemático de factores como la criticidad del impacto, la probabilidad de ocurrencia, la severidad de las consecuencias, la capacidad de control o mitigación y la influencia real de cada subcriterio en el comportamiento global del sistema evaluado.

<b>CRITERIOS ECONOMICOS</b>			
<b>Comparación independiente</b>	<b>Valor Saaty</b>	<b>Interpretación técnica de la dominancia</b>	<b>Justificación técnica</b>
<b>Maquinaria vs Auxiliares</b>	3	Dominancia económica moderada	La maquinaria principal condiciona de forma más directa la inversión inicial y la selección tecnológica, mientras que la configuración auxiliar, aun siendo relevante, se adapta en mayor medida a la máquina elegida.
<b>Maquinaria vs Útiles de corte</b>	5	Dominancia económica fuerte	El coste de la maquinaria define la viabilidad económica de la alternativa, mientras que los útiles de corte representan un coste operativo secundario y dependiente del sistema principal.
<b>Maquinaria vs Extracción</b>	3	Dominancia económica moderada	La maquinaria determina el sistema global de excavación y su rango de aplicación, mientras que el sistema de extracción, aunque relevante, se configura en función de la tecnología principal.
<b>Maquinaria vs Lodos</b>	5	Dominancia económica fuerte	El empleo de lodos introduce costes adicionales, pero estos están subordinados a la elección de la maquinaria y no condicionan por sí mismos la estructura económica de la solución.
<b>Auxiliares vs Útiles de corte</b>	3	Dominancia económica moderada	La configuración auxiliar implica instalaciones, equipos y logística que tienen un peso económico estructural mayor que los consumibles asociados al desgaste de herramientas.

<b>CRITERIOS ECONOMICOS</b>			
<b>Comparación independiente</b>	<b>Valor Saaty</b>	<b>Interpretación técnica de la dominancia</b>	<b>Justificación técnica</b>
<b>Auxiliares vs Extracción</b>	3	Dominancia económica moderada	Los sistemas auxiliares influyen de forma continuada en el coste del proyecto, mientras que la extracción se considera un subsistema funcional integrado dentro del esquema general.
<b>Auxiliares vs Lodos</b>	3	Dominancia económica moderada	La configuración auxiliar condiciona la implantación y operación global, mientras que los lodos representan un coste específico ligado a determinadas condiciones técnicas.
<b>Extracción vs Útiles de corte</b>	3	Dominancia económica moderada	La extracción del material excavado requiere sistemas específicos y logística asociada, con mayor impacto económico global que el consumo de útiles de corte.
<b>Extracción vs Lodos</b>	3	Dominancia económica moderada	El sistema de extracción tiene un impacto continuo sobre la operativa y los costes del proyecto, mientras que los lodos actúan como elemento auxiliar condicionado por el método empleado.
<b>Lodos vs Útiles de corte</b>	3	Dominancia económica moderada	El uso de lodos implica preparación, control y gestión específicos, con una repercusión económica más significativa que el desgaste de elementos de corte.

Tabla 55. Justificación del valor de escala Saaty dado por criterio económico. Elaboración propia.

<b>CRITERIOS AMBIENTALES</b>			
<b>Comparación independiente</b>	<b>Valor Saaty</b>	<b>Interpretación técnica de la dominancia</b>	<b>Justificación técnica</b>
<b>Hidrogeológica vs Acústica</b>	5	Dominancia ambiental fuerte	La afección hidrogeológica tiene un carácter estructural y potencialmente permanente sobre el medio, mientras que el impacto acústico es generalmente temporal y reversible una vez finalizadas las obras.
<b>Hidrogeológica vs Vibraciones</b>	7	Dominancia ambiental muy fuerte	Las afecciones hidrogeológicas pueden alterar de forma significativa el régimen de aguas subterráneas y el comportamiento del terreno, mientras que las vibraciones suelen tener un alcance espacial y temporal más limitado.
<b>Hidrogeológica vs CO<sub>2</sub></b>	3	Dominancia ambiental moderada	Aunque el aporte de CO <sub>2</sub> es un impacto relevante a escala global, la afección hidrogeológica presenta mayor criticidad a escala local del proyecto y puede

CRITERIOS AMBIENTALES			
Comparación independiente	Valor Saaty	Interpretación técnica de la dominancia	Justificación técnica
			condicionar la viabilidad ambiental de la actuación.
<b>Acústica vs Vibraciones</b>	3	Dominancia ambiental moderada	El impacto acústico suele tener una mayor persistencia temporal y un mayor grado de percepción por parte del entorno que las vibraciones, las cuales tienden a estar más amortiguadas por el terreno.
<b>Acústica vs CO<sub>2</sub></b>	0,3	Dominancia ambiental moderada de CO <sub>2</sub>	El impacto asociado al CO <sub>2</sub> , aunque menos perceptible localmente, tiene implicaciones ambientales de mayor alcance y carácter acumulativo frente al impacto acústico, que es esencialmente local y temporal.
<b>Vibraciones vs CO<sub>2</sub></b>	0,2	Dominancia ambiental fuerte de CO <sub>2</sub>	Las vibraciones presentan un impacto generalmente puntual y limitado, mientras que el aporte de CO <sub>2</sub> contribuye a efectos ambientales globales y persistentes, con menor capacidad de mitigación directa.

Tabla 56. Justificación del valor de escala Saaty dado por criterio ambiental. Elaboración propia.

El criterio social se ha modelizado mediante una única variable, correspondiente a la *afección a usuarios*, por lo que no ha sido necesario realizar comparaciones por pares a nivel de criterios secundarios dentro de esta rama del modelo jerárquico.

CRITERIOS DE SEGURIDAD Y OPERACIONALES			
Comparación independiente	Valor Saaty	Interpretación técnica de la dominancia	Justificación técnica
<b>Trabajadores vs Infraestructuras</b>	3	Dominancia moderada de "seguridad de trabajadores"	La seguridad laboral se prioriza por su criticidad intrínseca (daño a personas) y por su carácter no negociable en ingeniería (marco preventivo y legal). La afección a infraestructuras, aunque puede ser grave, suele presentar mayor capacidad de monitorización/mitigación y se gestiona con procedimientos técnicos (auscultación, límites de deformación, medidas correctoras).
<b>Trabajadores vs Atascamiento</b>	5	Dominancia fuerte de "seguridad de trabajadores"	El atascamiento es principalmente un riesgo operativo/producción (plazos, costes, rescate), mientras que la seguridad de los trabajadores implica exposición directa a daño y condiciona el método de trabajo. Además, incidentes operativos pueden ser gestionables; un evento de

CRITERIOS DE SEGURIDAD Y OPERACIONALES			
Comparación independiente	Valor Saaty	Interpretación técnica de la dominancia	Justificación técnica
			seguridad tiene consecuencia crítica y menor tolerancia al riesgo.
<b>Trabajadores vs Pozos</b>	5	Dominancia fuerte de “seguridad de trabajadores”	La dificultad de ejecución de pozos suele traducirse en complejidad técnica y logística, pero la seguridad laboral afecta transversalmente a todas las actividades y determina requisitos preventivos, procedimientos, permisos y medidas de control. Por severidad del daño potencial y prioridad de control, se establece dominancia fuerte de seguridad.
<b>Infraestructuras vs Atascamiento</b>	3	Dominancia moderada de “afección a infraestructuras”	La afección a infraestructuras combina probabilidad y consecuencia elevada (daños estructurales, interrupción de servicios, afecciones a terceros), con impactos potencialmente críticos. El atascamiento, aunque puede ser severo para la producción, suele presentar una consecuencia más acotada al proceso constructivo y suele resolverse mediante estrategias de recuperación.
<b>Infraestructuras vs Pozos</b>	5	Dominancia fuerte de “afección a infraestructuras”	La afectación a infraestructuras implica riesgo a terceros, continuidad de servicio y posibles daños de alta criticidad, con exigencias estrictas de control y responsabilidad. La dificultad de pozos, aun relevante, es generalmente planificable y mitigable mediante diseño constructivo, medios auxiliares y metodología, presentando una criticidad comparativamente menor.
<b>Atascamiento vs Pozos</b>	3	Dominancia moderada de “atascamiento”	El atascamiento representa un riesgo de pérdida de operatividad que puede implicar paradas prolongadas y procedimientos complejos de recuperación. La dificultad de pozos tiende a concentrarse en fases puntuales y puede mitigarse mediante soluciones constructivas; por impacto global en continuidad del proceso, se asigna dominancia moderada al atascamiento.

Tabla 57. Justificación del valor de escala Saaty dado por criterio de seguridad y operación. Elaboración propia.

### 5.2.7. Score de las alternativas

Una vez definidos los criterios principales y secundarios, y determinados sus pesos relativos mediante el método AHP, se procede a la evaluación de las alternativas a través de un proceso de *scoring*. Este proceso tiene como objetivo cuantificar el impacto asociado a cada alternativa respecto a cada uno de los criterios considerados, permitiendo integrar de forma coherente los distintos aspectos del modelo de decisión.

El *scoring* de las alternativas se realiza en el nivel de los criterios secundarios, ya que estos representan los factores más específicos y directamente evaluables. De este modo, cada alternativa recibe una puntuación para cada criterio secundario, que posteriormente se agrega de forma jerárquica hasta obtener una valoración global.

Para cada criterio secundario, las alternativas se valoran individualmente mediante una escala ordinal discreta de cinco niveles, definida en términos de impacto. Las puntuaciones asignadas reflejan la magnitud del impacto generado por cada alternativa respecto al criterio evaluado, donde valores más altos indican un mayor nivel de impacto y valores más bajos un impacto reducido.

Una vez obtenidos los *scores* de las alternativas para todos los criterios secundarios, se procede a su agregación a nivel de criterios principales. Este proceso se realiza mediante una suma ponderada, en la que cada puntuación de criterio secundario se multiplica por su peso relativo dentro del criterio principal correspondiente.

El resultado de esta agregación proporciona, para cada alternativa, un score parcial asociado a cada criterio principal, reflejando su impacto global en los ámbitos económico, ambiental, social y de seguridad y operación.

El *score* global de cada alternativa se obtiene mediante la agregación ponderada de los *scores* parciales correspondientes a los criterios principales, utilizando los pesos obtenidos previamente mediante el método AHP. De forma general, el *score* global puede expresarse como:

$$S_k = \sum_{i=1}^n W_i \cdot \left( \sum_{j=1}^{m_i} w_{ij} \cdot p_{ijk} \right)$$

Fórmula 38.-Sumatorio del score global dado a las alternativas.

donde:

- $S_k$  es el *score* global de la alternativa  $k$ ,
- $W_i$  es el peso del criterio principal  $i$ ,
- $w_{ij}$  es el peso del criterio secundario  $j$  dentro del criterio principal  $i$ ,

- $p_{ijk}$  es la puntuación asignada a la alternativa  $k$  respecto al criterio secundario  $j$  del criterio principal  $i$ ,
- $n$  es el número de criterios principales,
- $m_i$  es el número de criterios secundarios asociados al criterio principal  $i$ .

Este proceso permite integrar de forma jerárquica y coherente todos los niveles del modelo de decisión.

Se incluye a continuación el score dado para cada combinación que genera una alternativa.

ECONOMICOS				
Coste			Confi auxiliar	
1	Escudo cerrado. Sistema Slurry	5	1 Pipe Jacking	
2	Escudo cerrado.EPB	4	2 Pipe Jacking+ IJS	
3	Escudo cerrado.Hibrido	5		
4	Escudo abierto. Pico	4	Elementos corte	
5	Escudo abierto. Pico/Rozadera	4	1 Pico	5
6	Escudo abierto. Rozadera	3	2 Rozadera	4
7	Escudo abierto. Cazo/Rozadera	3	3 Cazo	3
8	Escudo abierto. Cazo.	3		
Extraccion			Lodos	
1	Estacion Lodos	5	1 Frente	4
2	Tornillo Sin fin	3	2 Tubo	3
			3 Frente y tubo	5
			4 Tubo y estudio	3
			5 Sin tubo y estudio	1
			5 Ni tubo ni frente	1
AMBIENTALES				
Hidrogeologica			Acustica	
1	Lodos frente	5	1 Estacion Lodos	4
2	Tubo	4	2 Tornillo Sin fin	2
Vibraciones			Aporte CO2	
1	Cerrado	3	1 Estacion lodos	5
2	Abierto	2	2 Tornillo sin fin	2
SOCIALES				
Afeccion usuarios				
1	Estacion de lodos	4		
2	Sin fin	3		
OPERACIONALES Y SEGURIDAD				
Personas			Infraestructura	
1	Escudo abierto	5	1 Lodos frente	3
2	Escudo cerrado	3	2 Sin lodos	5
Atascamiento			Pozos de entrada y salida	
1	Escudo cerrado	5	1 Compacto	4
2	Escudo abierto	3	2 No compacto	3

Tabla 58. Scores de las variables que componen las alternativas. Elaboración propia.

### 5.2.7.1. Justificación del score propuesto

La justificación del score asignado a cada alternativa constituye un aspecto fundamental en la aplicación de cualquier metodología de decisión multicriterio, ya que garantiza la trazabilidad, transparencia y coherencia del proceso de evaluación. Dado que las puntuaciones asignadas

influyen de forma directa en el resultado final del modelo, resulta imprescindible que cada valor esté respaldado por criterios técnicos objetivos, comparaciones relativas y razonamientos explícitos. Esta justificación permite reducir la subjetividad inherente al proceso de valoración, facilita la revisión y validación de los resultados y asegura que las diferencias entre alternativas respondan a características reales y verificables. Se procede a continuación a la justificación explícita

<b>1.-Criterios económicos.</b>
1.1.-Coste de maquinaria.
<b>1.1.1.-Escudos cerrados – Sistema Slurry (Score = 5)</b>
El sistema Slurry presenta el mayor impacto económico, debido a que requiere maquinaria de alta complejidad tecnológica, con sistemas presurizados de control del frente, separación y tratamiento de lodos, instrumentación avanzada y elevados requisitos de potencia y control. El coste de adquisición y operación de este tipo de equipos es significativamente superior al resto de alternativas, lo que justifica la asignación del valor máximo en la escala.
<b>1.1.2.-Escudos cerrados – Sistema EPB (Score = 4)</b>
Los escudos EPB presentan un impacto económico elevado, aunque inferior al sistema Slurry. Si bien incorporan sistemas de control del frente y una elevada automatización, su configuración es menos compleja al no requerir circuitos completos de lodos ni plantas de separación asociadas. Esta reducción relativa de complejidad y equipamiento justifica una puntuación ligeramente inferior.
<b>1.1.3.-Escudos cerrados – Sistema híbrido (Score = 5)</b>
Los sistemas híbridos combinan características de los sistemas Slurry y EPB, incorporando un elevado nivel de versatilidad y redundancia operativa. Esta dualidad implica un incremento significativo del coste de la maquinaria, tanto por la complejidad del equipo como por la necesidad de sistemas adicionales. Por este motivo, se les asigna igualmente el valor máximo de impacto económico.
<b>1.1.4.-Escudos abiertos – Pico (Score = 4)</b>
Los escudos abiertos con excavación mediante pico presentan un impacto económico medio-alto. Aunque su complejidad es inferior a la de los escudos cerrados, requieren maquinaria robusta, de elevada potencia y con sistemas mecánicos específicos para excavación en condiciones exigentes. Su coste es notable, pero claramente inferior al de los sistemas presurizados, lo que justifica un valor de 4.

<b>1.-Criterios económicos.</b>
1.1.-Coste de maquinaria.
<b>1.1.5.-Escudos abiertos – Pico/Rozadera (Score = 4)</b>
Esta alternativa incorpora un sistema de excavación combinado que incrementa la versatilidad del equipo frente al uso exclusivo de pico. La mayor complejidad mecánica respecto a sistemas simples se traduce en un coste de maquinaria similar al del escudo abierto con pico, manteniéndose por tanto un <i>score</i> equivalente.
<b>1.1.6.-Escudos abiertos – Rozadera (Score = 3)</b>
Los escudos abiertos equipados únicamente con rozadera presentan un impacto económico medio. Se trata de equipos mecánicamente más simples, con menores requerimientos de potencia y menor nivel de especialización, lo que reduce el coste de adquisición y mantenimiento respecto a alternativas más complejas.
<b>1.1.7.-Escudos abiertos – Cazo/Rozadera (Score = 3)</b>
La combinación de cazo y rozadera supone una solución mecánica de complejidad moderada, sin sistemas presurizados ni automatización avanzada. El coste de la maquinaria es comparable al de los sistemas de rozadera, situándose en un rango intermedio dentro del conjunto de alternativas, lo que justifica un <i>score</i> de impacto medio.
<b>1.1.8.-Escudos abiertos – Cazo (Score = 3)</b>
El uso exclusivo de cazo representa una de las soluciones más simples desde el punto de vista mecánico. No obstante, sigue requiriendo maquinaria específica de excavación, lo que impide considerar su impacto como bajo. En consecuencia, se asigna un <i>score</i> de impacto medio, coherente con su nivel de inversión relativa.

<b>1.-Criterios económicos.</b>
1.2.-Coste configuración auxiliar
<b>Pipe Jacking (Score = 3)</b>
La tecnología de Pipe Jacking requiere una configuración auxiliar de complejidad media, compuesta fundamentalmente por los sistemas de empuje, el pozo de ataque, el pozo de

<b>1.-Criterios económicos.</b>
1.2.-Coste configuración auxiliar
<b>Pipe Jacking (Score = 3)</b>
salida y los equipos básicos de guiado y control. Aunque estos elementos suponen un coste relevante, se trata de sistemas ampliamente estandarizados, con soluciones constructivas bien conocidas y sin necesidad de instalaciones adicionales de elevada especialización. Desde un punto de vista comparativo, el coste de la configuración auxiliar es significativo pero contenido, lo que justifica la asignación de un <i>score</i> de impacto medio (3) dentro de la escala definida.
<b>Pipe Jacking + IJS (Score = 4)</b>
La alternativa Pipe Jacking + IJS incorpora, además de la configuración auxiliar propia del Pipe Jacking convencional, sistemas adicionales de inyección (IJS) destinados al control del terreno y a la mejora de las condiciones de excavación. Esta configuración implica un incremento del coste asociado a equipos específicos de inyección, sistemas de control, materiales de inyección, personal especializado y mayores tiempos de preparación y operación

<b>1.-Criterios económicos.</b>
1.3.-Coste de la necesidad de utilizar lodos
<b>Empleo de lodos en el frente (Score = 4)</b>
Cuando el uso de lodos se limita al frente de excavación, se requiere un sistema de control y suministro relativamente complejo para garantizar la estabilidad del frente y el correcto funcionamiento del proceso constructivo. Este escenario implica costes relevantes asociados a la preparación del lodo, su control reológico y la instrumentación necesaria, aunque sin necesidad de un circuito completo de transporte por el tubo. El impacto económico es elevado, pero inferior al de configuraciones más completas, lo que justifica la asignación de un <i>score</i> de 4.

<b>Empleo de lodos en el tubo (Score = 3)</b>
En este caso, los lodos se emplean principalmente para facilitar el transporte del material excavado a través del tubo. Aunque se requiere un sistema específico de bombeo y control, la complejidad operativa y los costes asociados son menores que cuando el lodo interviene directamente en el control del frente. Por este motivo, el impacto económico se considera medio, justificando un <i>score</i> de 3.
<b>Empleo de lodos en el frente y en el tubo (Score = 5)</b>
La utilización de lodos tanto en el frente de excavación como en el tubo representa la configuración de mayor impacto económico dentro de este criterio. Este escenario requiere sistemas completos de preparación, control, recirculación y tratamiento de lodos, así como mayores consumos de materiales, energía y personal especializado. La combinación de ambos usos incrementa significativamente la complejidad y el coste global del sistema, lo que justifica la asignación del valor máximo de la escala (5).
<b>Empleo de lodos en el tubo con necesidad de estudio específico (Score = 3)</b>
Cuando el empleo de lodos en el tubo va acompañado de la realización de un estudio específico, el impacto económico se incrementa respecto al uso básico, pero sin alcanzar los niveles asociados al control directo del frente. El coste adicional derivado del estudio se considera limitado en comparación con los costes operativos del sistema completo de lodos. En términos relativos, el impacto se mantiene en un nivel medio, por lo que se asigna un <i>score</i> de 3.
<b>Sin empleo de lodos en el tubo ni necesidad de estudio (Score = 1)</b>
En este escenario no se requiere el uso de lodos ni la realización de estudios asociados, lo que elimina los costes de suministro, control, tratamiento y gestión de estos fluidos. El impacto económico asociado a este criterio es, por tanto, muy reducido, justificando la asignación del valor mínimo de la escala (1).
<b>Sin empleo de lodos ni en el tubo ni en el frente (Score = 1)</b>
La ausencia total de lodos tanto en el frente como en el tubo representa la situación de menor impacto económico posible dentro de este criterio. Al no requerirse ningún sistema auxiliar ni consumibles asociados, los costes derivados de este aspecto son prácticamente inexistentes, lo que justifica igualmente la asignación de un <i>score</i> de 1.

<b>1.-Criterios económicos.</b>
1.4.-Coste de extracción del material excavado
<b>Extracción mediante estación de lodos (Score = 5)</b>
<p>La extracción del material excavado mediante estación de lodos representa la alternativa de mayor impacto económico dentro de este criterio. Este sistema requiere la instalación de una planta específica para la separación sólido-líquido, equipos de bombeo, sistemas de recirculación, tratamiento de lodos y gestión de residuos, así como un elevado consumo energético y personal especializado para su operación y mantenimiento.</p> <p>La complejidad del sistema, junto con los costes asociados a su implantación, operación continua y gestión ambiental del material extraído, justifica la asignación del valor máximo de</p>

<b>1.-Criterios económicos.</b>
1.5.-Coste de útiles de corte
<b>Útil de corte tipo Pico (Score = 5)</b>
<p>El pico se asocia al mayor impacto económico por desgaste debido a que trabaja con esfuerzos altamente concentrados y, en general, con un componente significativo de impacto y penetración. Esto provoca, mayor sensibilidad a condiciones abrasivas y heterogeneidades del terreno, mayor probabilidad de deterioro acelerado (pérdida de filo, deformaciones, roturas), mayor frecuencia de reposición respecto a sistemas de contacto distribuido. En términos comparativos, el pico tiende a tener una vida útil más corta y una variabilidad elevada del rendimiento, lo que incrementa el coste asociado a consumibles. Por ello se asigna el valor máximo (5).</p>
<b>Útil de corte tipo rozadera (Score = 4)</b>
<p>La rozadera presenta un impacto económico alto, pero inferior al pico. Su mecanismo se basa en un arranque por rozamiento/corte continuo, con una distribución de esfuerzos más uniforme que el pico, lo que reduce parcialmente la severidad de los picos de carga. Sin embargo: el contacto continuo incrementa el desgaste por abrasión, el consumo de material en bordes/filos es relevante, la reposición sigue siendo frecuente en terrenos abrasivos. Por tanto, se asigna un <i>score</i> de 4, reflejando un coste de desgaste alto pero menor que en el caso del pico.</p>

### Útil de corte tipo Cazo (Score = 3)

El cazo se considera de impacto medio en costes por desgaste. Aunque está sometido a fricción y abrasión, su funcionamiento suele implicar: velocidades y sollicitaciones menos agresivas en el borde activo, componentes estructurales más robustos, menor dependencia de filos de precisión comparado con pico/rozadera. En consecuencia, la tasa de reposición de elementos críticos es, en términos relativos, menor, lo que justifica un *score* de 3.

## 2.-Criterios ambientales.

### 2.1.-Contaminación hidrogeológica

#### Lodos en el frente (Score = 5)

El uso de lodos en el frente se asocia al máximo impacto hidrogeológico debido a que implica una interacción directa entre un fluido de trabajo y el medio poroso en la zona de excavación. Desde un punto de vista hidrogeológico, esto incrementa: La probabilidad de intercambio hidráulico entre la excavación y el acuífero (entrada de agua al sistema o filtración de fluido hacia el terreno). El riesgo de modificación de presiones intersticiales en el entorno inmediato del frente, al trabajar con un fluido cuya presión debe ser controlada para estabilizar el terreno. La posibilidad de colmatación/filtración (formación de “cake”), con alteración de permeabilidades locales, y potencial afección al régimen de flujo. El riesgo de arrastre de finos y de fenómenos asociados a gradientes elevados si el balance hidráulico no está correctamente controlado. En términos comparativos, esta configuración implica mayor necesidad de control hidrogeológico (monitorización piezométrica, balance de volúmenes, control de presiones), por lo que se asigna el valor máximo (5).

#### Lubricación por el tubo (inyección tubo–terreno) (Score = 4)

Esta práctica incrementa la presencia de lodo en el entorno, su impacto hidrogeológico se considera alto pero inferior al caso de lodos en el frente, por las siguientes razones técnicas: La inyección se realiza típicamente en el anillo tubo–terreno, donde el objetivo es crear una película lubricante; el mecanismo dominante es la migración radial limitada desde el contorno del tubo, en lugar de una interacción directa en el frente con control de estabilidad. La operación no está orientada a mantener presiones de sostenimiento del frente, por lo que, comparativamente, el riesgo de inducir variaciones significativas de presiones intersticiales

<b>2.-Criterios ambientales.</b>
<b>2.1.-Contaminacion hidrogeológica</b>
asociadas a estabilidad es menor que en el frente (aunque pueden existir sobrepresiones locales de inyección). El impacto depende del volumen total inyectado, del régimen de inyección (caudal/presión), y de la permeabilidad del terreno: en suelos muy permeables o con fracturación, puede aumentar la probabilidad de migración del lodo. No obstante, en condiciones normales, la zona afectada queda más confinada al entorno del tubo y es más controlable. Por tanto, al existir introducción de lodos al terreno (con potencial de colmatación y afectación a calidad/flujo), pero con un nivel de criticidad hidráulica menor que en el frente, se asigna 4 (alto impacto).

<b>2.-Criterios ambientales.</b>
<b>2.2.-Contaminacion vibratoria</b>
<b>Escudos cerrados (Score = 3)</b>
Los sistemas cerrados se caracterizan por un proceso de excavación y avance generalmente más controlado y estable, con mayor nivel de confinamiento del frente. Sin embargo, incorporan equipos de elevada potencia (cabezal, accionamientos, sistemas de empuje) que generan solicitaciones dinámicas asociadas a: la rotación del cabezal y la interacción herramienta–terreno, variaciones de par y empuje durante el avance, funcionamiento de equipos auxiliares (bombas, elementos rotativos, etc.). Desde el punto de vista vibratorio, el confinamiento tiende a amortiguar la transmisión y a reducir la aparición de picos bruscos, pero la operación continua y la potencia instalada generan un nivel de vibración moderado. Por ello se asigna un <i>score</i> intermedio (3), representativo de un impacto medio.
<b>Sistemas abiertos (Score = 2)</b>
Los sistemas abiertos, en términos generales, tienden a presentar un impacto vibratorio más reducido en comparación con los cerrados debido a que suelen operar con: menor complejidad de equipos de control del frente, menor potencia instalada en sistemas presurizados, mecanismos de excavación con solicitaciones dinámicas menos sostenidas (dependiendo de la herramienta y del terreno), menor exigencia de funcionamiento continuo de equipos auxiliares de alta potencia. En términos comparativos, esto se traduce en una

## 2.-Criterios ambientales.

### 2.2.-Contaminacion vibratoria

menor probabilidad de inducir niveles vibratorios significativos en el entorno y una menor persistencia de vibración. Por este motivo, se asigna un *score* de 2, correspondiente a un impacto bajo.

## 2.-Criterios ambientales.

### 2.3.-Contaminacion acústica

#### Extracción mediante estación de lodos (Score = 4)

La estación de lodos presenta un impacto acústico alto debido a la presencia simultánea de múltiples focos sonoros, entre los que se incluyen: bombas de impulsión y recirculación, equipos de separación sólido-líquido (cribas, ciclones, decantadores), sistemas de agitación y transporte interno, funcionamiento continuo de equipos eléctricos y mecánicos. Estos equipos operan habitualmente de forma prolongada y casi continua, con niveles de potencia sonora elevados y escasa capacidad de parada durante el proceso constructivo. Desde un punto de vista comparativo, el número de fuentes acústicas y la persistencia del ruido incrementan notablemente la probabilidad de afección al entorno. Por este motivo, se asigna un *score* de 4, representativo de un impacto acústico alto, aunque no máximo, al tratarse de equipos generalmente confinados en instalaciones específicas.

#### Extracción mediante tornillo sin fin (Score = 2)

La extracción mediante tornillo sin fin presenta un impacto acústico bajo en términos relativos. Se trata de un sistema mecánico sencillo, con: una única fuente sonora principal, niveles de potencia sonora moderados, funcionamiento más fácilmente encapsulable o aislable acústicamente, menor necesidad de equipos auxiliares adicionales. Además, el régimen de funcionamiento suele ser más estable y con menores picos sonoros que en sistemas complejos de tratamiento. En comparación con la estación de lodos, la afección acústica es significativamente menor, lo que justifica la asignación de un *score* de 2.

<b>2.-Criterios ambientales.</b>
<b>2.4.-Aportacion de CO2</b>
<b>Extracción mediante estación de lodos (Score = 5)</b>
<p>La estación de lodos se valora con el impacto máximo (5) debido a que implica un sistema de extracción y gestión del material excavado con alta intensidad energética, al incorporar, típicamente, varias etapas de proceso en continuo. Los principales contribuyentes al consumo energético (y por tanto al CO<sub>2</sub> asociado) son: bombeo y recirculación de fluidos (demanda energética sostenida), equipos de separación sólido-líquido (hidrociclones, cribas, decantación/centrifugación según configuración), agitadores y sistemas de acondicionamiento del fluido, operación prolongada y simultánea de varios equipos auxiliares. Además, el sistema exige mantener un funcionamiento estable y continuo para garantizar la operatividad del circuito, lo que incrementa el consumo acumulado <math>E</math> por unidad de tiempo de obra. Por este motivo, se asigna 5, representando un aporte de CO<sub>2</sub> muy alto en términos relativos.</p>
<b>Tornillo sin fin (Score = 2)</b>
<p>La extracción mediante tornillo sin fin se valora con un impacto bajo (2) debido a que se trata de un sistema mecánico directo, normalmente con: una única línea de accionamiento principal, menor número de equipos auxiliares, menor potencia instalada total, menor complejidad de tratamiento del material (no requiere separación sólida-líquido). En consecuencia, la energía consumida <math>E</math> es significativamente menor frente a una estación de lodos, lo que reduce proporcionalmente las emisiones asociadas. Por ello se asigna un <i>score</i> de 2, correspondiente a un aporte de CO<sub>2</sub> reducido.</p>

<b>3.-Criterios Sociales</b>
<b>3.1.-Afeccion a usuarios.</b>
<b>Estación de lodos (Score = 4)</b>
<p>La estación de lodos genera una afección elevada a los usuarios debido a la necesidad de implantar una instalación auxiliar de dimensiones significativas, normalmente en superficie, que conlleva: mayor ocupación prolongada del espacio disponible, incremento del tráfico de vehículos pesados asociado a la gestión de residuos y mantenimiento de la planta, generación</p>

<b>3.-Criterios Sociales</b>
3.1.-Afección a usuarios.
<b>Estación de lodos (Score = 4)</b>
simultánea de ruido, vibraciones y actividad continua, mayor complejidad logística y presencia constante de personal y equipos. Desde un punto de vista social, estos factores incrementan la percepción de molestia y la interferencia con los usos habituales del entorno, especialmente en ámbitos urbanos o con alta densidad de usuarios. Por ello, se asigna un <i>score</i> de 4, correspondiente a una afección social alta.
<b>Tornillo sin fin (Score = 3)</b>
La extracción mediante tornillo sin fin presenta una afección social moderada en comparación con la estación de lodos. Se trata de un sistema más compacto, con menor número de equipos auxiliares y menor ocupación superficial, lo que se traduce en: menor interferencia con el espacio público, reducción del tráfico auxiliar asociado, menor percepción visual y operativa de la obra por parte de los usuarios, mayor facilidad para integrar la solución en entornos con restricciones de espacio. Aunque sigue existiendo una afección apreciable durante la ejecución de los trabajos, su magnitud es inferior a la asociada a una estación de lodos, lo que justifica la asignación de un <i>score</i> de 3, representativo de un impacto social medio.

<b>4.-Criterios de seguridad y operacionales</b>
4.1.-Riesgos para los trabajadores
<b>Escudo abierto (Score = 5)</b>
Los escudos abiertos presentan el mayor impacto en seguridad laboral, debido a que implican una exposición más directa de los trabajadores al frente de excavación y al terreno circundante. Desde un punto de vista técnico, esta configuración conlleva: Mayor probabilidad de inestabilidades locales en el frente o en el contorno de excavación. Mayor dependencia de las condiciones geotécnicas reales y de su variabilidad. Necesidad de intervenciones manuales o semimanuales más frecuentes. Menor grado de confinamiento y protección física frente a caídas de material, entradas de agua o fenómenos inesperados. La combinación de estos factores incrementa significativamente el riesgo laboral, justificando la asignación del valor máximo de impacto (5).

#### 4.-Criterios de seguridad y operacionales

##### 4.1.-Riesgos para los trabajadores

###### Escudo cerrado (Score = 3)

Los escudos cerrados presentan un impacto moderado en términos de seguridad para los trabajadores, ya que el proceso constructivo se desarrolla en un entorno confinado y controlado, reduciendo de forma significativa la exposición directa al terreno. Entre los factores que contribuyen a una mayor seguridad relativa se incluyen: Aislamiento del frente mediante sistemas presurizados o de control. Mayor automatización del proceso de excavación. Reducción de la necesidad de presencia humana directa en zonas críticas. Mejores condiciones para el control y monitorización de variables clave (presión, empuje, avance). No obstante, siguen existiendo riesgos inherentes a la operación de maquinaria pesada y a trabajos en espacios confinados, por lo que el impacto no se considera bajo. En consecuencia, se asigna un *score* de 3, representativo de un impacto medio.

#### 4.-Criterios de seguridad y operacionales

##### 4.2.-Riesgos de atascamiento.

###### Escudo cerrado (Score = 5)

Los escudos cerrados presentan un riesgo de atascamiento alto en términos relativos debido a la combinación de tres factores críticos: Mayor superficie de interacción escudo–terreno y mayor dependencia del control de fricción, lo que incrementa la probabilidad de aumentos de empuje requeridos ante cambios locales del terreno. Dependencia del condicionamiento del frente y del medio (presurización, control de presiones, control del material excavado): desviaciones en el balance pueden inducir incrementos súbitos de par/empuje y pérdida de capacidad de avance. Menor accesibilidad directa al frente y mayor complejidad de intervención en caso de incidencia, lo que incrementa la severidad del evento: un bloqueo puede requerir procedimientos de recuperación más complejos, con mayores tiempos de parada y mayores riesgos asociados. Además, en contextos con finos plásticos o materiales susceptibles de adhesión, los sistemas cerrados pueden ser más sensibles a ciertos fenómenos, afectando al rendimiento y aumentando el riesgo de bloqueo. Por esta combinación de probabilidad y criticidad operativa, se asigna el val máximo (5).

<b>4.-Criterios de seguridad y operacionales</b>
4.2.-Riesgos de atascamiento.
<b>Escudo abierto (Score = 3)</b>
Los escudos abiertos presentan un riesgo de atascamiento moderado, inferior al de los sistemas cerrados. Su menor complejidad de control del frente y la mayor capacidad de intervención y adaptación operativa (mayor accesibilidad y posibilidad de corrección de condiciones locales) reduce la severidad del bloqueo y la probabilidad de inmovilización prolongada. No obstante, siguen existiendo riesgos asociados al incremento de fricción, variabilidad del terreno o acumulaciones locales, por lo que el impacto no se considera bajo. Por ello, se asigna un <i>score</i> de 3, coherente con un riesgo de atascamiento medio.

<b>4.-Criterios de seguridad y operacionales</b>
4.3.-Riesgos de atascamiento.
<b>Lodos en frente (Score = 3)</b>
El uso de lodos en el frente se asocia a un impacto moderado (3) porque, desde un punto de vista geotécnico, introduce un mecanismo de estabilización del frente y de control de pérdidas de terreno, reduciendo el riesgo de movimientos del terreno que se transmiten a las infraestructuras. En términos de comportamiento suelo–excavación: El lodo actúa como medio de soporte, ayudando a mantener el equilibrio de presiones en el frente y reduciendo la probabilidad de inestabilidades locales. Al mejorar el control del proceso, tiende a disminuir la dispersión de asentos y la ocurrencia de episodios de pérdida de terreno que son los más críticos para daños en infraestructuras. Aunque el uso de lodos puede introducir otros riesgos
<b>Sin lodos (Score = 5)</b>
La condición sin lodos se valora con impacto muy alto (5) porque implica menor capacidad de control del frente y, por tanto, una mayor probabilidad de pérdidas de terreno, variabilidad del avance y aparición de asentos diferenciales, que son los mecanismos más correlacionados con daños en infraestructuras próximas. La ausencia de un medio de soporte aumenta la dependencia del terreno para mantener la estabilidad, elevando el riesgo de deformaciones no controladas. Se incrementa la probabilidad de colapsos locales, sobreexcavación, vacíos), que generan respuestas del terreno más severas y menos predecibles, con mayor transmisión a estructuras. Desde un enfoque de riesgo y control geotécnico, el escenario sin lodos presenta un potencial de afección superior, justificando el valor máximo (5).

Tabla 59.-Justificación de los scores dados por criterio y subcriterio. Elaboración propia.

5.2.8. *Matriz de score por criterio y alternativa*

Se incluye a continuación una muestra del score dado previo a la aplicación de pesos ponderados.

Nº de alternativa	VARIABLES	CRITERIOS ECONOMICOS					CRITERIOS AMBIENTALES				CRITERIOS SOCIALES	CRITERIOS OPERACIONALES Y DE SEGURIDAD				PUNTAJACION TOTAL CRITERIOS ECONOMICOS	PUNTAJACION TOTAL CRITERIOS AMBIENTALES	PUNTAJACION TOTAL CRITERIOS SOCIALES	PUNTAJACION TOTAL CRITERIOS OPERACIONALES Y DE SEGURIDAD	PUNTAJACION TOTAL
		0,46	0,25	0,04	0,16	0,09	0,56	0,12	0,06	0,26	0,09	0,56	0,26	0,13	0,07					
		COSTE MAQUINA	COSTE ELEMENTOS AUXILIARES	COSTE UTILES DE CORTE	COSTE DE SISTEMA DE EXTRACCION	COSTE DE LODOS	CONTAMINACION HIDROGEOLOGICA	CONTAMINACION ACUSTICA	VIBRACIONES	APORTE DE CO2	AFECCION A USUARIOS	TRABAJADORES	INFRAESTRUCTURAS	ATASCAMIENTO	POZOS DE ENTRADA/SALIDA					
1	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER ESTACION NO COMPACTA,ESPACIO PARA DISPONER PLANTA DE SEPARACION DE LODOS	5,00	4,00	0	5,00	3,00	3,00	4,00	5,00	4,00	4,00	5,00	5	5,00	3,00	17,00	16,00	4,00	13,00	50,00
2	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER ESTACION NO COMPACTA,EXTRACCION DE MATERIAL MEDIANTE TORNILLO SIN-FIN-CINTAS O VAGONETAS	5,00	4,00	0	3,00	3,00	3,00	2,00	5,00	2,00	2,00	5,00	5	5,00	3,00	15,00	12,00	2,00	13,00	42,00
3	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,SE DEBE RECURRIR A ESTACION DE EMPUJE COMPACTA,ESPACIO PARA DISPONER PLANTA DE SEPARACION DE LODOS	5,00	4,00	0	5,00	3,00	3,00	4,00	5,00	4,00	4,00	5,00	5	5,00	4,00	17,00	16,00	4,00	14,00	51,00
4	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,SE DEBE RECURRIR A ESTACION DE EMPUJE COMPACTA,EXTRACCION DE MATERIAL MEDIANTE TORNILLO SIN-FIN-CINTAS O VAGONETAS	5,00	4,00	0	3,00	3,00	3,00	2,00	5,00	2,00	2,00	5,00	5	5,00	4,00	15,00	12,00	2,00	14,00	43,00
5	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],LUBRICACION EN TUBO,SE ACONSEJA LUBRICAR FRENTE,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER ESTACION NO COMPACTA,ESPACIO PARA DISPONER PLANTA DE SEPARACION DE LODOS	5,00	4,00	0	5,00	3,00	3,00	4,00	5,00	4,00	4,00	5,00	3,00	5,00	3,00	17,00	16,00	4,00	16,00	53,00
6	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],LUBRICACION EN TUBO,SE ACONSEJA LUBRICAR FRENTE,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER ESTACION NO COMPACTA,EXTRACCION DE MATERIAL MEDIANTE TORNILLO SIN-FIN-CINTAS O VAGONETAS	5,00	4,00	0	3,00	3,00	3,00	2,00	5,00	2,00	2,00	5,00	3,00	5,00	3,00	15,00	12,00	2,00	16,00	45,00
7	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],LUBRICACION EN TUBO,SE ACONSEJA LUBRICAR FRENTE,SE DEBE RECURRIR A ESTACION DE EMPUJE COMPACTA,ESPACIO PARA DISPONER PLANTA DE SEPARACION DE LODOS	5,00	4,00	0	5,00	3,00	3,00	4,00	5,00	4,00	4,00	5,00	3,00	5,00	4,00	17,00	16,00	4,00	17,00	54,00
8	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],LUBRICACION EN TUBO,SE ACONSEJA LUBRICAR FRENTE,SE DEBE RECURRIR A ESTACION DE EMPUJE COMPACTA,EXTRACCION DE MATERIAL MEDIANTE TORNILLO SIN-FIN-CINTAS O VAGONETAS	5,00	4,00	0	3,00	3,00	3,00	2,00	5,00	2,00	2,00	5,00	3,00	5,00	4,00	15,00	12,00	2,00	17,00	46,00
9	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER ESTACION NO COMPACTA,ESPACIO PARA DISPONER PLANTA DE SEPARACION DE LODOS	5,00	4,00	0	5,00	1,00	1,00	4,00	5,00	4,00	4,00	5,00	5	5,00	3,00	15,00	14,00	4,00	13,00	46,00
10	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER ESTACION NO COMPACTA,EXTRACCION DE MATERIAL MEDIANTE TORNILLO SIN-FIN-CINTAS O VAGONETAS	5,00	4,00	0	3,00	1,00	1,00	2,00	5,00	2,00	2,00	5,00	5	5,00	3,00	13,00	10,00	2,00	13,00	38,00
11	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,SE DEBE RECURRIR A ESTACION DE EMPUJE COMPACTA,ESPACIO PARA DISPONER PLANTA DE SEPARACION DE LODOS	5,00	4,00	0	5,00	1,00	1,00	4,00	5,00	4,00	4,00	5,00	5	5,00	4,00	15,00	14,00	4,00	14,00	47,00
12	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,SE DEBE RECURRIR A ESTACION DE EMPUJE COMPACTA,EXTRACCION DE MATERIAL MEDIANTE TORNILLO SIN-FIN-CINTAS O VAGONETAS	5,00	4,00	0	3,00	1,00	1,00	2,00	5,00	2,00	2,00	5,00	5	5,00	4,00	13,00	10,00	2,00	14,00	39,00
13	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,SE ACONSEJA LUBRICAR FRENTE,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER ESTACION NO COMPACTA,ESPACIO PARA DISPONER PLANTA DE SEPARACION DE LODOS	5,00	4,00	0	5,00	4,00	4,00	4,00	5,00	4,00	4,00	5,00	3,00	5,00	3,00	18,00	17,00	4,00	16,00	55,00

Tabla 60. Muestra de matriz de score por criterio y alternativa. Elaboración propia.

**\*\*La tabla adjunta recoge una muestra a modo ilustrativa de 13 de las 512 alternativas que componen la matriz multicriterio.**

5.2.9. *Matriz de pesos ponderados*

Se incluye a continuación una muestra de la matriz multicriterio ponderada.

Nº de alternativa	VARIABLES	CRITERIOS ECONOMICOS					CRITERIOS AMBIENTALES				CRITERIOS SOCIALES	CRITERIOS OPERACIONALES Y DE SEGURIDAD				PUNTAJACION TOTAL CRITERIOS ECONOMICOS=1,1 pts	PUNTAJACION TOTAL CRITERIOS AMBIENTALES=0,55 pts	PUNTAJACION TOTAL CRITERIOS SOCIALES=0,46 pts	PUNTAJACION TOTAL CRITERIOS OPERACIONALES Y DE SEGURIDAD=2,97 pts	PUNTAJACION TOTAL=5,08 pts
		0,51	0,28	0,22	0,18	0,10	0,31	0,06	0,03	0,14	0,09	1,63	0,76	0,39	0,19					
		COSTE MAQUINA	COSTE ELEMENTOS AUXILIARES	COSTE UTILES DE CORTE	COSTE DE SISTEMA DE EXTRACCION	COSTE DE LODOS	CONTAMINACION HIDROGEOLOGICA	CONTAMINACION ACUSTICA	VIBRACIONES	APORTE DE CO2	AFECCION A USUARIOS	TRABAJADORES	INFRAESTRUCTURAS	ATASCAMIENTO	POZOS DE ENTRADA/SALIDA					
1	Balance Hidraulico.Sistema Slurry,LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [US],LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER ESTACION NO COMPACTA,ESPACIO PARA DISPONER PLANTA DE SEPARACION DE LODOS	0,51	0,22	0,00	0,18	0,06	0,19	0,05	0,03	0,12	0,37	1,63	0,76	0,39	0,12	0,96	0,38	0,37	2,90	4,61
2	Balance Hidraulico.Sistema Slurry,LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [US],LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER ESTACION NO COMPACTA,EXTRACCION DE MATERIAL MEDIANTE TORNILLO SIN-FIN-CINTAS O VAGONETAS	0,51	0,22	0,00	0,11	0,06	0,19	0,03	0,03	0,06	0,18	1,63	0,76	0,39	0,12	0,89	0,30	0,18	2,90	4,27
3	Balance Hidraulico.Sistema Slurry,LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [US],LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,SE DEBE RECURRIR A ESTACION DE EMPUJE COMPACTA,ESPACIO PARA DISPONER PLANTA DE SEPARACION DE LODOS	0,51	0,22	0,00	0,18	0,06	0,19	0,05	0,03	0,12	0,37	1,63	0,76	0,39	0,16	0,96	0,38	0,37	2,94	4,65
4	Balance Hidraulico.Sistema Slurry,LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [US],LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,SE DEBE RECURRIR A ESTACION DE EMPUJE COMPACTA,EXTRACCION DE MATERIAL MEDIANTE TORNILLO SIN-FIN-CINTAS O VAGONETAS	0,51	0,22	0,00	0,11	0,06	0,19	0,03	0,03	0,06	0,18	1,63	0,76	0,39	0,16	0,89	0,30	0,18	2,94	4,31
5	Balance Hidraulico.Sistema Slurry,LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [US],LUBRICACION EN TUBO,SE ACONSEJA LUBRICAR FRENTE,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER ESTACION NO COMPACTA,ESPACIO PARA DISPONER PLANTA DE SEPARACION DE LODOS	0,51	0,22	0,00	0,18	0,06	0,19	0,05	0,03	0,12	0,37	1,63	0,46	0,39	0,12	0,96	0,38	0,37	2,59	4,31
6	Balance Hidraulico.Sistema Slurry,LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [US],LUBRICACION EN TUBO,SE ACONSEJA LUBRICAR FRENTE,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER ESTACION NO COMPACTA,EXTRACCION DE MATERIAL MEDIANTE TORNILLO SIN-FIN-CINTAS O VAGONETAS	0,51	0,22	0,00	0,11	0,06	0,19	0,03	0,03	0,06	0,18	1,63	0,46	0,39	0,12	0,89	0,30	0,18	2,59	3,97
7	Balance Hidraulico.Sistema Slurry,LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [US],LUBRICACION EN TUBO,SE ACONSEJA LUBRICAR FRENTE,SE DEBE RECURRIR A ESTACION DE EMPUJE COMPACTA,ESPACIO PARA DISPONER PLANTA DE SEPARACION DE LODOS	0,51	0,22	0,00	0,18	0,06	0,19	0,05	0,03	0,12	0,37	1,63	0,46	0,39	0,16	0,96	0,38	0,37	2,63	4,35
8	Balance Hidraulico.Sistema Slurry,LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [US],LUBRICACION EN TUBO,SE ACONSEJA LUBRICAR FRENTE,SE DEBE RECURRIR A ESTACION DE EMPUJE COMPACTA,EXTRACCION DE MATERIAL MEDIANTE TORNILLO SIN-FIN-CINTAS O VAGONETAS	0,51	0,22	0,00	0,11	0,06	0,19	0,03	0,03	0,06	0,18	1,63	0,46	0,39	0,16	0,89	0,30	0,18	2,63	4,01
9	Balance Hidraulico.Sistema Slurry,LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [US],NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER ESTACION NO COMPACTA,ESPACIO PARA DISPONER PLANTA DE SEPARACION DE LODOS	0,51	0,22	0,00	0,18	0,02	0,06	0,05	0,03	0,12	0,37	1,63	0,76	0,39	0,12	0,92	0,26	0,37	2,90	4,45
10	Balance Hidraulico.Sistema Slurry,LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [US],NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER ESTACION NO COMPACTA,EXTRACCION DE MATERIAL MEDIANTE TORNILLO SIN-FIN-CINTAS O VAGONETAS	0,51	0,22	0,00	0,11	0,02	0,06	0,03	0,03	0,06	0,18	1,63	0,76	0,39	0,12	0,85	0,18	0,18	2,90	4,11
11	Balance Hidraulico.Sistema Slurry,LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [US],NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,SE DEBE RECURRIR A ESTACION DE EMPUJE COMPACTA,ESPACIO PARA DISPONER PLANTA DE SEPARACION DE LODOS	0,51	0,22	0,00	0,18	0,02	0,06	0,05	0,03	0,12	0,37	1,63	0,76	0,39	0,16	0,92	0,26	0,37	2,94	4,49
12	Balance Hidraulico.Sistema Slurry,LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [US],NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,SE DEBE RECURRIR A ESTACION DE EMPUJE COMPACTA,EXTRACCION DE MATERIAL MEDIANTE TORNILLO SIN-FIN-CINTAS O VAGONETAS	0,51	0,22	0,00	0,11	0,02	0,06	0,03	0,03	0,06	0,18	1,63	0,76	0,39	0,16	0,85	0,18	0,18	2,94	4,15
13	Balance Hidraulico.Sistema Slurry,LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [US],NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,SE ACONSEJA LUBRICAR FRENTE,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER ESTACION NO COMPACTA,ESPACIO PARA DISPONER PLANTA DE SEPARACION DE LODOS	0,51	0,22	0,00	0,18	0,08	0,25	0,05	0,03	0,12	0,37	1,63	0,46	0,39	0,12	0,98	0,45	0,37	2,59	4,39
14	Balance Hidraulico.Sistema Slurry,LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [US],NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,SE ACONSEJA LUBRICAR FRENTE,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER ESTACION NO COMPACTA,EXTRACCION DE MATERIAL MEDIANTE TORNILLO SIN-FIN-CINTAS O VAGONETAS	0,51	0,22	0,00	0,11	0,08	0,25	0,03	0,03	0,06	0,18	1,63	0,46	0,39	0,12	0,91	0,36	0,18	2,59	4,05

Tabla 61. Muestra de matriz multicriterio ponderada. Elaboración propia.

**\*\*La tabla adjunta recoge una muestra a modo ilustrativa de 14 de las 512 alternativas que componen la matriz multicriterio.**

5.2.10. *Puntuación global por alternativa y porcentaje de decisión del criterio.*

Nº de alternativa	VARIABLES	NOTA COMBINACION N	% CRITERIOS ECONOMICOS	% CRITERIOS AMBIENTALES	% CRITERIOS SOCIALES	% CRITERIOS OPERACIONALES Y DE SEGURIDAD	% PUNTUACION TOTAL
1	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER ESTACION NO COMPACTA,ESPACIO PARA DISPONER PLANTA DE SEPARACION DE LODOS	9,07	20,85%	8,33%	7,98%	62,85%	100,00%
2	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER ESTACION NO COMPACTA,EXTRACCION DE MATERIAL MEDIANTE TORNILLO SIN-FIN-CINTAS O VAGONETAS	8,40	20,85%	7,02%	4,31%	67,82%	100,00%
3	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,SE DEBE RECURRIR A ESTACION DE EMPUJE COMPACTA,ESPACIO PARA DISPONER PLANTA DE SEPARACION DE LODOS	9,14	20,67%	8,26%	7,91%	63,16%	100,00%
4	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,SE DEBE RECURRIR A ESTACION DE EMPUJE COMPACTA,EXTRACCION DE MATERIAL MEDIANTE TORNILLO SIN-FIN-CINTAS O VAGONETAS	8,48	20,66%	6,96%	4,27%	68,11%	100,00%
5	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],LUBRICACION EN TUBO,SE ACONSEJA LUBRICAR FRENTE,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER ESTACION NO COMPACTA,ESPACIO PARA DISPONER PLANTA DE SEPARACION DE LODOS	8,47	22,32%	8,92%	8,54%	60,22%	100,00%
6	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],LUBRICACION EN TUBO,SE ACONSEJA LUBRICAR FRENTE,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER ESTACION NO COMPACTA,EXTRACCION DE MATERIAL MEDIANTE TORNILLO SIN-FIN-CINTAS O VAGONETAS	7,80	22,45%	7,56%	4,64%	65,35%	100,00%
7	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],LUBRICACION EN TUBO,SE ACONSEJA LUBRICAR FRENTE,SE DEBE RECURRIR A ESTACION DE EMPUJE COMPACTA,ESPACIO PARA DISPONER PLANTA DE SEPARACION DE LODOS	8,55	22,12%	8,84%	8,47%	60,58%	100,00%
8	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],LUBRICACION EN TUBO,SE ACONSEJA LUBRICAR FRENTE,SE DEBE RECURRIR A ESTACION DE EMPUJE COMPACTA,EXTRACCION DE MATERIAL MEDIANTE TORNILLO SIN-FIN-CINTAS O VAGONETAS	7,88	22,23%	7,49%	4,59%	65,69%	100,00%
9	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER ESTACION NO COMPACTA,ESPACIO PARA DISPONER PLANTA DE SEPARACION DE LODOS	8,75	20,72%	5,84%	8,27%	65,16%	100,00%
10	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER ESTACION NO COMPACTA,EXTRACCION DE MATERIAL MEDIANTE TORNILLO SIN-FIN-CINTAS O VAGONETAS	8,08	20,72%	4,28%	4,48%	70,52%	100,00%
11	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,SE DEBE RECURRIR A ESTACION DE EMPUJE COMPACTA,ESPACIO PARA DISPONER PLANTA DE SEPARACION DE LODOS	8,82	20,54%	5,79%	8,20%	65,46%	100,00%
12	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,SE DEBE RECURRIR A ESTACION DE EMPUJE COMPACTA,EXTRACCION DE MATERIAL MEDIANTE TORNILLO SIN-FIN-CINTAS O VAGONETAS	8,16	20,52%	4,24%	4,44%	70,80%	100,00%
13	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,SE ACONSEJA LUBRICAR FRENTE,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER ESTACION NO COMPACTA,ESPACIO PARA DISPONER PLANTA DE SEPARACION DE LODOS	8,63	22,36%	10,16%	8,38%	59,10%	100,00%

Tabla 62. Muestra de puntuación global por alternativa y porcentaje de decisión del criterio. Elaboración propia.

**\*\*La tabla adjunta recoge una muestra a modo ilustrativa de 12 de las 512 alternativas que componen la matriz multicriterio.**

### *5.3. Creación de una herramienta de ayuda a la decisión en la elección de la tecnología de microtunelación con Power Bi.*

Tras profundizar en el estado del arte de las tecnologías de microtunelación, analizando en detalle su funcionamiento, ámbitos de aplicación y condicionantes técnicos, se ha identificado una carencia significativa en cuanto a herramientas estructuradas de apoyo a la toma de decisiones tecnológicas. Si bien existe un amplio conocimiento técnico y un elevado know-how asociado a estas técnicas, la selección de la solución más adecuada suele apoyarse en procesos poco sistematizados o excesivamente dependientes de criterios parciales, sin una integración clara de los distintos factores que intervienen en la decisión.

Con el objetivo de dar respuesta a esta carencia, se han elaborado una serie de árboles lógicos orientados a la selección tecnológica desde un punto de vista estrictamente técnico, que permiten identificar, en función de los condicionantes del proyecto, las alternativas de microtunelación técnicamente viables. No obstante, la elección final de una tecnología no puede basarse únicamente en criterios técnicos, sino que debe considerar de forma complementaria aspectos económicos, ambientales, sociales y de seguridad y operación.

Para ello, se ha desarrollado una matriz multicriterio que permite evaluar de manera estructurada el impacto de estos aspectos sobre las alternativas previamente seleccionadas, integrando los distintos criterios y subcriterios en un modelo coherente de apoyo a la decisión. La combinación de los árboles lógicos y la matriz multicriterio constituye así un marco metodológico completo que aborda el problema de decisión desde una perspectiva global.

Como paso adicional orientado a mejorar la accesibilidad, aplicabilidad práctica y transferencia de conocimiento al sector, se ha procedido a la digitalización de esta metodología mediante el desarrollo de una herramienta de ayuda a la decisión tecnológica implementada en el software Power BI. Esta herramienta permite integrar de forma interactiva los resultados de los árboles lógicos y de la matriz multicriterio, facilitando la comparación de alternativas, la visualización de resultados y el análisis de la influencia de los distintos criterios en la decisión final, contribuyendo así a una toma de decisiones más objetiva, transparente y reproducible en proyectos de microtunelación.

La herramienta desarrollada debe entenderse como un instrumento de apoyo a la toma de decisiones, cuyo objetivo es estructurar, sistematizar y facilitar el análisis de las distintas alternativas tecnológicas en función de los criterios considerados. En ningún caso pretende sustituir al decisor, sino complementar su labor proporcionando una base analítica coherente y transparente sobre la

que fundamentar la elección final. La decisión última corresponde siempre al responsable técnico, que debe interpretar los resultados obtenidos a la luz de su experiencia, del contexto específico del proyecto y de aquellos condicionantes particulares que no puedan ser plenamente capturados por el modelo. De este modo, la herramienta actúa como un soporte objetivo para la reflexión y comparación, reforzando la calidad del proceso de decisión sin reemplazar el criterio profesional.

### 5.3.1. Implementación de la herramienta

La herramienta de ayuda a la decisión desarrollada se ha implementado utilizando el software Power BI, aprovechando sus capacidades de integración de datos, modelado analítico y visualización interactiva para trasladar la metodología definida a un entorno digital accesible y operativo. Power BI actúa como plataforma de soporte que permite estructurar y procesar la información procedente de los árboles lógicos de selección tecnológica y de la matriz multicriterio, facilitando su explotación de manera coherente y sistemática.

Desde el punto de vista funcional, Power BI permite centralizar los datos de entrada, correspondientes a los condicionantes del proyecto, los pesos de los criterios obtenidos mediante el método AHP y las puntuaciones asignadas a cada alternativa. A partir de esta información, la herramienta calcula de forma automatizada los *scores* parciales y globales de las alternativas, garantizando la consistencia en la aplicación de los pesos y evitando errores asociados a procesos manuales.

Asimismo, el uso de Power BI proporciona un entorno dinámico e interactivo, en el que el usuario puede explorar los resultados del modelo, comparar alternativas y analizar la contribución de cada criterio y subcriterio al resultado final. La representación gráfica de los resultados facilita la interpretación del proceso de decisión, permitiendo identificar de forma inmediata los factores que condicionan la elección tecnológica y evaluar el efecto de distintas combinaciones de criterios.

Desde el punto de vista de su implantación y transferencia al sector, la elección de Power BI como plataforma de desarrollo aporta un valor añadido significativo, al tratarse de un software ampliamente extendido y conocido en el ámbito de la ingeniería y la consultoría técnica. Esta circunstancia permite que la herramienta pueda ser escalada, adaptada o ampliada fácilmente por cualquier usuario que así lo desee, sin requerir conocimientos avanzados de programación ni el uso de entornos específicos de desarrollo. La familiaridad de un elevado porcentaje de profesionales del sector con Power BI reduce de forma notable la barrera de entrada para la utilización y evolución futura de la herramienta.

Asimismo, la implementación en Power BI posibilita la publicación de la aplicación en entorno web, permitiendo su acceso a través de un navegador sin necesidad de que el usuario disponga de una licencia del software de escritorio. Esta característica convierte la herramienta en un recurso prácticamente libre y abierto, facilitando su difusión y utilización por parte de un público amplio, incluyendo técnicos, proyectistas, estudiantes y otros agentes interesados en la toma de decisiones tecnológicas en microtunelación.

La combinación de una plataforma ampliamente disponible, una interfaz intuitiva y la posibilidad de acceso web refuerza el carácter práctico, reutilizable y replicable de la herramienta, favoreciendo su aplicación en contextos reales y su potencial evolución futura. De este modo, la digitalización de la metodología no solo mejora la accesibilidad a los resultados, sino que contribuye activamente a la democratización del proceso de toma de decisiones, alineándose con el objetivo de proporcionar un apoyo estructurado, transparente y fácilmente transferible al conjunto del sector.

### **5.3.2. Estructura de datos del modelo**

La herramienta de ayuda a la decisión desarrollada se apoya en un modelo de datos tabular implementado en Power BI, diseñado para integrar de forma coherente los resultados de los árboles lógicos de selección tecnológica y de la matriz multicriterio basada en el método AHP. La estructura del modelo responde a un enfoque jerárquico y modular, que permite representar de manera explícita las distintas fases del proceso de decisión, desde la selección técnica inicial hasta la obtención de una puntuación global de las alternativas.

El modelo se articula en torno a un identificador común de alternativa, que actúa como clave lógica y permite relacionar las distintas tablas de evaluación, ponderación y resultados, garantizando la trazabilidad completa del proceso.

#### **1.-Tablas asociadas a la selección técnica (árboles lógicos)**

La fase de selección técnica se apoya fundamentalmente en la tabla Combinaciones, que constituye el nexo entre los condicionantes del proyecto y las configuraciones tecnológicas resultantes. Esta tabla recoge las distintas combinaciones o alternativas tecnológicas generadas a partir de los árboles lógicos, incorporando tanto los parámetros característicos de cada configuración como los aspectos técnicos a considerar durante su ejecución. La tabla Combinaciones es la principal fuente de información de la hoja *APP Selección tecnológica*, permitiendo que los condicionantes introducidos por el usuario actúen como filtros sobre las alternativas viables, y proporcionando una descripción técnica estructurada de la solución recomendada y de las alternativas posibles.

Tabla: Combinaciones (6144 filas)

TIPO DE ESCUDC	PRESION	NF	DN	ESTABILIDA	TIPO DE SUELO	RMR	PLASTICIDAD	GRANULOMETRIA	ALIENACION	VISUAL	LONGITUD	FRICCION	ASIENOS	ESPACIO POZO	ESPACIO PLAN
ABIERTO	NO	SI	>800mm	ALTA	ROCA DURA	>80	**	**	RECTA	SI	>120 m	ALTA	SI	SI	SI
ABIERTO	NO	SI	>800mm	ALTA	ROCA DURA	>80	**	**	RECTA	SI	>120 m	ALTA	SI	SI	NO
ABIERTO	NO	SI	>800mm	ALTA	ROCA DURA	>80	**	**	RECTA	SI	>120 m	ALTA	SI	NO	SI
ABIERTO	NO	SI	>800mm	ALTA	ROCA DURA	>80	**	**	RECTA	SI	>120 m	ALTA	SI	NO	NO
ABIERTO	NO	SI	>800mm	ALTA	ROCA DURA	>80	**	**	RECTA	SI	>120 m	BAJA	SI	SI	SI
ABIERTO	NO	SI	>800mm	ALTA	ROCA DURA	>80	**	**	RECTA	SI	>120 m	BAJA	SI	SI	NO
ABIERTO	NO	SI	>800mm	ALTA	ROCA DURA	>80	**	**	RECTA	SI	>120 m	BAJA	SI	NO	SI
ABIERTO	NO	SI	>800mm	ALTA	ROCA DURA	>80	**	**	RECTA	SI	>120 m	BAJA	SI	NO	NO
ABIERTO	NO	SI	>800mm	ALTA	ROCA DURA	>80	**	**	RECTA	SI	<120 m	ALTA	SI	SI	SI
ABIERTO	NO	SI	>800mm	ALTA	ROCA DURA	>80	**	**	RECTA	SI	<120 m	ALTA	SI	SI	NO
ABIERTO	NO	SI	>800mm	ALTA	ROCA DURA	>80	**	**	RECTA	SI	<120 m	ALTA	SI	NO	SI
ABIERTO	NO	SI	>800mm	ALTA	ROCA DURA	>80	**	**	RECTA	SI	<120 m	ALTA	SI	NO	NO
ABIERTO	NO	SI	>800mm	ALTA	ROCA DURA	>80	**	**	RECTA	SI	<120 m	BAJA	SI	SI	SI
ABIERTO	NO	SI	>800mm	ALTA	ROCA DURA	>80	**	**	RECTA	SI	<120 m	BAJA	SI	SI	NO
ABIERTO	NO	SI	>800mm	ALTA	ROCA DURA	>80	**	**	RECTA	SI	<120 m	BAJA	SI	NO	SI
ABIERTO	NO	SI	>800mm	ALTA	ROCA DURA	>80	**	**	RECTA	SI	<120 m	BAJA	SI	NO	NO
ABIERTO	NO	SI	>800mm	ALTA	ROCA DURA	>80	**	**	RECTA	NO	>120 m	ALTA	SI	SI	SI
ABIERTO	NO	SI	>800mm	ALTA	ROCA DURA	>80	**	**	RECTA	NO	>120 m	ALTA	SI	NO	SI
ABIERTO	NO	SI	>800mm	ALTA	ROCA DURA	>80	**	**	RECTA	NO	>120 m	ALTA	SI	NO	NO
ABIERTO	NO	SI	>800mm	ALTA	ROCA DURA	>80	**	**	RECTA	NO	>120 m	BAJA	SI	SI	SI
ABIERTO	NO	SI	>800mm	ALTA	ROCA DURA	>80	**	**	RECTA	NO	>120 m	BAJA	SI	SI	NO
ABIERTO	NO	SI	>800mm	ALTA	ROCA DURA	>80	**	**	RECTA	NO	>120 m	BAJA	SI	NO	SI
ABIERTO	NO	SI	>800mm	ALTA	ROCA DURA	>80	**	**	RECTA	NO	>120 m	BAJA	SI	NO	NO
ABIERTO	NO	SI	>800mm	ALTA	ROCA DURA	>80	**	**	RECTA	NO	<120 m	ALTA	SI	SI	SI
ABIERTO	NO	SI	>800mm	ALTA	ROCA DURA	>80	**	**	RECTA	NO	<120 m	ALTA	SI	SI	NO
ABIERTO	NO	SI	>800mm	ALTA	ROCA DURA	>80	**	**	RECTA	NO	<120 m	ALTA	SI	NO	SI
ABIERTO	NO	SI	>800mm	ALTA	ROCA DURA	>80	**	**	RECTA	NO	<120 m	ALTA	SI	NO	NO
ABIERTO	NO	SI	>800mm	ALTA	ROCA DURA	>80	**	**	RECTA	NO	<120 m	BAJA	SI	SI	SI
ABIERTO	NO	SI	>800mm	ALTA	ROCA DURA	>80	**	**	RECTA	NO	<120 m	BAJA	SI	SI	NO
ABIERTO	NO	SI	>800mm	ALTA	ROCA DURA	>80	**	**	RECTA	NO	<120 m	BAJA	SI	NO	SI
ABIERTO	NO	SI	>800mm	ALTA	ROCA DURA	>80	**	**	RECTA	NO	<120 m	BAJA	SI	NO	NO
ABIERTO	NO	SI	>800mm	ALTA	ROCA DURA	>80	**	**	CURVA	SI	>120 m	ALTA	SI	SI	SI
ABIERTO	NO	SI	>800mm	ALTA	ROCA DURA	>80	**	**	CURVA	SI	>120 m	ALTA	SI	SI	NO
ABIERTO	NO	SI	>800mm	ALTA	ROCA DURA	>80	**	**	CURVA	SI	>120 m	ALTA	SI	NO	SI
ABIERTO	NO	SI	>800mm	ALTA	ROCA DURA	>80	**	**	CURVA	SI	>120 m	ALTA	SI	NO	NO
ABIERTO	NO	SI	>800mm	ALTA	ROCA DURA	>80	**	**	CURVA	SI	>120 m	BAJA	SI	SI	SI

Figura 125 Pantallazo del software Power bi con tablas asociadas para la elección de la tecnología principal. Fuente propia.

## 2.-Tablas de ponderación del método AHP

El modelo incorpora de forma explícita los resultados del proceso de ponderación mediante el método AHP a través de un conjunto específico de tablas de pesos.

La tabla Pesos principales almacena los pesos normalizados correspondientes a los criterios principales del modelo (económicos, ambientales, sociales y de seguridad y operación), obtenidos a partir del vector de prioridades derivado de las comparaciones por pares y del análisis de consistencia.

De forma complementaria, se incluyen tablas independientes para los pesos de los criterios secundarios:

- Pesos Secundarios Económicos.
- Pesos Secundarios Ambientales.
- Pesos Secundarios Sociales.
- Pesos Secundarios Seguridad y Operación.

Estas tablas recogen los pesos normalizados de los subcriterios asociados a cada criterio principal y se emplean como parámetros de ponderación en la agregación de los *scores*. Su separación en tablas específicas permite mantener una estructura clara del modelo jerárquico y facilita la modificación o actualización de las ponderaciones sin alterar la estructura global del sistema.

## 3.-Tablas de evaluación multicriterio (scoring).

La evaluación de las alternativas se realiza mediante un conjunto de tablas de tipo Multicriterio Pivote Score, cada una asociada a un criterio principal. Estas tablas contienen las puntuaciones asignadas a cada alternativa en función de los distintos subcriterios, de acuerdo con las escalas de valoración definidas.

En particular, se incluyen tablas diferenciadas para la evaluación: Económica, Ambiental, Social, Seguridad y operación.

Cada una de estas tablas presenta una estructura homogénea basada en el identificador de alternativa, la puntuación asignada (*score*) y el tipo de criterio o subcriterio evaluado. Estas tablas actúan como tablas de hechos, ya que contienen los valores cuantitativos que posteriormente se ponderan y agregan.

## 2.-Tablas de ponderación del método AHP

El modelo incorpora de forma explícita los resultados del proceso de ponderación mediante el método AHP a través de un conjunto específico de tablas de pesos.

La tabla Pesos principales almacena los pesos normalizados correspondientes a los criterios principales del modelo (económicos, ambientales, sociales y de seguridad y operación), obtenidos a partir del vector de prioridades derivado de las comparaciones por pares y del análisis de consistencia.

De forma complementaria, se incluyen tablas independientes para los pesos de los criterios secundarios: Pesos secundarios económicos, pesos secundarios ambientales, pesos secundarios sociales, y pesos secundarios de seguridad y operación.

Estas tablas recogen los pesos normalizados de los subcriterios asociados a cada criterio principal y se emplean como parámetros de ponderación en la agregación de los *scores*. Su separación en tablas específicas permite mantener una estructura clara del modelo jerárquico y facilita la modificación o actualización de las ponderaciones sin alterar la estructura global del sistema.

The screenshot shows the Power BI interface with a table of secondary weights for economic criteria. The table has two columns: 'Column1' and 'Column2'. The data is as follows:

Column1	Column2
MAQUINA	0,46
ELEMENTOS AUX	0,25
UTILES CORTE	0,04
SIST. EXTRACCION	0,16
LODOS	0,09

The interface also shows a ribbon with 'Herramientas de tablas' and a 'Datos' pane on the right. The 'Datos' pane lists various data sources, including 'Pesos secundarios Economicos' which is currently selected.

Figura 126.- Pantallazo de software Power bi con tablas asociadas para el establecimiento de los pesos por criterio secundario. Fuente propia.

The screenshot shows the Microsoft Power BI interface. At the top, the title bar reads 'Aplicación microtunelacion prueba' and 'Guardado por última vez: Hoy a las 22:16'. The user is identified as 'jonatan alvarez lopez (Power BI)'. The ribbon includes 'Archivo', 'Inicio', 'Ayuda', and 'Herramientas de tablas'. The 'Herramientas de tablas' ribbon has sections for 'Relaciones', 'Cálculos', and 'Calendarios'. The 'Cálculos' section is active, showing options like 'Nueva medida', 'Medida rápida', 'Nueva columna', and 'Nueva tabla'. Below the ribbon, a table is displayed with the following data:

Column1	Column2
PESOS ECONOMICOS	0,22
PESOS AMBIENTALES	0,11
PESOS SOCIALES	0,092
PESOS OP Y SEG	0,579

On the right side, the 'Datos' pane shows a search bar and a list of data sources. The source 'Pesos principales' is selected and highlighted. Other sources include 'Combinaciones', 'Multicriterio', and various 'Multicriterio Pivote' tables.

Figura 127. Pantallazo de software Power bi con tablas asociadas para el establecimiento de los pesos por criterio principal. Fuente propia.

### 3.-Tablas de evaluación multicriterio (scoring).

La evaluación de las alternativas se realiza mediante un conjunto de tablas de tipo Multicriterio Pivote Score, cada una asociada a un criterio principal. Estas tablas contienen las puntuaciones asignadas a cada alternativa en función de los distintos subcriterios, de acuerdo con las escalas de valoración definidas.

En particular, se incluyen tablas diferenciadas para la evaluación: Económica, Ambiental, Social, Seguridad y operación.

Cada una de estas tablas presenta una estructura homogénea basada en el identificador de alternativa, la puntuación asignada (*score*) y el tipo de criterio o subcriterio evaluado. Estas tablas actúan como tablas de hechos, ya que contienen los valores cuantitativos que posteriormente se ponderan y agregan

Nº de alternativa	VARIABLES	Tipo de criterio de seguridad y operacion	Score
65	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,POZO DE ENTRA	TRABAJADORES	3
66	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,POZO DE ENTRA	TRABAJADORES	3
67	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,SE DEBE RECURR	TRABAJADORES	3
68	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,SE DEBE RECURR	TRABAJADORES	3
69	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],LUBRICACION EN TUBO,ESTUDIO ESPECIFICO DE VIABILIDAD DE AS	TRABAJADORES	3
70	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],LUBRICACION EN TUBO,ESTUDIO ESPECIFICO DE VIABILIDAD DE AS	TRABAJADORES	3
71	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],LUBRICACION EN TUBO,ESTUDIO ESPECIFICO DE VIABILIDAD DE AS	TRABAJADORES	3
72	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],LUBRICACION EN TUBO,ESTUDIO ESPECIFICO DE VIABILIDAD DE AS	TRABAJADORES	3
73	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,PO	TRABAJADORES	3
74	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,PO	TRABAJADORES	3
75	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,SE	TRABAJADORES	3
76	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,SE	TRABAJADORES	3
77	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,ESTUDIO ESPECIFICO DE VIA	TRABAJADORES	3
78	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,ESTUDIO ESPECIFICO DE VIA	TRABAJADORES	3
79	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,ESTUDIO ESPECIFICO DE VIA	TRABAJADORES	3
80	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,ESTUDIO ESPECIFICO DE VIA	TRABAJADORES	3
81	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING,LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER ESTACION NO COMPACT	TRABAJADORES	3
82	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING,LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER ESTACION NO COMPACT	TRABAJADORES	3
83	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING,LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,SE DEBE RECURRIR A ESTACION DE EMPUJE COMPACTA,ESPACIO	TRABAJADORES	3
84	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING,LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,SE DEBE RECURRIR A ESTACION DE EMPUJE COMPACTA,EXTRACC	TRABAJADORES	3
85	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING,LUBRICACION EN TUBO,ESTUDIO ESPECIFICO DE VIABILIDAD DE ASIENTOS,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER	TRABAJADORES	3
86	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING,LUBRICACION EN TUBO,ESTUDIO ESPECIFICO DE VIABILIDAD DE ASIENTOS,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER	TRABAJADORES	3
87	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING,LUBRICACION EN TUBO,ESTUDIO ESPECIFICO DE VIABILIDAD DE ASIENTOS,SE DEBE RECURRIR A ESTACION DE EMP	TRABAJADORES	3
88	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING,LUBRICACION EN TUBO,ESTUDIO ESPECIFICO DE VIABILIDAD DE ASIENTOS,SE DEBE RECURRIR A ESTACION DE EMP	TRABAJADORES	3
89	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING,NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER ESTACION	TRABAJADORES	3
90	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING,NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER ESTACION	TRABAJADORES	3
91	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING,NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,SE DEBE RECURRIR A ESTACION DE EMPUJE COMPA	TRABAJADORES	3
92	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING,NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,SE DEBE RECURRIR A ESTACION DE EMPUJE COMPA	TRABAJADORES	3
93	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING,NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,ESTUDIO ESPECIFICO DE VIABILIDAD DE ASIENTOS,POZO DE ENTRADA PERM	TRABAJADORES	3
94	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING,NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,ESTUDIO ESPECIFICO DE VIABILIDAD DE ASIENTOS,POZO DE ENTRADA PERM	TRABAJADORES	3
95	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING,NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,ESTUDIO ESPECIFICO DE VIABILIDAD DE ASIENTOS,SE DEBE RECURRIR A ESTA	TRABAJADORES	3
96	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING,NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,ESTUDIO ESPECIFICO DE VIABILIDAD DE ASIENTOS,SE DEBE RECURRIR A ESTA	TRABAJADORES	3
97	Escudo abierto. Util de corte con cazo.GIROSCOPIO O IMU,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,POZO DE EN	TRABAJADORES	3
98	Escudo abierto. Util de corte con cazo.GIROSCOPIO O IMU,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,POZO DE EN	TRABAJADORES	3
99	Escudo abierto. Util de corte con cazo.GIROSCOPIO O IMU,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,SE DEBE REC	TRABAJADORES	3

Tabla 63.-Pantallazo del software Power bi con tabla origen transformada para visualización de datos parciales. Fuente propia.

Adicionalmente, el modelo incorpora tablas auxiliares de tipo Multicriterio Pivote Total y Multicriterio Pivote %, que permiten calcular y visualizar sumatorios parciales y porcentajes de contribución por criterio, facilitando el análisis desagregado de los resultados.

Nº de alternativa	VARIABLES	Atributo	Valor
10	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,POZO DE ENTRADA PERMITE	AMBIENTALES-20 Pts	10
12	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,SE DEBE RECURRIR A ESTACI	AMBIENTALES-20 Pts	10
26	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.LASER DIRECTO,PIPE JACKING,NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER ESTACION NO COMPACTA,EXTRACCI	AMBIENTALES-20 Pts	10
28	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.LASER DIRECTO,PIPE JACKING,NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,SE DEBE RECURRIR A ESTACION DE EMPUJE COMPACTA,EXTRACCION DE MAT	AMBIENTALES-20 Pts	10
42	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.GIROSCOPIO O IMU,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,POZO DE ENTRADA PERI	AMBIENTALES-20 Pts	10
44	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.GIROSCOPIO O IMU,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,SE DEBE RECURRIR A EST	AMBIENTALES-20 Pts	10
58	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.GIROSCOPIO O IMU,PIPE JACKING,NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER ESTACION NO COMPACTA,EXTRA	AMBIENTALES-20 Pts	10
60	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.GIROSCOPIO O IMU,PIPE JACKING,NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,SE DEBE RECURRIR A ESTACION DE EMPUJE COMPACTA,EXTRACCION DE	AMBIENTALES-20 Pts	10
66	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONE	AMBIENTALES-20 Pts	10
68	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,SE DEBE RECURRIR A ESTACION DE EM	AMBIENTALES-20 Pts	10
70	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],LUBRICACION EN TUBO,ESTUDIO ESPECIFICO DE VIABILIDAD DE ASIENTOS,POZO DE ENT	AMBIENTALES-20 Pts	10
72	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],LUBRICACION EN TUBO,ESTUDIO ESPECIFICO DE VIABILIDAD DE ASIENTOS,SE DEBE RECU	AMBIENTALES-20 Pts	10
82	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING,LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER ESTACION NO COMPACTA,EXTRACCION DE M/	AMBIENTALES-20 Pts	10
84	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING,LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,SE DEBE RECURRIR A ESTACION DE EMPUJE COMPACTA,EXTRACCION DE MATERIAL MEI	AMBIENTALES-20 Pts	10
86	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING,LUBRICACION EN TUBO,ESTUDIO ESPECIFICO DE VIABILIDAD DE ASIENTOS,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER ESTACION NO COMP	AMBIENTALES-20 Pts	10
88	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING,LUBRICACION EN TUBO,ESTUDIO ESPECIFICO DE VIABILIDAD DE ASIENTOS,SE DEBE RECURRIR A ESTACION DE EMPUJE COMPACTA,EXTRA	AMBIENTALES-20 Pts	10
98	Escudo abierto. Util de corte con cazo.GIROSCOPIO O IMU,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPI	AMBIENTALES-20 Pts	10
100	Escudo abierto. Util de corte con cazo.GIROSCOPIO O IMU,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,SE DEBE RECURRIR A ESTACION DE	AMBIENTALES-20 Pts	10
102	Escudo abierto. Util de corte con cazo.GIROSCOPIO O IMU,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],LUBRICACION EN TUBO,ESTUDIO ESPECIFICO DE VIABILIDAD DE ASIENTOS,POZO DE	AMBIENTALES-20 Pts	10
104	Escudo abierto. Util de corte con cazo.GIROSCOPIO O IMU,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],LUBRICACION EN TUBO,ESTUDIO ESPECIFICO DE VIABILIDAD DE ASIENTOS,SE DEBE F	AMBIENTALES-20 Pts	10
114	Escudo abierto. Util de corte con cazo.GIROSCOPIO O IMU,PIPE JACKING,LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER ESTACION NO COMPACTA,EXTRACCION D	AMBIENTALES-20 Pts	10
116	Escudo abierto. Util de corte con cazo.GIROSCOPIO O IMU,PIPE JACKING,LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,SE DEBE RECURRIR A ESTACION DE EMPUJE COMPACTA,EXTRACCION DE MATERIAL	AMBIENTALES-20 Pts	10
118	Escudo abierto. Util de corte con cazo.GIROSCOPIO O IMU,PIPE JACKING,LUBRICACION EN TUBO,ESTUDIO ESPECIFICO DE VIABILIDAD DE ASIENTOS,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER ESTACION NO CC	AMBIENTALES-20 Pts	10
120	Escudo abierto. Util de corte con cazo.GIROSCOPIO O IMU,PIPE JACKING,LUBRICACION EN TUBO,ESTUDIO ESPECIFICO DE VIABILIDAD DE ASIENTOS,SE DEBE RECURRIR A ESTACION DE EMPUJE COMPACTA,E	AMBIENTALES-20 Pts	10
138	Balance Mecanico.Earth Pressure Balance. EPB.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,POZO DE ENTRA	AMBIENTALES-20 Pts	10
140	Balance Mecanico.Earth Pressure Balance. EPB.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,SE DEBE RECURR	AMBIENTALES-20 Pts	10
154	Balance Mecanico.Earth Pressure Balance. EPB.LASER DIRECTO,PIPE JACKING,NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER ESTACION NO COMPACT	AMBIENTALES-20 Pts	10
156	Balance Mecanico.Earth Pressure Balance. EPB.LASER DIRECTO,PIPE JACKING,NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,SE DEBE RECURRIR A ESTACION DE EMPUJE COMPACTA,EXTRACC	AMBIENTALES-20 Pts	10
170	Balance Mecanico.Earth Pressure Balance. EPB.GIROSCOPIO O IMU,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,POZO DE EN	AMBIENTALES-20 Pts	10
172	Balance Mecanico.Earth Pressure Balance. EPB.GIROSCOPIO O IMU,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,SE DEBE REC	AMBIENTALES-20 Pts	10
186	Balance Mecanico.Earth Pressure Balance. EPB.GIROSCOPIO O IMU,PIPE JACKING,NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER ESTACION NO COM	AMBIENTALES-20 Pts	10
188	Balance Mecanico.Earth Pressure Balance. EPB.GIROSCOPIO O IMU,PIPE JACKING,NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,SE DEBE RECURRIR A ESTACION DE EMPUJE COMPACTA,EXTF	AMBIENTALES-20 Pts	10
194	Escudo abierto. Util de corte con Cazo/Rozadera.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,POZO DE ENTRADA PERMITE	AMBIENTALES-20 Pts	10
196	Escudo abierto. Util de corte con Cazo/Rozadera.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,SE DEBE RECURRIR A ESTACI	AMBIENTALES-20 Pts	10

Tabla 65. Pantallazo del software Power bi con tabla origen transformada para visualización de datos totales. Fuente

#### 4.-Tabla de resultados consolidados.

La síntesis final del proceso de decisión se materializa en la tabla Multicriterio, que integra los resultados agregados del modelo. Esta tabla recoge, para cada alternativa, las puntuaciones parciales por criterio principal, los porcentajes de impacto asociados y la puntuación global ponderada, que constituye el indicador final de comparación entre alternativas.

Nombre: Multicriterio

Herramientas de tablas: Administrar relaciones, Nueva Medida rápida, Nueva columna, Nueva tabla, Marcar como tabla de fechas, Calendarios

Nº de alternativa	VARIABLES	COSTE MAQUINA	COSTE ELEMENTOS AUXILIARES	COSTE UTILES DE CORTE	COSTE DE SISTEMA DE EXTRACCION	COSTE DE LODOS	CONTAMINACION
1	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS E	5	4	0	5	3	
2	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS E	5	4	0	3	3	
3	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS E	5	4	0	5	3	
4	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.LASER DIRECTO,PIPE JACKING MAS E	5	4	0	3	3	
17	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.LASER DIRECTO,PIPE JACKING,LUBRIC	5	3	0	5	3	
18	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.LASER DIRECTO,PIPE JACKING,LUBRIC	5	3	0	3	3	
19	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.LASER DIRECTO,PIPE JACKING,LUBRIC	5	3	0	5	3	
20	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.LASER DIRECTO,PIPE JACKING,LUBRIC	5	3	0	3	3	
33	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.GIROSCOPIO O IMU,PIPE JACKING M.	5	4	0	5	3	
34	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.GIROSCOPIO O IMU,PIPE JACKING M.	5	4	0	3	3	
35	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.GIROSCOPIO O IMU,PIPE JACKING M.	5	4	0	5	3	
36	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.GIROSCOPIO O IMU,PIPE JACKING M.	5	4	0	3	3	
49	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.GIROSCOPIO O IMU,PIPE JACKING,LU	5	3	0	5	3	
50	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.GIROSCOPIO O IMU,PIPE JACKING,LU	5	3	0	3	3	
51	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.GIROSCOPIO O IMU,PIPE JACKING,LU	5	3	0	5	3	
52	Balance Hidraulico.Sistema Slurry.GIROSCOPIO O IMU,PIPE JACKING,LU	5	3	0	3	3	
65	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING M	3	4	2	5	3	
66	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING M	3	4	2	3	3	
67	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING M	3	4	2	5	3	
68	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING M	3	4	2	3	3	
69	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING M	3	4	2	5	3	
70	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING M	3	4	2	3	3	
71	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING M	3	4	2	5	3	
72	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING M	3	4	2	3	3	
81	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING,LL	3	3	2	5	3	
82	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING,LL	3	3	2	3	3	
83	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING,LL	3	3	2	5	3	
84	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING,LL	3	3	2	3	3	
85	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING,LL	3	3	2	5	3	
86	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING,LL	3	3	2	3	3	
87	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING,LL	3	3	2	5	3	
88	Escudo abierto. Util de corte con cazo.LASER DIRECTO,PIPE JACKING,LL	3	3	2	3	3	
97	Escudo abierto. Util de corte con cazo.GIROSCOPIO O IMU,PIPE JACKIN	3	4	2	5	3	
98	Escudo abierto. Util de corte con cazo.GIROSCOPIO O IMU,PIPE JACKIN	3	4	2	3	3	
99	Escudo abierto. Util de corte con cazo.GIROSCOPIO O IMU,PIPE JACKIN	3	4	2	5	3	
100	Escudo abierto. Util de corte con cazo.GIROSCOPIO O IMU,PIPE JACKIN	3	4	2	3	3	
101	Escudo abierto. Util de corte con cazo.GIROSCOPIO O IMU,PIPE JACKIN	3	4	2	5	3	

Tabla: Multicriterio (512 filas)

Datos: Buscar, Combinaciones, Multicriterio, % CRITERIOS ECONOMICOS, % CRITERIOS AMBIENTALES, % CRITERIOS OPERACIONALES Y DE SEGURIDAD, % CRITERIOS SOCIALES, %PUNTUACION TOTAL, Σ AFECCION A USUARIOS, Σ AFECCION A USUARIOS\_10, Σ APORTE DE CO2, Σ APORTE DE CO2\_9, Σ ATASCAMIENTO, Σ ATASCAMIENTO\_13, Column22, Σ CONTAMINACION ACUSTICA, Σ CONTAMINACION ACUSTICA\_7, Σ CONTAMINACION HIDROGEOLOGICA, Σ CONTAMINACION HIDROGEOLOGICA\_6, COSTE DE LODOS, Σ COSTE DE LODOS\_5, COSTE DE SISTEMA DE EXTRACCION, Σ COSTE DE SISTEMA DE EXTRACCION\_4, COSTE ELEMENTOS AUXILIARES, Σ COSTE ELEMENTOS AUXILIARES\_2, COSTE MAQUINA, Σ COSTE MAQUINA\_1, COSTE UTILES DE CORTE, Σ COSTE UTILES DE CORTE\_3, Σ INFRAESTRUCTURAS, Σ INFRAESTRUCTURAS\_12, Nº de alternativa, NOTA COMBINACION

Tabla 66. Pantallazo del software Power bi con tabla origen transformada para visualización de Notas combinación. Fuente propia.

### 5.- Relaciones y flujo de cálculo

El modelo de datos se articula mediante relaciones lógicas basadas en el identificador de alternativa, que actúa como clave común entre las tablas de selección técnica, evaluación multicriterio y resultados consolidados. Esta estructura permite vincular de forma coherente las configuraciones tecnológicas obtenidas a partir de los árboles lógicos con las puntuaciones asignadas en los distintos criterios y subcriterios.

Las relaciones se han definido de manera que las tablas de evaluación (*Multicriterio Pivote Score*) reciban el contexto de filtrado procedente de la tabla *Combinaciones*, asegurando que únicamente se evalúen aquellas alternativas compatibles con los condicionantes del proyecto. Por su parte, las tablas de ponderación del método AHP (pesos principales y secundarios) actúan como parámetros del modelo, aplicándose en los cálculos sin verse afectadas por los filtros sobre las alternativas

El flujo de cálculo se desarrolla de forma progresiva y jerárquica. En primer lugar, se asignan las puntuaciones (*scores*) de cada alternativa para los distintos subcriterios. A continuación, dichas puntuaciones se ponderan mediante los pesos de los criterios secundarios, obteniendo contribuciones parciales por criterio principal. Posteriormente, estas contribuciones se agregan aplicando los pesos de los criterios principales, dando lugar a una puntuación global ponderada por alternativa. Se incluye a continuación el árbol de relaciones que funciona como motor de la herramienta

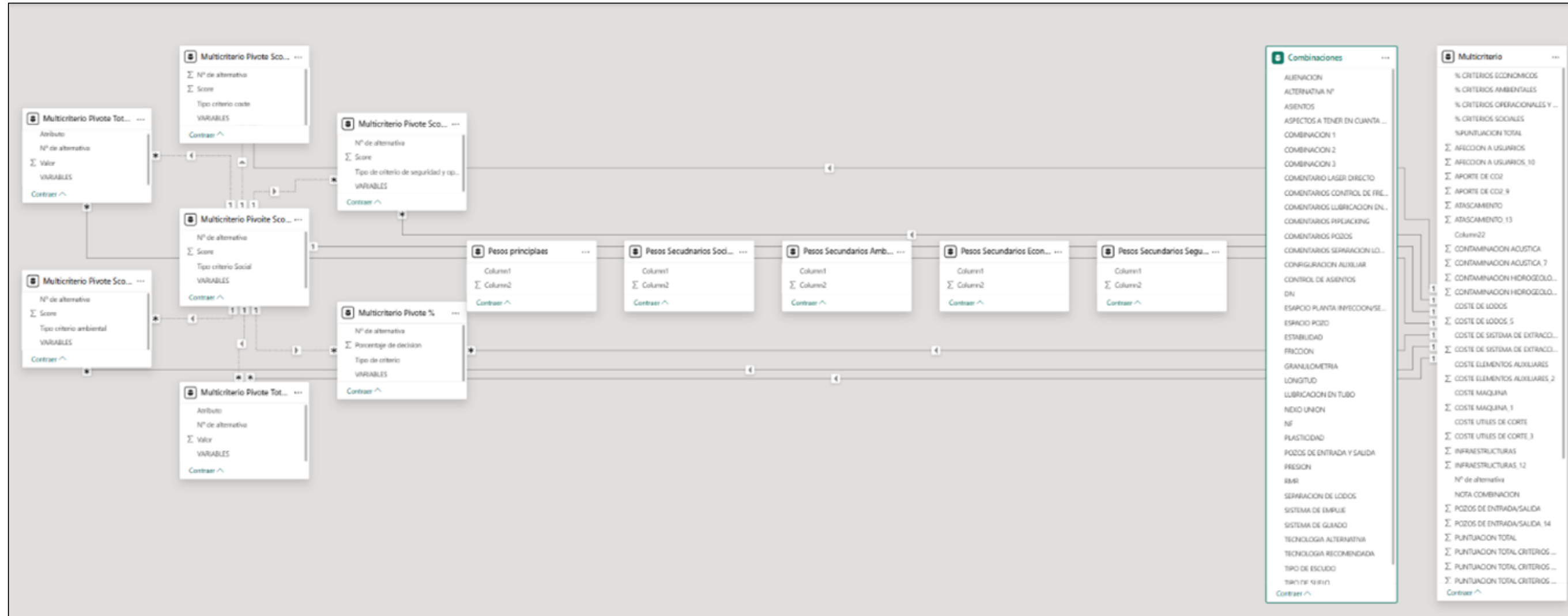


Figura 128. Vista modelo de Power Bi. Muestra de relaciones de variables internas del modelo. Fuente propia.

La estructura adoptada permite incorporar nuevas alternativas, criterios o subcriterios sin modificar la lógica fundamental del modelo, garantizando su escalabilidad y reutilización. Asimismo, la separación entre datos de entrada, pesos y resultados calculados refuerza la transparencia y trazabilidad del proceso de decisión, aspectos fundamentales en una herramienta de apoyo a la toma de decisiones tecnológicas.

### 5.3.3. Interfaz de usuario de la herramienta

La herramienta de ayuda a la decisión se presenta mediante una interfaz de usuario estructurada e intuitiva, desarrollada en Power BI, cuyo diseño está orientado a facilitar la interacción del usuario con el modelo de decisión y a garantizar una interpretación clara de los resultados. La interfaz se ha organizado en un conjunto de hojas funcionales, cada una de las cuales responde a una fase concreta del proceso de análisis, desde la introducción de información hasta la evaluación final de alternativas.

El diseño de la interfaz prioriza la claridad visual, la jerarquización de la información, permitiendo que el usuario se centre en los aspectos relevantes de la decisión sin necesidad de conocimientos específicos sobre el funcionamiento interno del modelo de datos o de los cálculos implementados.

#### 5.3.3.1. Configuración de la visualización

La herramienta de ayuda a la decisión se apoya en una configuración de visualización cuidadosamente diseñada, que permite traducir un modelo de decisión complejo en una interfaz clara, interpretable y operativa. La selección de los distintos elementos visuales disponibles en Power BI responde a criterios de funcionalidad, coherencia metodológica y facilidad de interpretación, de forma que cada tipo de visualización cumple un propósito específico dentro del flujo de uso de la aplicación.

A continuación, se describen los principales elementos visuales empleados y su función dentro de la herramienta.

##### 1.-Botones de navegación

Los botones se utilizan como elemento principal de navegación entre hojas, permitiendo al usuario desplazarse de forma intuitiva entre las distintas secciones de la aplicación (menú principal, selección tecnológica, criterios ponderados y caso de estudio).

Los botones se emplean fundamentalmente en la hoja de MENÚ, actuando como punto de entrada a cada una de las funcionalidades de la herramienta. Esta configuración favorece un uso secuencial alineado con la metodología definida, sin imponer restricciones al usuario.



Figura 129. Selectores de la herramienta de decisión del apartado Menú. Elaboración propia.

## 2.-Segmentadores (Slicers)

Los segmentadores constituyen el principal mecanismo de introducción de datos y condicionantes por parte del usuario. Se emplean para definir los parámetros del proyecto que alimentan los árboles lógicos de selección tecnológica, tales como condiciones geotécnicas, hidrogeológicas, geométricas y operativas.

En la hoja de APP Selección tecnológica, los *slicers* permiten seleccionar valores como presión de frente, nivel freático, diámetro, estabilidad, tipo de suelo, plasticidad, granulometría, alineación, longitud o disponibilidad de espacio. La interacción con estos elementos filtra dinámicamente las alternativas mostradas, garantizando que únicamente se presenten configuraciones técnicamente viables.

El uso de segmentadores facilita una interacción directa y transparente con el modelo, permitiendo al usuario comprender cómo los condicionantes influyen en la selección de alternativas sin necesidad de conocer la lógica interna de los árboles de decisión.



Figura 130. Segmentadores de la herramienta de decisión para la introducción de condicionantes. Elaboración propia.

## 3.-Tarjetas (Cards)

Las tarjetas se emplean como elementos de salida directa de información, destinadas a mostrar de forma clara y sintética los resultados principales del proceso de decisión. A diferencia de otros elementos gráficos orientados al análisis comparativo, las tarjetas presentan información cualitativa y cuantitativa ya interpretada por el modelo, actuando como resumen ejecutivo del resultado obtenido.

En la herramienta desarrollada, las tarjetas se utilizan para mostrar, entre otros aspectos:

- La alternativa tecnológica recomendada como resultado del proceso de selección y evaluación.

- La configuración auxiliar asociada a dicha alternativa.
- Los aspectos técnicos a tener en cuenta durante su ejecución.
- En su caso, una alternativa secundaria o complementaria que pueda considerarse viable.

Este tipo de visualización permite al usuario identificar de manera inmediata la solución propuesta por la herramienta, sin necesidad de interpretar gráficos adicionales o analizar desgloses numéricos. De este modo, las tarjetas cumplen una función clave en la comunicación del resultado final, facilitando la toma de decisiones y reforzando el carácter práctico de la aplicación.

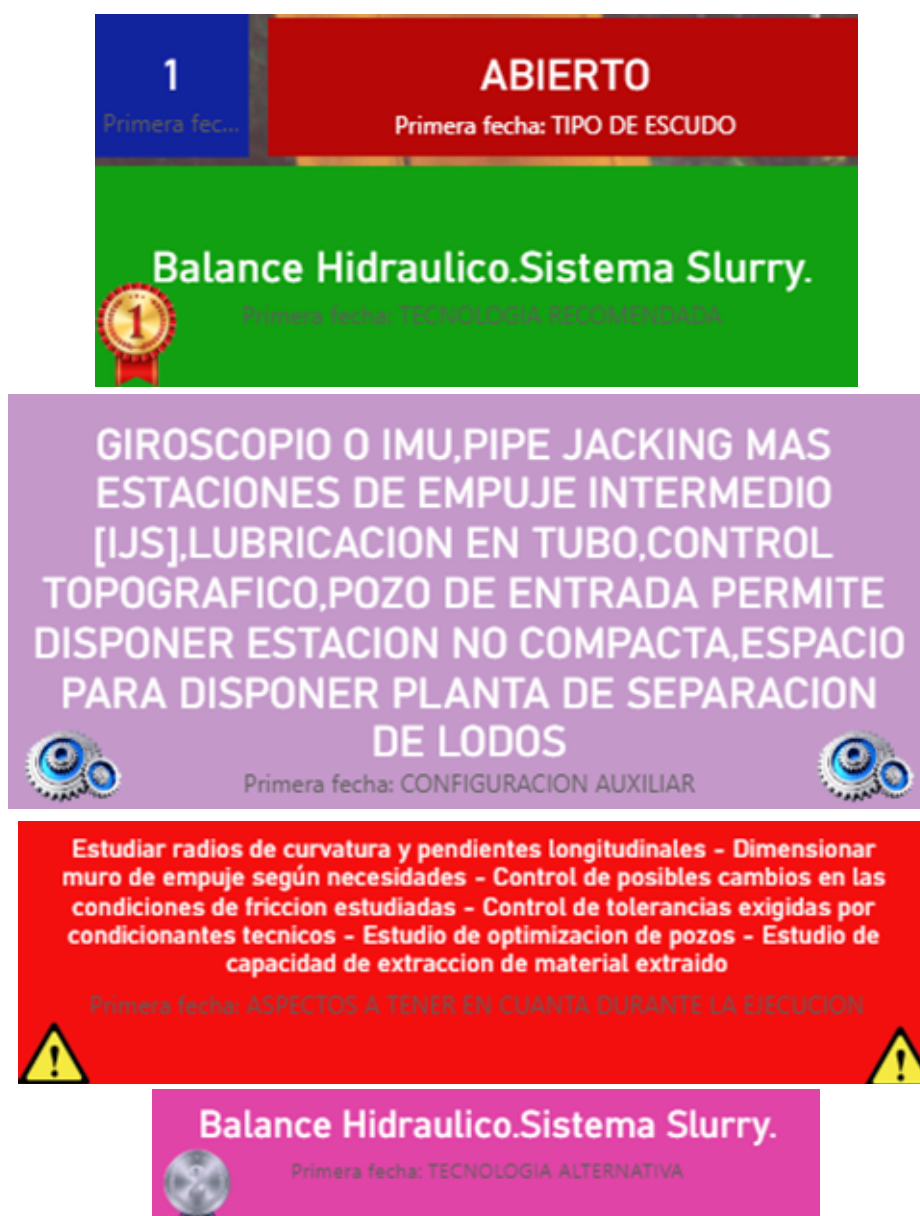


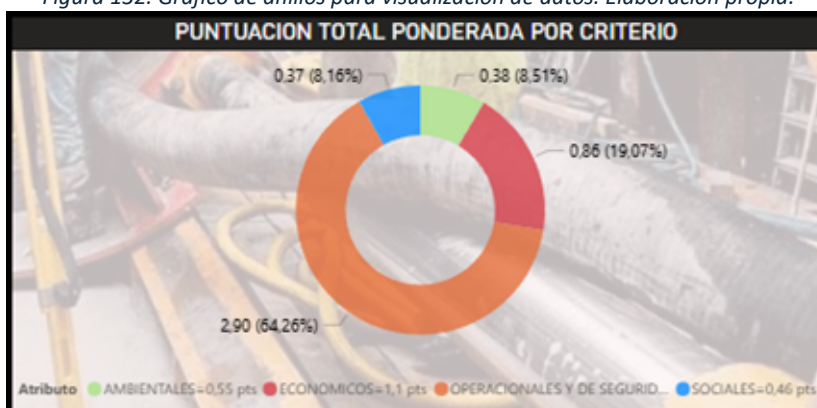
Figura 131. Tarjetas de salida de resultados de la herramienta de decisión. Elaboración propia.

Las tarjetas mantienen el código de colores establecido en los árboles lógicos para mejorar la interconexión de datos.

#### 4.-Gráficos de anillos (Donut charts)

Figura 132. Gráfico de anillos para visualización de datos. Elaboración propia.

Los gráficos de anillos se emplean para representar la distribución porcentual de la contribución de los criterios principales al resultado global. Este tipo de visualización resulta especialmente adecuado



para mostrar pesos relativos y proporciones, facilitando la identificación de los ámbitos que mayor influencia tienen en la decisión final.

En la herramienta, los gráficos de anillos se utilizan tanto para visualizar los pesos de los criterios principales obtenidos mediante AHP como para representar el porcentaje de impacto de cada criterio en el resultado final de una alternativa, tal y como se observa en las hojas de criterios ponderados y caso de estudio.

#### 5.-Gráficos de embudo (Funnel charts)

El gráfico de embudo se utiliza para representar de forma visual el proceso de reducción progresiva de alternativas, desde el conjunto inicial hasta las soluciones finales consideradas. Este tipo de gráfico permite ilustrar de manera intuitiva el efecto de los filtros y de la selección técnica sobre el número de alternativas viables.

En las capturas aportadas, el embudo se asocia al proceso de selección tecnológica, mostrando cómo los condicionantes introducidos por el usuario restringen el espacio de soluciones y conducen a un conjunto reducido de configuraciones compatibles.

#### 6.-Gráfico de embudo (Funnel chart)

El gráfico de embudo se emplea en la herramienta como un recurso visual para representar de forma jerarquizada los pesos de los subcriterios dentro de cada criterio principal, obtenidos mediante el método AHP. Su utilización permite mostrar de manera inmediata la priorización relativa de los subcriterios, ordenándolos de mayor a menor peso y facilitando la identificación de aquellos factores que ejercen una influencia dominante en el resultado final.

La elección del embudo como tipo de visualización se justifica por su capacidad para reflejar de forma intuitiva una distribución decreciente de importancia, lo cual es consistente con la

interpretación de los pesos AHP como contribuciones relativas. De este modo, el usuario puede interpretar con rapidez qué subcriterios concentran mayor parte del peso y, por tanto, qué variables del modelo tienen mayor capacidad de modificar el *score* global de las alternativas.

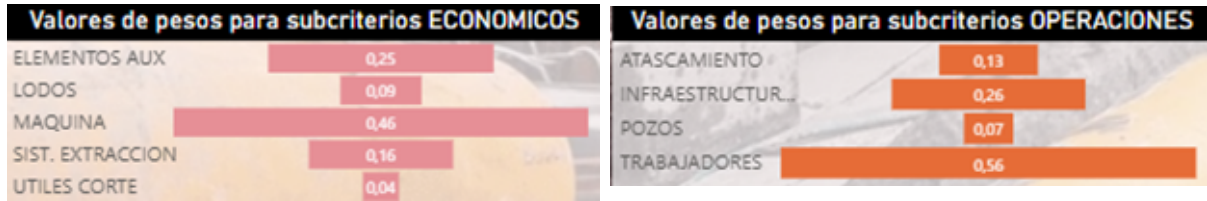


Figura 133. Gráfico de embudo para muestra de pesos por subcriterio. Elaboración propia.

### 7.-Gráficos de columnas apiladas

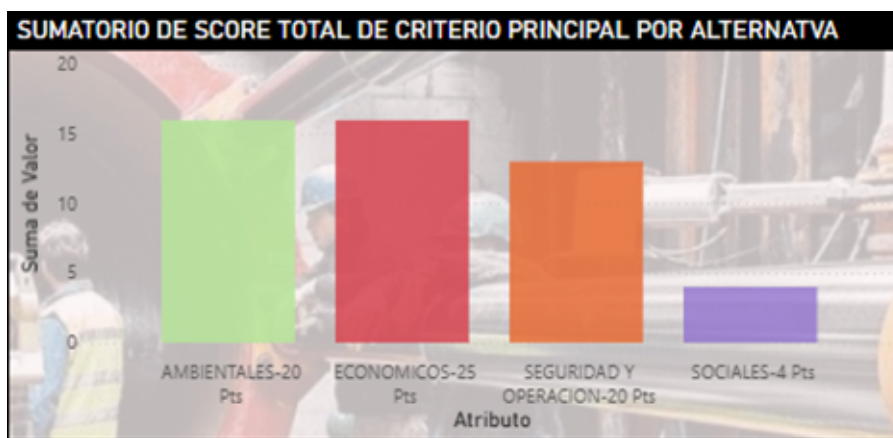


Figura 134. Gráfico de barras para muestra de Score total por criterio. Elaboración propia.

Los gráficos de columnas apiladas se emplean para representar la composición del score global de cada alternativa, desglosando la contribución de los

distintos criterios principales. Este tipo de visualización resulta especialmente útil para comparar alternativas y analizar cómo cada ámbito de decisión influye en el resultado final.

### 7.-Gráfico Treemap

El gráfico tipo Treemap se utiliza en la herramienta para representar de manera compacta la distribución relativa de pesos o contribuciones, permitiendo identificar de forma inmediata qué elementos concentran un mayor peso dentro del modelo AHP. Este tipo de visualización codifica la importancia relativa mediante el área de cada rectángulo, de modo que los elementos con mayor peso ocupan una mayor superficie, facilitando una lectura rápida de la jerarquía de prioridades.

Esta representación mejora la interpretabilidad del modelo al ofrecer una visión global de “dónde se concentra la decisión”, complementando otras visualizaciones (p. ej., embudo para ordenación descendente de subcriterios y anillo para distribución porcentual).

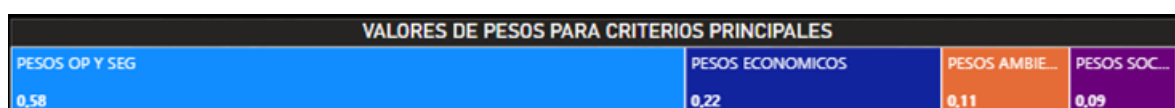


Figura 135. Gráfico Treemap para representar pesos de criterios principales. Elaboración propia.

En la hoja de criterios ponderados AHP, además de la visualización de los pesos asignados a los criterios principales y secundarios, se han habilitado funcionalidades avanzadas propias de Power BI que permiten ampliar el análisis del modelo y facilitar la explotación de los resultados.

Por un lado, la herramienta incorpora la opción de análisis del modelo mediante capacidades de inteligencia artificial, que permite explorar de forma asistida la información contenida en el modelo de datos. Esta funcionalidad posibilita identificar patrones, relaciones o sensibilidades relevantes entre criterios, pesos y resultados, aportando una visión complementaria al análisis determinista del modelo AHP. Su uso resulta especialmente útil para comprobar la coherencia de las ponderaciones, analizar la influencia relativa de determinados criterios y detectar posibles efectos dominantes en la toma de decisiones.

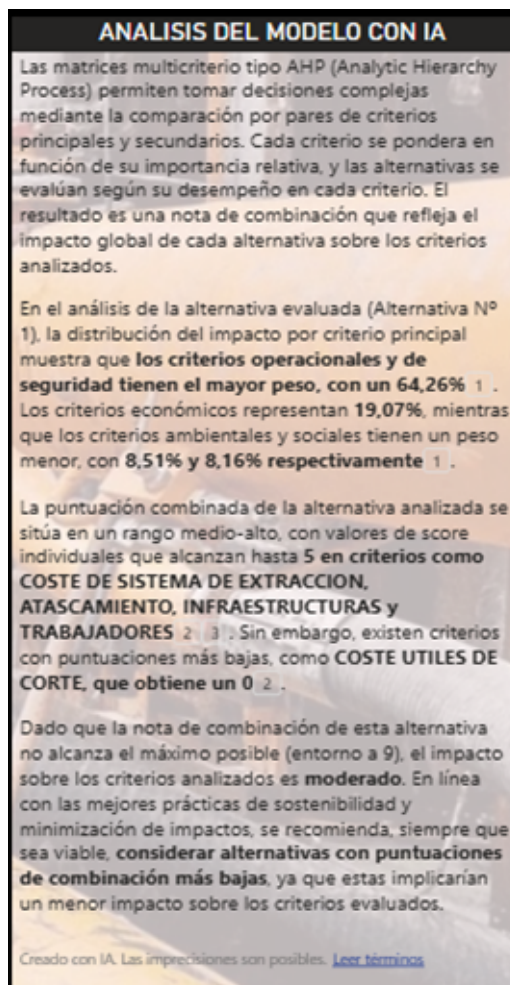


Figura 136. Cuadro de análisis con IA para datos del modelo. Fuente propia.

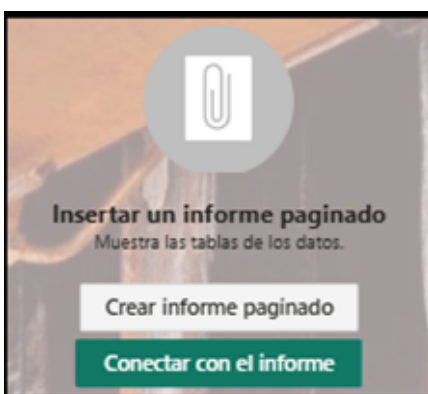


Figura 137. Cuadro para extracción de reporte. Fuente propia.

Por otro lado, se incluye la opción de generar un informe paginado, orientada a la documentación y comunicación formal de los resultados. Los informes paginados permiten estructurar la información en un formato adecuado para su impresión o distribución en documentos técnicos, incorporando tablas, gráficos y resultados clave del modelo de manera ordenada y reproducible. Esta funcionalidad refuerza la utilidad práctica de la herramienta, facilitando la elaboración de informes justificativos que acompañen al proceso de toma de decisiones tecnológicas.

### 5.3.3.2. Funciones principales

La interfaz se articula mediante un menú de navegación principal, que permite acceder de forma directa a las distintas hojas de la aplicación. Esta estructura facilita un uso secuencial de la

herramienta, alineado con la lógica metodológica definida, aunque permite igualmente un acceso flexible a los distintos apartados.

De forma general, la interfaz se organiza en las siguientes secciones:

- ✓ Hoja de información general y contextualización de la herramienta
- ✓ Hoja de selección tecnológica con base a árboles lógicos.
- ✓ Hoja de visualización de los pesos de criterios obtenidos mediante AHP.
- ✓ Hoja de análisis de resultados y caso de estudio.

### 1.-Hoja de información y contextualización.

La hoja de información tiene como objetivo proporcionar al usuario una visión general de las tecnologías de microtunelación consideradas, así como de los elementos que intervienen en su selección. En esta sección se presentan de forma sintética los distintos tipos de escudos, sistemas de extracción, configuraciones auxiliares y elementos de corte, sirviendo como apoyo conceptual previo a la utilización de la herramienta. Esta hoja no interviene directamente en los cálculos del modelo, pero cumple una función relevante en términos de comprensión del contexto técnico y homogeneización de criterios por parte del usuario.

### 2.-Hoja de selección tecnológica

La hoja de selección tecnológica constituye el punto de entrada principal de información por parte del usuario. En ella se dispone un conjunto de controles interactivos (segmentadores) que permiten introducir los condicionantes del proyecto, tales como parámetros geotécnicos, hidrogeológicos, geométricos y operativos. La interacción con estos controles filtra dinámicamente las configuraciones tecnológicas disponibles, mostrando las alternativas técnicamente viables de acuerdo con los árboles lógicos definidos. De este modo, la interfaz traduce un conjunto de condicionantes complejos en una selección clara y estructurada de soluciones posibles, sin requerir que el usuario conozca explícitamente la lógica interna del árbol de decisión.

Adicionalmente, la hoja muestra información descriptiva asociada a la alternativa seleccionada, incluyendo aspectos técnicos relevantes y consideraciones a tener en cuenta durante su aplicación. A mayores de esta información, la aplicación devuelve una posible tecnología alternativa para dar solución a la casuística dada.

### 3.-Hoja de criterios ponderados AHP

La hoja de criterios ponderados AHP permite visualizar de forma clara los pesos asignados a los criterios principales y secundarios, obtenidos mediante el proceso de comparación por pares.

También muestra el score dado a cada alternativa. Esta sección cumple una función clave de transparencia metodológica, ya que permite al usuario comprender la importancia relativa de cada criterio dentro del modelo de decisión. Los pesos se representan mediante gráficos que facilitan su interpretación y permiten identificar de forma inmediata qué aspectos tienen mayor influencia en el resultado final. Aunque los valores de ponderación se encuentran definidos previamente, su visualización en la interfaz contribuye a reforzar la trazabilidad del proceso y la confianza en los resultados obtenidos.

#### 4.-Hoja de análisis de resultados y caso de estudio

La hoja de análisis de resultados y caso de estudio está concebida como un entorno de verificación y validación del correcto funcionamiento de la herramienta, mediante su aplicación a un caso real de microtunelación. Su finalidad principal no es la toma directa de decisiones, sino la comprobación de la coherencia interna del modelo, contrastando los resultados obtenidos con soluciones técnicas ya ejecutadas o contrastadas en la práctica. En esta hoja se introducen los condicionantes y características del caso real seleccionado, reproduciendo de forma controlada el proceso de selección tecnológica y evaluación multicriterio definido en la herramienta. A partir de estos datos, se analizan las alternativas resultantes, las puntuaciones parciales por criterio y la puntuación global obtenida, verificando que el modelo conduce a soluciones compatibles con la experiencia y el comportamiento observado en el proyecto real.

#### 5.3.3.3. Versión desktop de la herramienta

Además de la versión accesible en entorno web, la herramienta de ayuda a la decisión se encuentra disponible en una versión de escritorio, desarrollada mediante Power BI Desktop. Esta versión constituye el entorno base de desarrollo y mantenimiento del modelo, en el que se implementan el modelo de datos, las relaciones, las ponderaciones AHP y las visualizaciones que conforman la aplicación. La versión Desktop permite un control completo sobre la estructura interna de la herramienta, incluyendo la modificación de tablas, la actualización de ponderaciones, la incorporación de nuevas alternativas o criterios y la revisión detallada de los cálculos realizados. De este modo, actúa como soporte para la evolución, validación y adaptación del modelo a distintos contextos de aplicación, manteniendo la coherencia metodológica definida. Asimismo, la existencia de una versión de escritorio facilita la escalabilidad y reutilización de la herramienta por parte de otros usuarios, al tratarse de un entorno ampliamente extendido en el sector. Los usuarios con acceso a Power BI Desktop pueden descargar, analizar y adaptarla a sus propias necesidades, reforzando su carácter abierto y transferible. Se detalla a continuación su funcionamiento.

HOJA DE MENU DE LA HERRAMIENTA DE DECISION



Figura 138. Explicación del funcionamiento de la hoja de menú de la herramienta de decisión. Elaboración propia.

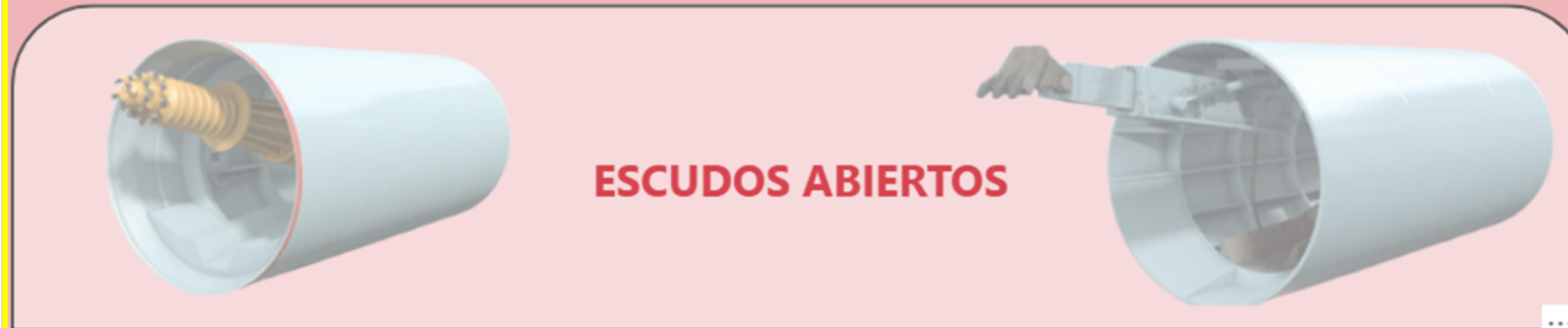
OPCION DE INFORMACION PARA AUELOS USUARIOS CUYO CONOCIMIENTO SOBRE LA TEMATICA NO ES ELEVADO. PERMITE EL USO DE LA HERAMIENTA A USUARIOS DE CUALQUIER NIVEL.

PANEL DE NAVEGACION DE LA HERRAMIENTA DE DECISION. AL SELECCIONAR CADA ICONICO LA HERRAMIENTA LLEVA AUTOMATICAMENTE A LA SECCION INDICADA

HOJA DE INFORMACION DE LA HERRAMIENTA DE DECISION

Figura 139. Explicación del funcionamiento de la hoja de información específica de la herramienta de decisión. Elaboración propia.

TECNOLOGIA DE MICROTUNELACION EN EL MERCADO



ESCUDOS ABIERTOS

Los escudos cerrados se emplean en microtunelación cuando el terreno no es capaz de autosostenerse o cuando existen condiciones de agua, presión o inestabilidad que requieren un control continuo del frente de excavación. En estos casos, el frente se mantiene confinado y equilibrado mediante distintos sistemas, que se seleccionan en función de las características del terreno y del entorno. Entre las principales alternativas se encuentran el balance hidráulico, mediante sistemas Slurry, que utilizan un fluido de soporte para estabilizar el frente, y el balance mecánico, mediante sistemas EPB (Earth Pressure Balance), que emplean el propio material excavado para mantener el equilibrio. En situaciones más específicas o complejas, pueden utilizarse sistemas mixtos, que combinan principios de ambos métodos para adaptarse a condiciones geotécnicas variables.



UTILES DE CORTE



SISTEMA DE GUIADO



SISTEMA DE EMPUJE



TIPOS DE LODOS



SISTEMAS DE EXTRACCIÓN DE MATERIAL



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

ue Universidad Europea

MUESTRA INFORMACION RELATIVA A LAS TECNOLOGIAS DE MICROTUNELACION, LA CUAL RESULTA DE GRAN UTILIDAD PARA LA CORRECTA INTERPRETACION DE LA HERRAMIENTA.

MUESTRA INFORMACION RELATIVA A LA CONFIGURACIÓN AUXILIAR, LA CUAL RESULTA DE GRAN UTILIDAD PARA LA CORRECTA INTERPRETACION DE LA HERRAMIENTA.

VIDEO ILUSTRATIVO DE LA TECNICA

HOJA DE APP DE SELECCIÓN TECNOLÓGICA

Figura 140. Explicación del funcionamiento de la hoja de selección tecnológica de la herramienta de decisión. Elaboración propia.

DATOS DE ENTRADA A INTRODUCIR POR EL USUARIO A MODO DE CONDICIONANTE PARA LA ELECCION DE LE TECNOLOGIA RECOMENDADA.

DATOS DE SALIDA APORTADO POR LA HERRAMIENTA COMO RESPUESTA A LOS DATOS DE ENTRADA PARA TECNOLOGIA ALTERNATIVA

DATOS DE ENTRADA A INTRODUCIR POR EL USUARIO A MODO DE CONDICIONANTE PARA LA ELECCION DE LA CONFIGURACION AUXILIAR

DATOS DE SALIDA APORTADO POR LA HERRAMIENTA COMO RESPUESTA A LOS DATOS DE ENTRADA PARA ELECCION DE TECNOLOGIA RECOMENDADA, CONFIGURACION AUXILIAR Y ASPECTOS A TENER EN CUENTA

# HOJA DE MATRIZ MULTICRITERIO AHP

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA DIGITAL DE APOYO A LA TOMA DE DECISIONES PARA LA SELECCIÓN DE TECNOLOGÍAS DE MICROTUNELACIÓN.

SELECTOR DE ALTERNATIVA PARA VISUALIZACIÓN DE DATOS MULTICRITERIO

DATOS HEREDADOS DE LA HOJA DE APP DE SELECCIÓN TECNOLÓGICA

ASISTENTE DE IA PARA ANÁLISIS DE DATOS

PERMITE LA EXPORTACIÓN DE INFORME DE LA HERRAMIENTA COMO REPORT JUSTIFICATIVO

**ABIERTO**  
Primera fecha: TIPO DE ESCUDO

**Balance Hidraulico.Sistema Slurry.GIROSCOPIO O IMU,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO [IJS],LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER ESTACION NO COMPACTA,ESPACIO PARA DISPONER PLANTA DE SEPARACION DE LODOS**  
Primera fecha: NEXO UNION

**1**  
Primera fec...

Insertar un informe paginado

Muestra las tablas de los datos.

Crear informe paginado

Conectar con el informe

N° DE ALTERNATIVA

1	2	3
4	5	6
7	8	9

SCORE ALTERNATIVA CRITERIOS DE COSTE

COSTE DE LODOS	3
COSTE DE SISTEMA D...	5
COSTE ELEMENTOS A...	4
COSTE MAQUINA	4
COSTE UTILES DE CO...	

Balance Hidraulico.Sistema Slurry.

Primera fecha: TECNOLOGIA ALTERNATIVA

SUMATORIO DE SCORE TOTAL DE CRITERIO PRINCIPAL POR ALTERNATIVA

ANÁLISIS DEL MODELO CON IA

Las matrices multicriterio tipo AHP (Analytic Hierarchy Process) permiten tomar decisiones complejas mediante la comparación por pares de criterios principales y secundarios. Cada criterio se pondera en función de su importancia relativa, y las alternativas se evalúan según su desempeño en cada criterio. El resultado es una nota de combinación que refleja el impacto global de cada alternativa sobre los criterios analizados.

En el análisis de la alternativa evaluada (Alternativa N° 1), la distribución del impacto por criterio principal muestra que los criterios operacionales y de seguridad tienen el mayor peso, con un 64,26% . Los criterios económicos representan 19,07%, mientras que los criterios ambientales y sociales tienen un peso menor, con 8,51% y 8,16% respectivamente .

La puntuación combinada de la alternativa analizada se sitúa en un rango medio-alto, con valores de score individuales que alcanzan hasta 5 en criterios como COSTE DE SISTEMA DE EXTRACCION, ATASCAMIENTO, INFRAESTRUCTURAS y TRABAJADORES . Sin embargo, existen criterios con puntuaciones más bajas, como COSTE UTILES DE CORTE, que obtiene un 0 .

Dado que la nota de combinación de esta alternativa no alcanza el máximo posible (entorno a 9), el impacto sobre los criterios analizados es moderado. En línea con las mejores prácticas de sostenibilidad y minimización de impactos, se recomienda, siempre que sea viable, considerar alternativas con puntuaciones de combinación más bajas, ya que estas implicarían un menor impacto sobre los criterios evaluados.

Creado con IA. Las impresiones son posibles. [Leer Normas](#)

Valores de pesos para subcriterios ECONOMICOS

ELEMENTOS AUX	0,25
LODOS	0,09
MAQUINA	0,46
SIST. EXTRACCION	0,16
UTILES CORTE	0,04

SCORE ALTERNATIVA CRITERIO DE AMBIENTAL

APORTE DE CO2	4
CONTAMINACION AC...	4
CONTAMINACION HI...	3
VIBRACIONES	5

PUNTUACION TOTAL PONDERADA POR CRITERIO

VALORES DE PESOS PARA subcriterios AMBIENTALES

ACUSTICA	0,12
APORTE CO2	0,26
HIDROGEOLOGICA	0,56
VIBRACIONES	0,06

SCORE ALTERNATIVA CRITERIO SEGURIDAD Y OPERACION

ATASCAMIENTO	5
INFRAESTRUCTURAS	5
POZOS DE ENTRADA...	3
TRABAJADORES	5

PORCENTAJE DE IMPACTO POR CRITERIO PRINCIPAL

% CRITERIOS OPERACIONALES Y DE SEGURIDAD	64,26 %
% CRITERIOS ...	19,07 %
% C...	8,51 %
% C...	8,16 %

Valores de pesos para subcriterios SOCIALES

USUARIOS	1
----------	---

SCORE ALTERNATIVA CRITERIO SOCIAL

AFECCION A USUARIOS	4
---------------------	---

NOTA COMBINACION

8,87

VALORES DE PESOS PARA CRITERIOS PRINCIPALES

PESOS OP Y SEG	0,58
PESOS ECONOMICOS	0,22
PESOS AMBIE...	0,11
PESOS SOC...	0,09

MENU

ANT SIG

MUESTRA LOS PESOS DE LOS CRITERIOS PRINCIPALES DE LA MATRIZ MULTICRITERIO

MUESTRA EL % DE CRITERIOS EN LA DECISION

MUESTRA EL SCORE POR CRITERIO DE LA ALTERNATIVA

Figura 141. Explicación del funcionamiento de la hoja de Matriz multicriterio AHP de la herramienta de decisión. Elaboración propia.

HOJA DE CASO DE ESTUDIO

ENTRADA DE DATOS PARA CONFIGURACION DE CASO DE ESTUDIO

The screenshot displays a digital decision support tool for microtunneling technology selection. The interface is divided into several sections:

- Data Entry Form:** A grid of buttons for inputting project parameters.
 

PRESION		NF		DN	ESTABILIDAD			PLASTICIDAD		
NO	SI	NO	SI	>800...	ALTA	BAJA	MEDIA	**	LL<50	LL>50
TIPO DE SUELO						GRANULOMETRIA				
COHESIVOS	GRANULARES	MIXTOS	ROCA BLANDA...	ROCA DURA	VARIARIF	**	<50%	>50%		
RMR	SISTEMA DE GUIADO			LONGITUD						
**	<40	>80	Entre 40 y 80	GIROSCOPIO ...	LASER DIRECTO	<120 m	>120 m			
FRICCIÓN		ASIENTOS		VISUAL		ESPACIO PLANTA INYECCION/SEPARACION DE LODOS				
ALTA	BAJA	NO	SI	NO	SI	NO	SI			
POZOS DE ENTRADA Y SALIDA										
POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER ESTACION NO COMPACTA					SE DEBE RECURRIR A ESTACION DE EMPUJE COMPACTA					
- Central Visualization:** A large 3D rendering of a construction site showing a tunnel being excavated through a hillside. A yellow crane is lifting a large concrete pipe segment into place. The tunnel is supported by a stone wall on one side.
- Bottom Bar:** A green button labeled "Balance Hidraulico.Sistema Slurry." is highlighted, indicating the recommended technology for the case study.
- Logos and Navigation:** The University of Europe logo is in the bottom left. In the bottom right, there is a navigation menu with "MENU" and "ANT" buttons.

TECNOLOGIA RECOMENDADA POR LA HERRAMIENTA PARA EL CASO DE ESTUDIO

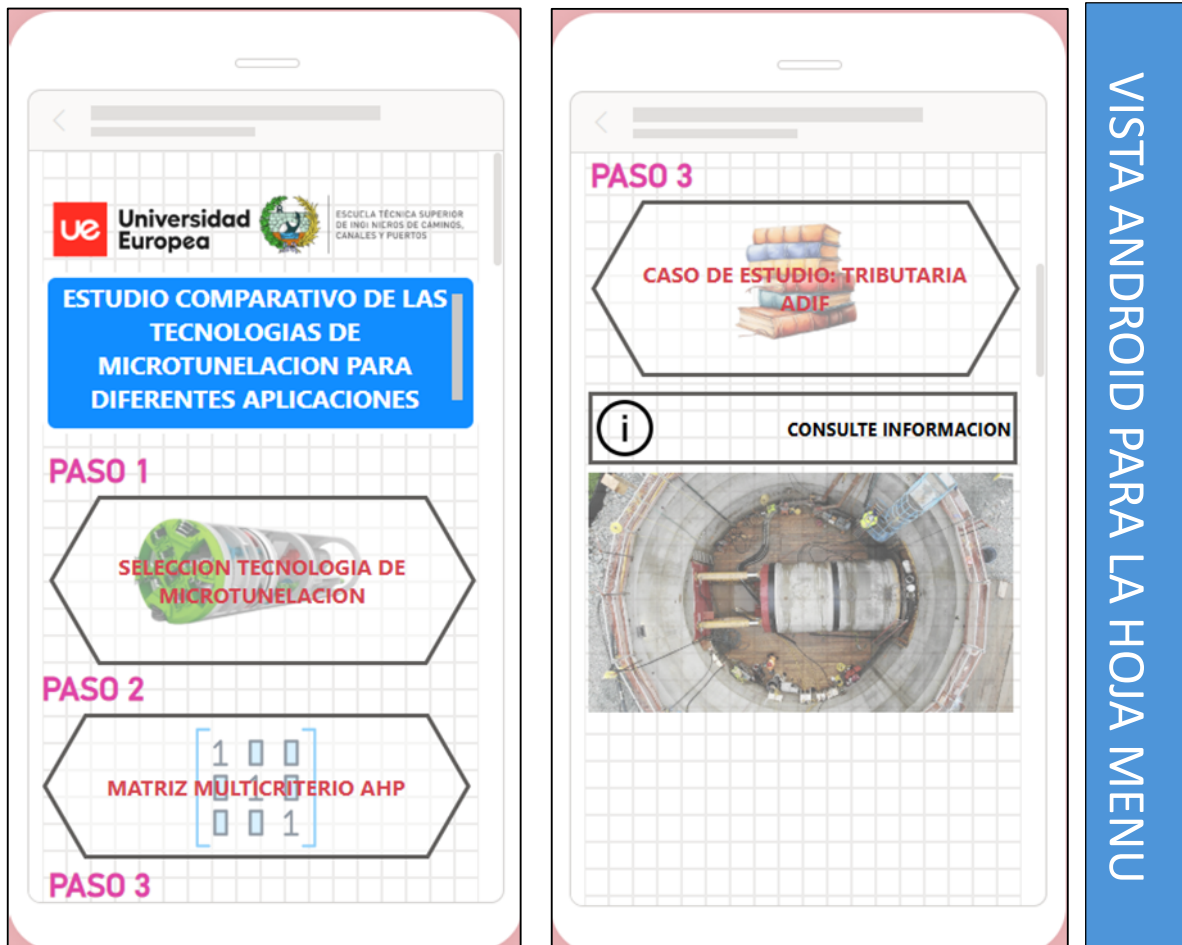
GIFFs DINAMICOS DEL PROCESO CONSTRUCTIVO DEL CASO DE ESTUDIO PARA LA EXTRACCION DIRECTA DE CONDICIONES TECNICOS DE DECISION

Figura 142. Explicación del funcionamiento de la hoja de caso de estudio de la herramienta de decision. Elaboración propia.

### 5.3.3.4. Versión móvil de la herramienta

Además de la versión de escritorio y de la versión accesible en entorno web, la herramienta se ha configurado para disponer de una visualización específica para dispositivos móviles, adaptando su interfaz a las particularidades de este tipo de soportes. Esta configuración implica una reorganización de los elementos visuales, priorizando la presentación de la información esencial y garantizando una correcta legibilidad y navegabilidad en pantallas de dimensiones reducidas. La visualización móvil permite mantener la funcionalidad principal de la herramienta, facilitando la consulta de resultados, la identificación de la alternativa recomendada y la revisión de los principales indicadores del modelo sin necesidad de acceder a un entorno de escritorio. De este modo, se amplía la accesibilidad de la aplicación y se refuerza su versatilidad, permitiendo su utilización en contextos diversos y favoreciendo una interacción más ágil con los resultados del proceso de toma de decisiones.

Se incluye a continuación una muestra de cada una de las pestañas de visualización de la herramienta en un dispositivo móvil.





VISTA ANDROID PARA LA HOJA DE INFORMACION ESPECIFICA

ue Universidad Europea ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

**PRESION**

NO

SI

**NF**

NO

SI

**DN**

>800mm

**ABIERTO**  
Primera fecha: TIPO DE ESCUDO

**CONDICIONANTES GEOTECNICOS E HIDROGEOLOGICOS**

**ESTABILIDAD**

ALTA

BAJA

MEDIA

**TIPO DE SUELO**

COHESIVOS

GRANULARES

MIXTOS

ROCA BLANDA

ROCA DURA

**PLASTICIDAD**

\*\*

\*\*

LL<50

LL>50

**RMR**

\*\*

<40

>80

Entre 40 y 80

**GRANULOMETRIA**

\*\*

<50%

<50%

>50%

**Balance Hidraulico.Sistema Slurry.**  
Primera fecha: TECNOLOGIA RECOMENDADA

**CONDICIONANTES GEOMETRICOS**

**ALIENACION**

CURVA

RECTA

**VISUAL**

NO

SI

**LONGITUD**

VISTA ANDROID PARA LA HOJA DE SELECCIÓN TECNOLÓGICA

LONGITUD

<120 m

>120 m

**CONDICIONANTES MECANICOS**

FRICCION

ALTA

BAJA

ASIENTOS

NO

SI

**CONDICIONANTES DEL LUGAR**

ESPACIO POZO

NO

ESAPCIO PLANTA

INYECCION/SEPARACION DE LODOS

NO

SI

GIROSCOPIO O IMU,PIPE JACKING MAS ESTACIONES DE EMPUJE INTERMEDIO (IJS),LUBRICACION EN TUBO,CONTROL TOPOGRAFICO,POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER ESTACION NO COMPACTA,ESPACIO PARA DISPONER PLANTA DE SEPARACION DE LODOS

fecha: CONFIGURACION

Estudiar radios de curvatura y pendientes longitudinales -  
Dimensionar muro de empuje según necesidades - Control de posibles cambios en las condiciones de fricción estudiadas - Control de tolerancias exigidas por condicionantes técnicos -  
Estudio de optimización de pozos -  
Estudio de capacidad de extracción de material extraído

Estudiar radios de curvatura y pendientes longitudinales -  
Dimensionar muro de empuje según necesidades - Control de posibles cambios en las condiciones de fricción estudiadas - Control de tolerancias exigidas por condicionantes técnicos -  
Estudio de optimización de pozos -  
Estudio de capacidad de extracción de material extraído

Primera fecha: ASPECTOS A TENER EN CU...

1

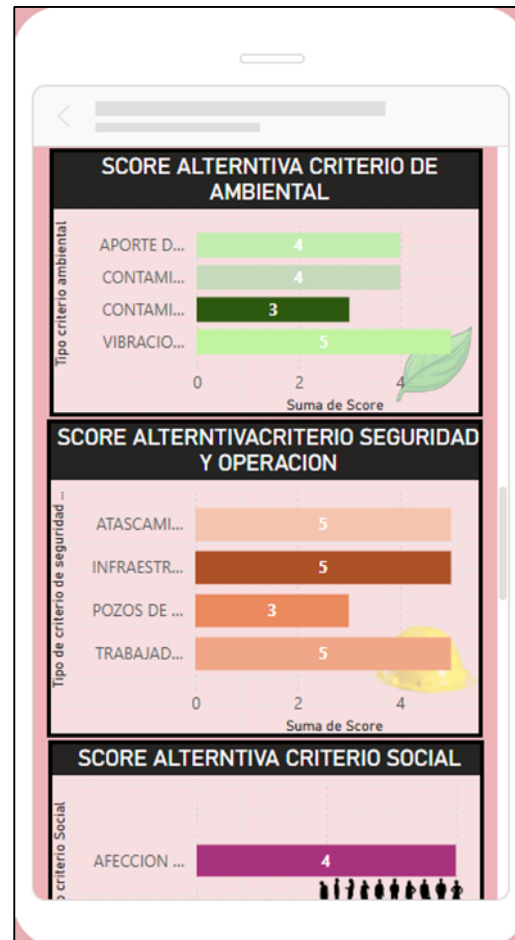
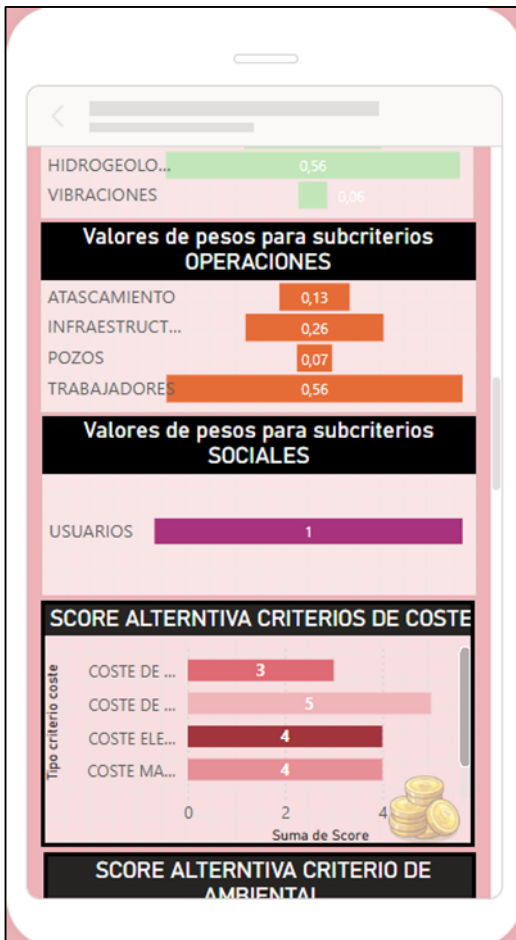
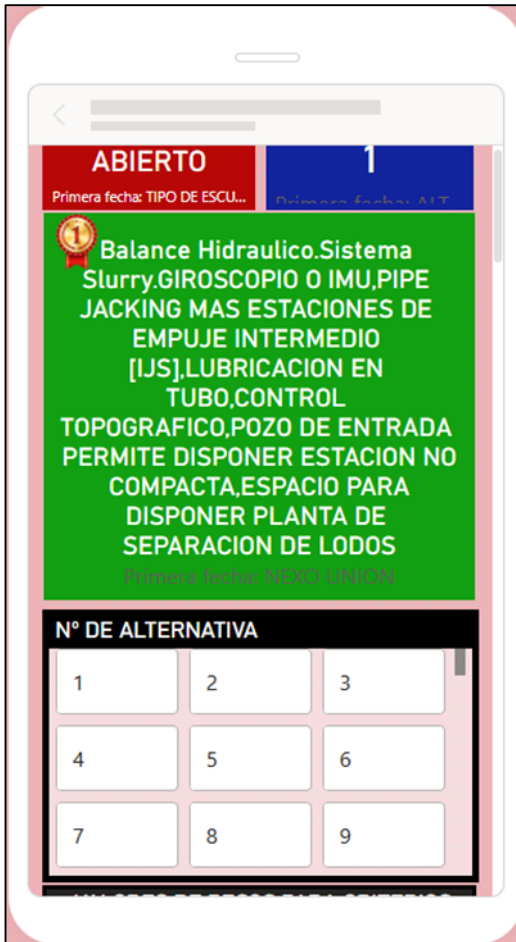
**Balance**  
Hidraulico.Sistema Slu...

Primera fecha: TECNOLOGIA ALTERNATIVA

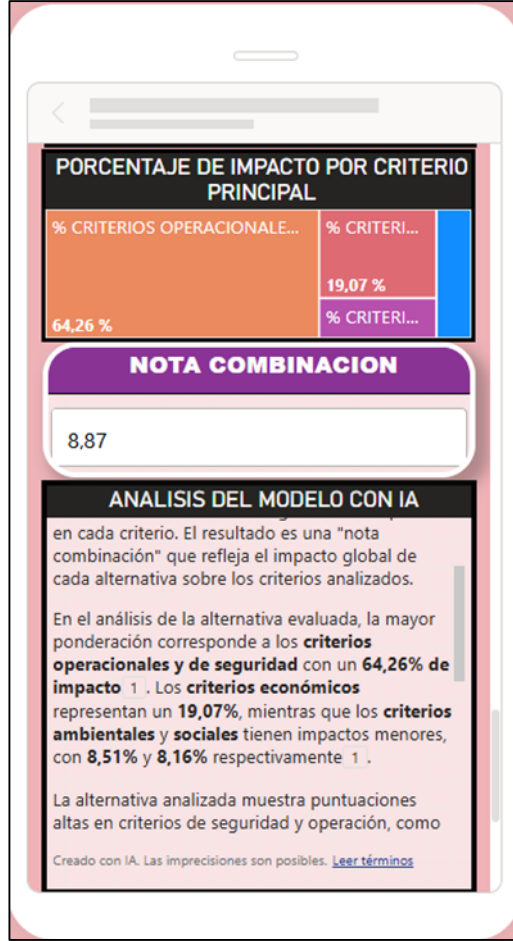
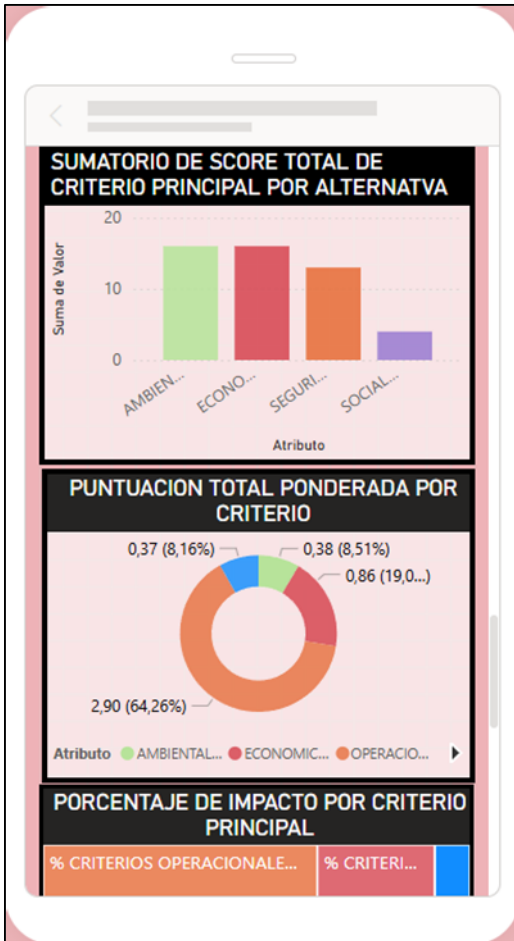
MENU

ANT SIG

VISTA ANDROID PARA LA HOJA DE SELECCIÓN TECNOLÓGICA



VISTA ANDROID PARA LA HOJA MATRIZ MULTICRITERIO AHP



**SISTEMA DE EXTRACCION** destaca con una puntuación de **5**, representando el mayor impacto dentro de su grupo **4** .

Dado que la nota combinación de la alternativa se encuentra en el rango alto, esto indica un impacto significativo sobre los criterios principales. Por lo tanto, siempre que sea posible, se recomienda considerar alternativas con una nota combinación menor para reducir el impacto global sobre los criterios evaluados.

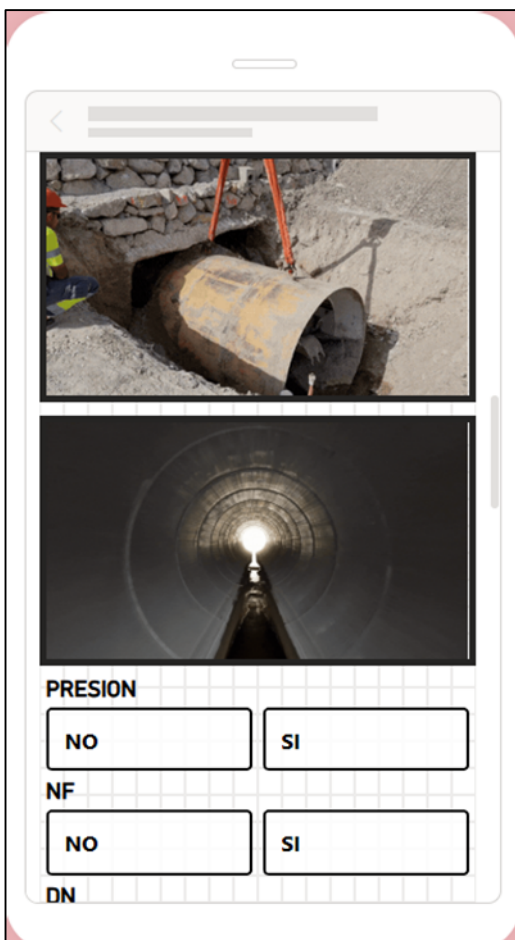
Creado con IA. Las imprecisiones son posibles. [Leer términos](#)

**Insertar un informe paginado**  
Muestra las tablas de los datos.

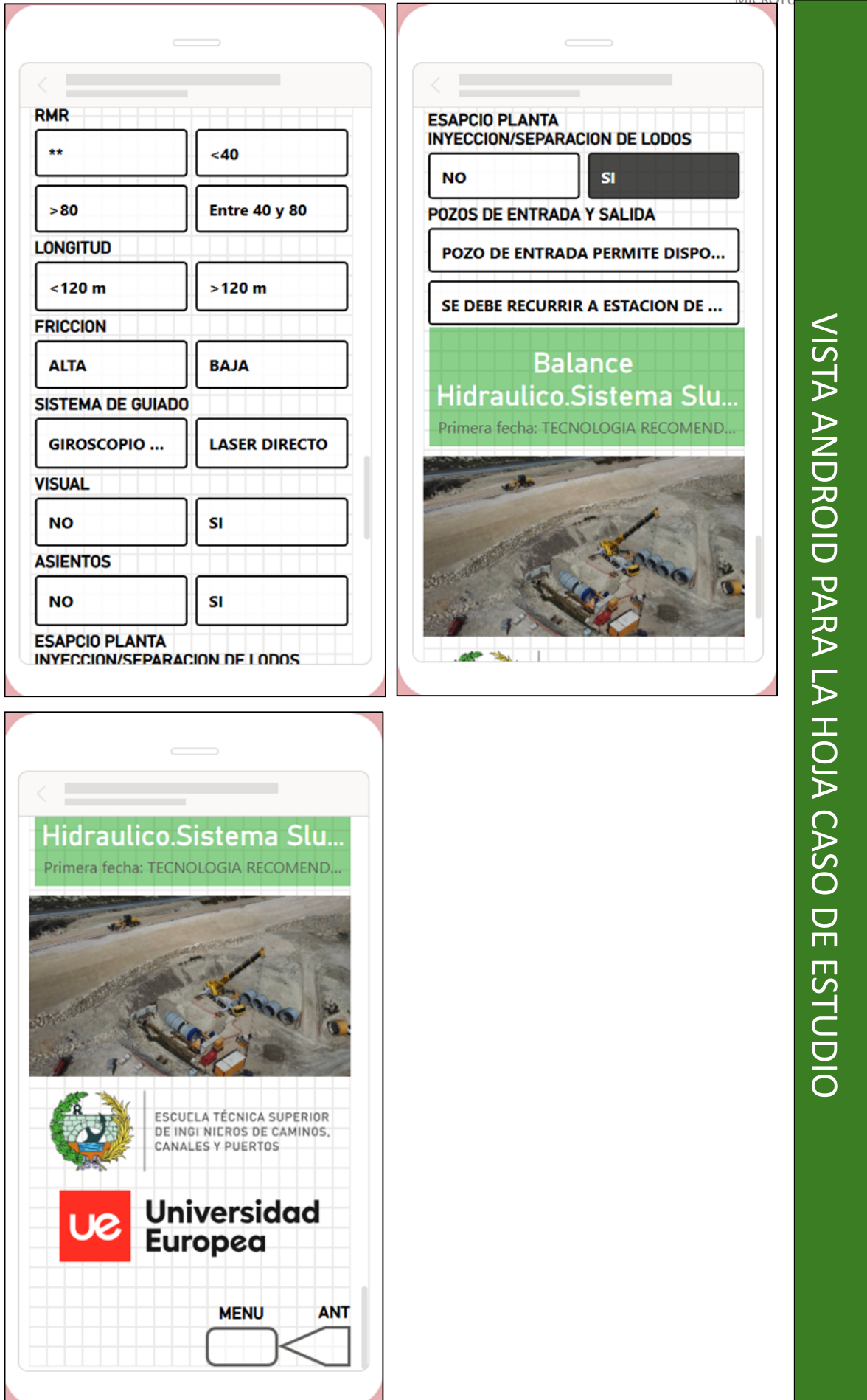
Crear informe paginado

Conectar con el informe

VISTA ANDROID PARA LA HOJA MATRIZ MULTICRITERIO AHP



VISTA ANDROID PARA LA HOJA CASO DE ESTUDIO



VISTA ANDROID PARA LA HOJA CASO DE ESTUDIO

Figura 143. Visualización Android de la herramienta de decision. Elaboración propia.

#### 5.3.4. Acceso a la herramienta de decisión

El acceso a la herramienta de ayuda a la decisión tecnológica se ha planteado mediante dos modalidades complementarias, con el objetivo de maximizar su accesibilidad y, al mismo tiempo, permitir su adaptación y evolución por parte de usuarios avanzados. Ambas opciones responden a distintos perfiles de uso y necesidades dentro del sector.

La primera modalidad de acceso se realiza vía web, mediante la publicación de la herramienta desarrollada en Power BI en un entorno online. En este caso, el usuario accede a la aplicación a través de un enlace directo, sin necesidad de disponer de credenciales específicas ni de una licencia de Power BI. Esta opción permite consultar la herramienta de forma inmediata desde un navegador web, facilitando la difusión y el uso generalizado de la aplicación como sistema de apoyo a la toma de decisiones, con un acceso sencillo y prácticamente libre.

#### ACCESO WEB A LA HERRAMIENTA DE AYUDA A LA DECISIÓN TECNOLÓGICA



La segunda modalidad de acceso se basa en la descarga del fichero de ejecución de la herramienta, a la que se accede mediante la lectura de un código QR que enlaza directamente con el archivo correspondiente. En este caso, la herramienta se abre y ejecuta en Power BI Desktop, lo que requiere que el usuario disponga de una cuenta activa (usuario y contraseña) y de una licencia de Power BI. Esta modalidad está orientada a un uso más avanzado, ya que permite no solo la explotación de la herramienta, sino también su edición, modificación y mejora de forma sencilla, posibilitando la adaptación del modelo de datos, de las ponderaciones o de las visualizaciones a nuevos contextos o requisitos específicos.

La coexistencia de ambas modalidades de acceso refuerza la versatilidad de la herramienta, permitiendo su utilización tanto como aplicación de consulta y apoyo a la decisión mediante acceso web, como entorno de desarrollo y evolución a través de la versión de escritorio, en función de las necesidades y capacidades del usuario.



## 6. CASO DE ESTUDIO.

Con el objetivo de evaluar y validar la fiabilidad técnica de la aplicación desarrollada, se plantea la realización de un caso de estudio basado en una actuación real ejecutada mediante la metodología de microtunelación. El análisis de un caso de éxito permite contrastar el comportamiento de la herramienta diseñada frente a una solución constructiva que ha demostrado su viabilidad técnica en condiciones reales de obra.

La selección de un caso de estudio real responde a la necesidad de comprobar si la lógica de decisión implementada en la aplicación es coherente con los criterios técnicos que habitualmente conducen a la elección de la microtunelación como método constructivo. En este sentido, el caso analizado constituye una referencia contrastada, al haberse ejecutado con éxito y cumplir los requisitos técnicos, geotécnicos y constructivos propios de este tipo de actuaciones.

A partir de la documentación técnica disponible del proyecto seleccionado, se extraen los principales condicionantes de partida que caracterizan la actuación, tales como las condiciones geotécnicas, el diámetro y longitud del túnel, la profundidad de ejecución, el entorno urbano o las restricciones superficiales existentes. Estos parámetros se emplean como datos de entrada en la aplicación desarrollada, reproduciendo de la forma más fiel posible el contexto en el que se tomó la decisión constructiva original.

Una vez introducidos los datos correspondientes al caso de estudio, se analiza la recomendación proporcionada por la aplicación y se compara con la solución finalmente adoptada en la actuación real. De este modo, se verifica si la herramienta propone la ejecución mediante microtunelación en consonancia con la metodología empleada en el caso de éxito, o si, por el contrario, se detectan desviaciones que pongan de manifiesto posibles limitaciones o aspectos mejorables del modelo de decisión implementado.

Este procedimiento permite no solo validar el correcto funcionamiento de la aplicación, sino también evaluar su capacidad para reproducir criterios técnicos habituales en la práctica profesional, aportando una base objetiva para valorar su utilidad como herramienta de apoyo a la toma de decisiones en fases iniciales de proyecto.

## 6.1. Propuesta de casuística y elección mediante el método de la tecnología apropiada y su posible alternativa.

### 6.1.1. Contexto de la actuación y antecedentes técnicos

La actuación objeto del presente caso de estudio viene precedida por una problemática recurrente en el tramo de terraplén comprendido entre los P.K. 389+550 y 389+960 de la línea ferroviaria Chinchilla de Montearagón – Cartagena, en el trayecto Agramón – Cieza.



Figura 144. Ubicación caso de estudio. Cieza. Murcia. Fuente propia.

Dicha problemática ha sido analizada a lo largo del tiempo mediante diversos estudios e inspecciones técnicas, cuyos resultados ponen de manifiesto la existencia de afecciones de carácter geotécnico e hidráulico que, con el paso de los años, han ido adquiriendo mayor relevancia.

La actuación objeto del presente caso de estudio tiene su origen en una problemática recurrente asociada a la insuficiente capacidad hidráulica de las obras de drenaje transversal existentes en el tramo de terraplén comprendido entre los P.K. 389+550 y 389+960 de la línea ferroviaria Chinchilla de Montearagón – Cartagena, en el trayecto Agramón – Cieza. Esta deficiencia ha condicionado históricamente el correcto funcionamiento del terraplén frente a episodios de lluvias intensas, dando lugar a situaciones de riesgo para la estabilidad de la infraestructura ferroviaria.

Los distintos Estudios de Riesgos Geotécnicos de la Infraestructura (E.R.G.I.), elaborados desde finales de la década de 1980 y actualizados posteriormente, ya ponían de manifiesto la vulnerabilidad del terraplén ante eventos de avenida. En particular, en la documentación correspondiente al estudio de 1988 se hacía referencia a la realización de un análisis específico destinado a evaluar los daños que podría sufrir el terraplén en el supuesto de que, durante episodios de fuertes precipitaciones, el agua quedase embalsada en el lado de aguas arriba como consecuencia de la capacidad insuficiente de las obras de drenaje transversal.

Esta problemática se vio confirmada y agravada con el paso del tiempo, manifestándose de forma especialmente significativa durante la DANA de septiembre de 2019. Las intensas precipitaciones asociadas a este episodio provocaron la acumulación de agua aguas arriba del terraplén, generando sobrecargas hidráulicas no previstas y una evacuación deficiente de los caudales de avenida. Como consecuencia directa, se produjeron daños en la base del terraplén que hicieron necesaria la ejecución de obras de emergencia para restablecer la seguridad y funcionalidad de la infraestructura.

El informe técnico específico “Terraplén P.K. 389+550 – 389+960”, confirmó que las incidencias detectadas en el tramo, tales como deformaciones en la vía y alteraciones del estado tensional de los carriles, estaban directamente relacionadas con asientos del cuerpo del terraplén inducidos por una evacuación insuficiente de las aguas de avenida a través de los drenajes transversales existentes.



Figura 145. ODTs tributarias a colmatadas. Fuente propia.

Este diagnóstico reforzó la conclusión de que la causa principal de las afecciones no residía en un defecto puntual del relleno, sino en la incapacidad del sistema de drenaje para gestionar adecuadamente los caudales asociados a eventos hidrológicos extremos.

#### 6.1.2. Descripción del ámbito de actuación.

La línea Chinchilla -Cartagena se inauguró en 1865. El terraplén inspeccionado tiene unos 460 metros de longitud, estando su inicio en el P.K. 389+500 donde concluye un tramo de desmontes y su final en el puente metálico que salva la Rambla del Judío. La altura máxima del relleno, 15 m., se alcanza sobre la obra de drenaje ODT 389.8. La pendiente de los taludes es mayor de 45º y en varios tramos supera los 50º - 60º debido al desarrollo de abarrancamientos. El perfil de los taludes está verticalizado en su parte superior y más tendido en su base.

El terraplén corta dos ramblas que son tributarias de la principal, que es la Rambla del Judío. Hay dos obras transversales en cada una de estas vaguadas para darles paso bajo el relleno, observándose que ambas obras han perdido parcialmente su funcionalidad y capacidad hidráulica.

En el P.K. 389+760 está la obra de drenaje transversal que centra el caso de estudio. Se trata de una tajea con un diámetro de unos dos metros. También está parcialmente aterrada y hundida en el cimiento del terraplén.

### 6.1.3. *Caracterización geológica*

El sustrato rocoso en el área de apoyo del terraplén está constituido por una unidad miocena de margas, calizas y areniscas. En el entorno del terraplén son exclusivamente margas correspondientes a las tradicionalmente denominadas facies Tap del Prebético externo.

Estos materiales afloran tanto en el desmonte situado justo antes del terraplén considerado, como en numerosos puntos del área de apoyo del propio terraplén e incluso en los márgenes de las dos ramblas. En estos afloramientos se han encontrado margas grises masivas, no observándose la existencia de las intercalaciones calizas y de areniscas. Las margas presentan una laminación fina y aspecto noduloso y tienen la consistencia de roca blanda.



Figura 146. Muestra tipo de suelo. Fuente propia.

La mayor parte del terraplén estaría apoyado en estas margas, que son una unidad competente y que se puede considerar incompresible bajo la carga de tierras del terraplén. En el fondo de las dos ramblas que corta el terraplén se detectan rellenos aluviales cuya potencia se desconoce, este hecho no se considera importante debido a que en los bordes del mismo cauce se han encontrado afloramientos de margas grises. La tercera unidad litológica que se ha encontrado en esta área corresponde a los vertidos antrópicos depositados en la cima de las dos colinillas existentes en el lado derecho del terraplén y en los pies del terraplén para construir los caminos de servicio. Por lo que se refiere a los materiales con que se construyó el núcleo del terraplén, se deduce que se corresponden a las mismas margas grises que afloran en el desmonte situado al inicio del terraplén y que con las labores de extracción, transporte y compactación constituyen un material de tipo “todo uno” formado por cantos margosos duros y matriz limo-arcillosa gris. Sobre su evolución en el tiempo, es razonable pensar que deben tener el mismo carácter evolutivo que presentan cuando quedan expuestos a la intemperie en afloramientos. Respecto a la existencia de agua freática, en el sustrato margoso no se han observado humedades o surgencias, ni en el desmonte del inicio, ni en los afloramientos situados bajo el terraplén.

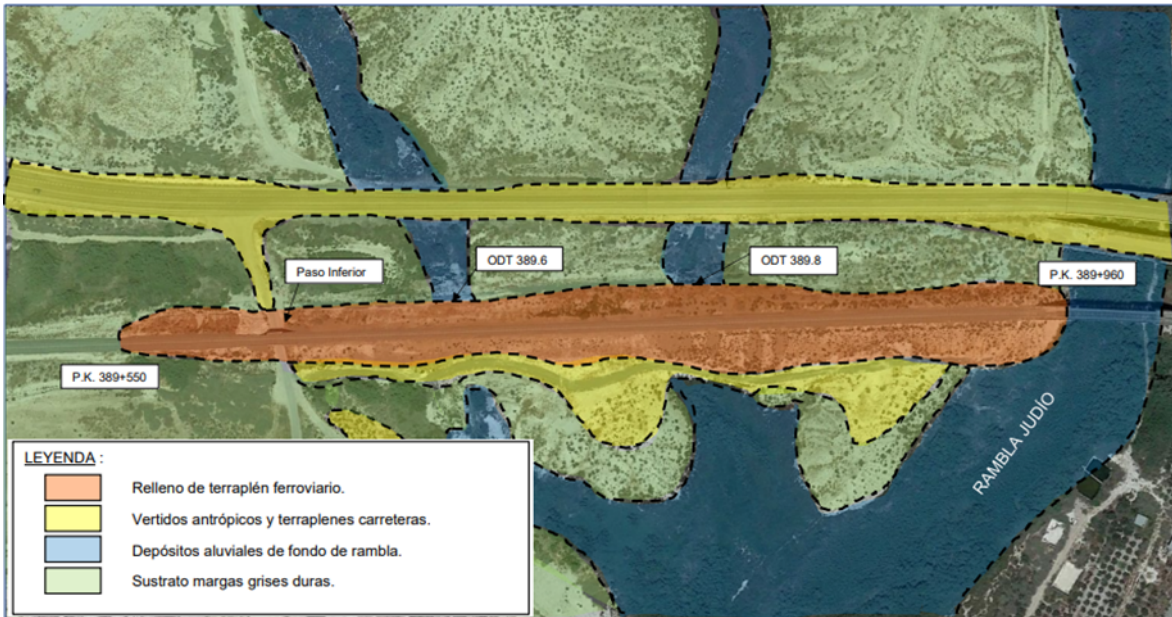


Figura 147. Mapa geológico del ámbito. Fuente propia.

#### 6.1.4. Estudio geotécnico

Como información geotécnica de referencia se toma el estudio realizado para la Determinación del Estado del Terraplén localizado entre los PKs 389+500 y 389+960 de la línea ferroviaria Chinchilla de Montearagón – Cartagena. Dicho estudio está compuesto por 6 sondeos mecánicos con modelo a rotación y recuperación continua de testigo, ensayando las muestras recuperadas en laboratorio. También cuenta con un total de 6 ensayos de penetración dinámica DPSH. Cuatro de los sondeos se han realizado en las zonas laterales del terraplén, mientras que los otros dos y los ensayos de penetración dinámica se efectuaron sobre la plataforma ferroviaria.

Sondeo nº	Rellenos		Margas		Margocalizas y calizas		Total
	m.l.	%	m.l.	%	m.l.	%	m.l.
1	7.80	78.0	0.00	0.0	2.20	22.0	10.00
2	8.50	70.8	0.00	0.0	3.50	29.2	12.00
3	4.70	48.0	0.00	0.0	5.10	52.0	9.80
4	1.00	16.7	2.00	33.3	3.00	50.0	6.00
5	9.00	87.4	1.30	12.6	0.00	0.0	10.30
6	12.00	79.2	3.15	20.8	0.00	0.0	15.15
<b>Total</b>	<b>43.00</b>	<b>68.0</b>	<b>6.45</b>	<b>10.2</b>	<b>13.80</b>	<b>21.8</b>	<b>63.25</b>

Tabla 67. Sondeos ejecutados en el ámbito de la actuación. Fuente propia.



Figura 148. Ejecución de sondeos en el ámbito de actuación. Fuente propia.



Figura 149. Muestras de material extraído de los 6 sondeos realizados. Fuente propia.

Sondeo n°	Tipo	Profundidad (m)	N <sub>15</sub>	N <sub>15</sub>	N <sub>15</sub>	N <sub>15</sub>	N <sub>30</sub>
1	SPT	2.00-2.45	2	3	3	-	6
	INALTERADA	4.00-4.60	4	7	7	10	8*
	SPT	6.00-6.45	2	3	2	-	5
	SPT	8.20-8.25	50	-	-	-	Rechazo
2	INALTERADA	2.00-2.60	5	5	5	6	6*
	SPT	4.00-4.45	2	2	2	-	4
	INALTERADA	6.00-6.60	3	4	4	4	5*
	SPT	8.00-8.45	4	3	5	-	8
3	SPT	2.00-2.45	3	2	3	-	5
	SPT	4.00-4.45	4	4	7	-	11
	SPT	6.00-6.05	50	-	-	-	Rechazo
	SPT	8.30-8.35	50	-	-	-	Rechazo
4	SPT	2.00-2.13	50	-	-	-	Rechazo
5	SPT	1.80-2.25	4	3	3	-	6
	INALTERADA	3.20-3.80	7	9	8	9	10*
	INALTERADA	5.20-5.80	7	11	11	14	13*
	SPT	7.60-8.05	8	9	14	-	23
	SPT	9.30-9.75	6	7	12	-	19
6	INALTERADA	3.50-4.10	6	10	11	16	13*
	INALTERADA	6.55-7.15	11	16	26	32	25*
	SPT	9.55-10.00	4	5	6	-	11
	INALTERADA	12.55-13.10	12	30	48	45	47*
	SPT	14.70-15.15	21	31	33	-	64

Tabla 68. NSPT. Fuente propia.

Con los testigos y muestras recuperados en los sondeos se han efectuado los ensayos que se indican.

Unidades	Designación
7	Análisis granulométrico por tamizado (UNE 103101/95)
7	Determinación de los límites de Atterberg (UNE 103103/94 y 103104/93)
12	Determinación de la humedad natural (UNE 103300/93)
5	Determinación de la densidad aparente (UNE 103301/94)
6	Compresión simple en suelos y uniaxial en roca (UNE 103400/93- UNE 22959-1/90)
4	Corte directo CU (UNE 103401/98)
2	Presión de hinchamiento (UNE 103601/96)
1	Determinación del contenido de sulfatos (UNE 83963/08)
2	Proctor modificado (UNE 103501/94)
1	Determinación del contenido en materia orgánica (UNE 103204/19)
1	Determinación del contenido en sales solubles (UNE 103205/96)
1	Determinación del contenido en yesos (UNE 103206/06)

Tabla 69. Ensayos efectuados para caracterización geotécnica. Fuente propia.

Los resultados obtenidos se resumen a continuación:

**G:** grava (2.0-60.0 mm) **S:** arena (0.06-2.0 mm) **L:** limo (0.002-0.06 mm) **C<sub>L</sub>:** arcilla (<0.002 mm) **L<sub>L</sub>:** límite líquido **I<sub>p</sub>:** índice de plasticidad **D<sub>s</sub>:** densidad seca g/cm<sup>3</sup> **D<sub>h</sub>:** densidad húmeda g/cm<sup>3</sup> **H:** humedad (%) **Q<sub>u</sub>:** resistencia a compresión simple Mpa **Φ:** Ángulo de rozamiento interno **C:** Cohesión Kpa **PH:** Presión de hinchamiento kPa **Sulf:** Contenido en sulfatos mg/kg.

Sondeo	Muestra	Profundidad	G	S	L	C <sub>L</sub>	L <sub>L</sub>	I <sub>n</sub>	H	D <sub>s</sub>	D <sub>h</sub>	Qu	φ	C	PH	Sulf
1	SPT	2.00-2.45							13.5							
	INALTERADA	4.00-4.60							15.0	1.69	1.94		17.7	33		
	SPT	6.00-6.45							17.7							
	TESTIGO	3.00-4.00	3.8	10.3	85.9	36.2	18.6								0	
2	TESTIGO	9.40-9.80									2.33	25.3				
	INALTERADA	2.00-2.60							12.0	1.66	1.86					
	SPT	4.00-4.45							12.5							
	INALTERADA	6.00-6.60							26.2	1.56	1.97		20.6	55		
	SPT	8.00-8.45							14.9							
	TESTIGO	3.00-5.00	12.2	18.9	68.9	36.0	16.3									7553
	TESTIGO	9.55-9.80										18.3				
	TESTIGO	10.70-11.00									2.35	9.4				
3	SPT	2.00-2.45							10.2							
	SPT	4.00-4.45							6.4							
	TESTIGO	8.80-9.20									2.36	24.2				
4	TESTIGO	4.50-4.80									2.34	18.7				
	TESTIGO	5.15-5.40									2.33	21.7				
5	SPT	1.80-2.25							5.8							
	INALTERADA	5.20-5.80							17.7	1.67	1.97		16.9	0		
	SPT	7.60-8.05							12.2							
	SPT	9.30-9.75							13.4							
	TESTIGO	3.00-5.00	8.7	16.3	75.0	36.9	17.2									
	TESTIGO	9.00-10.30	0	4.8	95.2	37.7	21.8									
	INALTERADA	3.50-4.10							15.9	1.76	2.05		37.4	1		
6	SPT	6.55-7.15							11.2							
	SPT	9.55-10.00							7.9							
	INALTERADA	12.55-13.10							9.5						25	
	TESTIGO	13.00-14.00	0	22.1	77.9	28.7	13.7									
CATA	1	SUPERFICIE	7.2	14.3	78.5	39.9	19.0									
CATA	2	SUPERFICIE	5.4	35.6	59.0	34.9	14.3									

Tabla 70. Resultados ensayos. Fuente propia.

Se incluye a continuación la distribución de los niveles geotécnicos en el sondeo.

Sondeo		Unidad geotécnica	Profundidad (m)	Espesor (m)
1	0	Rellenos de gravas arenosas	0.00-1.40	7.80
		Rellenos de margas y margas removilizadas	1.40-7.80	
	I	Margocalizas	7.80-8.70	2.20
2	0	Rellenos de gravas arenosas	0.00-1.30	8.50
		Rellenos de margas y margas removilizadas	1.30-8.50	
	I	Margocaliza	8.50-9.00	3.50
Caliza margosa	9.00-12.00			
3	0	Relleno de gravas arenosas	0.00-1.30	4.70
		Relleno de margas y margas removilizadas	1.30-4.70	
	I	Margocaliza algo alterada	4.70-5.60	5.10
Margocaliza con intercalaciones margosas	5.60-9.80			
4	0	Relleno de margas	0.00-1.00	1.00
	I	Margocaliza con intercalaciones margosas	1.00-3.00	5.00
		Caliza margosa	3.00-6.00	
5	0	Relleno de balasto	0.00-0.90	9.00
		Relleno de arenas y gravas finas	0.90-1.70	
		Relleno de margas con yesos	1.70-9.00	
I	Margas con margocalizas	9.00-10.30	1.30	
6	0	Relleno de balasto	0.00-0.60	12.00
		Relleno de limos arenosos con cantos y bolos	0.60-1.20	
		Relleno arenoso con cantos dispersos	1.20-2.60	
	Relleno de margas con cantos dispersos	2.60-12.00		
I	Margas con alguna margocaliza y yesos	12.00-15.15	3.15	

DPSH 1	0	Rellenos del terraplén y margas alteradas	0.00-6.00	6.00
	I	Margas y margocalizas	6.00-6.40	0.40
DPSH 2	0	Rellenos del terraplén y margas alteradas	0.00-8.40	8.40
	I	Margas y margocalizas	8.40-9.60	1.20
DPSH 3	0	Rellenos del terraplén y margas alteradas	0.00-12.00	12.00
	I	Margas y margocalizas	12.00-15.00	3.00
DPSH 4	0	Rellenos del terraplén y margas alteradas	0.00-17.20	17.20
	I	Margas y margocalizas	17.20-18.00	0.80
DPSH 5	0	Rellenos del terraplén y margas alteradas	0.00-8.20	8.20
	I	Margas y margocalizas	8.20-10.60	2.40
DPSH 6	0	Rellenos del terraplén y margas alteradas	0.00-14.00	14.00
	I	Margas y margocalizas	14.00-17.60	3.60

Tabla 71. Distribución de niveles geotécnicos detectados. Fuente propia.

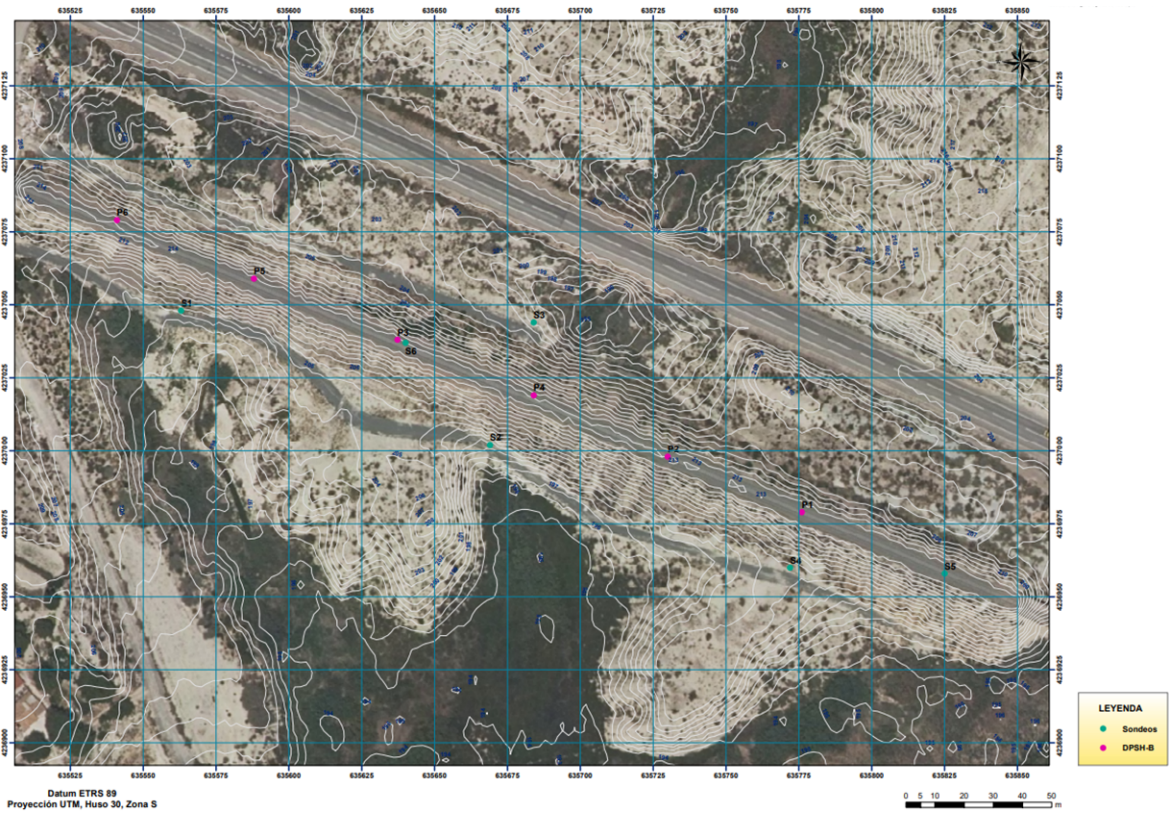


Figura 150. Plano de distribución de ensayos ejecutados en el ámbito.

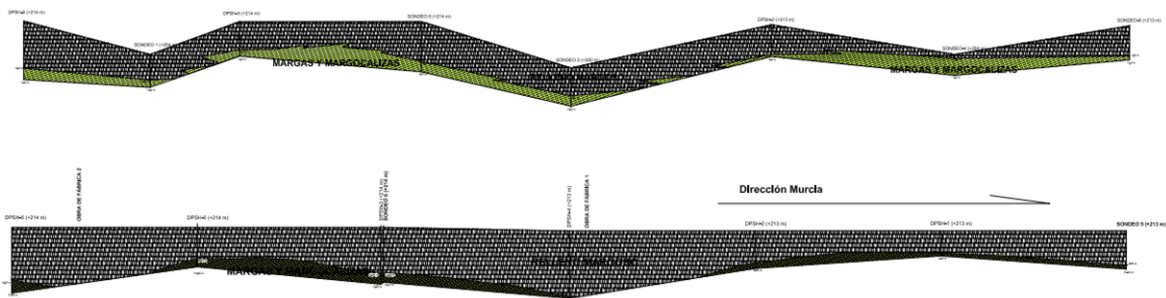


Figura 151. Perfiles longitudinales geológicos. Fuente propia.

A modo de resumen geotecnico se muestran los siguientes parametros:

Parámetros	Tipo de suelo		
	Rellenos margosos	Eluvi6n margoso	Margas y margocalizas
Número de penetración medio, $N_{30}$	9	42	Rchz.
Cohesión efectiva (kPa)	10	50	250
Cohesión sin drenaje (kPa)	37	300	7700
Peso específico aparente ( $kN/m^3$ )	18,6	21,0	23,5
Ángulo de rozamiento interno efectivo ( $^\circ$ )	23	30	35
Módulo de elasticidad (MPa)	9,6	77	300
Coefficiente de Poisson	0,40	0,30	0,25

Tabla 72. Resmen de parámetros geotécnicos de los suelos interceptados. Elaboración propia.

#### 6.1.5. Problemática detectada.

El terraplén original sobre el que se asienta la superestructura de vía tiene 150 años de antigüedad (inauguración de la línea 1865) y corresponde a un diseño muy alejado de los estándares de construcción actuales, tanto en su geometría, como en los materiales que lo constituyen.

Las obras de drenaje también corresponden a un criterio de diseño y dimensionamiento muy alejado de los actuales, el mantenimiento de estas es inexistente y se encuentran parcialmente aterradas, habiendo perdido su capacidad hidráulica. En esta situación, los caudales que son capaces de asumir son mínimos y muy alejados de los correspondientes a regímenes de lluvias torrenciales. En el caso extremo de un episodio de lluvias excepcionales y ante un funcionamiento de las ramblas en régimen de avenida el terraplén se comporta como un dique produciendo el embalsamiento de agua en su lado izquierdo.

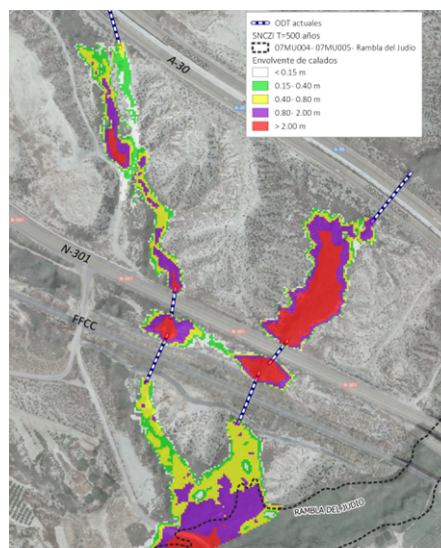


Figura 152. Estudio hidráulico previa microtunelaci6n. Fuente propia.

Esta situaci6n produce socavaciones en el pie del terraplén debido a arrastres del flujo de agua y también debe suponer importantes sobrepresiones en el cimiento y migraciones de finos en el

núcleo debido a la circulación de agua en su interior. El reflejo de estos procesos en la plataforma ferroviaria es la generación de asentamientos y deformaciones que se transmiten a la vía.



Figura 153. Estado y defectos de la vía debido al embolsamiento de agua. Fuente propia.

#### 6.1.6. Propuesta de actuación

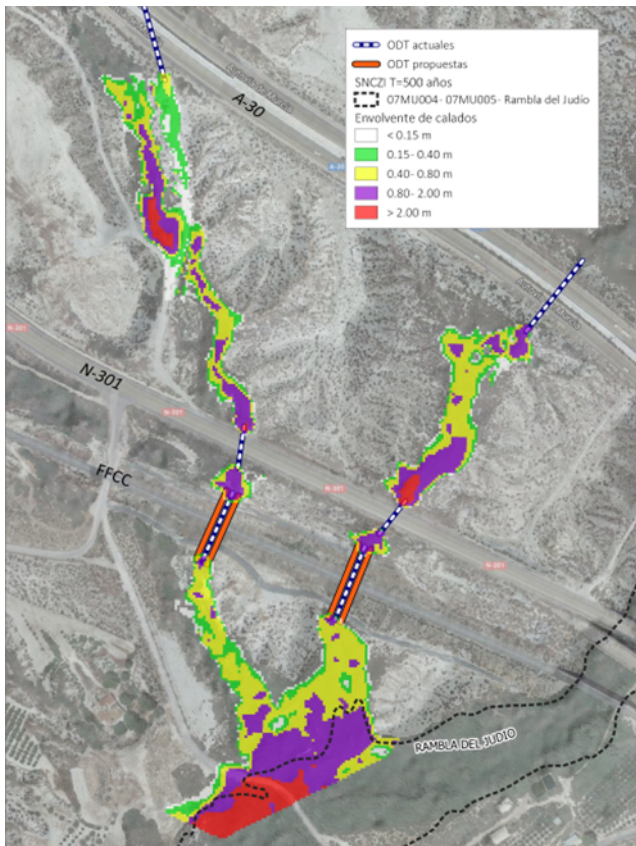


Figura 154. Estudio hidráulico tras microtunelación y mejora de la capacidad. Fuente propia.

Considerando la elevada altura del terraplén, su constitución con materiales evolutivos de baja calidad geotécnica y la existencia de un sustrato natural, medianamente competente, las alternativas que se considera que atenuarían los daños hasta límites admisibles o los eliminarían por completo, se pueden resumir en el redimensionamiento de las obras de drenaje con los periodos de retorno actualmente considerados. Se requiere por tanto la hincada de una tubería de mayor diámetro de manera paralela a la existente de tal modo que en caso de avenida el sistema tenga capacidad suficiente como para evitar embalsamientos de agua.

### 6.1.7. *Solución tecnológica adoptada para el caso de estudio*

Una vez identificada la necesidad de mejorar la capacidad hidráulica del sistema de drenaje transversal del terraplén y analizadas las condiciones particulares de la actuación, se optó por la ejecución de la nueva obra de drenaje mediante el uso de técnicas de microtunelación. Como ya se ha venido viendo a lo largo de todo el documento esta metodología constructiva permite la instalación de conducciones de forma controlada, minimizando la afección a la infraestructura ferroviaria en servicio y garantizando elevados niveles de precisión geométrica y seguridad durante la ejecución.

La selección tecnológica adoptada para la ejecución de la microtunelación se llevó a cabo teniendo en cuenta la experiencia de expertos en la materia, principalmente técnicos senior del sector en base a los condicionantes específicos de la actuación, entre los que destacan las condiciones geotécnicas del terreno así como condicionantes geométricos, estructurales, etc.

La recomendación realizada por los expertos en la materia para la selección de la maquinaria principal fue la utilización de un escudo abierto, con una máquina de extracción dotada con cazo, debido a que el estudio geotécnico mostraba que existía estabilidad en el frente y ausencia de nivel freático tal y como pudo verse en la información geotécnica mostrada anteriormente.



*Figura 155. Escudo abierto con útil de corte mediante cazo empleado en el caso de estudio. Fuente propia.*

En cuanto a la selección de la estructura de empuje para el hincado de los tubos, debido a la disponibilidad de espacio existente en el pozo de entrada se optó por una configuración de estación de empuje no compacta garantizando así que la fuerza transmitida para el hincado fuese suficiente ante cualquier cambio de terreno no contemplado en el estudio geotécnico realizado.



*Figura 156. Muro de empuje y estación no compacta utilizada en el caso de estudio. Fuente propia.*

Dado que se trata de una alineación recta, con una distancia de menos de 120 metros, no ha sido necesario recurrir a estaciones intermedias de empuje. Además, los sistemas de guiado empleados debido a la geometría descrita ha sido el denominado Laser directo.



*Figura 157. Vista aérea del ámbito. Alineación recta y cruce inferior a 120 m. Fuente propia.*

Dado que la perforación se ejecutó con la vía ferroviaria fuera de servicio se permita la posibilidad de que se generasen pequeños asientos por descompresión, motivo por el cual no se recurrió a tecnologías con sistema tipo slurry con el cual se minimiza el riesgo de posibles descompresiones. Para controlar estos asientos se llevaron a cabo trabajos de control topográfico mediante la auscultación de la cabeza de los taludes del terraplén.



*Figura 158. Hitofeno en la cabeza del talud para control de asientos mediante topografía clásica. Fuente propia.*

Para el caso de estudio analizado no se disponía de información específica ni de ensayos que permitieran caracterizar de forma precisa la fricción ejercida por el terreno sobre el tubo durante el avance por empuje. No obstante, a partir de la experiencia previa de los técnicos intervinientes y del conocimiento acumulado en actuaciones similares, se consideró que el comportamiento friccional esperado no presentaría valores elevados. En consecuencia, se optó por no recurrir al empleo de lodos bentónicos como sistema de lubricación del tubo, al entender que, en condiciones normales, la fricción desarrollada en el contacto entre suelos de naturaleza cohesiva y conducciones de hormigón suele situarse en rangos de moderados a bajos, permitiendo la ejecución de la microtunelación sin necesidad de medidas adicionales de reducción de rozamiento.

A pesar de que en el emplazamiento existía espacio suficiente para la implantación de una planta de separación de lodos, se optó por un sistema de extracción del material excavado basado en el transporte mediante cintas y vagonetas. Esta decisión se fundamentó en las características del

terreno atravesado, que, si bien presentaba cierta cohesión, no alcanzaba valores suficientemente elevados como para justificar el empleo de polímeros ni, por tanto, la necesidad de un sistema de excavación con lodos que requiriese una planta de separación asociada. En estas condiciones, el sistema de cintas y vagonetas permitió una evacuación eficaz del material extraído del frente de excavación, resolviendo de manera satisfactoria este aspecto del proceso constructivo sin introducir complejidad adicional en la obra.



Figura 159. Elementos de extracción de material empleado en el caso de estudio. Fuente propia.

## 6.2. Resultados.

Una vez analizados los antecedentes de la actuación y recopilados de manera práctica los condicionantes técnicos, geotécnicos y constructivos que caracterizan el caso de estudio, se dispone de la información necesaria para su incorporación en la herramienta de decisión desarrollada. Dichos condicionantes representan los parámetros de entrada requeridos por la aplicación y

permiten reproducir, de forma simplificada pero coherente, el contexto real en el que se adoptó la solución constructiva ejecutada.

Con los datos ya sistematizados, se procede a introducirlos en la herramienta con el objetivo de evaluar la tecnología recomendada por la aplicación y contrastarla con la composición tecnológica finalmente empleada en la actuación real. Este contraste constituye un paso clave dentro del proceso de validación, ya que permite comprobar si la lógica de decisión implementada es capaz de identificar como adecuada la misma solución tecnológica que fue seleccionada en la práctica, a partir de criterios técnicos contrastados.

De este modo, el análisis no se limita a verificar el correcto funcionamiento interno de la herramienta, sino que permite evaluar su alineación con la experiencia real de obra y con los criterios habituales de selección tecnológica en actuaciones de microtunelación. La coincidencia o divergencia entre la tecnología recomendada por la aplicación y la utilizada en el caso de estudio proporciona una medida objetiva de la fiabilidad y utilidad de la herramienta como apoyo a la toma de decisiones en fases iniciales de proyecto.

A continuación, se incluye una tabla resumen de los datos que servirán de entrada a la herramienta:

DATOS DE ENTRADA		DATOS CASO DE ESTUDIO	JUSTIFICACION DEL DATO DE ENTRADA
<b>PRESION EN EL FRENTE</b>	SI-NO	NO	El estudio geotécnico justifica que los materiales que a priori se encontrarán presentan una estabilidad media alta, siendo la mayor parte de ellos suelos cohesivos
<b>PRESENCIA DEL NF</b>	SI-NO	NO	En el estudio geotécnico se evidencia que a la cota a la cual se ejecuta la microtunelación no existe presencia del nivel freático.
<b>Diámetro</b>	>800mm	>800mm	Se busca incrementar la capacidad hidráulica de la ODT existente, la cual es de en torno a 2 m. El diámetro de la nueva ODT es de 3000 mm.
<b>Estabilidad del frente</b>	Alta, media, baja	Alta	El estudio geotécnico arroja parámetros que hacen confiar que la estabilidad el frente sea alto.
<b>Tipo de suelo</b>	Cohesivo, granulares, mixtos, roca dura, roca blanda	Cohesivo	El estudio geotécnico indica una predominancia de suelos cohesivos estables.

DATOS DE ENTRADA		DATOS CASO DE ESTUDIO	JUSTIFICACION DEL DATO DE ENTRADA
<b>Alineación</b>	Recta-Curva	Recta	Al tratar de un cruce de una ODT bajo la vía del FCC, la alineación de la microtunelación será recta.
<b>Visual</b>	Si-No	Si	AL tratarse de una alineación recta de corta distancia la visual entre el pozo de taque y la cabeza de perforación debe ser siempre constante.
<b>Longitud</b>	<120 m - >120 m	< 120 m	La distancia entre el pozo de ataque y el pozo de salida del caso de estudio es de unos 90 metros.
<b>Asientos</b>	Si-No	Si	Se permiten asientos diferenciales durante la ejecución de la microtunelación al no estar en servicio la vía ferroviaria.
<b>Fricción</b>	Alta-Baja	Baja	No se disponen de datos técnicos para ello. Se define como baja debido al juicio de expertos de la materia participantes en la actuación.
<b>Espacio pozos</b>	Si-No	Si	Se dispone de espacio suficiente en el pozo de entrada, tras acondicionamiento previo del entorno.
<b>Espacio estación lodos</b>	Si-No	Si	Se dispone de espacio suficiente en las inmediaciones del pozo de entrada para albergar una estación de gestión de lodos si fuese necesario.

*Tabla 73. Datos de entrada a la herramienta de decisión extraídos del caso de estudio. Elaboración propia.*

Se procede por tanto a introducir dichos datos en la herramienta de decisión diseñada:

**ue Universidad Europea**

**217**  
Primera fec...

**ABIERTO**  
Primera fecha: TIPO DE ESCUDO

**PRESION**  
NO  
SI

**NF**  
NO  
SI

**DN**  
>800mm

**CONDICIONANTES GEOTECNICOS E HIDROGEOLOGICOS**

**ESTABILIDAD**  
ALTA

**TIPO DE SUELO**  
COHESIVOS

**PLASTICIDAD**  
LL < 50  
LL > 50

**RMR**  
\*\*

**GRANULOMETRIA**  
\*\*

**CONDICIONANTES GEOMETRICOS**

**ALIENACION**  
CURVA  
RECTA

**VISUAL**  
NO  
SI

**LONGITUD**  
<120 m  
>120 m

**CONDICIONANTES MECANICOS**

**ASIENTOS**  
NO  
SI

**FRICCION**  
ALTA  
BAJA

**CONDICIONANTES DEL LUGAR**

**ESPACIO POZO**  
NO  
SI

**ESAPCIO PLANTA INYECCION/SEPARACION DE LODOS**  
NO  
SI

**Escudo abierto. Util de corte con Cazo/Rozadera.**  
Primera fecha: TECNOLOGIA RECOMENDADA

**LASER DIRECTO, PIPE JACKING, NO NECESITA LUBRICACION EN TUBO, CONTROL TOPOGRAFICO, POZO DE ENTRADA PERMITE DISPONER ESTACION NO COMPACTA, ESPACIO PARA DISPONER PLANTA DE SEPARACION DE LODOS**  
Primera fecha: CONFIGURACION AUXILIAR

Se debe garantizar que las condiciones visuales entre pozo de ataque y cabeza de excavación sean óptimas - Dimensionar muro de empuje según necesidades - Control de posibles cambios en las condiciones de fricción estudiadas - Control de tolerancias exigidas por condicionantes técnicos - Estudio de optimización de pozos - Estudio de la necesidad de instalar hidrociclones  
Primera fecha: ASPECTOS A TENER EN CUENTA DURANTE LA EJECUCION

**Balance Mecanico. Earth Pressure Balance. EPB.**  
Primera fecha: TECNOLOGIA ALTERNATIVA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

MENU ANT SIG

Figura 160. Interfaz de la hoja de selección tecnológica de la herramienta de decisión tras la introducción de condicionantes extraídos del caso de estudio. Elaboración propia.

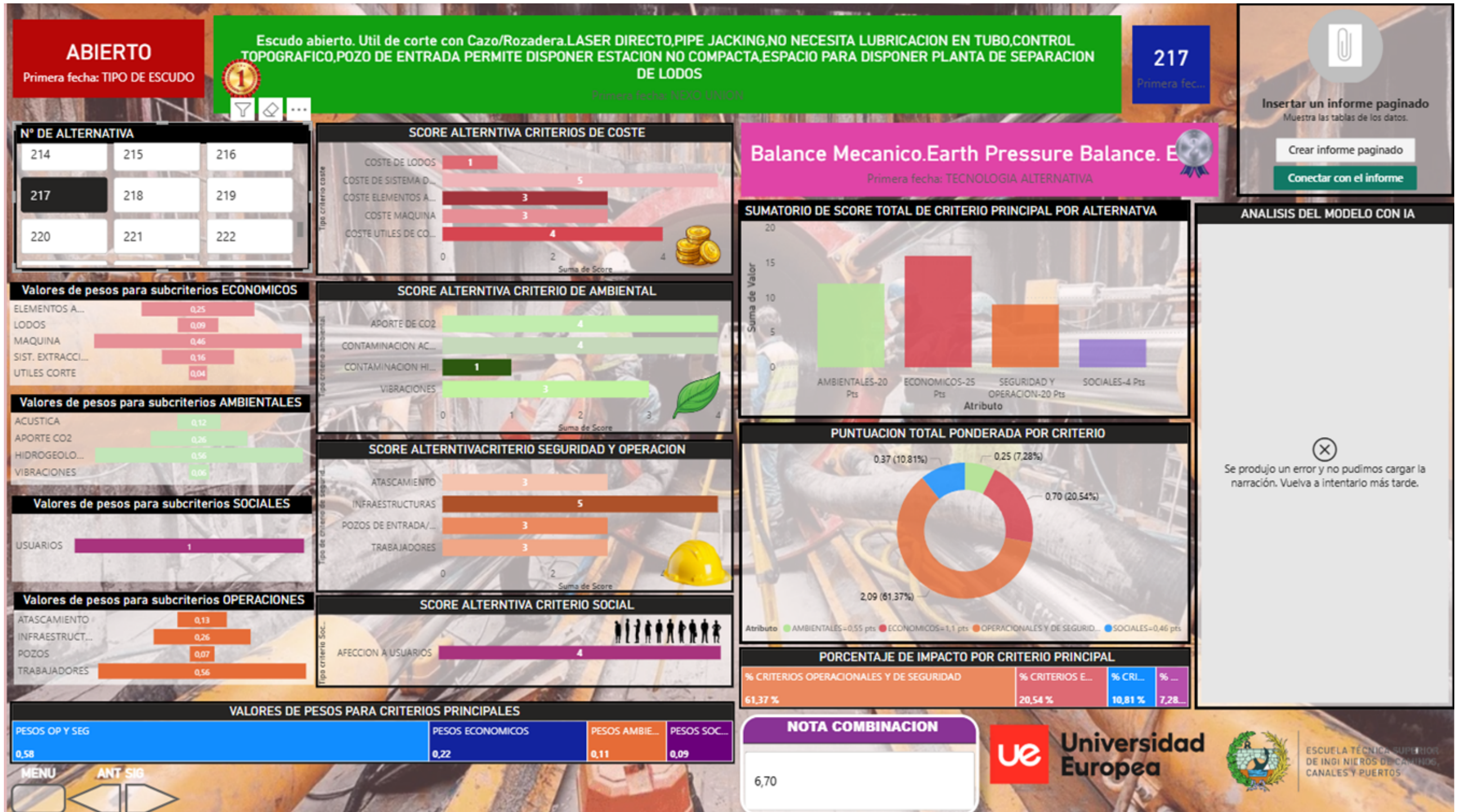


Figura 161. Interfaz de la hoja de Matriz multicriterio AHP de la herramienta de decisión tras la introducción de condicionantes extraídos del caso de estudio. Elaboración propia.

### 6.2.1. Presentación de resultados.

Una vez introducidos en la herramienta de decisión los condicionantes de entrada extraídos del caso de estudio, se procede al análisis de los resultados obtenidos con el objetivo de evaluar el grado de concordancia entre la tecnología recomendada por la aplicación y la solución finalmente adoptada en la actuación real.

Los resultados obtenidos (Alternativa 217) muestran una alta coincidencia entre la recomendación proporcionada por la herramienta y el *expertise* aplicado en el caso de estudio, lo que pone de manifiesto la coherencia de la lógica de decisión implementada. En términos generales, la aplicación identifica como adecuada una composición tecnológica muy próxima a la utilizada en la ejecución real de la microtunelación, validando así su fiabilidad como herramienta de apoyo a la toma de decisiones.



Figura 162. Alternativa Nº217 recomendada por la aplicación como respuesta a los condicionantes del caso de estudio. Elaboración propia.

No obstante, se detectan pequeñas diferencias puntuales que no afectan al planteamiento global de la solución. Un ejemplo de ello es la selección del útil de corte, donde la herramienta contempla, además del uso de cazo, la alternativa de emplear rozadera. La elección entre uno u otro útil queda condicionada principalmente por los objetivos de productividad que se deseen alcanzar durante la excavación, aspecto que en la práctica suele resolverse en función de criterios operativos y de experiencia de la empresa ejecutora.

Otro de los aspectos relevantes analizados corresponde a la fricción entre el terreno excavado y el tubo de hormigón. El caso de estudio carece de información específica que permita cuantificar con precisión si dicha fricción puede considerarse alta o baja, lo que influye directamente en la decisión de recurrir o no a sistemas de lubricación del tubo. En la actuación real, este aspecto se resolvió mediante el *expertise* de la empresa especializada, que consideró que, dadas las características del terreno, la fricción sería baja, no siendo necesario emplear lubricación.

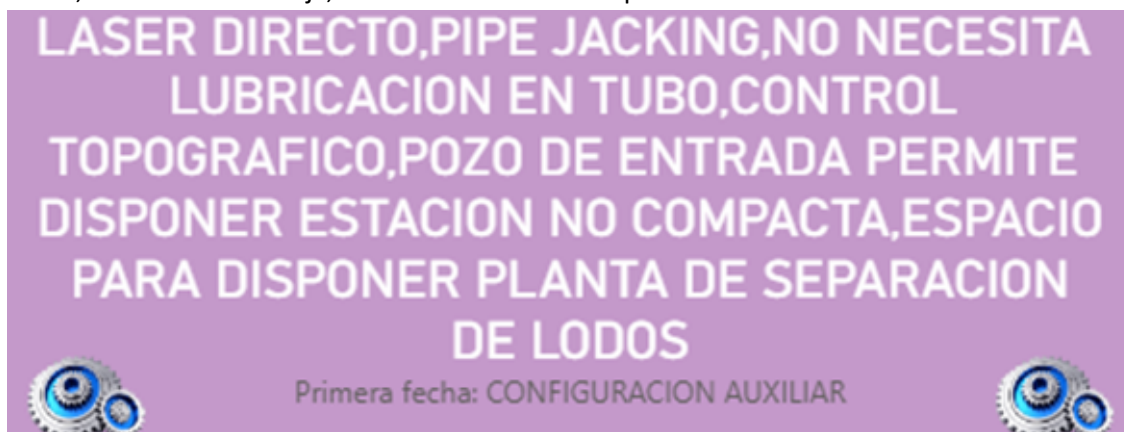


Figura 163. Configuración aux. recomendada como respuesta a condicionantes del caso de estudio. Elaboración propia.

Este mismo criterio fue adoptado en la introducción de datos en la herramienta de decisión. No obstante, la aplicación devuelve un aviso preventivo, indicando que, aun cuando no se considere necesaria la lubricación del tubo bajo hipótesis de baja fricción, se recomienda vigilar este parámetro durante el proceso de ejecución, con el fin de detectar posibles incrementos de fricción o cambios en las condiciones del terreno que pudieran requerir la adopción de medidas correctoras.

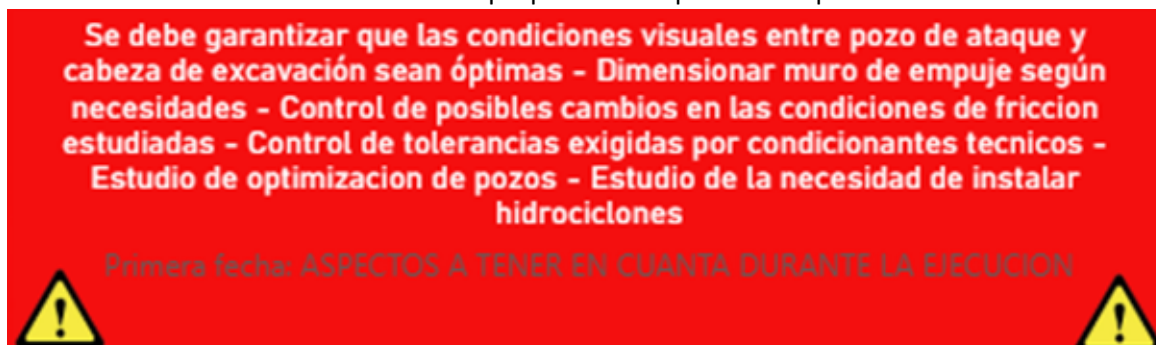


Figura 164. Aspectos a tener en cuenta según la aplicación durante las labores de microtunelación. Elaboración propia.

Adicionalmente, la herramienta analiza la disponibilidad de espacio en obra, evaluando la posibilidad de implantar, en caso necesario, una planta de separación de lodos si durante la ejecución se produjera un aumento significativo de la fricción que hiciera recomendable modificar el sistema de excavación. Este enfoque refuerza el carácter preventivo y adaptable de la herramienta, alineándose con los criterios habituales de gestión de riesgos en obras de microtunelación.

Los resultados obtenidos permiten afirmar que la herramienta de decisión desarrollada se encuentra alineada con el conocimiento experto del sector, el cual constituye, en la práctica, la principal fuente de referencia para la selección tecnológica en actuaciones de microtunelación. Esta circunstancia viene motivada por la ausencia de normativa específica o referencias técnicas normalizadas que establezcan de manera clara y prescriptiva la idoneidad de una u otra tecnología en función de los condicionantes del proyecto, quedando dicha elección tradicionalmente supeditada a la experiencia acumulada de técnicos y empresas especializadas.

Aun así, la aplicación incorpora de forma integrada la posibilidad de ampliar el análisis de la solución tecnológica desde otros puntos de vista complementarios, tales como el económico, social, ambiental y de seguridad y operación. En este contexto, se procede a analizar tanto la tecnología recomendada (Alternativa 217) por la herramienta desde el punto de vista técnico como una tecnología alternativa (Alternativa 153) técnicamente viable, evaluando el comportamiento de ambas opciones al considerar dichos criterios adicionales.

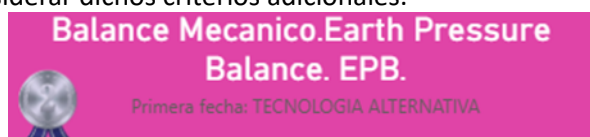


Figura 165. Tecnología alternativa propuesta. Elaboración propia.

El análisis multicriterio realizado por la herramienta pone de manifiesto que, aun introduciendo estos nuevos enfoques, la solución inicialmente recomendada como opción técnica continúa resultando dominante frente a la alternativa analizada (Nota combinación alternativa 217- 6,70 pts.). Este resultado se debe a que la opción presenta un mayor impacto negativo en alguno o varios de los criterios considerados (Nota combinación alternativa 153- 8,44 pts.), lo que penaliza su idoneidad global frente a la solución seleccionada.

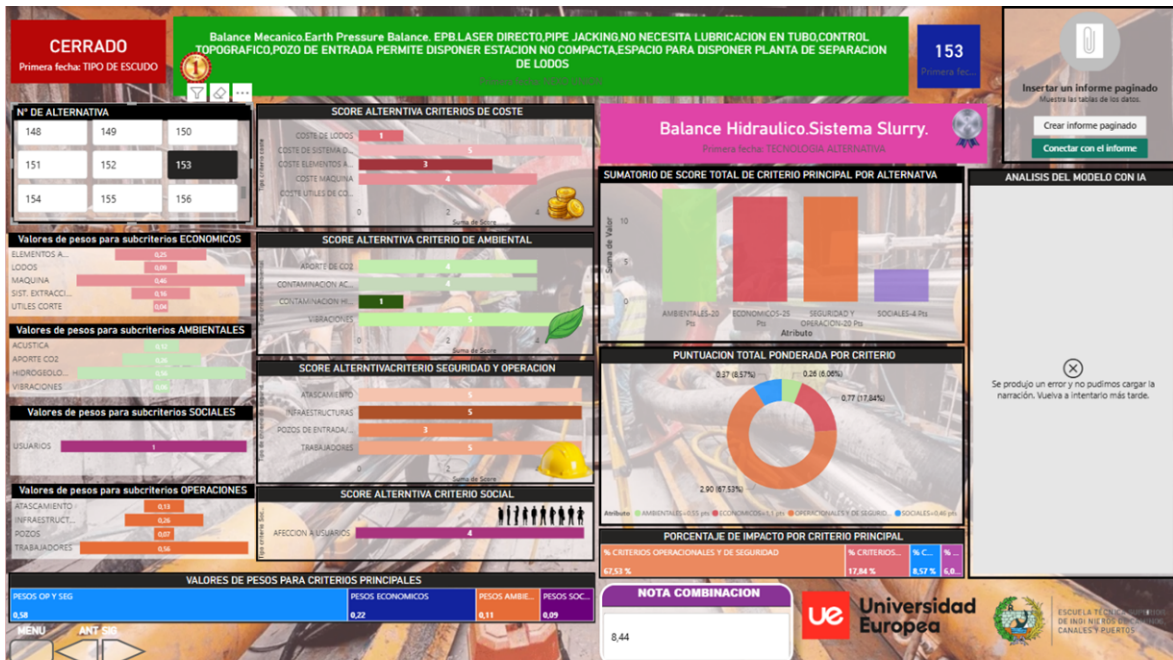


Figura 166. interfaz de la hoja de matriz multicriterio AHP para la tecnología alternativa propuesta. Elaboración propia.

En el caso de estudio analizado no se dispone de información detallada acerca de la ponderación de criterios empleada en el proceso real de toma de decisiones. No obstante, es habitual en este tipo de actuaciones que los criterios económicos y de seguridad tengan un peso significativo en la elección final de la solución constructiva. Esta preferencia habitual por determinados criterios en fase de obra, especialmente los de carácter económico y de seguridad, refuerza la decisión de decantarse por una solución basada en un escudo abierto con cazo frente a un escudo cerrado de tipo EPB, aun siendo ambas alternativas técnicamente viables para las condiciones del caso de estudio. La elección de un escudo abierto permite, en este contexto, una mayor simplicidad operativa, una reducción de costes asociados a equipos auxiliares y una menor complejidad en la gestión de la excavación, aspectos que suelen resultar determinantes en la práctica profesional. En consecuencia, esta interpretación respalda el planteamiento de la herramienta de decisión, que pone de manifiesto la conveniencia de complementar el análisis puramente técnico con la evaluación de criterios paralelos, permitiendo justificar de forma más completa y realista la selección tecnológica adoptada.

6.2.2. *Análisis de sensibilidad.*

Con el fin de complementar la validación técnica de la herramienta, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad del módulo multicriterio, cuyo objetivo es evaluar cómo varía la valoración de impacto de las alternativas cuando cambian las prioridades del decisor (ponderación de criterios económicos, ambientales, sociales y de operación/seguridad). En este trabajo es importante destacar que el análisis multicriterio no pretende “forzar” un cambio de solución, sino comprobar si la alternativa recomendada por la herramienta mantiene un comportamiento consistente bajo escenarios de ponderación diferentes, y en qué medida la decisión final podría depender del contexto o preferencias del usuario.

La herramienta implementa una estructura jerárquica basada en criterios y subcriterios. En primer lugar, cada alternativa es evaluada mediante una puntuación (impacto) para cada subcriterio. A continuación, se obtiene una contribución ponderada por combinación criterio–subcriterio.

Durante el análisis de sensibilidad se modifican únicamente los pesos de los criterios principales  $W_i$ , manteniéndose constantes los pesos de subcriterios  $w_{ij}$  respecto a la matriz multicriterio original.

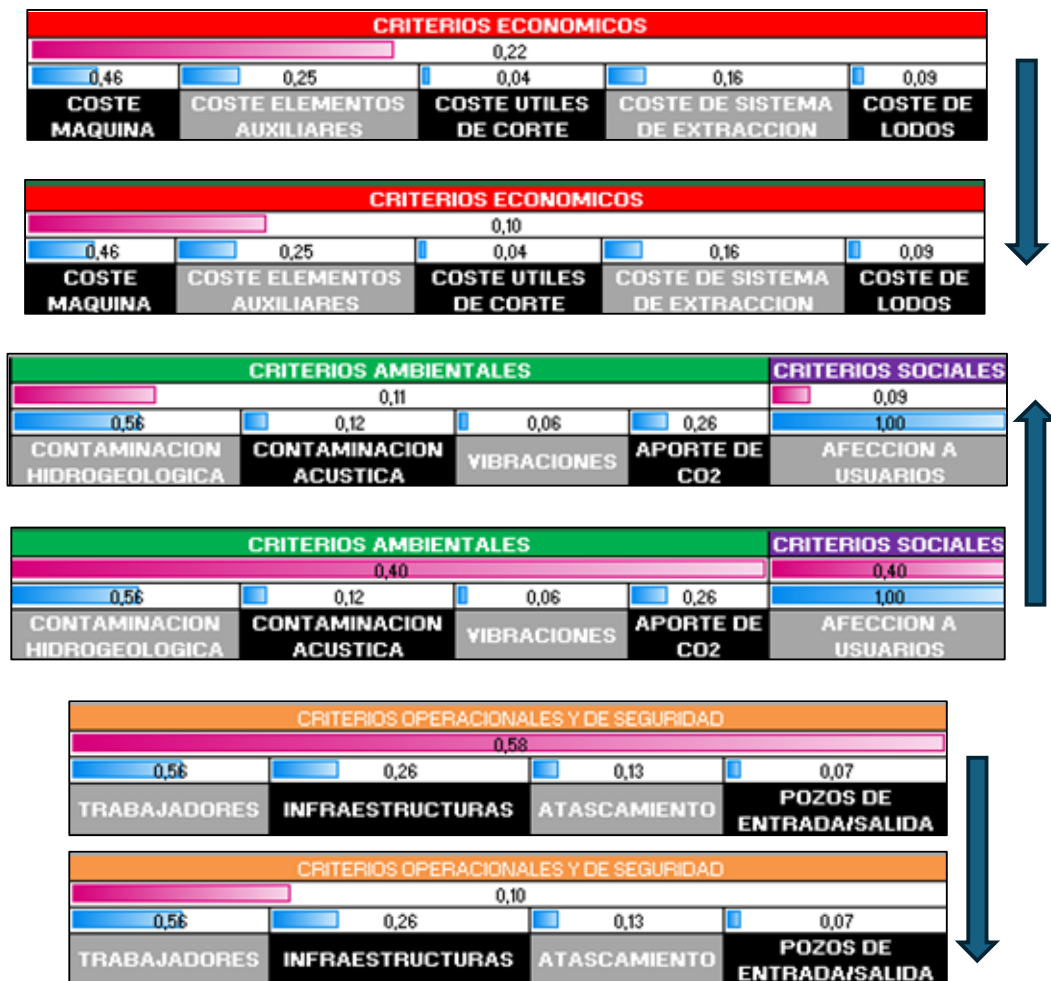


Figura 167. Variación de pesos de criterios principales para análisis de sensibilidad. Elaboración propia.

La no variación de los pesos de subcriterios se justifica debido a que representan en muchos casos la estructura real del problema dentro de cada criterio (por ejemplo, dentro del criterio económico, el coste de tiene siempre un orden de magnitud superior al de ciertos elementos auxiliares). En consecuencia, variar  $w_{ij}$  implicaría alterar la naturaleza del modelo y no solo las prioridades del decisor. Por tanto, el análisis de sensibilidad se centra en el nivel donde realmente existe variabilidad según el usuario: la ponderación relativa entre criterios principales.

Con el objetivo de evidenciar de forma más clara la estabilidad del modelo multicriterio, se planteó un escenario adicional de análisis de sensibilidad basado en la adopción de ponderaciones significativamente alejadas de la línea base. Mientras que el escenario inicial de referencia otorga un peso predominante a los criterios económicos y de operación y seguridad, coherente con el contexto habitual de obras de infraestructura, en este nuevo escenario se decidió invertir parcialmente dicha jerarquía de prioridades.

En concreto, se redujo de manera intencionada el peso asignado a los criterios económicos y de operación y seguridad, y se incrementó el peso relativo de los criterios ambientales y sociales. Este planteamiento responde a la voluntad de simular un perfil de decisor con una elevada sensibilidad hacia las afecciones al entorno y a la sociedad, representativo de contextos con fuertes condicionantes ambientales, elevada presión social o marcos normativos especialmente restrictivos.

La elección de este escenario no persigue reflejar una situación habitual, sino someter la matriz multicriterio a una condición exigente, en la que las prioridades del decisor se alejan de las que tradicionalmente dominan en proyectos de ingeniería civil. De este modo, se busca analizar si la valoración de impacto y la alternativa técnicamente recomendada permanecen estables incluso cuando se modifican de forma sustancial las preferencias externas que guían la toma de decisiones.

Los resultados obtenidos en este escenario extremo muestran que, a pesar del desplazamiento de pesos hacia criterios ambientales y sociales, la puntuación agregada de las alternativas no experimenta variaciones abruptas ni conduce a cambios significativos en la interpretación global del impacto. Si aplicamos este análisis de sensibilidad al caso de estudio podemos observar lo siguiente:

En el escenario de línea base, la aplicación identificó como alternativa recomendada la alternativa 217, con una puntuación de impacto agregado de 6,70 puntos, mientras que la alternativa 153 se situaba como opción secundaria, con una puntuación significativamente superior de 8,44 puntos, lo que indicaba un mayor impacto global. Tras aplicar el análisis de sensibilidad y variar los pesos de

los criterios principales, ambas alternativas experimentan una reducción de su puntuación, pasando la alternativa 217 a 6,25 puntos y la alternativa 153 a 6,67 puntos. A pesar de esta reducción y del acercamiento entre ambas puntuaciones, la alternativa 217 continúa presentando el menor impacto agregado, manteniéndose como la opción preferente dentro del nuevo escenario de ponderación.

La reducción observada en la puntuación de ambas alternativas tras la modificación de los pesos responde, en primer lugar, a la redistribución de la importancia relativa entre los criterios principales. Al variar la ponderación, se ha reducido el peso de aquellos criterios en los que ambas alternativas presentaban un impacto interno más elevado y se ha incrementado el peso de criterios en los que el impacto relativo era menor. Dado que las puntuaciones internas de los criterios no se modifican durante el análisis de sensibilidad, la variación de la nota final es consecuencia directa del cambio en la agregación ponderada de dichos impactos.

El hecho de que ambas alternativas reduzcan su puntuación indica que el nuevo escenario de ponderación favorece criterios en los que, en términos relativos, las dos soluciones presentan un comportamiento más equilibrado. No obstante, la alternativa 153 experimenta una reducción proporcionalmente mayor, lo que provoca que la diferencia entre ambas se reduzca de forma significativa respecto a la línea base. Este comportamiento sugiere que la alternativa 153 estaba más penalizada en los criterios que pierden peso en el escenario de sensibilidad, mientras que la alternativa 217 presenta un perfil de impacto más homogéneo frente a los cambios de ponderación.

El estrechamiento de la diferencia entre ambas alternativas no implica una inversión en la preferencia, sino que pone de manifiesto que, bajo un perfil de decisor distinto, las dos soluciones presentan impactos globales más próximos. Sin embargo, la persistencia de la alternativa 217 como opción de menor impacto confirma que su ventaja no depende de una configuración concreta de pesos, sino de un comportamiento técnico y de impacto más equilibrado.

Este comportamiento refuerza la idea de que la matriz multicriterio presenta una baja sensibilidad frente a cambios severos en la ponderación de criterios, y confirma que la evaluación no está dominada por un único criterio ni condicionada por una configuración específica de pesos.

Como ya se explicó en la metodología la herramienta está concebida en dos niveles complementarios:

- Selección técnica (árbol lógico): determina la tecnología viable y coherente con los condicionantes técnicos (terreno, geometría, restricciones de obra, etc.).

- Evaluación multicriterio: cuantifica el impacto de las alternativas viables según prioridades del decisor (económicas, ambientales, sociales y de operación/seguridad).

En este contexto, la baja sensibilidad observada frente a cambios en los pesos del decisor refuerza la robustez de la selección técnica realizada por el árbol lógico. Si la recomendación técnica se mantuviera únicamente bajo un conjunto muy específico de ponderaciones, la decisión podría interpretarse como dependiente de preferencias externas. Sin embargo, el hecho de que la valoración agregada no se vea fuertemente alterada ante escenarios de ponderación diferentes indica que la alternativa seleccionada es sólida y presenta un comportamiento estable en términos de impacto.

En conjunto, el análisis de sensibilidad confirma que el modelo jerárquico (criterios–subcriterios) se comporta de forma consistente, y que las variaciones en los pesos de criterios principales se transmiten principalmente a través de los subcriterios más relevantes, tal como es esperable. La estabilidad de la puntuación final frente a cambios de ponderación no reduce la utilidad del análisis multicriterio; al contrario, permite concluir que la solución recomendada por la herramienta no depende críticamente de la priorización del usuario, lo que aporta mayor fiabilidad al proceso global de selección y respalda la robustez de la selección técnica implementada en el árbol lógico.

### *6.3. Discusiones e interpretaciones.*

Tras la introducción en la herramienta de ayuda a la decisión de los condicionantes extraídos del caso de éxito analizado, los resultados obtenidos permiten extraer una serie de conclusiones relevantes en cuanto a la validez, coherencia y alcance de la metodología propuesta. En primer lugar, puede afirmarse que la herramienta recomienda la misma tecnología de microtunelación que la finalmente ejecutada en el caso real, lo que constituye un primer indicio de alineación entre el modelo desarrollado y el conocimiento técnico aplicado en obra. Este resultado resulta especialmente significativo si se tiene en cuenta que la herramienta no se basa en una normativa prescriptiva inexistente, sino en la sistematización del conocimiento técnico y la experiencia acumulada en el sector.

No obstante, la herramienta amplía el abanico de decisión al proponer, además del caso utilizado en el caso real, la posibilidad de emplear una rozadera como elemento de corte alternativo. Esta recomendación no supone una contradicción con la actuación ejecutada, sino que introduce un matiz relevante en la interpretación de los resultados, ya que la elección entre uno u otro útil de corte queda condicionada principalmente por criterios de productividad y estrategia de ejecución,

aspectos que en la práctica suelen definirse en fases avanzadas del proyecto o incluso durante la obra.

En relación con la configuración auxiliar, la herramienta muestra igualmente una elevada coherencia con la solución adoptada en el caso de estudio. La configuración propuesta coincide con la ejecutada, si bien deja abierta la posibilidad de instalar una planta de separación de lodos, justificada por la existencia de espacio suficiente para su implantación y por la ausencia de información precisa relativa a la fricción terreno–tubo y a la eventual necesidad de lubricación. Esta recomendación no implica que la planta sea necesaria desde el inicio, sino que introduce una advertencia técnica razonable, alineada con la práctica habitual en microtunelación, consistente en prever soluciones de contingencia ante posibles cambios en las condiciones de excavación.

Asimismo, la herramienta identifica una tecnología alternativa técnicamente viable, que podría ejecutarse desde un punto de vista estrictamente técnico. Sin embargo, el análisis posterior desde los puntos de vista económico, ambiental, social y de operación y seguridad pone de manifiesto que dicha alternativa presenta un impacto global significativamente mayor que la solución recomendada. Este resultado refuerza la utilidad del enfoque multicriterio, al evidenciar que la viabilidad técnica por sí sola no es suficiente para justificar una elección tecnológica, siendo necesario evaluar de forma conjunta el conjunto de impactos asociados.

La aplicación del análisis de sensibilidad, mediante la inversión de los valores tradicionalmente prioritarios en obra —principalmente los criterios económicos y de operación y seguridad—, permite profundizar en la interpretación de estos resultados. Bajo este nuevo escenario de ponderación, se observa que las puntuaciones de ambas alternativas se aproximan, reduciéndose de forma más acusada la puntuación de la alternativa secundaria. Este comportamiento se explica por el hecho de que dicha alternativa presenta un mayor impacto en los criterios económico y de operación y seguridad, al corresponderse con una tecnología tipo EPB, caracterizada por un mayor coste de maquinaria, mayores necesidades auxiliares y una mayor probabilidad de atascamiento, con el consiguiente riesgo operativo y coste asociado.

El acercamiento entre las puntuaciones no implica, sin embargo, una inversión en la alternativa preferente, sino que pone de manifiesto que, incluso bajo un perfil de decisor menos centrado en los aspectos económicos y de seguridad, la solución recomendada por la herramienta mantiene un impacto global inferior. Esta estabilidad refuerza la interpretación de que la elección tecnológica no depende de una configuración concreta de prioridades, sino de un comportamiento más equilibrado de la alternativa seleccionada frente al conjunto de criterios considerados.

En conjunto, los resultados obtenidos permiten concluir que la herramienta no solo reproduce la decisión adoptada en el caso real, sino que aporta una visión más amplia y estructurada del proceso de decisión, identificando alternativas viables, explicitando sus impactos relativos y permitiendo analizar la influencia de distintos perfiles de decisor. Todo ello refuerza la validez del enfoque propuesto como herramienta de apoyo a la toma de decisiones en proyectos de microtunelación, especialmente en contextos donde la experiencia técnica debe complementarse con una evaluación sistemática de impactos.

## **7. CONCLUSIONES Y LINEAS FUTURAS DE TRABAJO.**

El presente Trabajo Fin de Máster ha tenido como objetivo principal el desarrollo y validación de una herramienta de apoyo a la toma de decisiones para la selección tecnológica en actuaciones de microtunelación. A lo largo del trabajo se han analizado los fundamentos técnicos y el conocimiento experto existente en el sector, se ha diseñado una metodología estructurada de decisión y se ha aplicado dicha herramienta a un caso de estudio real con el fin de evaluar su coherencia y fiabilidad. En este apartado se recogen las conclusiones derivadas del trabajo realizado, sintetizando las aportaciones más relevantes del estudio sin olvidar también las principales limitaciones identificadas y las posibles líneas futuras de mejora.

### *7.1. Conclusiones*

#### 1.-Integración del conocimiento experto del sector

La herramienta de decisión desarrollada engloba y sistematiza el conocimiento experto generado por las empresas especializadas del sector y publicado hasta el momento. Este conocimiento ha sido estudiado y analizado en detalle durante la elaboración del estado del arte, permitiendo identificar criterios técnicos recurrentes, configuraciones habituales y buenas prácticas en la selección de tecnologías de microtunelación. La principal fortaleza de la herramienta reside en la transformación de este conocimiento, tradicionalmente disperso y basado en la experiencia, en un proceso estructurado y reproducible que puede aplicarse de forma objetiva a nuevos casos de estudio.

#### 2.-Separación entre la decisión técnica y otros criterios de evaluación

El diseño de la herramienta diferencia e independiza la selección de la tecnología óptima desde el punto de vista estrictamente técnico de las necesidades económicas, ambientales, sociales y de operación que pueda tener el usuario. Esta separación permite analizar, en primer lugar, la viabilidad técnica de las distintas alternativas y, posteriormente, evaluar su idoneidad global considerando criterios adicionales que habitualmente condicionan la decisión final en proyectos reales. De este

modo, la herramienta reproduce de forma fiel el proceso de toma de decisiones habitual en obra, evitando que condicionantes externos distorsionen la evaluación técnica inicial.

### 3.-Propuesta de configuración auxiliar y generación de advertencias

Además de recomendar una tecnología principal, la herramienta proporciona una configuración auxiliar ajustada a los condicionantes específicos de cada caso de estudio, incorporando aspectos clave para la correcta ejecución de la microtunelación. Asimismo, genera una serie de advertencias que deben ser tenidas en cuenta durante el desarrollo de la obra, basadas tanto en el conocimiento científico disponible como en el *expertise* de empresas punteras del sector. Este enfoque permite anticipar posibles riesgos, cambios de condiciones o necesidades de adaptación durante la ejecución, aportando un valor añadido.

### 4.-Transparencia del proceso de selección multicriterio.

El proceso de selección mediante criterios económicos, sociales, ambientales y de operación se caracteriza por su completa transparencia. La herramienta muestra de forma explícita los valores de puntuación (*score*) obtenidos por cada alternativa, así como los pesos asignados a cada criterio considerado. Esta característica facilita la comprensión del resultado final, permite justificar técnicamente la decisión adoptada y ofrece al usuario la posibilidad de analizar cómo variaciones en la ponderación de criterios influyen en la solución recomendada.

### 5.-Facilidad de uso y bajo nivel de especialización requerido.

El diseño y la complejidad de la herramienta permite su utilización sin necesidad de un grado de especialización elevado en microtunelación. Con el fin de facilitar su uso, se ha incluido un apartado específico de información sobre las distintas tecnologías y configuraciones auxiliares, proporcionando al usuario una base de conocimiento mínima para interpretar correctamente los resultados obtenidos. Esta característica amplía el perfil de usuarios potenciales, permitiendo que la herramienta sea empleada tanto por especialistas como por técnicos en fases iniciales de proyecto.

### 6.-Accesibilidad y disponibilidad gratuita.

La herramienta ha sido concebida como una aplicación de uso gratuito y accesible vía web, lo que elimina barreras de entrada y facilita su difusión entre profesionales del sector. Esta accesibilidad refuerza su utilidad como herramienta de apoyo a la toma de decisiones, especialmente en entornos donde no se dispone de recursos especializados o experiencia en este tipo de actuaciones.

## 7.-Escalabilidad y facilidad de adaptación

Por último, la herramienta se basa en un código sencillo y fácilmente escalable, lo que permite su adaptación a las necesidades específicas de cada usuario o proyecto. Con un conocimiento básico de Power BI, es posible modificar ponderaciones, incorporar nuevos criterios o ampliar el número de tecnologías analizadas. Esta flexibilidad garantiza que la herramienta pueda evolucionar con el tiempo, incorporando nuevos avances técnicos y ajustándose a distintos contextos de aplicación.

### 7.2. Líneas futuras de trabajo

Como posibles líneas de investigación futura se plantea lo siguiente:

#### 1.-Incremento del porcentaje de variables cuantitativas en la decisión.

Una de las principales líneas de mejora de la herramienta consiste en aumentar el peso de las variables cuantitativas frente a las cualitativas. Durante su desarrollo se han identificado dificultades para acceder a datos precisos y homogéneos, especialmente en lo relativo a costes de maquinaria, elementos auxiliares o medios de ejecución, lo que ha limitado su incorporación de forma directa. La disponibilidad futura de bases de datos más completas permitiría reforzar el carácter cuantitativo de la herramienta y reducir la dependencia de valoraciones cualitativas.

#### 2.-Ampliación del rango de valores cualitativos en el árbol de decisión.

Otra posible mejora se relaciona con el incremento del rango de valores cualitativos considerados y, en consecuencia, con un mayor poder de discretización de la herramienta. Actualmente, algunos parámetros se agrupan en categorías amplias que, si bien facilitan su uso, pueden simplificar en exceso determinadas situaciones intermedias. La ampliación de estos rangos permitiría una representación más fiel de la variabilidad real de los condicionantes de obra.

#### 3.-Incorporación de análisis de sensibilidad en el análisis multicriterio.

El análisis multicriterio integrado en la herramienta no contempla actualmente un análisis de sensibilidad que permita evaluar la influencia de variaciones en los pesos asignados a los distintos criterios. Dado que las necesidades externas a la propia técnica pueden variar significativamente entre usuarios o proyectos, la incorporación de este tipo de análisis permitiría evaluar la robustez de la solución recomendada frente a cambios en las prioridades establecidas.

#### 4.-Diversificación de metodologías para la ponderación de criterios.

En la versión actual, la ponderación de los criterios de decisión se realiza mediante un método AHP. Como línea de mejora, se plantea la posibilidad de incorporar distintas metodologías de matrices

multicriterio de decisión, permitiendo al usuario seleccionar aquella que mejor se ajuste a sus necesidades o a la naturaleza del proyecto. Esta flexibilidad reforzaría la adaptabilidad de la herramienta a distintos contextos de toma de decisiones.

#### 5.-Limitaciones derivadas de la plataforma tecnológica.

A pesar de que la herramienta es accesible a todos los usuarios en su versión web de consulta, existe una limitación para un pequeño porcentaje de usuarios en lo relativo a su edición, personalización y escalabilidad, al requerirse licencias específicas de Microsoft para estas funciones. Aunque actualmente este colectivo es reducido, esta dependencia tecnológica puede considerarse una limitación para tener en cuenta en futuras evoluciones de la herramienta.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- 1.-An introduction to pipe jacking and microtunnelling. (2017). Pipe Jacking Association.
- 2.-Asad, W., Brian B., S., & Bryaan A., M. (2025, mayo 25). *Field monitoring and instrumentation in microtunnelling-pipe jacking: A review and future directions*.
- 3.-Ayun, Z. Q., Awaludin, A., Siswokarto, S., & Ismanti, S. (2024). Analysis of Reinforced Concrete Pipe Strain Due to Jacking Force Case Study: Sudetan Ciliwung River Project to the East Flood Canal. *CIVED*, 11(2), 634-644. <https://doi.org/10.24036/cived.v11i2.594>
- 4.-Beltps. (s. f.). *Microtunelización: La historia del desarrollo – Beltps*. Recuperado 25 de noviembre de 2025, de <https://beltps.com/microtunnelling-the-history-of-development/>
- 5.-Benato, A., Gaida, E., Oggeri, C., & Oreste, P. (2023). Analysis of the Importance of the Filling Material Characteristics Injected Around the Precast Concrete Lining in the Microtunnelling Technology. *Geotechnical and Geological Engineering*, 41(5), 2775-2785. <https://doi.org/10.1007/s10706-023-02405-9>
- 6.-Bobylev, N. (2011). Comparative analysis of environmental impacts of selected underground construction technologies using the analytic network process. *Automation in Construction*, 20(8), 1030-1040. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.04.004>
- 7.-Broere, W. (2013). *Criteria for face support of microtunnelling TBMs*.
- 8.-Broere, W. (2014). On the face support of microtunnelling TBMs. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 46. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2014.09.015>
- 9.-Chen, X., Huang, M., Bai, Y., & Zhang, Q.-B. (2024). Sustainability of underground infrastructure – Part 1: Digitalisation-based carbon assessment and baseline for TBM tunnelling. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 148, 105776. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.105776>

- 10.-Chen, Z., Su, Z., Li, M., Shen, Q., Fan, L., & Zhang, Y. (2024). Investigation of the Tunnel Water Inflow Prediction Method Based on the MODFLOW-DRAIN Module. *Water*, 16(8), 1078. <https://doi.org/10.3390/w16081078>
- 11.-Ghazali, M. F., Mohamad, H., Nasir, M. Y., Abdullah, M. A., & Chaiyasarn, K. (2025). *Monitoring Micro-Tunnelling Pipe-Jacking Work Using Distributed Optical Fibre Sensing*. SSRN. <https://doi.org/10.2139/ssrn.5128170>
- 12.-Golian, M., Teshnizi, E. S., & Nakhaei, M. (2018). Prediction of water inflow to mechanized tunnels during tunnel-boring-machine advance using numerical simulation. *Hydrogeology Journal*, 26(8), 2827-2851. <https://doi.org/10.1007/s10040-018-1835-x>
- 13.-Han, B., Yuan, D., Wang, T., & Wang, Z. (2022). Numerical Investigation of Slurry Fracturing during Shield Tunneling under a Reservoir. *Applied Sciences*, 12(15), 7929. <https://doi.org/10.3390/app12157929>
- 14.-He, Y., Cheng, J., Shi, Z., Zhang, B., Chen, L., Li, X., Wang, X., & Zhang, P. (2024). Research on Axial Stress and Strain Characteristics of Reinforced-Concrete Curved Pipe Jacking in Power Tunnels. *Buildings*, 14(9), 3030. <https://doi.org/10.3390/buildings14093030>
- 15.-Health & Safety Executiv, (HSE), Pipe Jacking Association, (PJA), & British Tunnelling Society, (BTS). (2015). *Health & Safety Executive (HSE), Pipe Jacking Association (PJA), & British Tunnelling Society (BTS). (2015). Tunnelling and Pipejacking: Guidance for Designers. London, UK.*
- 16.-Hegab, M. Y., & Salem, O. M. (2010a). Ranking of the Factors Affecting Productivity of Microtunneling Projects. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 1(1), 42-52. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000038](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000038)

- 17.-Hegab, M. Y., & Salem, O. M. (2010b). Ranking of the Factors Affecting Productivity of Microtunneling Projects. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 1(1), 42-52.  
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000038](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000038)
- 18.-Hoyo Rodríguez, J. J., & Romana, M. G. (2015). La selección del método constructivo en hincas. Comparación con los túneles de dovelas de mediano diámetro. *Revista CICCOP Túneles (Monográfico), Número 3568*:
- 19.-Hu, K., Yao, L., Liao, J., Wang, H., Luo, J., & Xu, X. (2024). Predicting Water Inflow in Tunnel Construction: A Fracture Network Model with Non-Darcy Flow Considerations. *Water*, 16(13), 1885. <https://doi.org/10.3390/w16131885>
- 20.-Instrucción ferroviaria para el proyecto y construcción del subsistema de infraestructura. *IFI 2025*. (2025).
- 21.-Ji, X., Ni, P., & Barla, M. (2019). Analysis of jacking forces during pipe jacking in granular materials using particle methods. *Underground Space*, 4(4), 277-288.  
<https://doi.org/10.1016/j.undsp.2019.03.002>
- 22.-Jiang, L., Zhen, L., Wang, J., Zhang, T., & Huang, X. (2022). Research on Dewatering Characteristics of Waste Slurry from Pipe Jacking Construction. *Materials*, 15(6), 2242.  
<https://doi.org/10.3390/ma15062242>
- 23.-Jimenez Salas, J. A. (1975). *Geotecnia y Cimientos I (Propiedades de los suelos y de las rocas), tomo sobre Mecánica del Suelo*. (Tomo I). Editorial Rueda.
- 24.-Jimenez Salas, J. A. (1976). *Geotecnia y Cimientos II (Mecánica de los suelos y de las rocas), tomo sobre Mecánica del Suelo*. (Tomo II). Editorial Rueda.

- 25.-Jin, L.-H., Wu, B.-J., Zheng, X.-Z., & Chen, S. (2023). Development and Field Application of an Automated Pipe Jacking Friction Resistance Identification and Warning System in Construction. *Applied Sciences*, 13(23), 12814. <https://doi.org/10.3390/app132312814>
- 26.-Jorjam, S., Mawlana, M., & Hammad, A. (2023). Stochastic Simulation of Construction Methods for Multi-purpose Utility Tunnels. *Infrastructures*, 9(1), 1. <https://doi.org/10.3390/infrastructures9010001>
- 27.-Ko, T. Y., & Lee, S. S. (2020). Effect of Rock Abrasiveness on Wear of Shield Tunnelling in Bukit Timah Granite. *Applied Sciences*, 10(9), 3231. <https://doi.org/10.3390/app10093231>
- 28.-L'Amante, D., & Fantauzzi, G. (2023). Face stability of tunnels under the groundwater level: Comparison of existing theories and introduction of a new analytical method calibrated on 3D FEM calculations. En G. Anagnostou, A. Benardos, & V. P. Marinos, *Expanding Underground—Knowledge and Passion to Make a Positive Impact on the World* (1.<sup>a</sup> ed., pp. 1616-1623). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003348030-193>
- 29.-Li, T., Zhao, W., Liu, R., Han, J., & Cheng, C. (2022). Experimental Study on the Pipe-Soil Interface under the Influence of Pipe Jacking Stagnation Time. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 26(3), 1428-1438. <https://doi.org/10.1007/s12205-021-0642-4>
- 30.-Liu, H., Wang, T., Ma, W., Kang, M., Fu, Y., & Yan, T. (2025). Research on the Settlement Patterns of Tunnel-Surrounding Rock Under Groundwater Conditions. *Applied Sciences*, 15(7), 3796. <https://doi.org/10.3390/app15073796>
- 31.-Lyons, S. (2009). *Tunnelling induced ground-borne noise modelling*.
- 32.-Ma, M., Han, L., Wu, Y., Li, Q., & Zhang, Y. (2023). Behavioral Investigations of Three Parallel Large Reinforced Concrete Circular Pipes with the Construction of Pipe Jacking. *Applied Sciences*, 13(15), 8901. <https://doi.org/10.3390/app13158901>

- 33.-Marzouk, M., Abdallah, M., & El-Said, M. (2010). Modeling Microtunneling Projects using Computer Simulation. *Journal of Construction Engineering & Management*, 136(6), 670-682. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CO.1943-7862.0000169](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CO.1943-7862.0000169)
- 34.-McKim, R. (1997). Bidding strategies for conventional and trenchless technologies considering social costs. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 24(5), 819-827. <https://doi.org/10.1139/l97-036>
- 35.-Mendaña Savedra, F., & Fernandez Martinez, R. (2011). Hydrosields and E.P.B. tunnel boring machines. Areas of application. *Revista de Obras Públicas*, nº 3.525.
- 36.-Namli, M., & Guler, E. (2017). Effect of Bentonite Slurry Pressure on Interface Friction of Pipe Jacking. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 8(2), 04016016. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)PS.1949-1204.0000255](https://doi.org/10.1061/(ASCE)PS.1949-1204.0000255)
- 37.-Niu, G., He, X., Xu, H., & Dai, S. (2024). Tunnelling-induced ground surface settlement: A comprehensive review with particular attention to artificial intelligence technologies. *Natural Hazards Research*, 4(1), 148-168. <https://doi.org/10.1016/j.nhres.2023.11.002>
- 38.-Pan, G., & Fan, W. (2020). Automatic Guidance System for Long-Distance Curved Pipe-Jacking. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 24(8), 2505-2518. <https://doi.org/10.1007/s12205-020-1489-9>
- 39.-Pujades-Garnes, E., Badiella, G., Jurado, A., Carrera, J., & Vazquez-Suñe, E. (2024). An approach for the design of dewatering systems: The case of an excavation for the construction of the assembly shaft of a tunnel boring machine. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 83(7), 296. <https://doi.org/10.1007/s10064-024-03778-8>
- 40.-Qian, D., Jiao, H., Li, Z., Zhu, Y., Liu, J., Chen, Z., Gao, X., Liu, H., Tao, B., & Xu, Z. (2023). Ground Settlement Law, Jacking Force Prediction, and Control Countermeasures for Large-Section

- Rectangular Pipe Jacking of National Highway Underpass. *Sustainability*, 15(17), 12888.  
<https://doi.org/10.3390/su151712888>
- 41.-Qin, S., Cheng, Y., Huang, H., & Zhou, W.-H. (2024). Pressure infiltration behavior and fluid loss of bentonite slurry: A comparative study of two bentonite slurries. *Canadian Geotechnical Journal*, 61(5), 945-958. <https://doi.org/10.1139/cgj-2023-0103>
- 42.-Qin, S., Cheng, Y., & Zhou, W.-H. (2023). State-of-the-art review on pressure infiltration behavior of bentonite slurry into saturated sand for TBM tunneling. *Smart Construction and Sustainable Cities*, 1(1), 14. <https://doi.org/10.1007/s44268-023-00018-y>
- 43.-Qiu, D., Wang, L., Zu, Y., & Qing, Y. (2025). The Development of the Pipe Jacking Guidance Technology. *Applied Sciences*, 15(4), 2137. <https://doi.org/10.3390/app15042137>
- 44.-Sheil, B. (2020). Prediction of microtunnelling jacking forces using a probabilistic observational approach. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 109. <https://ora.ox.ac.uk/objects/uuid:55c13099-f010-4ee3-b79e-769e7a149848>
- 45.-Sterling, R. L. (2020a). Developments and research directions in pipe jacking and microtunneling. *Underground Space*, 5(1), 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2018.09.001>
- 46.-Sterling, R. L. (2020b). Developments and research directions in pipe jacking and microtunneling. *Underground Space*, 5(1), 1-19. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2018.09.001>
- 47.-Stolarik, M., Pinka, M., & Nedoma, J. (2019). Ground-Borne Vibration Due to Construction Works with Respect to Brownfield Areas. *Applied Sciences*, 9(18), 3766. <https://doi.org/10.3390/app9183766>
- 48.-Sun, P. (2015). *Análisis en 3D de los movimientos del terreno causados por la excavación mecanizada de túneles (EPB)*. TESINA DE MÀSTER. Universidad Politècnica de Catalunya.

- 49.-Tang, J., Xu, J., Zhou, D., Huang, D., Zeng, K., Li, Y., & Chen, Z. (2023). Ground Surface Deformation Caused by Pipe Jacking Construction in a Soft Soil Area: An Experiment-Based Study. *Buildings*, 13(7), 1628. <https://doi.org/10.3390/buildings13071628>
- 50.-Ueki, M., Haas, C. T., & Seo, J. (1999). Decision Tool for Microtunneling Method Selection. *Journal of Construction Engineering and Management*, 125(2), 123-131. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9364\(1999\)125:2\(123\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9364(1999)125:2(123))
- 51.-Wadood, A., McCabe, B. A., & Sheil, B. B. (2025). Field monitoring and instrumentation in microtunnelling/pipe jacking: A review and future directions. *Underground Space*, 22, 225-240. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2024.12.003>
- 52.-Wang, F. (2021). Empirical evidence for estimation of subsurface settlement caused by tunneling in sand. *Underground Space*, 6(5), 577-584. <https://doi.org/10.1016/j.undsp.2021.01.002>
- 53.-Wen, J., Zhang, P., & Xiang, T. (2024). Comparative research on the pipe-soil frictional resistances of circular and rectangular pipe sections during trenchless pipe jacking. *PLOS ONE*, 19(2), e0297537. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0297537>
- 54.-Xu, T., Bezuijen, A., & Broere, W. (2021). Analytical solutions for excess pore water pressures generated by TBM tunnelling in a semi-confined aquifer. *Tunnelling and Underground Space Technology*. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2021.104162>
- 55.-Yoganathan, A., Priyankara, N. H., Costa, S., Mahmoodian, M., & Robert, D. (2025). Micro-tunnelling technique and its applicability for soft soils: A review. *Structure and Infrastructure Engineering*, 0(0), 1-20. <https://doi.org/10.1080/15732479.2025.2534881>
- 56.-Yun, J.-S., Yoo, H.-K., Hwang, S.-P., Kim, W.-S., & Kim, H.-E. (2025). Prediction of Settlement Due to Shield TBM Tunneling Based on Three-Dimensional Numerical Analysis. *Buildings*, 15(13), 2235. <https://doi.org/10.3390/buildings15132235>

- 57.-Zizka, Z., Schoesser, B., & Thewes, M. (2017). Excavation cycle dependent changes of hydraulic properties of granular soil at the tunnel face during slurry shield excavations. En A. Negro & M. O. Cecílio (Eds.), *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground* (1.<sup>a</sup> ed., pp. 137-144). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315099507-15>

## **9. DECLARACIÓN DEL USO DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL.**

En la elaboración del presente Trabajo Fin de Máster se han utilizado de forma puntual herramientas de inteligencia artificial exclusivamente como apoyo en tareas de revisión lingüística y mejora de la redacción del documento. El planteamiento del trabajo, el desarrollo del contenido, el análisis realizado y la metodología elaborada corresponden íntegramente al autor.