



TRABAJO DE FIN DE MÁSTER

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

ESCUELA DE ARQUITECTURA, INGENIERÍA Y DISEÑO

ANCLAJES DE ARMADURAS EN ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN IMPRESAS EN 3D

Autor: D. Miguel de la Torre Montoro

Director: D. Raúl R. Rodríguez Escribano

En Madrid, 2023.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia y amigos, que durante estos años han sido cimiento y pilares de lo que hoy soy, y a los profesores de esta institución, que han dedicado tiempo y esfuerzo a formarnos en esta bonita profesión.

RESUMEN

Los procesos de automatización de los trabajos son un aspecto fundamental para garantizar el desarrollo y el progreso de las industrias. En el sector de la construcción empezó con la prefabricación de elementos aislados que, posteriormente, son dispuestos en obra junto con el resto de los elementos que conforman la estructura. Ahora, es el momento de la impresión 3D, que posibilita tanto la impresión in-situ como la impresión en fábrica y su posterior traslado.

En este trabajo se aborda la determinación de la capacidad de anclaje de armaduras en probetas de mortero impresas en 3D, siguiendo la metodología descrita en el Anejo D de la norma UNE-EN 10080:2006: Ensayo de adherencia para las armaduras de hormigón armado. Ensayo de arrancamiento.

Con los resultados, se establece un procedimiento metodológico para la determinación de la longitud de anclaje necesaria para la armadura, las posibles aplicaciones en el sector de la construcción y las futuras líneas de investigación.

ABSTRACT

Work automation processes are a fundamental aspect to ensure the development and progress of industries. In the construction sector, it started with the prefabrication of isolated elements that are later assembled on site with the rest of the elements that make up the structure. Now it is time for 3D printing, which allows both printing in situ and printing in the factory and its subsequent transfer.

This work deals with the determination of the anchorage capacity of reinforcement in 3D printed mortar specimens, following the methodology described in Annex D of the UNE-EN 10080:2006 standard: Adhesion test for reinforced concrete reinforcement. Pull-out test.

The results establish a methodological procedure for determining the anchorage length required for reinforcement, possible applications in the construction sector and future lines of research.

ÍNDICE GENERAL

CAPÍTULO I.	INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II.	OBJETIVOS	5
CAPÍTULO III.	ESTADO DEL CONOCIMIENTO	6
	III.1 Introducción	6
	III.2 Impresión 3D de hormigón	6
	III.2.1 Tecnologías	6
	III.2.2 Calidad del hormigón conseguido	9
	III.2.3 Resistencia alcanzada según la disposición de las capas	10
	III.3 Adherencia acero-hormigón	12
	III.3.1 Parámetros que influyen en la adherencia Acero-Hormigón	15
	III.4 Anclaje de barras en elementos impresos en 3D	20
	III.5 Normativa aplicable	24
	III.5.1 Código Estructural	24
	III.5.2 Eurocódigo estructural	26
CAPÍTULO IV.	GAP DE CONOCIMIENTO Y METODOLOGÍA	31
	IV.1 Gap de conocimiento	31
	IV.2 Metodología	31
CAPÍTULO V.	PROPUESTA TECNOLÓGICA PARA EL ANCLAJE DE LA ARMADURA	32
CAPÍTULO VI.	CAMPAÑA EXPERIMENTAL	33
	VI.1 Materiales	33
	VI.1.1 Mortero	33
	VI.1.2 Acero	34
	VI.1.3 Aditivos	34
	VI.2 Confección de las probetas de ensayo	34
	VI.3 Ensayos de adherencia	37

VI.4 Análisis de resultados	43
CAPÍTULO VII. PROPUESTA METODOLÓGICA	45
VII.1 Formulación adaptada a la del código estructural	45
VII.2 Formulación adaptada a la del Eurocódigo 2	46
VII.3 Análisis de resultados y propuesta de formulación.....	48
VII.3.1 Propuesta de formulación para el Código Estructural	49
VII.3.2 Propuesta de formulación para el Eurocódigo 2.....	49
CAPÍTULO VIII. CONCLUSIONES	50
CAPÍTULO IX. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	52
REFERENCIAS	53
ANEXO I DOCUMENTACIÓN RELATIVA AL MORTERO	57
ANEXO II DOCUMENTACIÓN RELATIVA AL ADITIVO.....	68
ANEXO III REPORTAJE FOTOGRÁFICO.....	72
ANEXO IV TABULACIÓN DE RESULTADOS	80
ANEXO V FORMAS DE ROTURA.....	88
ANEXO VI RESULTADOS DE PROPUESTA METODOLÓGICA.....	98

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Impresión 3D por capas - www.hormisa.com.ar	1
Ilustración 2. Impresión en laboratorio de Acciona	2
Ilustración 3. Distribución de coste típica para un proyecto de nueva construcción de hormigón (Jha, 2012).....	4
Ilustración 4. Contour Crafting - Google.....	7
Ilustración 5. Pieza de hormigón impreso: Obsérvese la nervadura en el lateral(Le, Austin, Lim, Buswell, Gibb, et al., 2012).....	7
Ilustración 6. Vista seccional de un muro de hormigón impreso: Obsérvese los huecos formados entre los filamentos (Le, Austin, Lim, Buswell, Gibb, et al., 2012)	8
Ilustración 7. a. Una capa de material depositado lista para el adhesivo; b. una sección transversal del modelo que se acaba de imprimir (Cesaretti et al., 2014)	8
Ilustración 8. Aplicación de carga de compresión en relación a la dirección de las capas de impresión (Paul et al., 2018).....	10
Ilustración 9. Resistencia a la compresión de probetas coladas (Control) e impresas de diferentes mezclas (D1, D2 y D3). (Paul et al., 2018).....	11
Ilustración 10. Esquema de tensiones (Wight & MacGregor, 2012).....	14
Ilustración 11. Fisuración del hormigón (Tepfers, 1973).....	14
Ilustración 12. Anillo de tracción frente a las fuerzas de adherencia (Tepfers, 1973) ...	14
Ilustración 13. Esquema de fisuras (Wight and Macgregor, 2012).....	15
Ilustración 14. Influencia de la relación entre la altura y la separación de las corrugas en el tipo de fallo (Rehm & Eligehausen, 1978)	16
Ilustración 15. Influencia del diámetro del refuerzo en la tensión máxima de adherencia (Molina et al., 2004)	17
Ilustración 16. Condiciones de adherencia según UNE-EN-1992-1-1	19
Ilustración 17. La zona afectada se extiende a ambos lados de la fisura (Calavera Ruíz, 2005).....	20
Ilustración 18. Presentación gráfica de la fuerza de extracción media y relativa.(Baz et al., 2020).....	21
Ilustración 19. Variación de la resistencia a la extracción para todas las mezclas (Hachem et al., 2023)	22
Ilustración 20. Cavidades en la parte superior producidas por la penetración (Marchment & Sanjayan, 2020)	23

Ilustración 21. Categorización de las tres zonas y mecanismos en el perfil de adherencia de penetración de la barra (Marchment & Sanjayan, 2020).....	23
Ilustración 22. Coeficiente numérico m	25
Ilustración 23. Valores de β	25
Ilustración 24. Métodos de anclaje diferentes de la barra recta (Comité Europeo de Normalización, 2011).....	27
Ilustración 25. Descripción de las condiciones de adherencia (Comité Europeo de Normalización, 2011).....	28
Ilustración 26. Anclaje con epoxi - Hilti	32
Ilustración 27. Resistencia característica 3Dprintable MORTAT - CyBe MORTAR ...	34
Ilustración 28. Esquema de disposición de barras.....	35
Ilustración 29. Comienzo de impresión de una probeta	35
Ilustración 30. Fase 1 de hormigonado de probetas	36
Ilustración 31. Colocación de la armadura en la probeta	36
Ilustración 32. Disposición de la armadura.	36
Ilustración 33. Fase 2 de hormigonado de probetas	37
Ilustración 34. Probeta terminada.....	37
Ilustración 35. Barra situada en sentido paralelo a los hilos de impresión.....	38
Ilustración 36. Barra situada en sentido perpendicular a los hilos de impresión.....	38
Ilustración 37. Probetas antes de ensayo de adherencia	38
Ilustración 38. Probeta N.º 1 de capas paralelas.....	39
Ilustración 39. Probeta N.º 7 de capas perpendiculares.....	40
Ilustración 40. Probeta N.º 10 de capas alternas.....	40
Ilustración 41. Prensa de tracción del Laboratorio de INTEMAC	41
Ilustración 42. Ensayo de anclaje de la Probeta 2	42
Ilustración 43. Colapso en ensayo de la Probeta 2	42
Ilustración 44. Resultados de las probetas con barras de 12 mm.	44
Ilustración 45. Dispersión de resultados de Y_1	48
Ilustración 46. Dispersión de resultados de Y_2	48
Ilustración 47. Conjunto de probetas previo a ensayo.....	72
Ilustración 48. Probeta N.º 1.....	72
Ilustración 49. Probeta N.º 2.....	73
Ilustración 50. Probeta N.º 3.....	73
Ilustración 51. Probeta N.º 4.....	74

Ilustración 52. Probeta N.º 5.....	74
Ilustración 53. Probeta N.º 6.....	75
Ilustración 54. Probeta N.º 7.....	75
Ilustración 55. Probeta N.º 8.....	76
Ilustración 56. Probeta N.º 9.....	76
Ilustración 57. Probeta N.º 10.....	77
Ilustración 58. Probeta N.º 11.....	77
Ilustración 59. Probeta N.º 12.....	78
Ilustración 60. Probeta N.º 13.....	78
Ilustración 61. Probeta N.º 14.....	79
Ilustración 62. Probeta N.º 15.....	79
Ilustración 63. Probeta N.º 1. Forma de rotura.....	88
Ilustración 64. Probeta N.º 2. Forma de rotura.....	88
Ilustración 65. Probeta N.º 3. Forma de rotura.....	89
Ilustración 66. Probeta N.º 4. Forma de rotura.....	90
Ilustración 67. Probeta N.º 5. Forma de rotura.....	91
Ilustración 68. Probeta N.º 6. Forma de rotura.....	92
Ilustración 69. Probeta N.º 7. Forma de rotura.....	93
Ilustración 70. Probeta N.º 8. Forma de rotura.....	94
Ilustración 71. Probeta N.º 9. Forma de rotura.....	94
Ilustración 72. Probeta N.º 10. Forma de rotura.....	95
Ilustración 73. Probeta N.º 11. Forma de rotura.....	95
Ilustración 74. Probeta N.º 12. Forma de rotura.....	96
Ilustración 75. Probeta N.º 13. Forma de rotura.....	96
Ilustración 76. Probeta N.º 14. Forma de rotura.....	97
Ilustración 77. Probeta N.º 15. Forma de rotura.....	97

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores de los coeficientes $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ (Comité Europeo de Normalización, 2011)	29
Tabla 2. Clasificación de probetas.....	39
Tabla 3. Resultado de los ensayos	43
Tabla 4. Resultados del coeficiente Υ_1	46
Tabla 5. Resultados del coeficiente Υ_2	48

CAPÍTULO I INTRODUCCIÓN

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

En las dos últimas décadas, la forma tradicional de mezclar y hormigonar in situ ha sido sustituida, en gran medida, por el prefabricado en los países desarrollados. Sin embargo, el sector de la construcción aún puede beneficiarse de la automatización para reducir la mano de obra y el tiempo de construcción, mejorar la calidad y reducir el impacto ambiental. En este sentido, la impresión tridimensional (3D) se introdujo por primera vez en 1986 como medio de creación rápida de prototipos. Hoy en día, existen diferentes técnicas, pero el principio básico sigue siendo el de la fabricación aditiva, lo que significa que el material se añade capa a capa.



Ilustración 1. Impresión 3D por capas - www.hormisa.com.ar

Desde el principio del siglo XX, la automatización de procesos ha avanzado a buen ritmo en los diferentes sectores industriales y en la Ingeniería Civil, pero en el caso específico de la construcción es algo más lento. Algunos de los factores que han dificultado la implantación de la automatización han sido la inadecuación de las tecnologías de fabricación automatizada disponibles para los productos a gran escala, el enfoque de diseño convencionales que no son adecuados para la impresión 3D, una relación significativamente menor entre la cantidad de producción y el tipo de productos finales en comparación con otras industrias, limitaciones en los materiales que pueden ser usados, poco atractivo económico debido a los altos costos de los equipos de impresión y cuestiones relacionadas con la gestión.

La industria de la construcción se enfrenta actualmente a los siguientes problemas graves:

- La eficiencia de la mano de obra es alarmantemente baja y la implementación de la automatización en la construcción supondría una mejora considerable.
- La tasa de accidentes en obras en países en vías de desarrollo es alta, por lo que fomentar metodologías constructivas que reduzcan la exposición de trabajadores a desempeños con riesgos asociados es fundamental.
- Los estándares de calidad son cada vez más altos y los métodos tradicionales se van quedando desfasados frente a metodologías constructivas modernas.
- La gestión y control de las obras son una tarea difícil y que con asiduidad resultan insuficientes, apostar por métodos constructivos en taller es cada día más recurrente y necesario.
- La mano de obra cualificada está desapareciendo, lo que conlleva a una necesidad de automatización de los procesos que más la demandan.
- La fabricación off-site permite reducir el impacto ambiental, ya que se produce una disminución de la generación de polvo y ruido en las obras.

Algunas de las ventajas de la impresión 3D frente a los métodos tradicionales de construcción son la posibilidad de diseñar estructuras con formas exóticas, pues no dependen de encofrados; la utilización de materiales diferentes en función de los requerimientos estructurales y económicos, la posibilidad de implementar sistemas de alimentación automatizados que coloquen los elementos de refuerzo necesarios o apliquen imprimaciones y pinturas, entre otros.



Ilustración 2. Impresión en laboratorio de Acciona

La tecnología más extendida en la actualidad y con mejores resultados es la denominada *Contour Crafting*, denominada en castellano como *Extrusión*. Está basada en la fabricación de estructuras o piezas de hormigón por capas y destaca por una mejor calidad de la superficie, una mayor velocidad de fabricación y de puesta en obra. Esta nueva técnica presenta ventajas significativas en términos de productos de mayor calidad, producción más rápida, mayor libertad geométrica y menor coste. En la práctica, las capas de mortero se depositan sucesivamente para producir el elemento o estructura. Sin embargo, el mortero utilizado constituye todo un reto, ya que tiene que ser lo suficientemente trabajable para ser bombeado, y lo suficientemente rígido para resistir las cargas impuestas una vez que la capa se deposita. Además, debe adquirir la resistencia suficiente para soportar las cargas procedentes de las capas posteriores en un corto periodo de tiempo. De hecho, la capacidad del material para comportarse adecuadamente está ligada a su reología. En este sentido, siempre debe mantenerse un equilibrio entre la velocidad de acumulación estructural del material y las cargas crecientes. El factor reológico más importante que afecta al comportamiento del material es su límite elástico estático.

Un aspecto técnico muy importante, el cual se va a evaluar en este trabajo, es la capacidad de adherencia de estas mezclas en relación con la disposición de las capas. El esquema de impresión de las capas resulta vital en términos de resistencia y adherencia y, por tanto, de seguridad estructural.

La aplicación con éxito de la impresión 3D en el sector de la construcción puede tener una enorme repercusión en el coste total de la construcción. La siguiente ilustración muestra que para un proyecto de construcción de hormigón, más del 50% del coste total se gasta en el encofrado y la mano de obra (Jha, 2012).

CAPÍTULO II OBJETIVOS

CAPÍTULO II. OBJETIVOS

A raíz de la proliferación de la tecnología de impresión 3D para elementos de hormigón, se pretende proponer técnicas para la materialización de anclajes de las armaduras corrugadas empleadas en la tecnología del hormigón armado a los elementos de hormigón impreso o entre estos y otros elementos estructurales o cimentaciones, y proponer una formulación para evaluar la capacidad del anclaje.

Para la consecución de este objetivo principal se plantean los siguientes objetivos o hitos parciales:

- Llevar a cabo un estudio exhaustivo de la literatura existente en cuanto a las capacidades adherentes y los requerimientos normativos del uso de anclajes en estructuras de hormigón armado.
- Propuesta de una técnica de inclusión de armadura en los elementos de hormigón impreso.
- Plantear un programa de ensayos de capacidad de anclaje de las armaduras con la tipología propuesta, y realización de los ensayos en Laboratorio bajo la supervisión del autor del Trabajo.
- Evaluar los resultados obtenidos de los ensayos y proponer una formulación para el anclaje de barras en este tipo de elementos.
- Por último, se plantearán futuras líneas de investigación.

CAPÍTULO III ESTADO DEL CONOCIMIENTO

CAPÍTULO III. ESTADO DEL CONOCIMIENTO

III.1 Introducción

En este capítulo se realiza un estudio exhaustivo del estado del conocimiento acerca de la adherencia acero-hormigón y el anclaje mediante barras corrugadas. También se aborda la literatura existente sobre la adherencia en elementos de hormigón impresos mediante tecnología 3D, así como los requerimientos normativos a nivel europeo; tanto normas nacionales como normas europeas que se encuentren vigentes a fecha de redacción de este estudio.

Hasta la fecha, la mayoría de las investigaciones sobre la impresión 3D de estructuras de hormigón son realizados por organizaciones comerciales privadas y, por tanto, se carece de literatura científica revisada por pares.

III.2 Impresión 3D de hormigón

III.2.1 Tecnologías

En la actualidad existen tres tecnologías principales y con reconocida eficacia en la fabricación de componentes arquitectónicos y estructurales.

III.2.1.1 Contour Crafting (CC)

Esta tecnología de fabricación aditiva está basada en la fabricación por capas mediante control remoto y a través de un modelo digital. Algunas de las ventajas importantes del CC en comparación con otros procesos de fabricación por capas son la mejor calidad de la superficie, la mayor velocidad de fabricación y una mayor variedad de materiales compatibles (Khoshnevis, 2004) (Khorramshahi & Mokhtari, 2017).

El método de funcionamiento se basa en un brazo robótico con una boquilla que, siguiendo las instrucciones del modelo, se desplaza depositando el material capa por capa, logrando un acabado liso al proyectar el material sobre una llana. Las capas inferiores, tras haberse curado el tiempo suficiente, se endurecen para soportar las cargas procedentes de las capas superiores, conformando la pieza o estructura diseñada (Perkins & Skitmore, 2015).

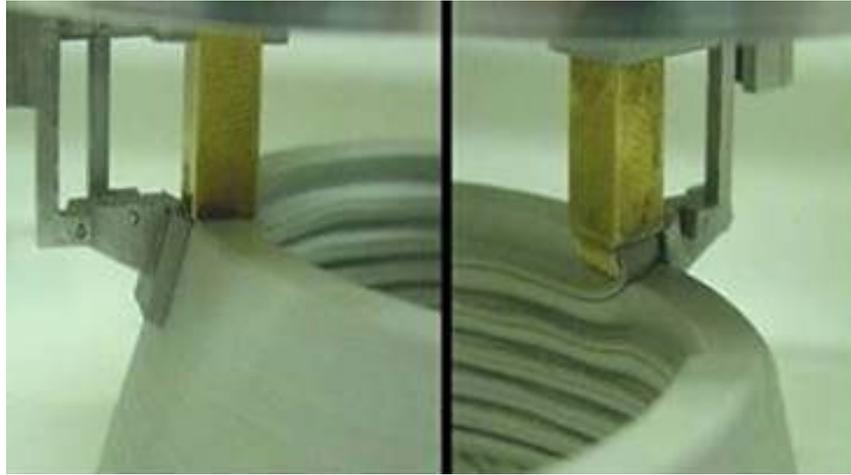


Ilustración 4. Contour Crafting - Google

III.2.1.2 Concrete Printing (CP)

También se basa en la extrusión de mortero de cemento en un proceso de capas. En este método se descarta el uso de la paleta utilizada en el método anterior, por lo que se necesita una menor resolución de deposición para lograr mayores niveles de libertad. Este menor nivel de resolución de impresión ha dado lugar a un mayor control de las geometrías internas y externas (Lim et al., 2012).

A consecuencia de este método de construcción, el acabado no resulta liso si no con apariencia nervada que puede controlarse y diseñarse para aprovechar el efecto o puede rectificarse posteriormente para obtener una superficie lisa, proceso que no se ha conseguido automatizar a día de hoy (Perkins & Skitmore, 2015).



Ilustración 5. Pieza de hormigón impreso: Obsérvese la nervadura en el lateral (Le, Austin, Lim, Buswell, Gibb, et al., 2012)

Es probable que la estructura en capas sea anisótropa, ya que pueden formarse huecos entre los filamentos, lo que debilita la capacidad estructural (Le, Austin, Lim, Buswell, Gibb, et al., 2012).

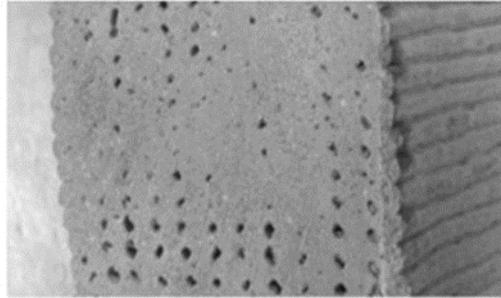


Ilustración 6. Vista seccional de un muro de hormigón impreso: Obsérvense los huecos formados entre los filamentos (Le, Austin, Lim, Buswell, Gibb, et al., 2012)

Para contrarrestar dichos problemas sería recomendable el uso de materiales de altas resistencias, asegurando así unas capacidades estructurales que aseguren los niveles de servicio (Lim et al., 2011).

III.2.1.3 D-Shape

Este método utiliza capas de material granular muy fino y un componente aglutinante en lugar de la pasta cementosa que se utiliza en el resto de las tecnologías. Se trata de un proceso en el que se deposita el material en capas que más tarde se endurece selectivamente utilizando el aglutinante, cada capa de material se coloca con el grosor deseado, se compacta y, posteriormente, un bastidor de pórtico deposita el aglutinante allí donde interesa. Una vez la pieza está acabada, se extrae el material granular que no forma parte del diseño y se descarta.

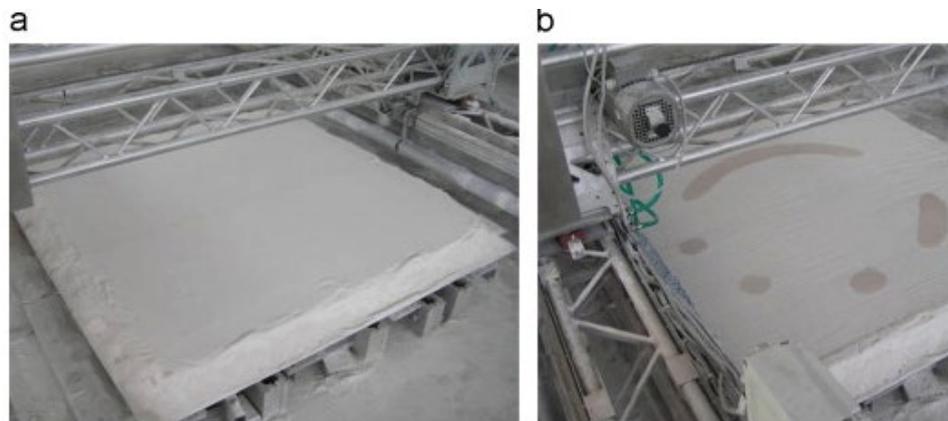


Ilustración 7. a. Una capa de material depositado lista para el adhesivo; b. una sección transversal del modelo que se acaba de imprimir (Cesaretti et al., 2014)

Una de las principales ventajas de esta tecnología es que es capaz de utilizar cualquier material parecido a la arena y produce pocos residuos, ya que el material descartado de una pieza sirve para ser reutilizado en la fabricación de otra. Los materiales utilizados son todas sustancias naturales que requieren muy poco procesamiento antes de su uso en el proceso de fabricación. El resultado es un producto final muy similar a la piedra natural (Tibaut et al., 2016).

III.2.2 Calidad del hormigón conseguido

Las propiedades en fresco del hormigón, así como los parámetros de impresión, como el tiempo de impresión, la velocidad, etc., desempeñan un papel importante en las propiedades endurecidas de los objetos impresos en 3D. Dado que en 3DCP no se requiere encofrado para soportar las capas de hormigón y que el material debe bombearse hasta el cabezal de la boquilla para su extrusión, la reología de las propiedades en fresco del material imprimible adquiere una gran importancia.

Dado que en la impresión 3D no se utiliza ningún encofrado de soporte, no puede utilizarse directamente hormigón tradicional. Para garantizar una deformación escasa o nula en las capas de cordones, se requiere un hormigón de asentamiento casi nulo pero bombeable. Sin embargo, la producción de hormigón de bajo asentamiento requiere una atención especial a las propiedades granulométricas de los áridos. Otra propiedad reológica importante del hormigón fresco es la tixotropía, que se define como una disminución de la viscosidad cuando se aplica cizallamiento, seguida de una recuperación gradual cuando éste se elimina. De lo contrario, se producirá una deformación en la capa de cordones debido a la deposición de las capas siguientes

Para cualquier tipo de material fluido, un buen conocimiento de la reología ayuda a optimizar las condiciones de procesamiento y a obtener productos de buena calidad. En el caso del hormigón/mortero, por ejemplo, la dispersión adecuada o inadecuada de las partículas de cemento en el medio de suspensión cambia por completo la reología de la pasta y, por tanto, tiene un efecto notable en las características de mezclado y colocación del material. Además, pueden presentarse situaciones complejas en la reología cuando se añaden fibras u otros componentes reactivos para mejorar las propiedades de los productos. La mejora de la reología del hormigón tiene mucho que ver con la reducción de la energía que se destina al mezclado y la vibración del producto para su correcta colocación (Banfill, 1991) (Roussel, 2006).

III.2.3 Resistencia alcanzada según la disposición de las capas

Las propiedades en fresco del material, el tiempo de impresión y la dirección de las capas tienen un efecto fundamental en la capacidad de carga global de las piezas. El hormigón estratificado puede crear juntas débiles y reducir notablemente la resistencia a compresión, tracción y flexión que se requiere para la transferencia de esfuerzos a través de dichas juntas.

A continuación se muestra una figura en la que se representan los diferentes casos de carga con respecto a la disposición de las capas de impresión.

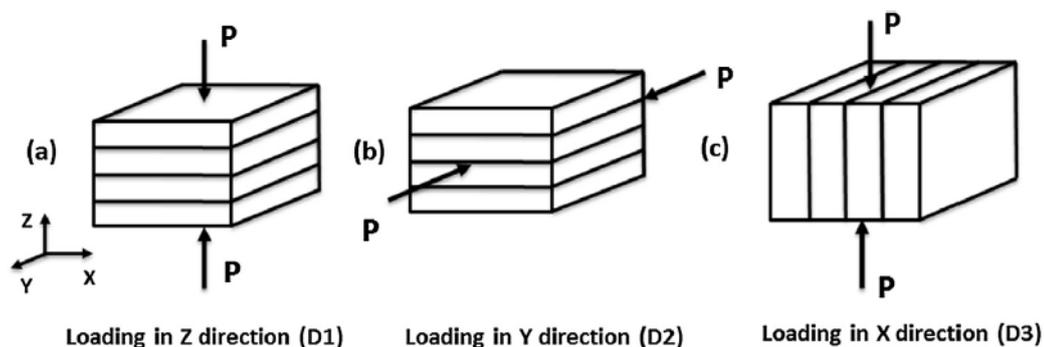


Ilustración 8. Aplicación de carga de compresión en relación a la dirección de las capas de impresión (Paul et al., 2018)

La resistencia a la tracción en la dirección vertical (dirección Z) está relacionada con la resistencia de la unión entre las capas sucesivas. La resistencia de la unión está relacionada con muchos parámetros, como la viscosidad del material, el tiempo de impresión entre las capas, el área de contacto entre las capas sucesivas (la boquilla rectangular proporciona más área de contacto que la boquilla circular), etc. (Le, Austin, Lim, Buswell, Law, et al., 2012).

Frente a esfuerzos de compresión, se han obtenido rendimientos superiores de hasta un 14% en piezas testeadas en las direcciones D1 y D3 en comparación con las probetas convencionales (Nerella & Mechtcherine, 2019). Además, también se observaron mejores resultados en la resistencia a compresión en aquellas piezas cuyas capas son paralelas a la pieza (D1 y D2) que en el caso de las perpendiculares a esta (D3) (Feng et al., 2015). Ambos estudios concluyen que la dirección de las capas resulta fundamental en las capacidades resistentes de las piezas y que se alcanzan mayores valores en los casos D1 y D2 que en el caso D3.

Un importante estudio (Paul et al., 2018) realizó la comparación entre las resistencias a compresión en probetas impresas en 3D de 50 mm (*Mix 1*, *Mix 2* y *Mix 3*) y probetas convencionales de 50 mm (*Control*). Para la impresión de las piezas se utilizó una boquilla rectangular en el caso del geopolímero *Mix 1*, mientras que para las piezas impresas con mezclas *Mix 2* y *Mix 3* se recurre a boquilla circular, esta última lleva en su composición fibra de vidrio. En la siguiente ilustración se puede observar la resistencia a compresión de las diferentes mezclas en función de la dirección de las capas.

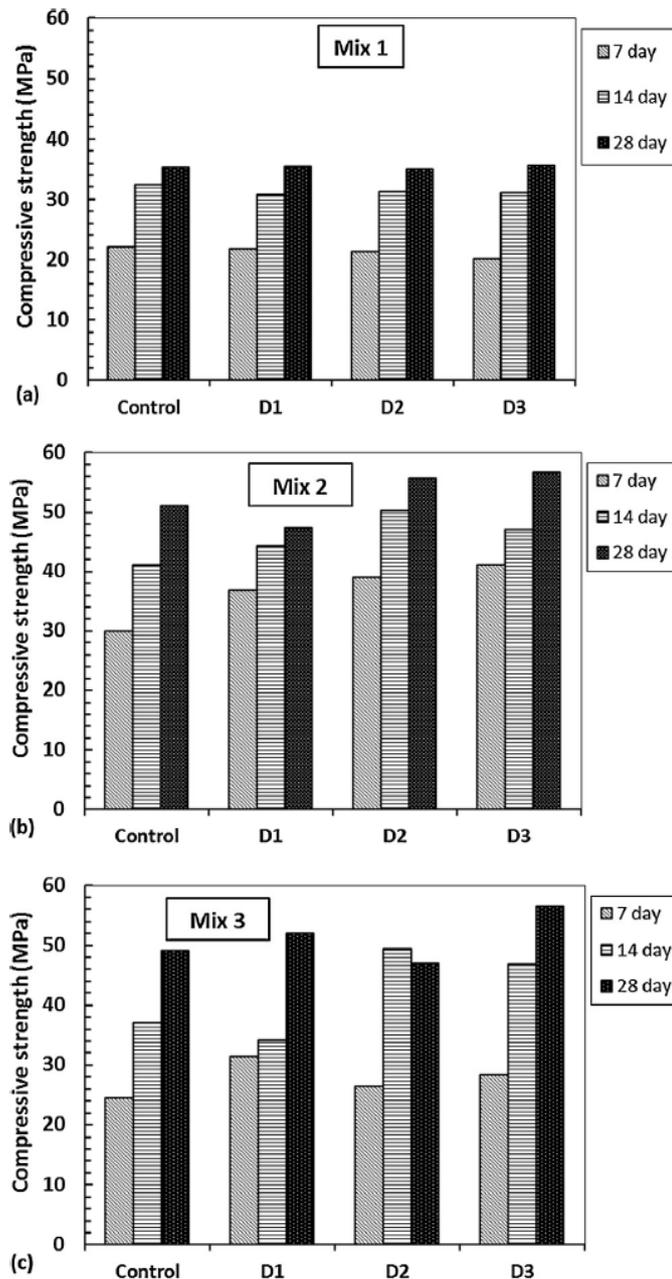


Ilustración 9. Resistencia a la compresión de probetas coladas (*Control*) e impresas de diferentes mezclas (*D1*, *D2* y *D3*). (Paul et al., 2018).

Se puede observar cómo la dirección de impresión influye en las propiedades mecánicas de las probetas impresas. Las resistencias últimas a la compresión, independientemente de las mezclas, están en el rango de 36 MPa para el geopolímero y 57 MPa para la mezcla con fibra de vidrio. A los 28 días, las muestras con dirección de impresión D3 tienen más resistencia que las muestras de las otras direcciones, incluidas las probetas coladas, y se encontraron resistencias máximas que rondan un 11% y un 15% más altas en las muestras de la dirección D3 de las mezclas 2 y 3 que en los especímenes colados, mientras que en la mezcla 1, esta diferencia fue de aproximadamente el 1% (Paul et al., 2018).

Esta mayor resistencia en la dirección D3 coincide con los resultados obtenidos por (Feng et al., 2015) y (Nerella & Mechtcherine, 2019). En la dirección D3, ambos autores encontraron alrededor de un 15% más de resistencia en comparación con las probetas coladas. También es importante señalar que las probetas impresas con orificio de boquilla rectangular utilizando la mezcla 1 mostraron una tendencia casi similar en el desarrollo de la resistencia que las probetas de control, mientras que las probetas impresas con orificio circular utilizando las mezclas 2 y 3 mostraron una gran variación en el desarrollo de la resistencia.

III.3 Adherencia acero-hormigón

La gran ventaja del hormigón armado frente a otros materiales de construcción es que, a un precio más reducido, presenta la gran capacidad de combinar el trabajo del hormigón frente a compresiones y el del acero en las tracciones. Este comportamiento conjunto entre ambos materiales se garantiza a través de una correcta adherencia acero-hormigón, de otra forma se producirían desconchones o deslizamientos y se pondría en riesgo la seguridad estructural. Este aspecto no sólo es fundamental para el aseguramiento de los estados límite últimos, sino también en servicio, pues se controla la fisuración y se limitan las deformaciones.

Antiguamente, sobre todo en Europa, era común el uso de armaduras lisas, hasta que se determinó que el uso de barras corrugadas mejoraba la seguridad de las estructuras ya que se garantizaba una mejor adherencia.

Una barra lisa incrustada en hormigón desarrolla la unión por adherencia entre el hormigón y la barra y por una pequeña cantidad de fricción. Ambos efectos se pierden rápidamente cuando la barra se somete a tracción, en buena medida porque el diámetro

de la barra disminuye ligeramente debido a la relación de Poisson. Por esta razón, las barras lisas no suelen utilizarse ya desde los años 60 y 70 del pasado siglo XX como refuerzo. En los casos en los que se utilizaban barras lisas, éstas se empotraban en el hormigón mediante pernos de anclaje, estribos de barras de pequeño diámetro, etc., o más habitualmente mediante un anclaje mecánico que se realizaba a través de ganchos y, normalmente, con tuercas y arandelas en el extremo empotrado (Wight & MacGregor, 2012).

La adherencia entre acero-hormigón se compone de tres elementos principales; adhesión química, rozamiento y esfuerzo mecánico (Lutz & Gergely, 1967).

En el caso de barras lisas, sólo contribuyen a la adherencia los mecanismos de adhesión química y rozamiento y no existe un aumento de tensiones en la barra, si la longitud de anclaje es insuficiente y se produce un deslizamiento. En cambio, mediante el uso de corrugas sí se produce aumento de las tensiones en el acero; por ello las componentes de adhesión química y rozamiento se vuelven prácticamente irrelevantes y es la adhesión mecánica la encargada de garantizar la seguridad (Gambarova & Rosati, 1997).

Para que se active el mecanismo de adherencia, se requieren desplazamientos relativos entre el acero y el hormigón circundante. La acción de adherencia se consigue mediante el enclavamiento mecánico de las corrugas del acero en el hormigón circundante. Al iniciarse el desplazamiento relativo, las corrugas empiezan a penetrar en la matriz del hormigón. Las tensiones de compresión en las bielas del hormigón inducen tensiones perpendiculares y, por tanto, fisuras de adherencia internas inclinadas que comienzan en las corrugas, denominadas “fisuras de Goto” (Goto, 1971).

El esfuerzo de tracción transferido al hormigón se traduce en un desarrollo de tensiones que pueden dividirse en tensiones longitudinales y radiales. La tensión de adherencia es la tensión longitudinal que actúa a lo largo de la superficie de contacto (Tepfers, 1979).

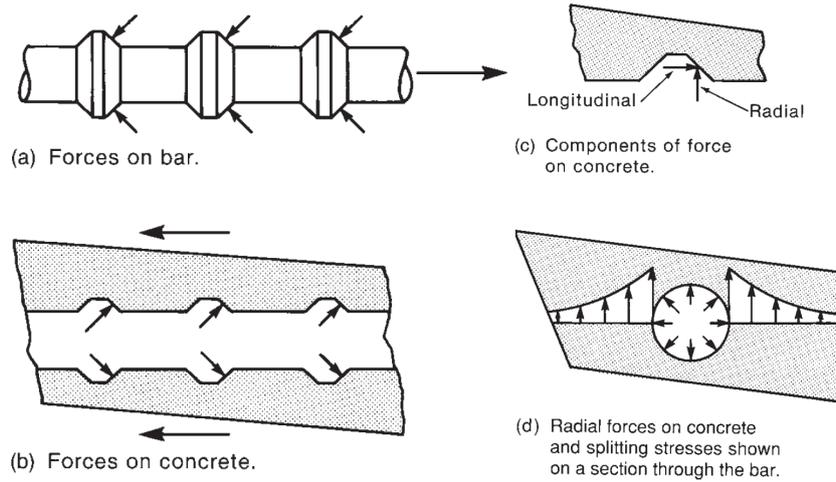


Ilustración 10. Esquema de tensiones (Wight & MacGregor, 2012)

Una vez se produce un esfuerzo de tracción en la barra, se generan fisuras y deformaciones en el hormigón circundante, especialmente en la unión entre el acero y el hormigón. Este fenómeno puede llegar a propiciar el arranque y el deslizamiento de la barra. La anchura de dichas fisuras viene determinada por el diámetro de la barra, la resistencia del hormigón y el espesor del recubrimiento (Tepfers, 1973).

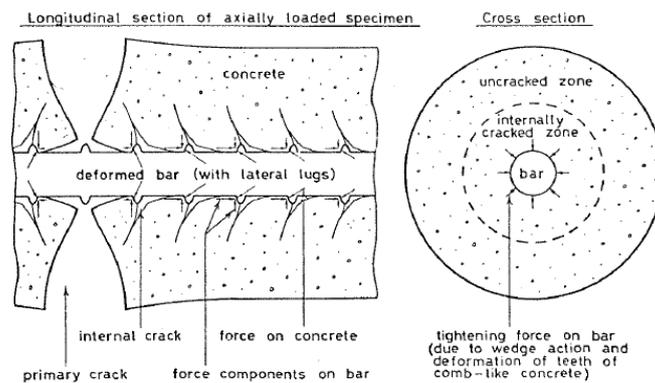


Ilustración 11. Fisuración del hormigón (Tepfers, 1973)

A raíz de las tensiones anteriormente descritas, surge un anillo de tracciones que provoca la fisuración del hormigón.

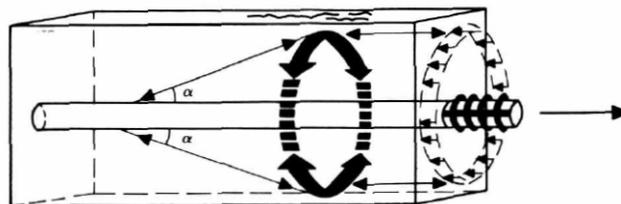


Ilustración 12. Anillo de tracción frente a las fuerzas de adherencia (Tepfers, 1973)

Según las condiciones de confinamiento de la barra, el fallo se puede producir por *splitting*, fisuración del recubrimiento, o por *pull-out*, deslizamiento de la barra. El fallo por *splitting* se origina cuando el recubrimiento es menor que tres veces el diámetro de la barra, ya que al aumentar la carga las fisuras se propagan radialmente, un mayor recubrimiento retrasa el afloramiento de éstas en la superficie (Cairns & Zhao, 1994).

Una vez que las fisuras se desarrollan, la transferencia decrece rápidamente a menos que se proporcione un refuerzo que impida su apertura. Las grietas tienden a desarrollarse a lo largo de la distancia entre una barra y la superficie o entre dos barras (Wight & MacGregor, 2012).

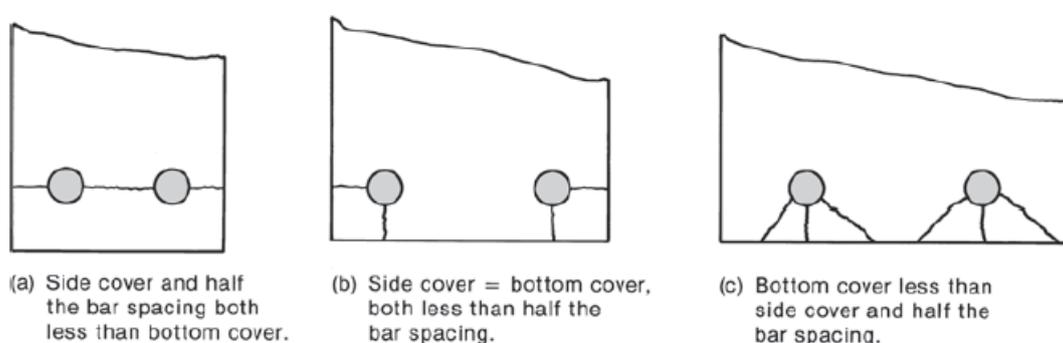


Ilustración 13. Esquema de fisuras (Wight and Macgregor, 2012)

Si el recubrimiento y la separación entre barras es larga en comparación con el diámetro de la barra, puede ocurrir un fallo por *pull-out*.

III.3.1 Parámetros que influyen en la adherencia Acero-Hormigón.

Según varios estudios, los principales parámetros que influyen en la adherencia son: las características geométricas del acero, las características del hormigón, el tipo de sollicitación, el recubrimiento y el confinamiento. Además, también influyen la dosificación del hormigón, la edad de éste y la corrosión (Ouglova et al., 2008), (Cao et al., 2013), (Zhang et al., 2009), (Álvarez et al., 2011), (Sulaiman et al., 2017)

III.3.1.1 Características geométricas del acero

El hecho de disponer corrugas tiene un efecto muy importante en el tipo de fallo que se produce con la pérdida de adherencia.

Las barras con mayor número de corrugas ejercen menores tensiones al hormigón circundante para una tensión de adherencia dada, mientras que la inclinación de

las corrugas y el ángulo de las mismas no resultan significativas (Cairns & Jones, 1995).

La relación adecuada entre la altura a y la separación c' (ver Ilustración 14) debe estar entre 0,07 y 0,1 suponiendo de ello que el espesor de las corrugas es despreciable frente a la separación entre ellas. Cuando la relación entre la separación y la altura es menor se produce una rotura del hormigón entre las corrugas y, por el contrario, cuando esta relación es mayor se produce una rotura del hormigón situado alrededor de la corruga (Rehm & Eligehausen, 1978).

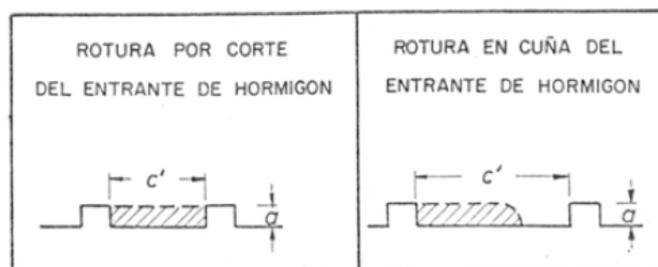


Ilustración 14. Influencia de la relación entre la altura y la separación de las corrugas en el tipo de fallo (Rehm & Eligehausen, 1978)

Se podría decir que con el aumento de la altura y el espesor de las corrugas aumenta la adherencia (Rehm & Eligehausen, 1978).

Por otro lado, al aumentar el diámetro de la armadura, se reduce la tensión de adherencia. La transferencia de tensiones entre el hormigón y el acero se ve afectada por la geometría del refuerzo, incluyendo la distribución, separación, altura y tipo de corrugas. Estos factores juegan un papel importante al evitar el deslizamiento físico de la barra embebida en el hormigón (fib Bulletin, 2000)

En la Ilustración 15, procedente de un reciente estudio de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, se representa una relación recubrimiento/diámetro de $c/\varnothing=0$ y $c/\varnothing=2$ y se confirma que la tensión última de adherencia local disminuye al aumentar el diámetro de la barra (Molina et al., 2004).

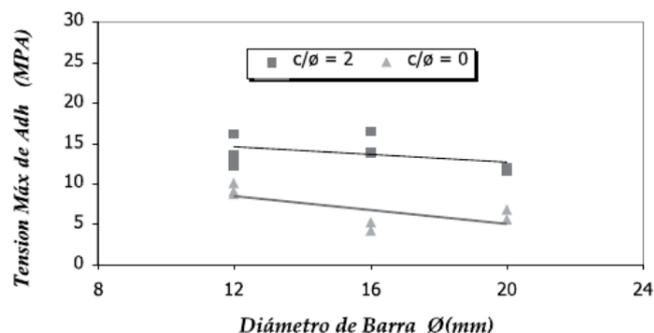


Ilustración 15. Influencia del diámetro del refuerzo en la tensión máxima de adherencia (Molina et al., 2004)

III.3.1.2 Características del hormigón

La resistencia a tracción del hormigón es uno de los principales factores responsables de las características de adherencia.

La serie normativa UNE-EN-1992-1-1:2004 (Eurocódigo 2), de referencia en el marco europeo, determina que la resistencia a tracción del hormigón, clave en la capacidad de adherencia y anclaje de las armaduras, se puede definir mediante la expresión:

$$f_{ctm} = 0,30 \cdot f_{ck} \left(\frac{2}{3}\right) \leq C50/60$$

donde

f_{ctm} es la resistencia media a tracción del hormigón

f_{ck} es la resistencia a compresión del hormigón.

Además de aportar los valores característicos en la Tabla 3.1 del documento oficial de dicha norma.

III.3.1.3 Solicitaciones

El éxito del hormigón armado como material de construcción se debe en gran medida a la capacidad de la armadura y del hormigón de actuar conjuntamente para resistir las cargas externas y deformaciones impuestas a la estructura. Para que el hormigón y el acero trabajen de forma eficiente, las barras deben sufrir la misma tensión de deformación que el hormigón circundante, evitando así problemas de posibles desplazamientos diferenciales o arrancamientos tras un episodio de carga.

Dado que las fuerzas externas rara vez se aplican directamente a la armadura, como sería el caso de un ensayo de extracción en laboratorio, la barra puede recibir su parte de carga únicamente a través del hormigón que la rodea (Park & Paulay, 2009). Esta transferencia de carga se produce en un campo de tensión continuo que se desarrolla en las proximidades del interfaz acero-hormigón. Para que exista este proceso interactivo de transferencia de carga entre ambos materiales, las tensiones de adherencia deben actuar a lo largo de la interfaz de acero-hormigón para producir las tensiones necesarias de tracción o compresión en la barra.

Sin embargo, la tensión de adherencia no sólo es necesaria para garantizar un nivel adecuado de seguridad mediante el aseguramiento de una correcta interacción entre los dos materiales, sino también para controlar el comportamiento estructural con un nivel adecuado de ductilidad y robustez.

III.3.1.4 Recubrimiento

Una de las principales funciones del recubrimiento es la protección de las armaduras frente a los procesos de corrosión, la normativa vigente determina los espesores mínimos a disponer en función de los ataques químicos o físicos a los que se exponga la estructura en su puesta en servicio.

La adherencia mejora cuando aumenta el recubrimiento hasta un determinado valor en el que permanece constante, este valor está comprendido entre 2,5Ø y 3,5Ø (Cairns & Jones, 1995). Este mismo ratio se utiliza para determinar la relación entre el recubrimiento y el diámetro de la barra que asegura una transición del fallo por splitting a un fallo por deslizamiento de la barra (Euro-international du béton & University, 1992).

Las propiedades de durabilidad del recubrimiento del hormigón pueden mejorarse reduciendo la relación agua-cemento, añadiendo materiales cementantes suplementarios o aumentando el espesor del propio recubrimiento (Cao et al., 2013).

Otro aspecto importante del recubrimiento es que debe ser suficiente para garantizar las condiciones de durabilidad de la estructura.

III.3.1.5 Confinamiento conferido por el hormigón a la armadura

En el caso de hormigonados in-situ, un aspecto fundamental a la hora de evaluar la adherencia de una barra embebida en el hormigón es la posición de esta frente a la capa última de hormigonado. La norma UNE-EN-1992-1-1 establece un coeficiente para el cálculo de la tensión última de adherencia que obtendrá el valor de 1,0 si se obtienen “buenas” condiciones de adherencia ó 0,7 si son “deficientes”

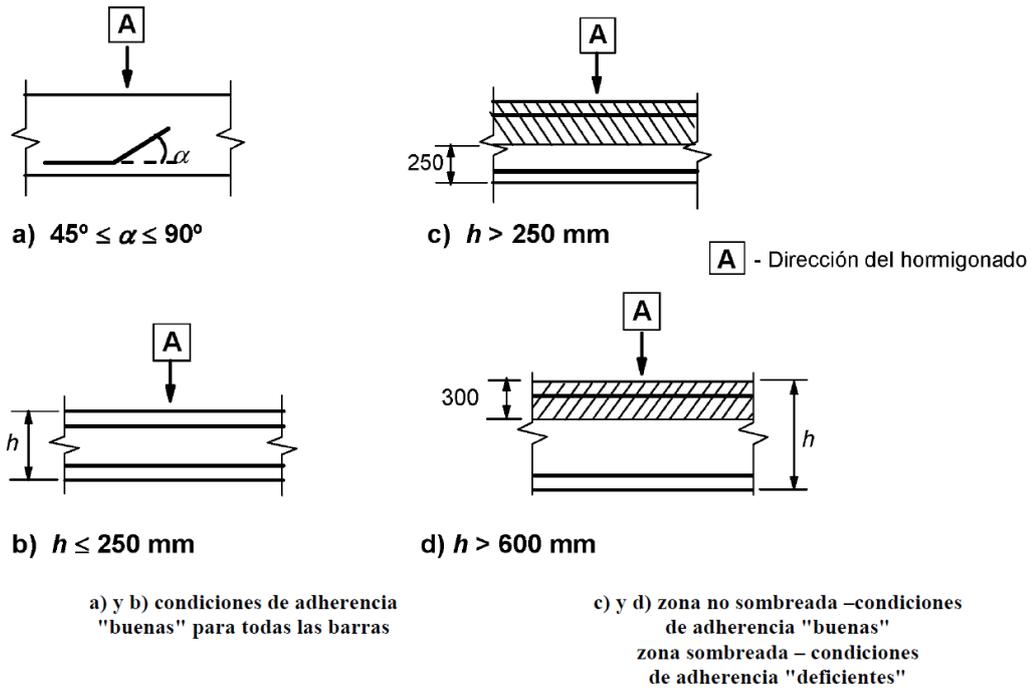


Ilustración 16. Condiciones de adherencia según UNE-EN-1992-1-1

Este aspecto no es aplicable, en muchos casos, a piezas de hormigón prefabricadas, pues las condiciones de ejecución aseguran un correcto confinamiento del hormigón en todos sus capas y, por tanto, unas “buenas” condiciones de adherencia en toda la sección.

III.3.1.6 Corrosión

Existen dos aspectos fundamentales a tener en cuenta en la evaluación de los posibles ataques a las armaduras. En primer lugar, la carbonatación reduce el pH del hormigón a valores próximos a 6, lo que reduce la capacidad de pasivar el acero y, por tanto, facilitando los procesos de corrosión. En segundo lugar, la presencia de cloruros procedentes del agua, los áridos y/o algunos aditivos resulta en pérdidas de resistencia e interviene en los procesos de corrosión de las armaduras, actuando como catalizador. (Rodríguez, 2022)

La rotura de la adherencia provocada por una fisuración excesiva, junto con el giro del hormigón de recubrimiento separándose de la barra en una zona en torno a la fisura, provocan la corrosión a ambos lados de la barra (Calavera Ruíz, 2005).

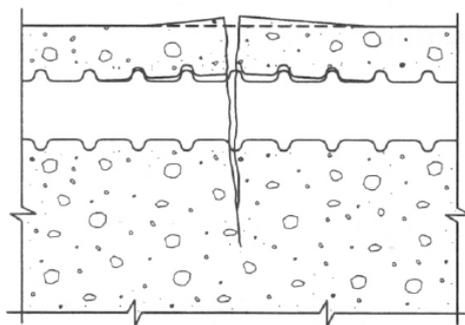


Ilustración 17. La zona afectada se extiende a ambos lados de la fisura (Calavera Ruíz, 2005)

Uno de los factores más decisivos en la disminución de la adherencia debida a la corrosión es la pérdida de corruga. Además, cuando se produce un proceso de oxidación, las barras aumentan su tamaño en proporciones que pueden suponer un problema de estabilidad en el hormigón, llegando a provocar el desprendimiento de este. Este hecho provocaría posibles riesgos por pérdida de sección, exposición de las armaduras a la intemperie, y afectaría a las condiciones de adherencia y anclaje por los aspectos antes expuestos en lo referente a la influencia del recubrimiento.

La corrosión por cloruros produce corrosión por picaduras o localizada, mientras que la corrosión inducida por carbonatación suele causar corrosión uniforme o generalizada. (Cao et al., 2013).

Los niveles de corrosión leves, de hasta el 0,4%, aumentan los valores de la tensión y la rigidez del anclaje, sin embargo, cuando el nivel de corrosión supera el 0,4% la tensión de adherencia y la rigidez del anclaje disminuyen considerablemente (Ouglova et al., 2008).

III.4 Anclaje de barras en elementos impresos en 3D

La impresión 3D de hormigón, denominada 3DCP por sus siglas en inglés (3D Concrete Printing), es una tecnología emergente en el sector de la construcción que promete revolucionarlo con la implementación de estructuras más baratas, automatizadas y sin

encofrados. La idea fue concebida en primera instancia por Khosnevis como “Contour Crafting” sinónimo de la que ahora se denomina como “mediante extrusión” (Khosshnevis, 2004).

La tecnología de impresión por extrusión es la más adecuada para construcción a gran escala, en la que se bombea una mezcla cementosa con una viscosidad rígida a un cabezal de impresión y la extruye a través de una boquilla para conformar una disposición de capas superpuestas que dan lugar a un sólido (Buswell et al., 2018).

En la actualidad, las técnicas más eficaces y aceptadas para reforzar estructuras de gran tamaño y que soportan cargas verticales a través de la capa intermedia consisten en imprimir una cáscara hueca, colocar a continuación armadura convencional en el centro y rellenar el núcleo con hormigón fluido. Esta técnica no aprovecha del todo el potencial de la impresión 3D, ya que implica una integración manual del refuerzo que requiere mano de obra y supone un aumento de la masa neta de las piezas. Esto en sí mismo crea un cuello de botella en el proceso de impresión (Marchment & Sanjayan, 2020).

Son numerosas las investigaciones realizadas en cuanto al comportamiento estructural de las piezas impresas, pero sin profundizar en los refuerzos mediante acero. Cuando se imprime una pieza hay que tener en cuenta la orientación de las capas frente a la disposición de las barras de refuerzo. El hormigón vibrado es el que ofrece mejor resistencia a las tensiones de arrancamiento, seguido de las piezas impresas con las capas paralelas a la barra, por último, las piezas con capas perpendiculares a los refuerzos. Aún con todo, en rendimiento global de la adherencia del hormigón impreso en 3D con el acero de refuerzo puede calificarse de satisfactorio (Baz et al., 2020).

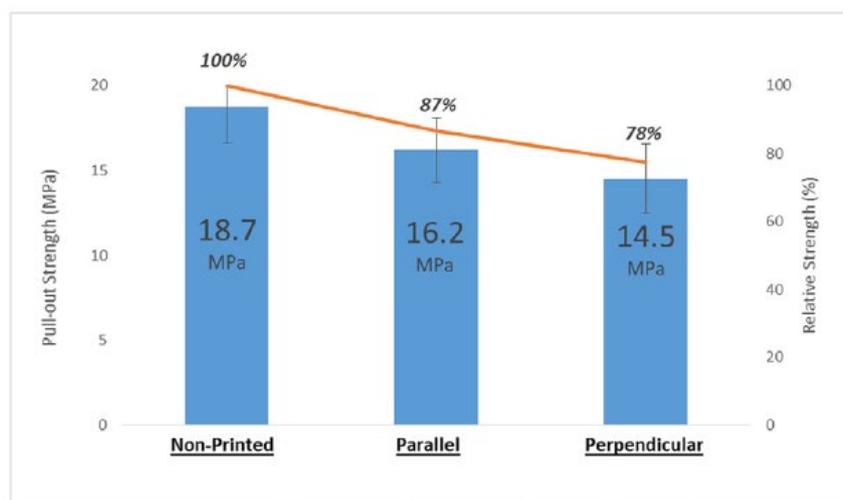


Ilustración 18. Presentación gráfica de la fuerza de extracción media y relativa. (Baz et al., 2020)

Unos primeros ensayos realizados a piezas impresas determinaron que los elementos impresos en 3D ofrecían prácticamente la misma resistencia a la extracción que la de los elementos vibrados, menos en los casos en los que las barras son incrustadas después de haber impreso la pieza al completo (Bar-After). Una de las principales conclusiones de este ensayo es que siempre que el material se considere imprimible, e independientemente de la trabajabilidad de la mezcla, se seguirá desarrollando una fuerte tensión e adherencia acero-hormigón y la resistencia a extracción seguirá siendo significativa (Hachem et al., 2023).

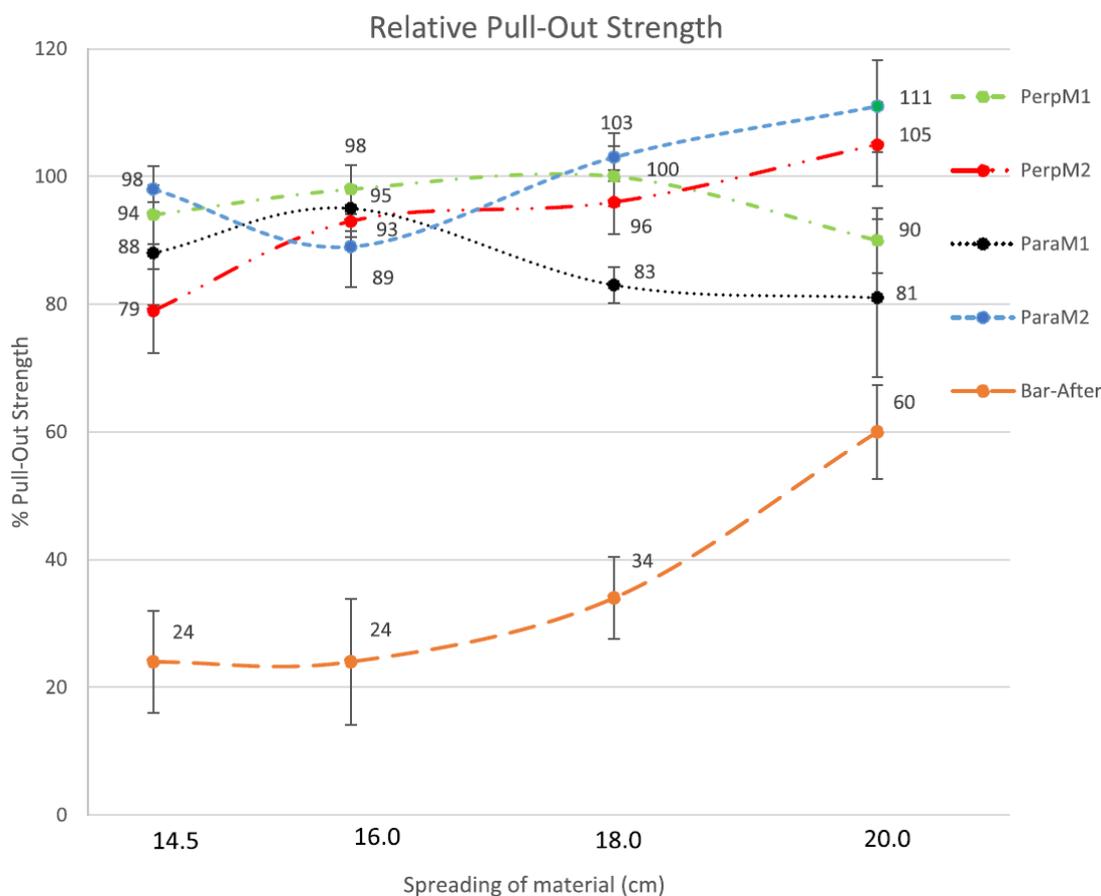


Ilustración 19. Variación de la resistencia a la extracción para todas las mezclas (Hachem et al., 2023)

También se han realizado ensayos en los que se determina que utilizar la técnica de incrustación de barras verticalmente a través de las capas impresas es un método eficaz para automatizar el proceso de refuerzo. Este estudio también determina que la adherencia es mayor en la parte inferior de la barra y menor en la superior, debida a las deformaciones producidas en el proceso de penetración. La adherencia en la parte inferior es muy similar a la conseguida en elementos colados de forma tradicional (Marchment & Sanjayan, 2020).

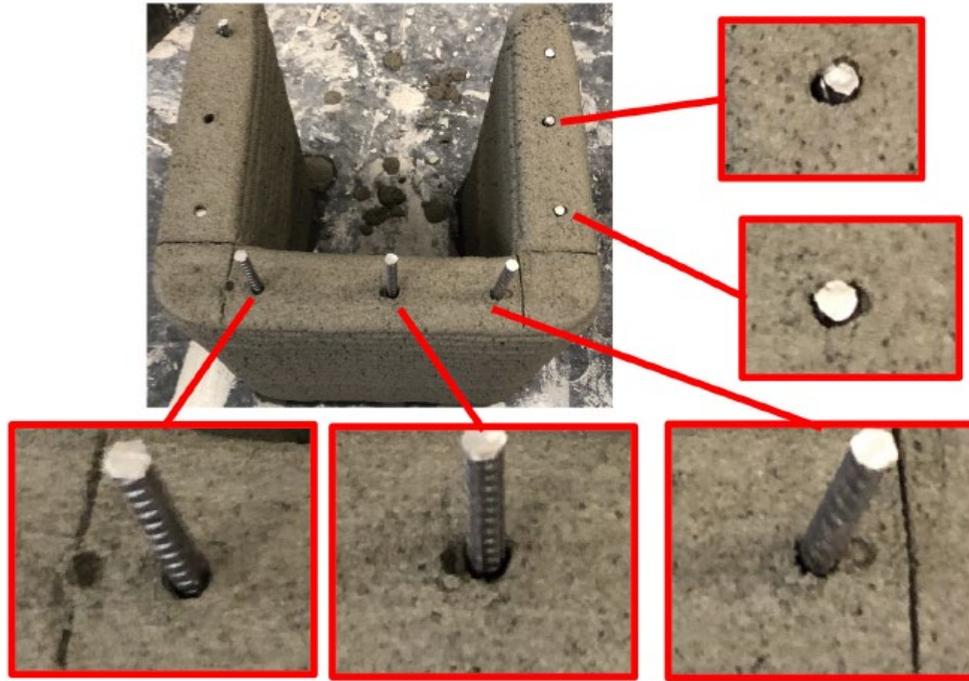


Ilustración 20. Cavidades en la parte superior producidas por la penetración (Marchment & Sanjayan, 2020)

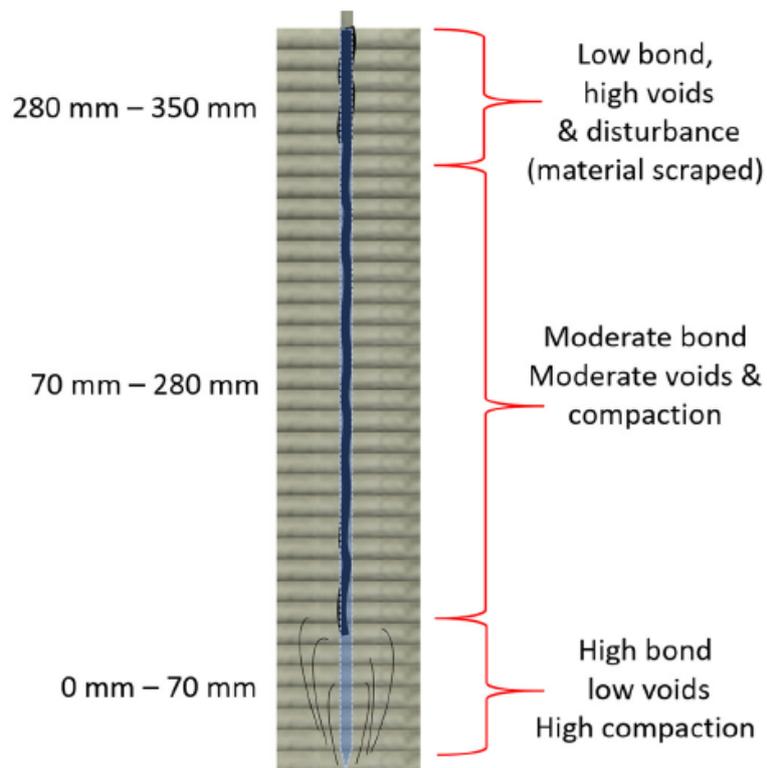


Ilustración 21. Categorización de las tres zonas y mecanismos en el perfil de adherencia de penetración de la barra (Marchment & Sanjayan, 2020)

III.5 Normativa aplicable

Las piezas fabricadas mediante la tecnología de impresión 3D que posean un comportamiento estructural tanto en obra civil como en edificación están sometidas al cumplimiento de la normativa nacional y europea. La finalidad de dichas normas es satisfacer los requisitos de seguridad estructural, seguridad en caso de incendio y frente a sismo; proporcionando procedimientos que permiten demostrar su cumplimiento frente a los estados límites con suficientes garantías técnicas.

En España hay dos marcos reglamentarios que establecen las exigencias que deben cumplir los elementos de hormigón estructural, éstos son:

III.5.1 Código Estructural

El apartado 49.5.1.2 de (*Documento Básico SE. Seguridad Estructural.*, 2019) establece el método de cálculo de la longitud básica de anclaje para barras corrugadas que cumplan con la norma UNE-EN 10080 y suponiendo una tensión de adherencia constante τ_{bd} .

Para garantizar el anclaje de la armadura debe disponerse una longitud de anclaje:

$$l_b = \frac{\emptyset \cdot f_{yd}}{4\tau_{bd}}$$

Donde τ_{bd} depende de numerosos factores, entre ellos el diámetro de las armaduras, las características resistentes del hormigón y de la propia longitud de anclaje.

La longitud básica de anclaje resultante, obtenida de forma simplificada es:

- Para barras en posición I:

$$l_{bI} = m\emptyset^2 \leq \frac{f_{yk}}{20} \emptyset$$

- Para barras en posición II:

$$l_{bII} = 1,4m\emptyset^2 \leq \frac{f_{yk}}{14} \emptyset$$

donde:

\emptyset Diámetro de la barra, en mm.

m Coeficiente numérico, indicados en la siguiente tabla.

Resistencia característica del hormigón (N/mm ²)	<i>m</i>	
	B 400 S B400SD	B 500 S B 500SD
25	1,2	1,5
30	1,0	1,3
35	0,9	1,2
40	0,8	1,1
45	0,7	1,0
≥50	0,7	1,0

Ilustración 22. Coeficiente numérico *m*

f_{yk} Límite elástico del acero, en N/mm².

l_{bI} y l_{bII} Longitudes básicas de anclaje en posiciones I y II, en mm.

La longitud neta de anclaje se define como:

$$l_{b,neto} = l_b \beta \frac{\sigma_{sd}}{f_{yd}} \cong l_b \beta \frac{A_s}{A_{s,real}}$$

donde:

β Factor de reducción

Tipo de anclaje	Tracción	Compresión
Prolongación recta	1	1
Patilla, gancho y gancho en U	0,7 (*)	1
Barra transversal soldada	0,7	0,7

Ilustración 23. Valores de β

(*) Si el recubrimiento de hormigón perpendicular al plano de doblado es superior a $3\varnothing$. En caso contrario $\beta = 1$.

σ_{sd} Tensión de trabajo de la armadura que se desea anclar, en la hipótesis de carga más desfavorable, en la sección desde la que se determinará la longitud de anclaje.

A_s Armadura necesaria por el cálculo en la sección a partir de la cual se ancla la armadura.

$A_{s,real}$ Armadura realmente existente en la sección a partir de la cual se ancla la armadura.

En cualquier caso, $l_{b,meta}$ no podrá adoptar valores inferiores al mayor de los tres siguientes:

- 10 Ø.
- 150 mm.
- La tercera parte de la longitud básica de anclaje para barras traccionadas y los dos tercios de dicha longitud para barras comprimidas.

De acuerdo con el artículo 3 de este documento, se deberán adoptar, para el dimensionamiento y comprobación de la estructura en el proyecto, los procedimientos establecidos los Eurocódigos vigentes.

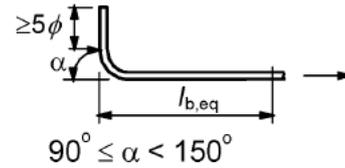
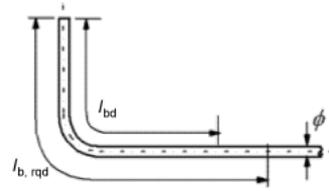
III.5.2 Eurocódigo estructural

La serie normativa de normalización europea (Comité Europeo de Normalización, 2011) comprende una serie normas de cumplimiento obligatorio en los proyectos de edificación y obra civil dentro del marco de la Unión Europea. Se incluye, además, como Anejo al Código Estructural para el Proyecto de Estructuras de Hormigón.

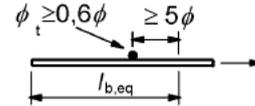
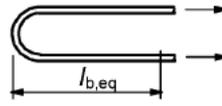
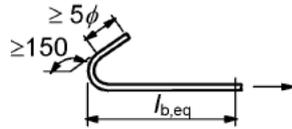
El apartado 8.4 del Eurocódigo 2 establece el método de cálculo para determinar longitud de anclaje de la armadura longitudinal y determina los métodos de anclaje contemplado en la Instrucción.

En primer lugar, las armaduras de barras se deben anclar de modo que las fuerzas de adherencia se transmitan de forma segura al hormigón, y si eviten las fisuras longitudinales y desconchones. Si fuera necesario, se deberá disponer armadura transversal.

A continuación se muestran métodos de anclaje contemplados por la norma



- a) Longitud básica de anclaje en tracción, l_b , para cualquier forma medida a lo largo del eje longitudinal
- b) Longitud de anclaje equivalente para una patilla



- c) Longitud de anclaje equivalente para un gancho
- d) Longitud de anclaje equivalente para un gancho en U
- e) Longitud de anclaje equivalente para una barra transversal soldada

Ilustración 24. Métodos de anclaje diferentes de la barra recta (Comité Europeo de Normalización, 2011)

La tensión última de adherencia debe ser suficiente para prevenir los fallo, para el caso de utilización de barras corrugadas debe adoptarse la siguiente expresión:

$$\tau_{b,u} = f_{bd} = 2,25 \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd}$$

donde

f_{ctd} es el valor de cálculo de la resistencia del hormigón a tracción.

η_1 es un coeficiente relacionado con la calidad de la condición de adherencia y la posición de la barra durante el hormigonado.

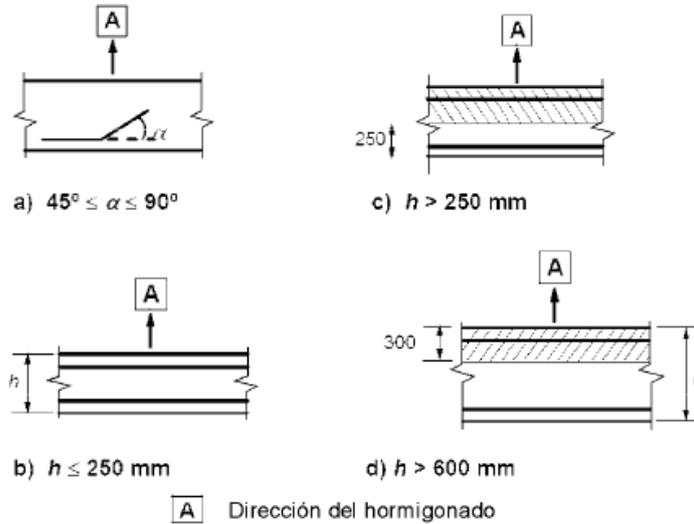
$\eta_1 = 1,0$ cuando se obtienen “buenas” condiciones

$\eta_1 = 0,7$ para el resto de los casos.

η_2 está relacionado con el diámetro de la barra:

$\eta_2 = 1,0$ para $\varnothing \leq 32 \text{ mm}$

$\eta_2 = (132 - \varnothing)$ para $\varnothing > 32 \text{ mm}$



a) y b) condiciones de adherencia "buenas" para todas las barras

c) y d) zona no sombreada - condiciones de adherencia "buenas"
zona sombreada - condiciones de adherencia "deficientes"

Ilustración 25. Descripción de las condiciones de adherencia (Comité Europeo de Normalización, 2011)

En el siguiente apartado de esta norma, se determina el método de cálculo de la longitud de anclaje requerida $l_{b,rqd}$, la cual depende de la tensión de cálculo de la barra σ_{sd} en la posición a partir de la cual se mide el anclaje y la tensión de adherencia constante f_{bd} .

$$l_{b,rqd} = \left(\frac{\emptyset}{4}\right) \left(\frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}\right)$$

Esta longitud de anclaje requerida sirve de base de cálculo para hallar al longitud neta de anclaje l_{bd} :

$$l_{bd} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot l_{b,rqd} \geq l_{b,min}$$

donde los diferentes coeficientes $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5$ se determinan en la siguiente tabla:

Factor que influye	Tipo de anclaje	Barra de armadura	
		En tracción	En compresión
Forma de las barras	Prolongación recta	$\alpha_1 = 1,0$	$\alpha_1 = 1,0$
	Distinto de prolongación recta [véanse las figuras 8.1 (b), (c) y (d)]	$\alpha_1 = 0,7$ si $c_d > 3\phi$ en otro caso $\alpha_1 = 1,0$ (véase la figura 8.3 para valores de c_d)	$\alpha_1 = 1,0$
Recubrimiento del hormigón	Prolongación recta	$\alpha_2 = 1 - 0,15 (c_d - \phi) / \phi$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$	$\alpha_2 = 1,0$
	Distinto de prolongación recta [véanse las figuras 8.1 (b), (c) y (d)]	$\alpha_2 = 1 - 0,15 (c_d - 3\phi) / \phi$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$ (véase la figura 8.3 para valores de c_d)	$\alpha_2 = 1,0$
Confinamiento debido a la armadura transversal no soldada a la armadura central	Todos los tipos	$\alpha_3 = 1 - K\lambda$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$	$\alpha_3 = 1,0$
Confinamiento debido a la armadura transversal soldada*	Todos los tipos, posiciones y tamaños especificados en la figura 8.1 (e)	$\alpha_4 = 0,7$	$\alpha_4 = 0,7$
Confinamiento debido a la presión transversal	Todos los tipos	$\alpha_5 = 1 - 0,04p$ $\geq 0,7$ $\leq 1,0$	—
donde $\lambda = (\Sigma A_{st} - \Sigma A_{st,min}) / A_s$; ΣA_{st} área de la sección de armadura transversal a lo largo de la longitud neta de anclaje l_{bd} ; $\Sigma A_{st,min}$ área de la sección transversal de la armadura transversal mínima; $= 0,25 A_s$ para vigas y 0 para losas; A_s área de la barra anclada de diámetro mayor; K los valores se indican en la figura 8.4; p presión transversal [MPa] en estado límite último a lo largo de l_{bd} .			
* Véase también el apartado 8.6: para apoyos directos se puede tomar l_{bd} menor que $l_{b,min}$ siempre y cuando haya al menos un alambre transversal soldado dentro del apoyo. Dicho alambre se debería ubicar al menos a 15 mm desde la cara del apoyo.			

Tabla 1. Valores de los coeficientes α_1 , α_2 , α_3 , α_4 , α_5 (Comité Europeo de Normalización, 2011)

**CAPÍTULO IV GAP DE CONOCIMIENTO Y
METODOLOGÍA**

CAPÍTULO IV. GAP DE CONOCIMIENTO Y METODOLOGÍA

IV.1 Gap de conocimiento

El marco en el que se sitúa este trabajo se centra básicamente en los siguientes puntos:

- La fijación de armaduras a elementos de hormigón impreso en 3D carece de un procedimiento estándar y no existen referencias bibliográficas significativas que describan cómo realizar este proceso de manera adecuada. Para abordar esta falta de información, en colaboración con ACCIONA, se explorará una propuesta tecnológicamente viable destinada a su implementación en una producción a gran escala.
- La evaluación de la capacidad de anclaje de armaduras en el hormigón impreso en 3D también se enfrenta a la ausencia de normativas y literatura relevante. Para abordar este desafío, se propondrá una formulación respaldada por una serie de ensayos experimentales.

IV.2 Metodología

Identificado en el apartado anterior el gap de conocimiento de cara a los objetivos planteados para el trabajo, se plantea:

- En primer lugar, establecer una propuesta de anclaje de la armadura a los elementos de hormigón impreso 3D.
- Dadas las especiales condiciones en las que se encuentra la armadura, en relación con las que se presentan en el hormigón armado convencional, se hace precisa una campaña experimental que oriente la propuesta de una formulación sobre la capacidad de anclaje de la armadura con el procedimiento tecnológico establecido de acuerdo con el punto anterior.
- Finalmente, analizar los resultados de la campaña experimental para proponer una formulación sobre la capacidad de anclaje de la armadura dispuesta con el procedimiento de puesta en obra propuesto.

CAPÍTULO V PROPUESTA TECNOLÓGICA PARA EL ANCLAJE DE LA ARMADURA

CAPÍTULO V. PROPUESTA TECNOLÓGICA PARA EL ANCLAJE DE LA ARMADURA

La inclusión de armadura es uno de los aspectos vitales a la hora de determinar las capacidades adherentes de las piezas. Frente a la propuesta de ejecutar taladros en los que se injerten las barras con formulaciones epoxi o algún otro anclaje químico similar, Acciona propone la inclusión de las barras manualmente entre capa y capa. Este hecho agiliza enormemente el proceso de producción, pero añade incertidumbre sobre la capacidad de adherencia y anclaje de las barras así dispuestas, lo que motiva el análisis que se expone en los apartados siguientes.



Ilustración 26. Anclaje con epoxi - Hilti

CAPÍTULO VI CAMPAÑA EXPERIMENTAL

CAPÍTULO VI. CAMPAÑA EXPERIMENTAL

Tras realizar un estado del conocimiento en el que se recogen los principales desarrollos y conocimientos en el campo de la impresión estructural en 3D, se plantea un método ensayo de anclaje. Dadas las notables diferencias que en principio existen entre las condiciones de las barras en los elementos de hormigón impreso, de acuerdo con la técnica propuesta en apartados anteriores, y las que presentan las armaduras en las estructuras habituales de hormigón armado para las que son de aplicación las formulaciones disponibles en la normativa y bibliografía relevantes. Se evaluará el método de rotura, si se produce en la barra o en el mortero, y en este último caso, se estudiará la forma de rotura para la posterior valoración.

Para ello se plantea la realización de un plan de ensayos en Laboratorio sobre probetas de hormigón impreso con armaduras embebidas con la técnica propuesta. El planteamiento de estos ensayos y la metodología y resultados obtenidos se exponen en los apartados siguientes.

VI.1 Materiales

VI.1.1 Mortero

El material utilizado corresponde a la serie 3Dprintable MORTAR de CyBe MORTAR, específico para su utilización en impresión 3D, el cual posee unas características muy específicas que posibilitan su uso en este campo.

Se trata de un mortero ligero bajo en contenido de cloruros y sulfatos que es capaz de fraguar en tres minutos y alcanzar resistencia estructural en una hora. La velocidad máxima de impresión está limitada a 600 mm/s y es posible realizar capas de hasta 50 mm de altura.

La resistencia característica a compresión a 5 días puede llegar a 20 N/mm² y alcanzar un valor máximo de 40 N/mm² a 28 días.

Por otro lado, la resistencia a tracción es de 2,4 N/mm² tras 1 día y de 4 N/mm² a los 28 días.

En el Anexo I se adjunta el informe emitido por el fabricante así como el informe de la caracterización de la docilidad y las resistencias tempranas.

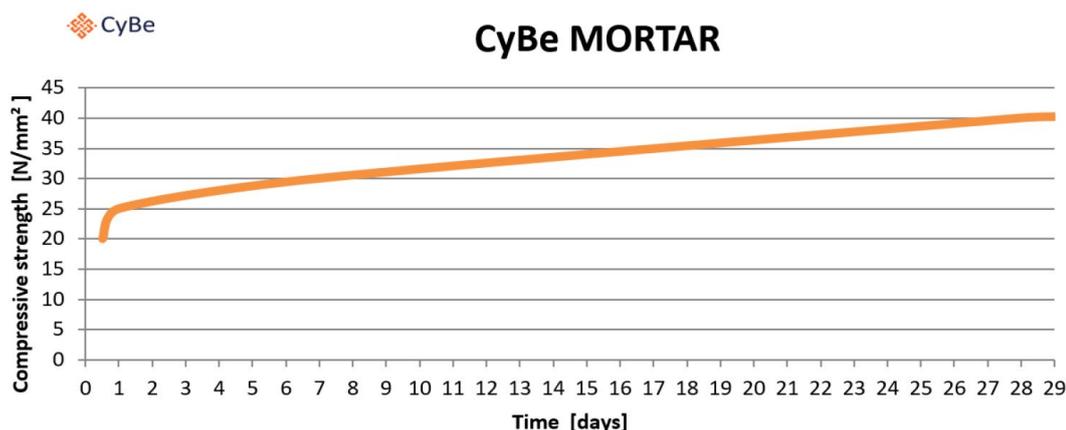


Ilustración 27. Resistencia característica 3Dprintable MORTAR - CyBe MORTAR

VI.1.2 Acero

Se ha establecido el uso de barras corrugadas B500SD con una resistencia de 500 N/mm² y una longitud de 500 mm, para la valoración de diferentes escenarios se dispone una barra por probeta que serán de diámetros de 10 mm, 12 mm y 16 mm.

VI.1.3 Aditivos

Se emplea Sika[®] Retarder-50 como retardador de fraguado, siguiendo la norma UNE-EN 934-2. Es un aditivo líquido que desarrollado para el control de la hidratación del cemento, de esta forma estabiliza el mortero sin influir negativamente en su calidad.

Se adjunta informe de fabricante en el Anexo II Documentación relativa al aditivo.

VI.2 Confección de las probetas de ensayo

Se decide que se dispondrán las barras una altura de 100 mm, quedando así en el centro de las probetas de 200x200 mm. Se disponen barras de 500 mm de longitud con recubrimiento de PVC que limitará la longitud de anclaje a 5Ø.

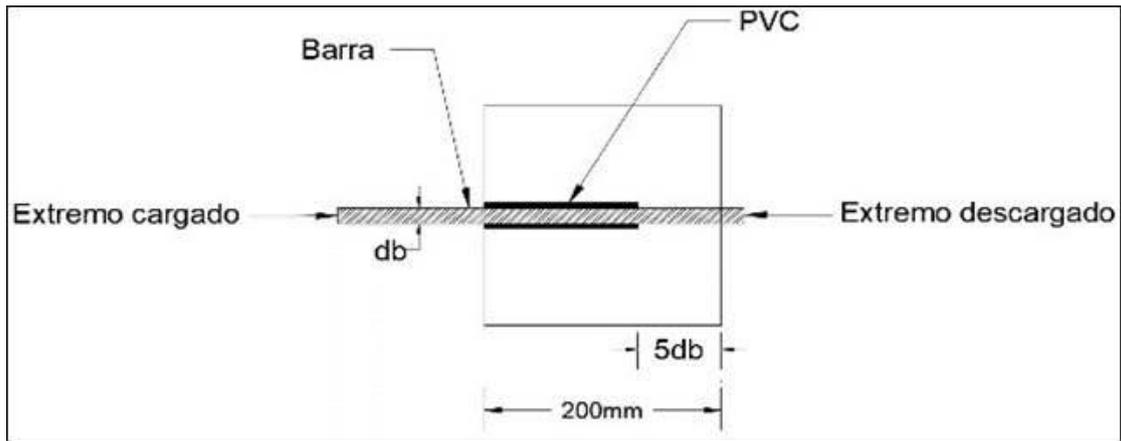


Ilustración 28. Esquema de disposición de barras

Las probetas tienen, por tanto, forma cúbica de 200x200 mm y con una textura rugosa fruto del proceso de impresión.

- Comienza la impresión de la pieza.



Ilustración 29. Comienzo de impresión de una probeta

- Alcanzada la altura de 100 mm se desplaza la manguera sin detener el hormigonado, de esa forma se evita la obstrucción debido a un fraguado dentro de la misma.



Ilustración 30. Fase 1 de hormigonado de probetas

- El técnico de taller se encarga de colocar la armadura manualmente con la ayuda de una pieza que mantenga la armadura en posición horizontal y evite desplazamientos indeseados.



Ilustración 31. Colocación de la armadura en la probeta



Ilustración 32. Disposición de la armadura.

- Continúa el hormigonado hasta los 200 mm de altura y se da por finalizada la probeta.



Ilustración 33. Fase 2 de hormigonado de probetas



Ilustración 34. Probeta terminada

VI.3 Ensayos de adherencia

Los ensayos de extracción son habituales en el construcción para determinar con exactitud la capacidad de adherencia del hormigón suministrado. En el caso que se aborda se han realizado diferentes muestras que varían en la disposición de las capas y el diámetro de la barra injertada.

Se han ensayado un total de 15 probetas y se han clasificado en función del diámetro de la barra y de la disposición de las capas. Las barras utilizadas son de 16 mm, 12 mm y 10 mm, mientras que las capas están en disposición paralela a dicha barra, perpendicular o con capas alternas.

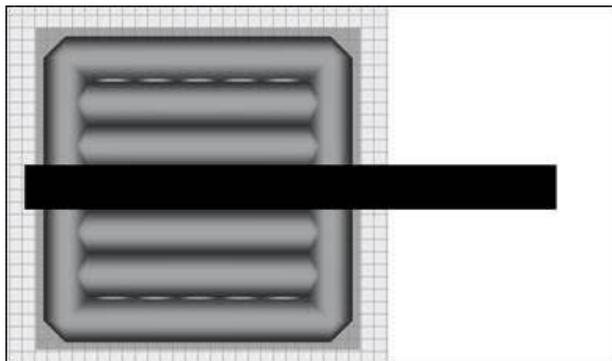


Ilustración 35. Barra situada en sentido paralelo a los hilos de impresión

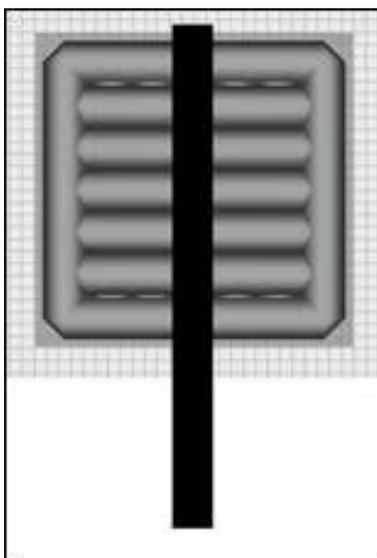


Ilustración 36. Barra situada en sentido perpendicular a los hilos de impresión

En la siguiente imagen se pueden observar las probetas antes de ser ensayadas en el laboratorio.



Ilustración 37. Probetas antes de ensayo de adherencia

Con esto, quedarían numeradas y clasificadas de la siguiente forma:

Número de probeta	Diámetro de la barra (mm)	Disposición de las capas respecto de la barra
1	16	Paralela (0°)
2	16	Paralela (0°)
3	16	Paralela (0°)
4	12	Paralela (0°)
5	12	Paralela (0°)
6	12	Paralela (0°)
7	12	Alternativa (0 - 90°)
8	12	Alternativa (0 - 90°)
9	12	Alternativa (0 - 90°)
10	12	Perpendicular (90°)
11	12	Perpendicular (90°)
12	12	Perpendicular (90°)
13	10	Paralela (0°)
14	10	Paralela (0°)
15	10	Paralela (0°)

Tabla 2. Clasificación de probetas

En las siguientes fotografías se muestran cómo han sido marcadas para la correcta identificación y tabulación de los resultados.



Ilustración 38. Probeta N.º 1 de capas paralelas

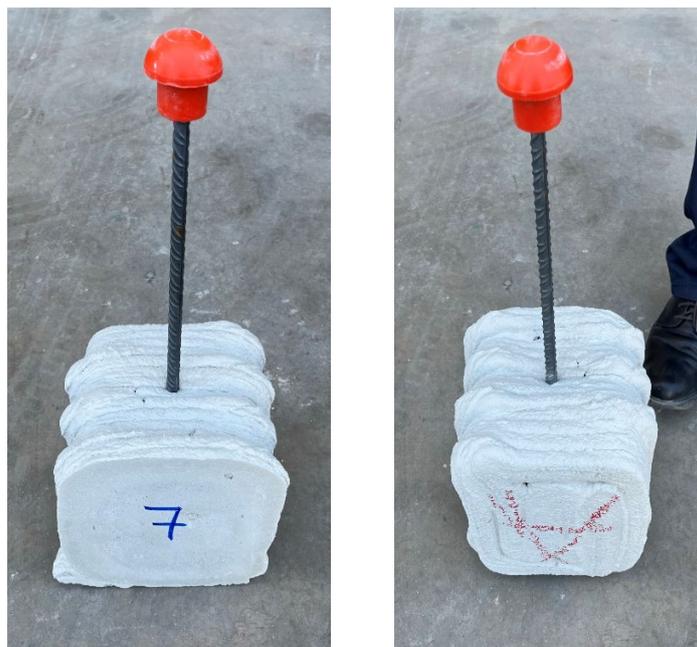


Ilustración 39. Probeta N.º 7 de capas perpendiculares



Ilustración 40. Probeta N.º 10 de capas alternas

En el Anexo III se pueden consultar el reportaje fotográfico de todas las probetas ensayadas.

Para la realización del ensayo se han seguido principalmente la metodología descrita en el Anejo D de la norma UNE-EN 10080:2006: Ensayo de adherencia para las armaduras de hormigón armado. Ensayo de arrancamiento. Este método es aplicable a las armaduras de acero para hormigón con diámetro igual o inferior a 32 mm.

Cabe destacar que para poder realizar los ensayos se tuvo que realizar empalmes por soldadura de las barras dispuestas en las probetas, pues la longitud libre resultando era insuficiente. Estos empalmes fueron realizados por el equipo de INTEMAC en su laboratorio.

El principio de ensayo consiste en aplicar una carga de tracción a una barra o alambre embebido en un cubo de hormigón hasta una longitud determinada, permaneciendo el otro extremo de la barra sin ningún tipo de tensión. La fuerza de tracción se va incrementando hasta que se produce el fallo de la adherencia o hasta que rompe la barra de acero.

La tracción se ha aplicado sobre el extremo libre de la armadura (zona no embebida) con un mecanismo de regulación de carga que permite un incremento continuo con una velocidad de 0,14 kN/s.

El sistema de aplicación de carga debe asegurar que la tracción se aplique perpendicularmente a la superficie externa del hormigón. En el caso de las probetas en las que la barra había quedado embebida con alguna inclinación, la superficie de hormigón fue suplementada con elementos de neopreno para que la tracción de la barra fuera completamente perpendicular a la superficie exterior del hormigón.



Ilustración 41. Prensa de tracción del Laboratorio de INTEMAC

Para los ensayos se empleó una prensa de tracción de 100 kN de capacidad y precisión de Clase 1. Conformada principalmente por una base, en la que se sitúa la probeta con la barra en posición vertical descendente, y una mordaza que es la encargada de aplicar la tracción a la barra.



Ilustración 42. Ensayo de anclaje de la Probeta 2



Ilustración 43. Colapso en ensayo de la Probeta 2

En todos los casos se registró la carga máxima alcanzada durante el ensayo y se tomó documentación fotográfica de la forma de rotura ocasionada por el arrancamiento de la barra. Estos resultados pueden ser consultados en el Informe de INTEMAC, con la metodología y resultados del ensayo y las acreditaciones de las que dispone como Laboratorio, ubicado en el Anexo IV y las fotografías en el Anexo V.

VI.4 Análisis de resultados

Una vez realizados los ensayos, los resultados obtenidos son:

Probeta	Diámetro de la barra embebida (mm)	Disposición de las capas respecto de la barra	Carga máxima alcanzada (kN)	Tipo de rotura	Tensión media de adherencia (N/mm ²)
1	16	Paralela (0°)	17,3	B	4,3
2	16	Paralela (0°)	27,3	B	6,8
3	16	Paralela (0°)	25,8	C	6,4
4	12	Paralela (0°)	18,6	B	8,2
5	12	Paralela (0°)	16,8	C	7,4
6	12	Paralela (0°)	13,8	C	6,1
7	12	Alterna (0 - 90°)	12,4	C	5,5
8	12	Alterna (0 - 90°)	14,6	C	6,5
9	12	Alterna (0 - 90°)	12	C	5,3
10	12	Perpendicular (90°)	20,2	C	8,9
11	12	Perpendicular (90°)	18,5	C	8,2
12	12	Perpendicular (90°)	22,7	C	10,0
13	10	Paralela (0°)	12	A	7,6
14	10	Paralela (0°)	9,2	C	5,9
15	10	Paralela (0°)	10,1	A	6,4

Tabla 3. Resultado de los ensayos

A: Despegue íntegro de la barra sin rotura del bloque de hormigón

B: Despegue parcial de la barra por rotura de la parte superior del bloque

C: Despegue íntegro de la barra con rotura del bloque de hormigón

De un primer análisis se puede extraer que, a mayor diámetro de la barra se alcanza una tensión máxima mayor.

En la siguiente gráfica, extraída de los resultados de la Tabla 3, en la que se analizan los resultados de las probetas con diámetro de barra de 12 mm, se puede determinar que hay una correlación entre la disposición de las capas respecto de la dirección de la barra y el aumento de la tensión media de adherencia.

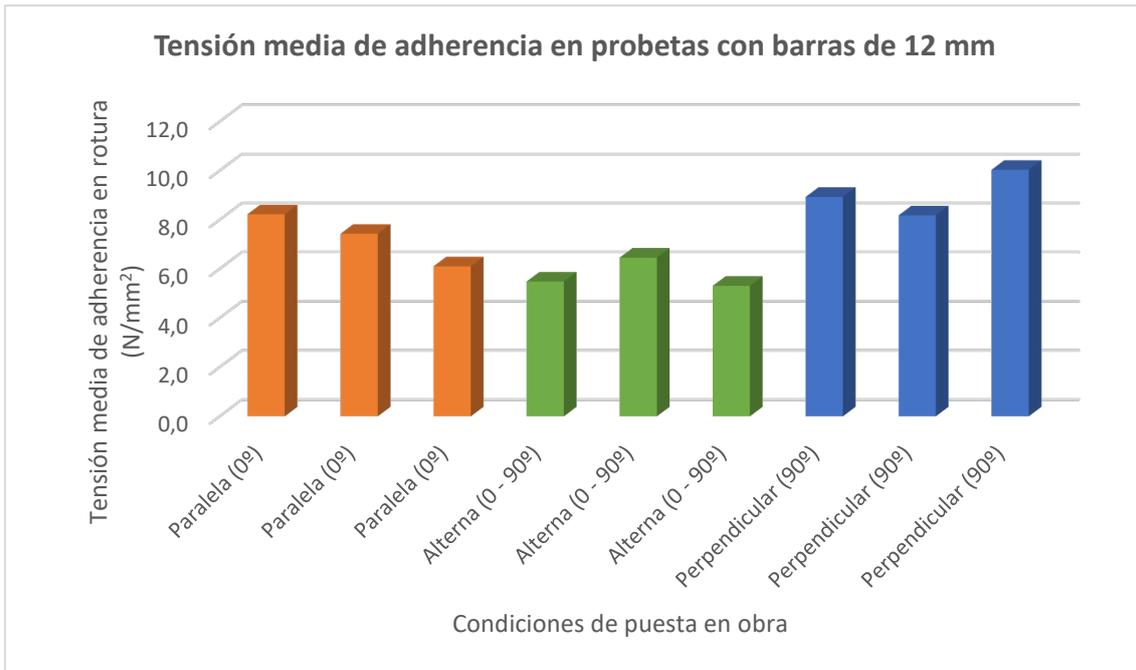


Ilustración 44. Resultados de las probetas con barras de 12 mm.

Es notable el aumento de las tensiones medias de adherencia en el caso de la disposición de capas perpendiculares a la dirección del eje de la barra y, por el contrario, en el caso de la disposición de capas paralelas y alternas se consiguen unas tensiones medias inferiores, más marcado en el segundo de los casos.

CAPÍTULO VII PROPUESTA METODOLÓGICA

CAPÍTULO VII. PROPUESTA METODOLÓGICA

La propuesta para la determinación de la longitud de anclaje de las armaduras en elementos impresos en 3D se realiza mediante el ajuste de las formulaciones correspondientes al Artículo 49.5.1.2 del Código Estructural y al apartado 8.4 del Eurocódigo 2. Se propone para ambas formulaciones una corrección en uno de sus coeficientes para determinar la longitud de anclaje necesaria para el caso de hormigones impresos en 3D.

VII.1 Formulación adaptada a la del código estructural

Siguiendo con el planteamiento expuesto en el Capítulo III, la longitud básica de anclaje se determina mediante la formulación:

$$l_{bl} = Y_1 \cdot \emptyset^2$$

Donde,

Y_1 es el coeficiente corrector.

Pero en el ensayo se ha empleado una longitud de $5\emptyset$, con la que se ha conseguido una capacidad en la barra equivalente a una tensión.

$$\sigma_{sd} = \frac{F}{\frac{\pi \emptyset^2}{4}}$$

De acuerdo con la norma, para anclar una fuerza no igual a la de la barra, sino a una fracción de ella, la longitud neta de anclaje l_{bnet} se corrige por un coeficiente.

$$\beta = \frac{\sigma_{sd}}{\frac{f_{yk}}{Y_s}}$$

Así, el coeficiente Y_1 se obtiene imponiendo que sean iguales la longitud neta de anclaje de fórmula ($l_{bnet} = \beta \cdot l_{bl}$) con la longitud dispuesta de $5\emptyset$.

$$l_{bnet} = \beta \cdot l_{bl} = \beta \cdot Y_1 \cdot \emptyset^2 = 5\emptyset$$

De esta forma se puede determinar el valor del coeficiente γ_1 .

Probeta	\emptyset	γ_1
1	16	1,58
2	16	1,00
3	16	1,06
4	12	1,10
5	12	1,22
6	12	1,48
7	12	1,65
8	12	1,40
9	12	1,71
10	12	1,01
11	12	1,11
12	12	0,90
13	10	1,42
14	10	1,86
15	10	1,69

Tabla 4. Resultados del coeficiente γ_1

De cara a determinar el coeficiente de corrección se escoge el valor que englobe a todos los demás:

$$\gamma_1 = 1,86$$

VII.2 Formulación adaptada a la del Eurocódigo 2

Según la ficha de producto del mortero utilizado, la resistencia a compresión (f_{ck}) a 28 días alcanza los 40 N/mm² y la resistencia a tracción (f_{ctk}) llega a los 4 N/mm².

Así,

$$f_{ctd} = \frac{f_{ctk}}{1,5} = \frac{4,0}{1,5} = 2,7 \text{ MPa.}$$

La tensión última de adherencia debe ser suficiente para prevenir los fallos, para el caso de utilización de barras corrugadas debe adoptarse la siguiente expresión:

$$\tau_{b,u} = f_{bd} = 2,25 \cdot \gamma_2 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd}$$

Donde,

γ_2 es el coeficiente corrector.

$$\eta_2 = 1,0 \text{ para } \emptyset \leq 32 \text{ mm}$$

$$\eta_2 = (132 - \emptyset) \text{ para } \emptyset > 32 \text{ mm}$$

Con esto, se obtiene:

$$\tau_{b,u} = f_{bd} = 2,25 \cdot \gamma_2 \cdot 1,0 \cdot 2,7$$

El siguiente paso es el cálculo de la longitud de anclaje requerida $l_{b,rqd}$, la cual depende de la tensión de cálculo de la barra σ_{sd} en la posición a partir de la cual se mide el anclaje y la tensión de adherencia constante f_{bd} .

$$l_{b,rqd} = \left(\frac{\emptyset}{4}\right) \left(\frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}\right) = \left(\frac{\emptyset}{4}\right) \left(\frac{\sigma_{sd}}{2,25 \cdot \gamma_2 \cdot 1,0 \cdot 2,67}\right)$$

Ahora, se determina la longitud neta de anclaje, que resulta:

$$l_{bd} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot l_{b,rqd}$$

Esta longitud neta de anclaje tiene que ser igual al anclaje dispuesto en la probeta que, como se ha mencionado en apartados anteriores, es de $5\emptyset$.

$$l_{bd} = \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot \left(\frac{\emptyset}{4}\right) \left(\frac{\sigma_{sd}}{2,25 \cdot \gamma_2 \cdot 1,0 \cdot 2,67}\right) = 5\emptyset$$

Donde, los valores de $\alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5$ quedan determinados en la Tabla 8.2 del Eurocódigo 2 o en la Tabla 1 de este Informe.

Los resultados arrojados para γ_2 son:

Probeta	\emptyset	γ_2
1	16	0,50
2	16	0,79
3	16	0,75
4	12	0,96
5	12	0,87
6	12	0,71
7	12	0,64
8	12	0,75
9	12	0,62

10	12	1,04
11	12	0,95
12	12	1,17
13	10	0,89
14	10	0,68
15	10	0,75

Tabla 5. Resultados del coeficiente γ_2

Al igual que en el apartado anterior, se determina que el coeficiente de corrección para sea:

$$\gamma_2 = 1,17$$

VII.3 Análisis de resultados y propuesta de formulación

Examinando los resultados, se puede apreciar que no existe una gran dispersión entre ellos.



Ilustración 45. Dispersión de resultados de γ_1



Ilustración 46. Dispersión de resultados de γ_2

El ensayo es sensible a la regularidad de las caras de la probeta. Aunque se han puesto neoprenos, parte de esta dispersión en los resultados puede deberse a eso.

Dado que el número de probetas y la diferencia de características entre ellas no permite un análisis estadístico riguroso, a falta de una campaña de ensayos más extensiva, se establece un coeficiente de seguridad adicional que garantice la seguridad:

$$\varepsilon = 1,5$$

VII.3.1 Propuesta de formulación para el Código Estructural

La longitud básica de anclaje se determina mediante la formulación:

$$l_{bl} = \gamma_1 \cdot \varnothing^2 = 1,86 \cdot \varnothing^2$$

Como se determinó, tensión es:

$$\sigma_{sd} = \frac{F}{\frac{\pi \varnothing^2}{4}}$$

Y el coeficiente β :

$$\beta = \frac{\sigma_{sd}}{\frac{f_{yk}}{\gamma_s}}$$

Así, con ambos parámetros introducidos, la longitud neta de anclaje resultará

$$l_{bnet} = \varepsilon \cdot \beta \cdot l_{bl} = \varepsilon \cdot \beta \cdot \gamma_1 \cdot \varnothing^2$$

VII.3.2 Propuesta de formulación para el Eurocódigo 2

La tensión última de adherencia se determina mediante la siguiente fórmula:

$$\tau_{b,u} = f_{bd} = 2,25 \cdot \gamma_2 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctd}$$

Así, se determina la longitud de anclaje requerida:

$$l_{b,rqd} = \left(\frac{\varnothing}{4}\right) \left(\frac{\sigma_{sd}}{f_{bd}}\right)$$

Y la longitud neta de anclaje resulta:

$$l_{bd} = \varepsilon \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \alpha_4 \cdot \alpha_5 \cdot l_{b,rqd}$$

CAPÍTULO VIII CONCLUSIONES

CAPÍTULO VIII. CONCLUSIONES

A partir del exhaustivo análisis del Estado del Arte en lo que respecta a la adherencia y el anclaje de armaduras en elementos de hormigón, realizado como parte integral de la presente investigación, y habiendo presentado la metodología empleada junto con los resultados correspondientes en secciones previas, se derivan las siguientes conclusiones:

- La carencia de armadura en elementos de hormigón, especialmente en aquellos contruidos mediante tecnología de impresión 3D, se traduce en una significativa deficiencia en su capacidad para resistir esfuerzos de tracción y en la presencia de considerables desafíos en términos de su conexión con otros elementos estructurales, atribuibles a su falta de armadura.
- La incorporación de armaduras en piezas impresas en 3D presenta una notable complejidad debido a las características inherentes al proceso de fabricación. En el contexto de este estudio, desarrollado en colaboración con ACCIONA, se ha propuesto la inserción manual de estas armaduras entre las distintas capas de las piezas. Las incertidumbres resultantes de este procedimiento en cuanto a las condiciones de adherencia y anclaje de las barras de refuerzo han requerido un análisis exhaustivo de las formulaciones convencionales utilizadas para determinar dichas condiciones, tal como se establecen en el Código Estructural y el Eurocódigo 2.

Para ello se ha contado con la inestimable colaboración de ACCIONA, que en sus instalaciones ha confeccionado probetas de hormigón impreso en las que se han incluido barras con la técnica propuesta, para su posterior ensayo en el Laboratorio de INTEMAC, acreditado para la realización de este tipo de ensayos.

- Los resultados obtenidos de carga máxima alcanzada en los ensayos de pull-out son esperanzadores para esta metodología de construcción y revelan que podrían ser usados para elementos no estructurales que estén sometidos a cargas, como podrían ser barandillas o fachadas.
- Se ha comprobado que las formulaciones para las condiciones de anclaje dadas por el Código Estructural y por el Eurocódigo 2 son aptas, corrigiendo alguno de sus coeficientes tal y como se señala en el apartado VII.3.

Cabe destacar que el número de probetas ensayadas, teniendo en cuenta que representan diferentes situaciones en cuanto a diámetro de barras, condiciones de colocación de la

armadura en relación con la dirección de impresión del hormigón, exigen el empleo con prudencia de la formulación, ampliando prudentemente las longitudes deducidas de las fórmulas. En el apartado VII.3 se incluye una propuesta correctora.

CAPÍTULO IX FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

CAPÍTULO IX. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Se plantean diferentes vías de investigación:

- Para sancionar la formulación propuesta sin la utilización de un coeficiente corrector de las longitudes derivadas de la misma, sería necesario ampliar el número de probetas de manera significativa, garantizando así una base estadística robusta. El costo asociado a esta ampliación se justifica plenamente, ya que los resultados obtenidos en el presente trabajo demuestran que el procedimiento es apropiado y las formulaciones son coherentes y confiables.
- Es esencial llevar a cabo mejoras significativas en el proceso de impresión y disposición de armaduras con el fin de asegurar la confiabilidad de los resultados obtenidos de la prensa. Esto se debe a que las probetas exhiben irregularidades en sus superficies que resultan difíciles de rectificar y que podrían influir en el aumento de tensiones localizadas en el mortero.
- Otro aspecto a tener en cuenta es que, algunas de las probetas presentaban barras que habían quedado con alguna inclinación y hubo que suplementar las probetas con neopreno para realizar los ensayos. Además, la longitud libre de las barras resultó ser insuficiente para realizar los ensayos directamente, por lo que fue necesario realizar empalmes mediante soldadura, lo que potencialmente pudo afectar los resultados.
- Ensayos de piezas estructurales armadas con esta técnica (vigas, soportes, placas...) para verificar su comportamiento en cuanto a fisuración, capacidad en estado límite último, etc. en relación con piezas de hormigón armado convencionales.
- Estudio de inclusión de vainas entre capas para el posterior pretensado de piezas.
- Análisis frente a cargas cíclicas para elementos que pudieran estar sometidos a este tipo de acciones.

REFERENCIAS

REFERENCIAS

- Álvarez, S. M., Bautista, A., & Velasco, F. (2011). Corrosion behaviour of corrugated lean duplex stainless steels in simulated concrete pore solutions. *Corrosion Science*, 53(5), 1748–1755. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.01.050>
- Banfill, P. F. G. (1991). *Rheology of Fresh Cement and Concrete: Proceedings of an International Conference, Liverpool, 1990*. CRC Press.
<https://doi.org/10.1201/9781482288889>
- Baz, B., Aouad, G., Leblond, P., Al-Mansouri, O., D'hondt, M., & Remond, S. (2020). Mechanical assessment of concrete – Steel bonding in 3D printed elements. *Construction and Building Materials*, 256, 119457.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119457>
- Buswell, R. A., Leal de Silva, W. R., Jones, S. Z., & Dirrenberger, J. (2018). 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research*, 112, 37–49.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.006>
- Cairns, J., & Jones, K. (1995). Influence of rib geometry on strength of lapped joints: An experimental and analytical study. *Magazine of Concrete Research*, 49(180), 259–262. <https://doi.org/10.1680/mac.1997.49.180.259>
- Cairns, J., & Zhao, Z. (1994). Behaviour of concrete beams with exposed reinforcement. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, 104(3), 351–355. <https://doi.org/10.1680/istbu.1994.26785>
- Calavera Ruíz, J. (2005). *Patología de estructuras de hormigón armado y pretensado* (2a.ed.). INTEMAC.
- Cao, C., Cheung, M. M. S., & Chan, B. Y. B. (2013). Modelling of interaction between corrosion-induced concrete cover crack and steel corrosion rate. *Corrosion Science*, 69, 97–109. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2012.11.028>
- Cesaretti, G., Dini, E., De Kestelier, X., Colla, V., & Pambaguian, L. (2014). Building components for an outpost on the Lunar soil by means of a novel 3D printing technology. *Acta Astronautica*, 93, 430–450.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2013.07.034>
- Comité Europeo de Normalización. (2011). Eurocódigo 2: Proyecto de estructuras de hormigón. Parte 1: Reglas generales y reglas para la edificación. *Aenor*, 141, 242.
- Euro-international du béton, C., & University, R. T. (1992). *Bond in Concrete: Proceedings of the International Conference on Bond in Concrete : from Research to Practice : Proceedings Topics 1-12, Riga, Latvia, October 15-17 1992*. RTU.
<https://books.google.es/books?id=14QnMwEACAAJ>

- Feng, P., Meng, X., Chen, J.-F., & Ye, L. (2015). Mechanical properties of structures 3D printed with cementitious powders. *Construction and Building Materials*, 93, 486–497. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.132>
- fib Bulletin. (2000). *Bond of Reinforcement in Concrete*.
- Gambarova, P. G., & Rosati, G. P. (1997). Bond and splitting in bar pull-out: Behavioural laws and concrete cover role. *Magazine of Concrete Research*, 48(6), 99–110. <https://doi.org/10.1680/mac.1997.49.179.99>
- Goto, Y. (1971). *CRACKS FORMED IN CONCRETE AROUND DEFORMED TENSION BARS*.
- Hachem, Y., Ezzedine El Dandachy, M., & Khatib, J. M. (2023). Physical, Mechanical and Transfer Properties at the Steel-Concrete Interface: A Review. *Buildings*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/buildings13040886>
- Jha, K. (2012). *FORMWORK FOR CONCRETE STRUCTURES*.
- Khorramshahi, M. R., & Mokhtari, A. (2017). Automatic construction by contour crafting technology. *Emerging Science Journal*, 1(1), 28–33. <https://doi.org/10.28991/esj-2017-01113>
- Khoshnevis, B. (2004). Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies. *Automation in Construction*, 13(1), 5–19. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2003.08.012>
- Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Gibb, A. G. F., & Thorpe, T. (2012). Mix design and fresh properties for high-performance printing concrete. *Materials and Structures*, 45(8), 1221–1232. <https://doi.org/10.1617/s11527-012-9828-z>
- Le, T. T., Austin, S. A., Lim, S., Buswell, R. A., Law, R., Gibb, A. G. F., & Thorpe, T. (2012). Hardened properties of high-performance printing concrete. *Cement and Concrete Research*, 42(3), 558–566. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.12.003>
- Lim, S., Buswell, R. A., Le, T. T., Austin, S. A., Gibb, A. G. F., & Thorpe, T. (2012). Developments in construction-scale additive manufacturing processes. *Automation in Construction*, 21, 262–268. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2011.06.010>
- Lim, S., Buswell, R. A., Le, T., Wackrow, R., Austin, S., Gibb, A., & Thorpe, A. (2011). Development of a viable concrete printing process. *Proceedings of the 28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction, ISARC 2011*. <https://doi.org/10.22260/ISARC2011/0124>
- Lutz, L. A., & Gergely, P. (1967). Mechanics of Bond and Slip of Deformed Bars in Concrete. *ACI Journal Proceedings*, 64(11). <https://doi.org/10.14359/7600>

- Marchment, T., & Sanjayan, J. (2020). Bond properties of reinforcing bar penetrations in 3D concrete printing. *Automation in Construction*, *120*, 103394. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103394>
- Documento Básico SE. Seguridad estructural., Código Técnico de la Edificación 1 (2019).
- Molina, M., Gutiérrez, J. P., & García, M. D. (2004). Influencia del diámetro de la barra y del recubrimiento en las características adherentes del hormigón armado. *Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, *43*(2), 560–564. <https://doi.org/10.3989/cyv.2004.v43.i2.595>
- Nerella, V. N., & Mechtcherine, V. (2019). *Chapter 16 - Studying the Printability of Fresh Concrete for Formwork-Free Concrete Onsite 3D Printing Technology (CONPrint3D)* (J. G. Sanjayan, A. Nazari, & B. B. T.-3D C. P. T. Nematollahi (eds.); pp. 333–347). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815481-6.00016-6>
- Ouglova, A., Berthaud, Y., Foct, F., François, M., Ragueneau, F., & Petre-Lazar, I. (2008). The influence of corrosion on bond properties between concrete and reinforcement in concrete structures. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, *41*(5), 969–980. <https://doi.org/10.1617/s11527-007-9298-x>
- Park, R., & Paulay, T. (2009). Bond and Anchorage. In *Reinforced Concrete Structures* (pp. 392–425). <https://doi.org/10.1002/9780470172834.ch9>
- Paul, S. C., Tay, Y. W. D., Panda, B., & Tan, M. J. (2018). Fresh and hardened properties of 3D printable cementitious materials for building and construction. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, *18*(1), 311–319. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.acme.2017.02.008>
- Perkins, I., & Skitmore, M. (2015). Three-dimensional printing in the construction industry: A review. *International Journal of Construction Management*, *15*, 1–9. <https://doi.org/10.1080/15623599.2015.1012136>
- Rehm, G., & Eligehausen, R. (1978). Bond of Ribbed Bars Under High Cycle Repeated Loads. *J Am Concr Inst*, *76*(2). <https://doi.org/10.14359/6948>
- Rodríguez, R. (2022). *Fallos debidos a los materiales: El hormigón* (pp. 8–13). Patología y Rehabilitación de Estructuras. Universidad Europea de Madrid.
- Roussel, N. (2006). A thixotropy model for fresh fluid concretes: Theory, validation and applications. *Cement and Concrete Research*, *36*(10), 1797–1806. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.05.025>
- Sulaiman, M. F., Ma, C. K., Apandi, N. M., Chin, S., Awang, A. Z., Mansur, S. A., & Omar, W. (2017). A Review on Bond and Anchorage of Confined High-strength Concrete. *Structures*, *11*, 97–109. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2017.04.004>

- Tepfers, R. (1973). A Theory of Bond Applied to Overlapped Tensile Reinforcement Splices for Deformed Bars. *PhD Thesis, Chalmers University of Technology*, 1–330.
- Tepfers, R. (1979). *Cracking of concrete cover along anchored deformed reinforcing bars*. 6. <https://doi.org/10.1680/mac.1979.31.106.3>
- Tibaut, A., Rebolj, D., & Nekrep Perc, M. (2016). Interoperability requirements for automated manufacturing systems in construction. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 27(1), 251–262. <https://doi.org/10.1007/s10845-013-0862-7>
- Wight, J. K., & MacGregor, J. G. (2012). *Reinforcement Concrete. Mechanics & Design*. Pearson Education.
- Zhang, F., Pan, J., & Lin, C. (2009). Localized corrosion behaviour of reinforcement steel in simulated concrete pore solution. *Corrosion Science*, 51(9), 2130–2138. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.05.044>

ANEXO I DOCUMENTACIÓN RELATIVA AL MORTERO

ANEXO I DOCUMENTACIÓN RELATIVA AL MORTERO

En este anexo se recogen los siguientes documentos relativos a las características del mortero empleado:

- Documentación del producto, emitido por el fabricante Cybe.
- Informe de caracterización de la docilidad y las resistencias tempranas, realizado por Acciona.

CyBe MORTAR

3DPRINTABLE MORTAR :

For architectural, structural, industrial, and design 3Dconcrete printing applications



Professional 3Dconcrete printing
CyBe MORTAR Datasheet



Highlights:

- **3DPRINTABLE**

Specially developed for 3Dconcrete printing applications.

- **DURABLE**

Formulated for long life even in critical applications.

- **STRUCTURAL**

For structural and non structural construction components and objects.

- **SINGLEPURPOSE**

Usage only for 3Dconcrete printing with 3Dconcrete printers analysed and approved by CyBe Construction.

EXCLUSIVE SUPPLIER:

CyBe Construction B.V.
Kanaalstraat 12b
5347 KM Oss
the Netherlands
Tel: +31 (0)412 669 444
Web: www.CyBe.eu
E-mail: info@CyBe.eu

PRODUCT NAME:

CyBe MORTAR
3Dprintable MORTAR

DESCRIPTION:

CyBe MORTAR is a high-performance, singlepurpose material. Durable in all environments, CyBe MORTAR is non-metallic with a very low chloride and sulphate content. Use CyBe MORTAR with a 3Dconcrete printer to produce high durability objects where low shrinkage is desired. CyBe MORTAR sets in 3 minutes and achieves structural strength in 1 hour.

3DCONCRETE PRINTING:

CyBe MORTAR enables to 3Dprint at speeds of max. 600 mm/s and layer heights up to 50 mm. Moreover, the timewindow to print on top of a 3Dprinted layer only takes 10 seconds.

APPLICATIONS:

Use CyBe MORTAR with 3Dconcrete printing for architectural, structural, industrial and design purposes.

ENVIRONMENTAL ADVANTAGES:

Use CyBe MORTAR to reduce your carbon footprint and lower your environmental impact. Production of CyBe MORTAR emits up to 60% less CO₂ than portland cement.



Technical specifications

Color	concrete grey		
Grain size	0 – 3 mm		DIN/BS EN 933-1
Consumption	approx. 1,5 kg per 1,7 s. – 5 s. <i>corresponds to a layer of 1m length, 40mm width and 20mm height and depends on printing speed ranging 200 – 600 mm/s</i>		
Layer thickness	variable; standard 20x40mm (h x w) <i>depending on the selected nozzle, preliminary testing required</i>		
Setting time	initial set	approx. 3 min	DIN/BS EN 196-3
	final set	approx. 5 min	
Load bearing	after 60 min		
Compressive strength (f_{ck})	after 5h	approx. 20 N/mm ²	DIN/BS EN 12390-13 DIN/BS EN 1015-11 DIN/BS EN 12504-1
	after 1d	approx. 25 N/mm ²	
	after 7d	approx. 30 N/mm ²	
	after 28d	approx. 40 N/mm ²	
Tensile/Bond strength (f_{ctm}) Parallel to layer : // Perpendicular to layer : ⊥	after 1d	$f_{ctk, //} = \text{approx. } 2,4 \text{ N/mm}^2$ $f_{ctk, \perp} = \text{approx. } 2,4 \text{ N/mm}^2$	DIN/NEN EN 1542 CUR Aanbeveling 20
	after 28d	$f_{ctk, //} = \text{approx. } 4 \text{ N/mm}^2$ $f_{ctk, \perp} = \text{approx. } 4 \text{ N/mm}^2$	
Flexural strength ($f_{ctm, fl}$) *: Identical in different orientations perpendicular and parallel to layer	after 5h	approx. 4 N/mm ²	DIN/BS EN 1015-11 DIN/BS EN 13892-2
	after 1d	approx. 4 N/mm ²	
	after 7d	approx. 5 N/mm ²	
	after 28d	approx. 6 N/mm ²	
Density (ρ)	hardened	approx. 2100 - 2200 kg/m ³	DIN EN 12390-13, DIN EN 12390-7 DIN EN 12504-1
Flow	approx. 160mm		ASTM C1437-01
Air void content	approx. 5,3 Vol.-%		DIN/BS EN 1015-7; Method A
Static stabilized secant E-modulus (E_{cm})	approx. 26.000 – 28.000 N/mm ²		DIN EN 12390-13; Method B DIN EN 13412
Thermal resistance *: At mean temperature 35 °C	0,054 (m ² ·K)/W		ASTM C177:10
Thermal conductivity (λ) *: At various temperatures, based on corresponding standard	0,781 ⁽¹⁾ – 0,979 ⁽²⁾ W/(m.K) ⁽¹⁾ : Performed on 3Dprinted specimen ⁽²⁾ : Performed on densified lab specimen		DIN 52612 ASTM C177:10
Specific heat capacity (c)	1,10 J/(g·K) ±0,06		Determined with Macro-DSC
Thermal expansion coefficient (α_m)	15,0 · 10 ⁻⁶ /K		DIN EN 1770
Depth of water penetration	23 mm		DIN EN 12390-8
pH value	12		
Sulfate resistance According to W. Wittekindt	Requirement fulfilled; High chemical resistance	<input checked="" type="checkbox"/>	According to W. Wittekindt From : ZKG, Zement, Kalk, Gips - 1960
Fire classification	Class A1: non-combustible		DIN EN 13501-1; acc.to EN ISO 1182 and EN ISO 1716

* With every 3Dprint variables can be attuned to the most optimal 3Dprint strategy to 3Dprint the product.
Therefore **no rights can be derived** from the information provided in the specifications.

* Data may be changed without notice.



Implementation

STRENGTH DEVELOPMENT:

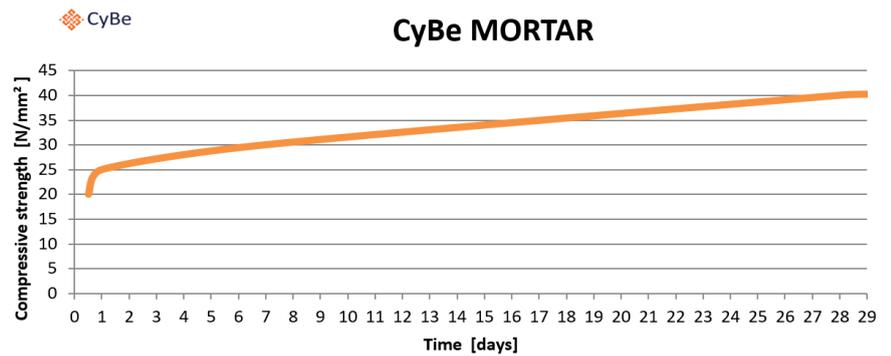
If applied under recommendations and properly executed with curing under the advised circumstances, the graph shown to the right is a representation of the strength development of CyBe MORTAR. Indicative load bearing capacity could be achieved after already 1 hour. The structural engineer can determine based on specific situations what the lead-time for individual 3DCP objects is.

The graph is indicative and depends on the circumstances and specifically designed and applied CyBe MORTAR.

MINIMUM PRINTING REQUIREMENTS:

To enable 3Dconcrete printing a set of minimum requirements on the construction site is needed. The following specific requirements are needed but depend on specific circumstances and therefore are not limited to :

- Supply of clean tap water, similar to water quality in the Netherlands
- Short and long term specified storage facilities for 3DCP equipment and mortar pallets.



* Indicative; curve-type remains, specific values are influenced due to external factors and specifically required material design

- Water supply min. 300 L/h, temperature min. 13 °C – max. 20 °C (55 °F – 68 °F)
- Water supply min. 50 L/h, for curing immediately after 3Dconcrete printing
- Controlled workspace temperature min. 5 °C – max. 30 °C
- Waste containers for mortar packaging, plastic and hardened concrete
- **Additional requirements will be specified depending on specific project and construction-site requirements**

Application, storage and liability

3DPRINTING:

The use of a CyBe 3Dprinter is recommended. Organize work so that all personnel and equipment are in place before 3Dprinting. Use clean potable water. The needed quantity of water depends on the 3Dprint strategy.

PLACEMENT:

CyBe MORTAR shall only be applied using a 3Dconcrete printer. Organize work so that all personnel and equipment are ready before 3Dconcrete printing. 3Dprint, consolidate and screed quickly to allow for maximum finishing time. Use a method of consolidation that eliminates air voids. Do not wait for bleed water; apply final finish as soon as possible. CyBe MORTAR may be troweled, floated or broom finished. Do not install on frozen surfaces. CyBe MORTAR may be applied in temperatures ranging from 5°C to 30°C.

CURING:

Water cures CyBe MORTAR installations by keeping exposed surfaces wet for a minimum of 1 hour. Begin curing as soon as the surface starts to lose its moisture. When experiencing extended setting time due to cold temperature, longer curing times may be required. The objective of water curing shall be to maintain a continuously wet surface until the product has achieved sufficient strength.

YIELD & PACKAGING:

CyBe MORTAR is available in 55-lb (25-kg) sizes. One 55-lb (25-kg) bag of CyBe MORTAR will yield approximately 14 liter.

SHELF LIFE:

6 Months when stored in cool, dry humidity stable conditions out of direct sunlight.

WARNING: DO NOT BREATHE DUST, AVOID CONTACT WITH SKIN AND EYES

Use material in well-ventilated areas only. Exposure to cement dust may irritate eyes, nose, throat, and the upper respiratory system/lungs. Seek medical treatment if you experience difficulty breathing while using this product. Eat and drink only in dust-free areas to avoid ingesting cement dust. Skin contact with dry material or wet mixtures may result in moderate irritation to thickening/cracking of skin to severe skin damage from chemical burns. If irritation or burning occurs, seek medical treatment. Protect eyes with goggles or safety glasses with side shields. Cover skin with protective clothing. Use chemical resistant gloves and waterproof boots. In case of skin contact with cement dust, immediately wash off dust with soap and water to avoid skin damage. Wash skin areas exposed to wet concrete with cold, running water as soon as possible. In case of eye contact with cement dust, flush immediately and repeatedly with clean water and consult a physician. If wet concrete splashes into eyes, rinse eyes with clean water for at least 15 minutes and contact a hospital for possible further treatment.

LIMITED WARRANTY

CyBe Construction warrants its materials to be of good quality and at its option, within 6 months from date of sale, will replace material proven defective or refund purchase price therefor, and such replacement or refund shall be the limit of CyBe's responsibility. Except for the foregoing, all warranties expressed or implied, including merchantability and fitness are excluded. CyBe shall not be liable for any consequential, incidental, or special damages arising directly from the use of the material.

USER RESPONSIBILITY

Before using CyBe MORTAR, read current technical data sheet and 3Dprinter manual. It is the user's responsibility to review instructions and warnings for any CyBe MORTAR product in current technical data sheet prior to use.

* With every 3Dprint variables can be attuned to the most optimal 3Dprint strategy to 3Dprint the product. Therefore no rights can be derived from the information provided in the specifications.

* Data may be changed without notice.



IMPRESIÓN 3D

CARACTERIZACIÓN MORTERO CyBe

junio de 2023

ÍNDICE

1. Introducción	3
2. Caracterización de la docilidad del material (Cono de Abrams)	3
3. Caracterización de las resistencias tempranas	5

	Elaborado	Revisado	Aprobado
Nombre: Fecha:	Ángel Larrañaga Muro 05/06/2023		

Control de versiones

Versión	Modificado	Fecha	Descripción del Cambio
001	Proyecto	05/06/2023	Documento inicial

1. Introducción

Para caracterizar el material de Korodur (CyBe) se realizaron dos pruebas distintas. Por un lado se utilizó el método del Cono de Abrams para determinar la docilidad del material. Por otro lado se realizaron mediciones utilizando un penetrómetro para determinar las resistencias tempranas del material.

Mediante esta tecnología se extruye el material a través de un robot, bombeado desde un sistema de mezcla, siguiendo el contorno del modelo deseado, capa a capa. El movimiento para conseguir trazar este contorno puede ser mediante un brazo robótico, un sistema de pórtico con ejes cartesianos o cilíndricos, etc.

2. Caracterización de la docilidad del material (Cono de Abrams)

Para la realización de esta prueba se utilizó la gunitadora Mtec Duo-Mix 2000 y una manguera de 10m conectada por un lado a la salida del material de la gunitadora y sin conectar en el otro extremo.

Para realizar la mezcla se fijó el flujo de agua a 550L/h, lo que en porcentajes de masa se traduce en aproximadamente 10% de agua y 90% de mortero seco. No se utilizó aditivo retardante para este ensayo.

La temperatura ambiente en el momento del ensayo era de 20°C y la temperatura del agua utilizada en la mezcla era de 20°C.

La prueba del Cono de Abrams se realizó según norma:

1. Se llena el 1/3 inferior del volumen del cono.
2. Se realizan 25 golpes con la varilla.
3. Se echa una segunda capa de mezcla hasta llenar 2/3 del volumen del cono.
4. Se realizan 25 golpes con la varilla.
5. Se echa una última capa de material, dejando que éste rebasa el borde superior.
6. Se realizan 25 golpes con la varilla.
7. Se utiliza la varilla para eliminar el exceso de material que rebasa el borde superior del cono.
8. Se levanta el cono metálico y se coloca junto al cono de material.
9. Con ayuda de la varilla se mide la distancia entre la parte superior del cono metálico y el cono de material.



Resultado del ensayo del Cono de Abrams

El resultado de esta prueba fue 2.5cm.



3. Caracterización de las resistencias tempranas

Para la realización de este ensayo se utilizaron probetas de 40x40x160mm como la que se muestra en la imagen inferior y un Penetrómetro.



Molde normalizado para probetas



Penetrómetro

Para la realización de esta prueba se utilizó la gunitadora Mtec Duo-Mix 2000 para mezclar el material seco con el agua y la manguera de 15m.

Para realizar la mezcla se fijó el flujo de agua a 550L/h, lo que en porcentajes de masa se traduce en aproximadamente 10% de agua y 90% de mortero seco. No se utilizó aditivo retardante para este ensayo.

La temperatura ambiente en el momento del ensayo era de 20°C y la temperatura del agua utilizada en la mezcla era de 20°C.

El ensayo consistió en llenar los huecos correspondientes a 6 probetas. Y, para cada valor de tiempo se tomaron mediciones de la temperatura de la probeta y 3 mediciones de resistencia utilizando el penetrómetro.

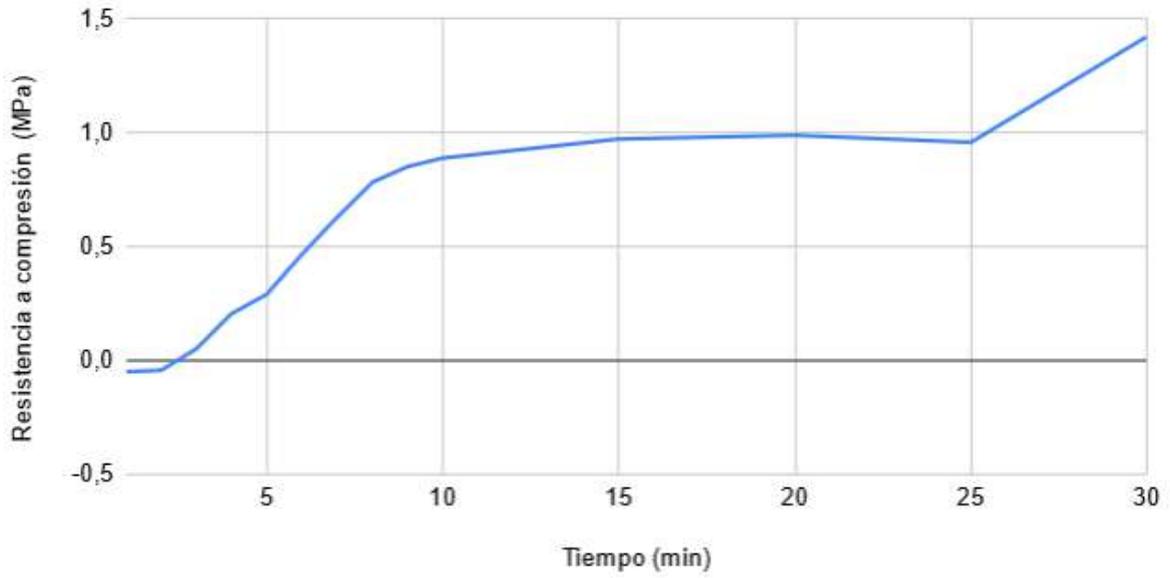


Realización del ensayo de resistencias tempranas

Los resultados de este ensayo fueron los siguientes:

Tiempo (min)	Temperatura (°C)	Resistencias tempranas (N)				Resistencia a compresión (MPa)
		Medida 1	Medida 2	Medida 3	Promedio	
1	29	9,6	10,6	13,8	11,33333333	-0,04879594423
2	29	7	17,4	20,2	14,86666667	-0,04207858048
3	29	48	71	75	64,66666667	0,0525982256
4	27,9	136	105	197	146	0,2072243346
5	26,7	220	155	197	190,6666667	0,2921419518
6	26,7	271	298	281	283,3333333	0,4683143219
7	26,4	272	405	429	368,6666667	0,6305449937
8	26,5	400	452	497	449,6666667	0,7845373891
9	26,8	514	457	486	485,6666667	0,8529784537
10	26,4	548	478	490	505,3333333	0,8903675539
15	27,6	548	546	554	549,3333333	0,974017744
20	27,1	520	556	598	558	0,9904942966
25	27,9	504	544	577	541,6666667	0,9594423321
30	27,4	615	898	845	786	1,423954373

Resistencia a compresión (MPa) frente a Tiempo



ANEXO II DOCUMENTACIÓN RELATIVA AL ADITIVO

ANEXO II DOCUMENTACIÓN RELATIVA AL ADITIVO

En este anexo se recoge la documentación del producto utilizado como aditivo retardante del fraguado.

HOJA DE DATOS DEL PRODUCTO

Sika® Retarder-50

ADITIVO RETARDADOR/ESTABILIZADOR

DESCRIPCION DEL PRODUCTO

Sika® Retarder-50 es un aditivo líquido desarrollado para el control de la hidratación del cemento. Sika® Retarder® 50 Retarda/Estabiliza el hormigón sin influir negativamente en su calidad.

USOS

Sika® Retarder-50 permite la producción de hormigón retardado/estabilizado.

Sika® Retarder-50 se usa principalmente para las siguientes aplicaciones:

- Una amplia gama de aplicaciones donde se necesita el retrado / estabilización de la masa de hormigón.

CARACTERISTICAS / VENTAJAS

Sika® Retarder-50 retarda / estabiliza la hidratación del cemento.

- Fuerte retraso / estabilización para poder hacer transportes a largas distancias.
- Alta resistencia a la segregación y un sangrado reducido.
- Trabajabilidad extendida
- Proporciona mayores resistencias finales

CERTIFICADOS / NORMAS

Cumple la norma UNE-EN 934-2, tabla 8: retardador de fraguado.

INFORMACION DEL PRODUCTO

Base Química	Hidrocarboxilato y mezcla de carbohidratos.
Presentación	Garrafas de 30 litros y contenedores de m ³ .
Apariencia / Color	Líquido marrón
Conservación	12 meses a partir de la fecha de fabricación, en sus envases de origen bien cerrados no deteriorados.
Condiciones de Almacenamiento	Almacenar en condiciones secas a temperaturas entre + 5 ° C y + 25 ° C. Proteger de la luz solar directa y las heladas.
Densidad	1.22 Kg/L
pH	8.0 ± 1.0
Contenido Total de Ión Cloruro	<0.1%
Recomendaciones Específicas	Óxido de sodio equivalente en % Na ₂ O: <10.0%

INFORMACION DE APLICACIÓN

Dosificación Recomendada	0.2 – 2.0% sobre el peso del cemento
Compatibilidad	Sika® Retarder-50 se puede combinar con muchos otros productos Sika. Importante: siempre realice pruebas antes de combinar productos en mezclas específicas y comuníquese con nuestro Departamento Técnico para obtener información y asesoramiento sobre combinaciones específicas.
Dispensando	<ul style="list-style-type: none">▪ Sika® Retarder-50 se agrega al medidor de agua o se agrega con el mezclador de concreto.▪ Se recomienda un tiempo de mezclado, que depende de las condiciones de mezclado y el rendimiento del mezclador, de al menos 60 segundos.▪ Cuando se añade en obra, el mezclado en camiones se realizara haciendo girar su tambor a maximas revoluciones durante al menos 1 minuto por m³ de hormigon con un mínimo de 5 minutos para lograr una mezcla uniforme.

INSTRUCCIONES DE APLICACION

MÉTODO DE APLICACIÓN / HERRAMIENTAS

- Deben seguirse las normas estándar de buenas prácticas de hormigonado, relativas a la producción y la colocación.
- Las pruebas de laboratorio deben llevarse a cabo antes del hormigonado en obra, especialmente cuando se usa un nuevo diseño de mezcla o se producen nuevos componentes de hormigón.
- El hormigón fresco se debe curar adecuadamente y el curado debe aplicarse lo antes posible.

NOTAS SOBRE APLICACIÓN / LIMITACIONES

- Al usar Sika® Retarder-50, se debe tener en cuenta un diseño de mezcla adecuado y se deben probar las fuentes de material locales.
- Sika® Retarder-50 no se debe agregar al cemento seco.
- Una sobredosis dará lugar a un aumento en el tiempo de fraguado. Las grandes sobredosis de retardadores/estabilizadores pueden producir tiempos de fraguado muy largos e incluso las sobredosis pequeñas pueden tener este efecto si la dosis inicial es alta.
- Se recomienda el apoyo de nuestro Departamento de Servicio Técnico.
- Helada: Si se congela y/o si se producen precipitaciones, se puede usar Sika® Retarder-50 después de descongelar lentamente a temperatura ambiente, seguido de un mezclado intensivo.

LIMPIEZA DE HERRAMIENTAS

Limpie todas las herramientas y equipos de aplicación con agua inmediatamente después del uso. El material endurecido / curado solo se puede eliminar mecánicamente.

NOTAS

Todos los datos técnicos indicados en estas Hojas de Datos de Producto están basados en ensayos de laboratorio. Las medidas reales de estos datos pueden variar debido a circunstancias más allá de nuestro control.

RESTRICCIONES LOCALES

Tenga en cuenta que como resultado de las regulaciones locales específicas, el funcionamiento del producto puede variar de un país a otro. Por favor, consulte la Hoja de Datos de Producto local para la descripción exacta de los campos de aplicación.

ECOLOGIA, SEGURIDAD E HIGIENE

Para cualquier información referida a cuestiones de seguridad en el uso, manejo, almacenamiento y eliminación de residuos de productos químicos, los usuarios deben consultar la versión más reciente de la Hoja de Seguridad del producto, que contiene datos físicos, ecológicos, toxicológicos y demás cuestiones relacionadas con la seguridad.

NOTAS LEGALES

Esta información y, en particular, las recomendaciones relativas a la aplicación y uso final del producto, están dadas de buena fe, basadas en el conocimiento actual y la experiencia de Sika de los productos cuando son correctamente almacenados, manejados y aplicados, en situaciones normales, dentro de su vida útil y de acuerdo con las recomendaciones de Sika. En la práctica, las posibles diferencias en los materiales, soportes y condiciones reales en el lugar de aplicación son tales, que no se puede deducir de la información del presente documento, ni de cualquier otra recomendación escrita, ni de consejo alguno ofrecido, ninguna garantía en términos de comercialización o idoneidad para propósitos particulares, ni obligación alguna fuera de cualquier relación legal que pudiera existir. El usuario debe ensayar la conveniencia de los productos para la aplicación y la finalidad deseadas. Sika se reserva el derecho de modificar las propiedades de sus productos. Se reservan los derechos de propiedad de terceras partes. Los pedidos son aceptados en conformidad con los términos de nuestras vigentes Condiciones Generales de Venta y Suministro. Los usuarios deben conocer y utilizar la versión última y actualizada de las Hojas de Datos de Productos, copias de las cuales se mandarán a quién las solicite.

OFICINAS CENTRALES Y FABRICA

Carretera de Fuencarral, 72
P. I. Alcobendas
Madrid 28108 - Alcobendas
Tels.: 916 57 23 75
Fax: 916 62 19 38

OFICINAS CENTRALES Y CENTRO LOGÍSTICO

C/ Aragoneses, 17
P. I. Alcobendas
Madrid 28108 - Alcobendas
Tels.: 916 57 23 75
Fax: 916 62 19 38



Diseño y producción en instalaciones de Alcobendas (Madrid)



RESPONSIBLE CARE
El Compromiso de la Industria Química con el Desarrollo Sostenible

Hoja De Datos Del Producto
Sika® Retarder-50
Diciembre 2018, Versión 01.01
021406011000000030

SikaRetarder-50-es-ES-(12-2018)-1-1.pdf



ANEXO III REPORTAJE FOTOGRÁFICO

ANEXO III REPORTAJE FOTOGRÁFICO



Ilustración 47. Conjunto de probetas previo a ensayo



Ilustración 48. Probeta N.º 1



Ilustración 49. Probeta N.º 2

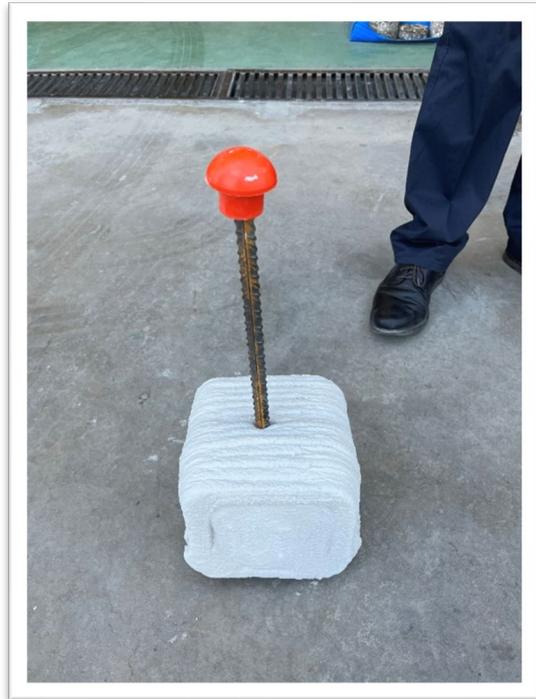


Ilustración 50. Probeta N.º 3



Ilustración 51. Probeta N.º 4



Ilustración 52. Probeta N.º 5



Ilustración 53. Probeta N.º 6



Ilustración 54. Probeta N.º 7



Ilustración 55. Probeta N.º 8



Ilustración 56. Probeta N.º 9



Ilustración 57. Probeta N.º 10



Ilustración 58. Probeta N.º 11



Ilustración 59. Probeta N.º 12



Ilustración 60. Probeta N.º 13

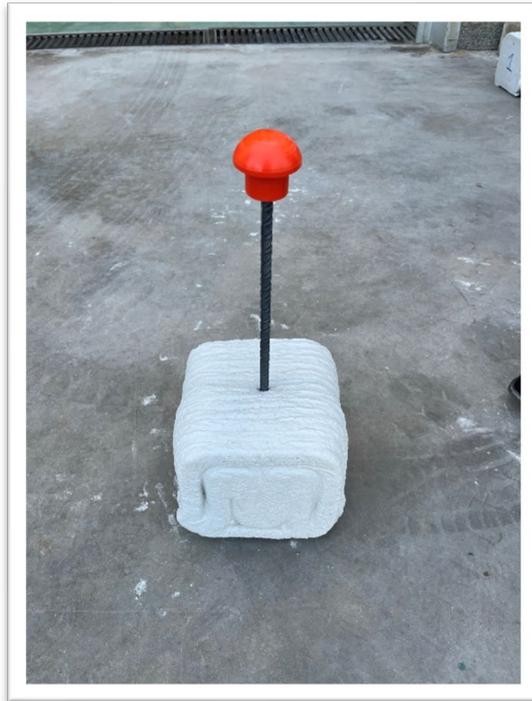


Ilustración 61. Probeta N.º 14



Ilustración 62. Probeta N.º 15

ANEXO IV TABULACIÓN DE RESULTADOS

ANEXO IV TABULACIÓN DE RESULTADOS

Se incluye el informe aportado por el Laboratorio del Instituto Técnico de Materiales y Construcciones (INTEMAC) con los resultados de los ensayos realizados, por el cual estoy muy agradecido.

INVESTIGACIÓN DE PRESTACIONES DE ADHERENCIA HORMIGÓN-ACERO



ENSAYOS DE ARRANCAMIENTO (PULL OUT) DE BARRAS DE ACERO
EMBEDIDAS EN BLOQUES DE HORMIGÓN PRODUCIDOS POR
IMPRESIÓN 3D

Peticionario:



8 de septiembre de 2023

ÍNDICE

1.- METODOLOGÍA	3
2.- RESULTADOS	4
3.- LABORATORIO DE ENSAYO.....	5
3.1.-CERTIFICACIÓN DEL SISTEMA DE CALIDAD, GESTIÓN AMBIENTAL Y PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES	5
3.2.-ACREDITACIONES DEL LABORATORIO CENTRAL DE INTEMAC.....	6

1.- METODOLOGÍA

Para la realización del ensayo se han seguido principalmente la metodología descrita en el Anejo D de la norma UNE-EN 10080:2006: Ensayo de adherencia para las armaduras de hormigón armado. Ensayo de arrancamiento. Este método es aplicable a las armaduras de acero para hormigón con diámetro igual o inferior a 32 mm.

El principio de ensayo consiste en aplicar una carga de tracción a una barra o alambre embebido en un cubo de hormigón hasta una longitud determinada, permaneciendo el otro extremo de la barra sin ningún tipo de tensión. La fuerza de tracción se va incrementando hasta que se produce el fallo de la adherencia o hasta que rompe la barra de acero.

La probeta de ensayo es un cubo de hormigón en cuyo centro se dispone la barra o alambre. La longitud efectiva de adherencia ha de ser de 5 veces el diámetro, lo que se corresponde solo con una parte de las probetas, evitándose la adhesión entre el hormigón y la barra en la otra parte. Para esta investigación se recibieron las probetas objeto de ensayo ya fabricadas, habiendo sido embebidas las armaduras de forma paralela tanto al extendido de las capas de hormigón en la impresora 3D como al trazado de los inyectores de agua sobre las capas recién extendidas. Debido a las limitaciones de esa operativa de fabricación, la profundidad a la que se han embebido las armaduras (20 cm) no se corresponde con los requisitos de la citada norma.

La tracción se ha aplicado sobre el extremo libre de la armadura (zona no embebida) con un mecanismo de regulación de carga que permite un incremento continuo con una velocidad de 0,14 kN/s.

El sistema de aplicación de carga debe asegurar que la tracción se aplique perpendicularmente a la superficie externa del hormigón. En el caso de las probetas en las que la barra había quedado embebida con alguna inclinación, la superficie de hormigón fue suplementada con elementos de neopreno para que la tracción de la barra fuera completamente perpendicular a la superficie exterior del hormigón.

Para los ensayos se empleó una prensa de tracción de 100 kN de capacidad y precisión de Clase 1. En todos los casos se registró la carga máxima alcanzada durante el ensayo y se tomó documentación fotográfica de la forma de rotura ocasionada por el arrancamiento de la barra.

=====

=====

=====

2.- RESULTADOS

Seguidamente se presentan los resultados obtenidos sobre las piezas recibidas para ensayo:

Probeta	Fecha de ensayo	Diámetro de la barra embebida (mm)	Carga máxima alcanzada (kN)	Tipo de rotura
1	04/09/2023	16	17,3	B
2			27,3	B
3			25,8	C
4		12	18,6	B
5			16,8	C
6			13,8	C
7			12,4	C
8			14,6	C
9			12,0	C
10			20,2	C
11		18,5	C	
12		22,7	C	
13		10	12,0	A
14			9,2	C
15			10,1	A

A: Despegue íntegro de la barra sin rotura del bloque de hormigón

B: Despegue parcial de la barra por rotura de la parte superior del bloque

C: Despegue íntegro de la barra con rotura del bloque de hormigón

=====

=====

=====

3.- LABORATORIO DE ENSAYO

Los ensayos han sido realizados en el Laboratorio Central de **INTEMAC**, situado en la C/ Bronce, 26 y 28, en Torrejón de Ardoz (Madrid).

3.1.- CERTIFICACIÓN DEL SISTEMA DE CALIDAD, GESTIÓN AMBIENTAL Y PREVENCIÓN DE RIESGOS LABORALES

Es política de **INTEMAC** alcanzar y mantener, en todas sus actividades, la máxima calidad posible, superior a los estándares exigidos por la reglamentación aplicable y siempre acorde a las necesidades establecidas por sus clientes. Para ello en **INTEMAC** tenemos desarrollado, implantado, actualizado, auditado y certificado externamente nuestro propio **SISTEMA DE GESTIÓN DE CALIDAD**, que satisface los requisitos de las normas internacionales **ISO 9001:2015** y **UNE-EN ISO/IEC 17025:2017**.

El Sistema de Gestión de la Calidad se encuentra certificado por **AENOR**, con número de registro ER-0235/2000.



Figura 1: Certificación del sistema de gestión de calidad de **INTEMAC**

INTEMAC, desde finales de 2018, forma parte del **Grupo TYPESA**, líder en servicios de consultoría e ingeniería del transporte, la edificación, el agua, la energía, el medio ambiente y el desarrollo rural.

Al igual que nuestra matriz, desarrollamos nuestras actividades buscando siempre la máxima calidad de nuestro trabajo mediante la **INNOVACIÓN**, con el objetivo de mejorar nuestros servicios gracias a la investigación y el desarrollo tecnológico, y con criterios de mejora de la **SOSTENIBILIDAD**, apostando siempre por un desarrollo sostenible en todas las actividades y servicios que desarrollamos, y conforme a la norma internacional **ISO 14001:2015**, con el fin de contribuir a preservar nuestro entorno.

Para ello, **INTEMAC** dispone de un **SISTEMA DE GESTIÓN MEDIOAMBIENTAL**, documentado en su Manual y su Programa de Gestión Medioambiental y en Procedimientos organizativos propios del SGMA, que está certificado por **AENOR** de acuerdo con **ISO 14001:2015**, con número de registro GA-2003/0339.



Figura 2: Certificación del sistema de gestión medioambiental de INTEMAC

INTEMAC también dispone de un **SISTEMA DE GESTIÓN DE SEGURIDAD Y SALUD EN EL TRABAJO**, que está certificado por **CERNE** de acuerdo con **ISO 45001:2018**, con número de registro 96907-6/2023 para: Servicios técnicos de arquitectura e ingeniería; Laboratorio de ensayos y análisis técnicos.



Figura 3: Certificación del sistema de gestión de seguridad y salud en el trabajo de INTEMAC

3.2.- ACREDITACIONES DEL LABORATORIO CENTRAL DE INTEMAC

ENTIDAD NACIONAL DE ACREDITACIÓN (ENAC)

El Laboratorio Central del Instituto está **ACREDITADO POR ENAC** con acreditación nº 25/LE039, según criterios recogidos en la norma **UNE-EN ISO/IEC 17025:2017**. El alcance de dicha acreditación, concedida en fecha 09/05/1991, está definido en el Anexo Técnico Rev. 28 de fecha 11/02/2022.

Las determinaciones a que se refiere el citado alcance corresponden a:

- Ensayos de hormigón, derivados, **cementos y constituyentes.**

- Ensayos de materiales metálicos.



Figura 4: Acreditación ENAC del Laboratorio de Ensayos de INTEMAC

REGISTRO GENERAL DEL C.T.E.

El Laboratorio Central de **INTEMAC** está inscrito en el Registro General de Laboratorios de Ensayos para el Control de Calidad de la Edificación (LECCE) con el registro MAD-L-030 y fecha de alta 25 de marzo de 2011, según Real Decreto 410/2010, 31 de marzo.

INTEMAC considerará el trabajo como materia confidencial, no facilitando información referente al mismo a terceras personas, salvo autorización escrita del PETICIONARIO o en los casos previstos por las Leyes.

En Torrejón de Ardoz (Madrid), a 8 de septiembre de 2023.

INTEMAC (Grupo TYPESA) tiene el compromiso de actuar siguiendo los más altos estándares de comportamiento ético y requiere de sus empleados un comportamiento acorde con dichos principios. Considera que la corrupción va contra el interés público y no la fomenta ni la tolera sea cual sea el país en el que desarrolle su actividad. Los principios sobre los que se basa el comportamiento empresarial y personal de las empresas y empleados del Grupo están establecidos en su [Código Ético](#) y en su [Política de Integridad Corporativa](#)

PROTECCIÓN DE DATOS (RGPD)

De acuerdo con lo establecido por la legislación vigente de Protección de Datos de Carácter Personal, con la finalidad de mantener una relación contractual y realizar una gestión administrativa o comercial, los datos personales de contacto de que disponemos son tratados por el INSTITUTO TÉCNICO DE MATERIALES Y CONSTRUCCIONES, S.A. (INTEMAC), con NIF A-28184661. Estos datos han sido incorporados a un fichero que se encuentra inscrito en la Agencia Española de Protección de Datos. Sus datos no serán cedidos a terceros para ningún fin, salvo en los casos contemplados por la ley. Tiene derecho de acceso, rectificación, supresión, limitación, portabilidad y oposición, que puede ejercer enviando un correo electrónico a intemac@intemac.es. Le invitamos a que consulte y acepte nuestra [Política de Privacidad](#).

ANEXO V FORMAS DE ROTURA

ANEXO V FORMAS DE ROTURA

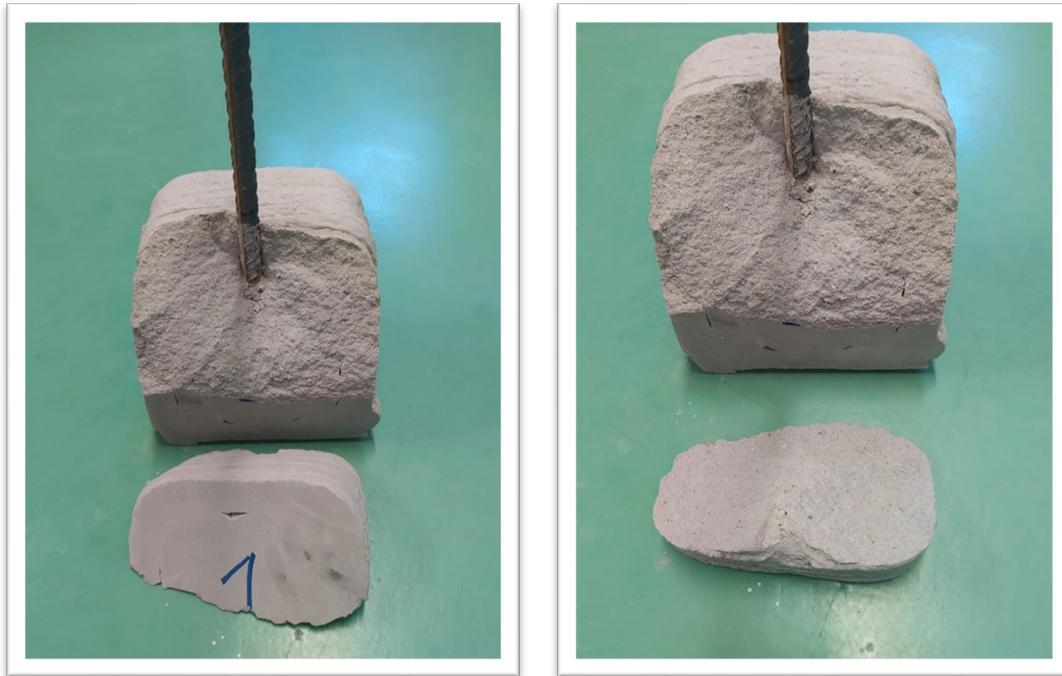


Ilustración 63. Probeta N.º 1. Forma de rotura



Ilustración 64. Probeta N.º 2. Forma de rotura



Ilustración 65. Probeta N.º 3. Forma de rotura

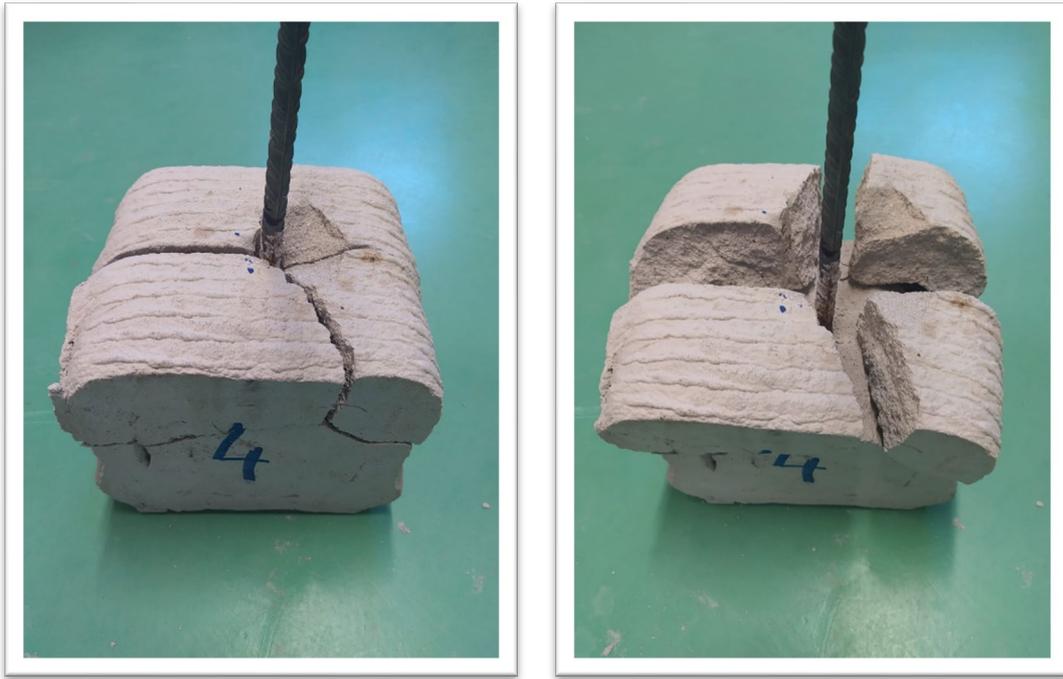


Ilustración 66. Probeta N.º 4. Forma de rotura

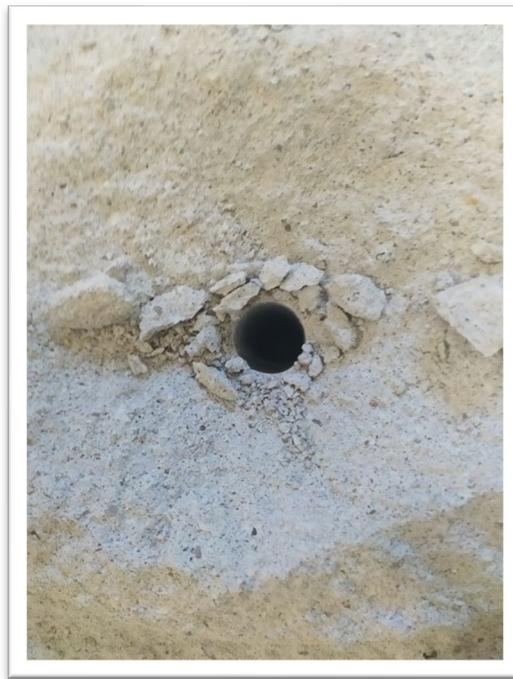
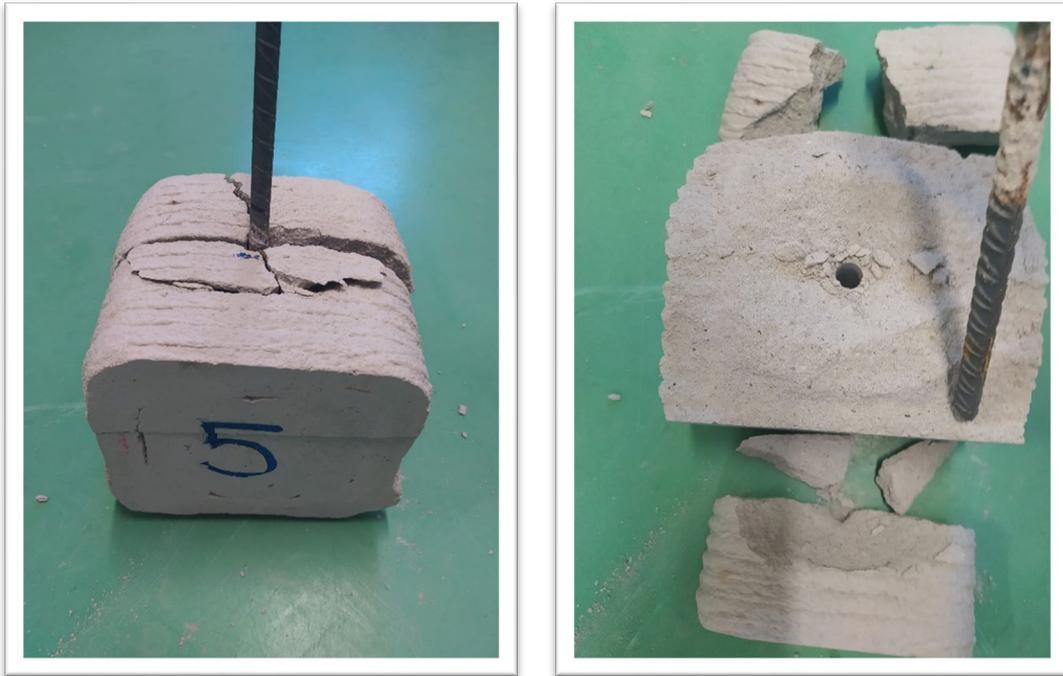


Ilustración 67. Probeta N.º 5. Forma de rotura



Ilustración 68. Probeta N.º 6. Forma de rotura

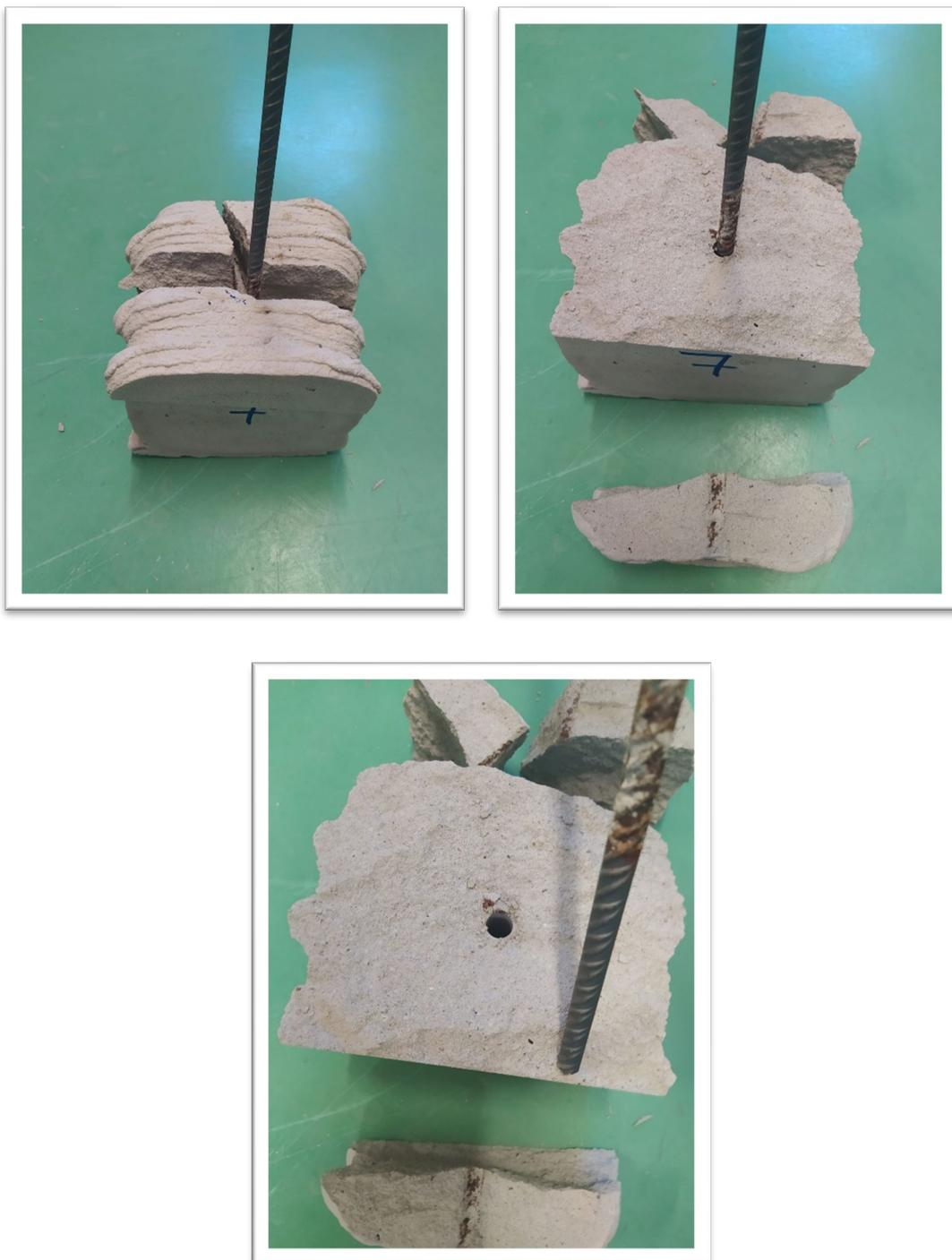


Ilustración 69. Probeta N.º 7. Forma de rotura



Ilustración 70. Probeta N.º 8. Forma de rotura



Ilustración 71. Probeta N.º 9. Forma de rotura



Ilustración 72. Probeta N.º 10. Forma de rotura



Ilustración 73. Probeta N.º 11. Forma de rotura

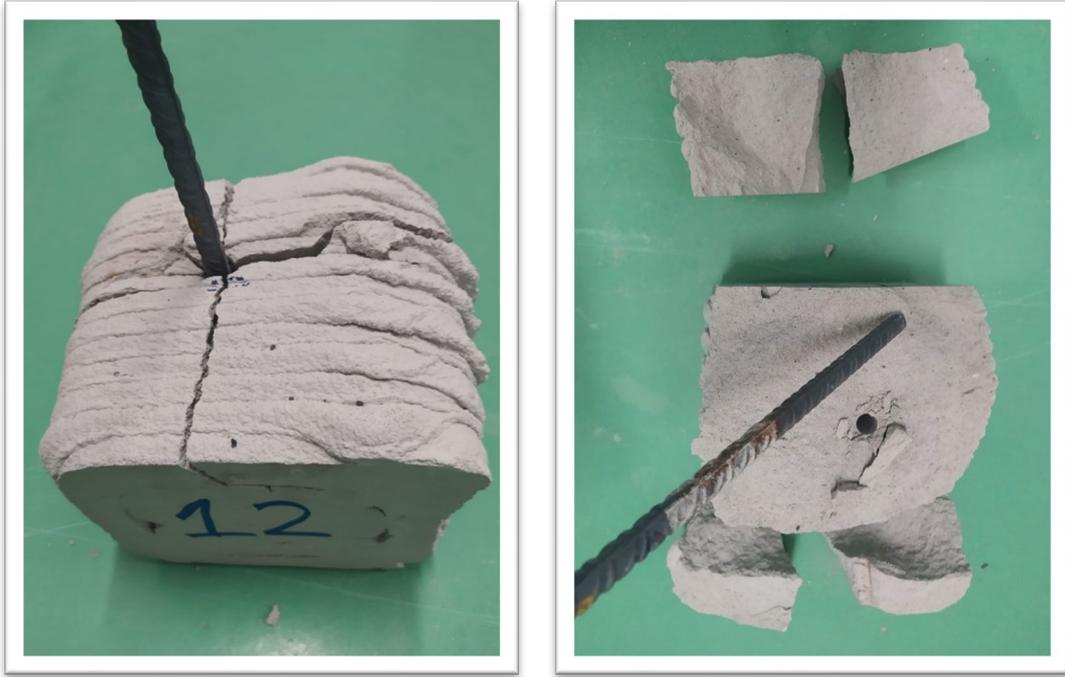


Ilustración 74. Probeta N.º 12. Forma de rotura

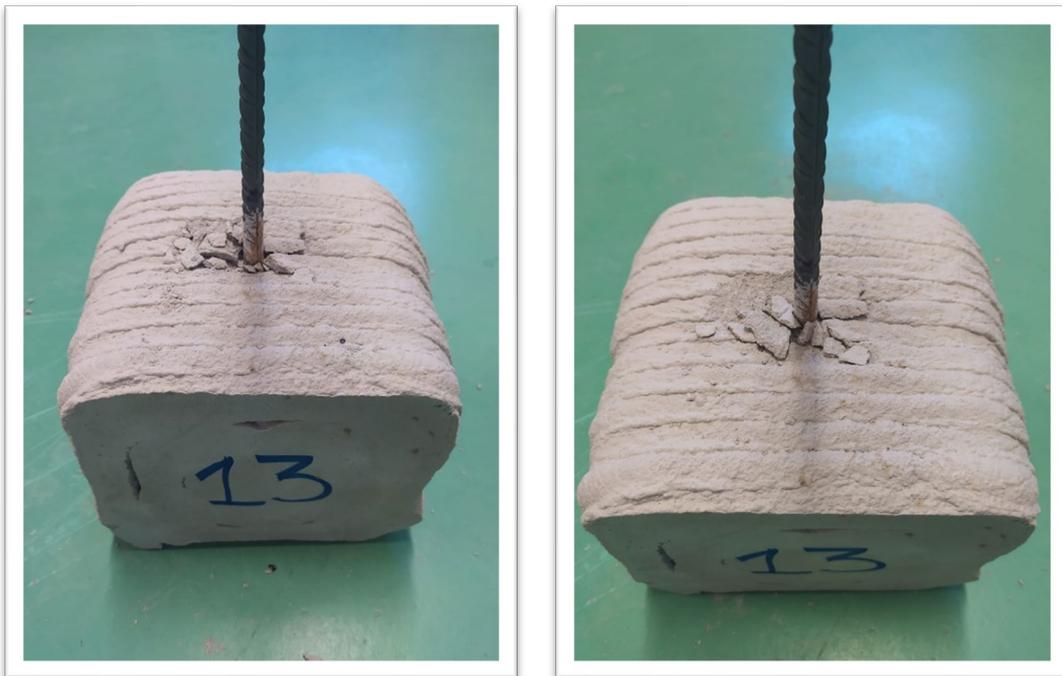


Ilustración 75. Probeta N.º 13. Forma de rotura

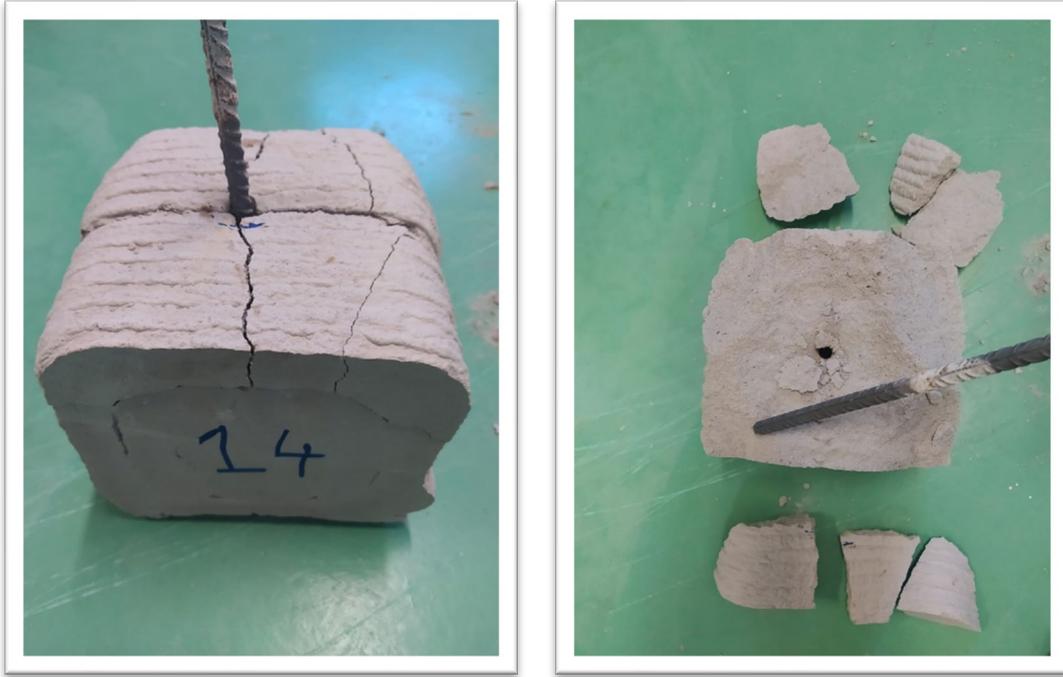


Ilustración 76. Probeta N.º 14. Forma de rotura



Ilustración 77. Probeta N.º 15. Forma de rotura

ANEXO VI RESULTADOS DE PROPUESTA METODOLÓGICA

ANEXO VI RESULTADOS DE PROPUESTA METODOLÓGICA

A continuación, se presentan los resultados del modelo de determinación de coeficientes expuesto en el Capítulo VII. Se trata de una hoja de cálculo en la que se resuelven, por métodos analíticos, las ecuaciones anteriormente mencionadas.

FORMULACIÓN ADAPTADA A LA DEL CÓDIGO ESTRUCTURAL

Probeta N.º: 1

$$\varnothing = 16 \text{ mm}$$

$$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$$

$$F = 17300 \text{ N}$$

$$l_{bl} = \gamma_1 \cdot \varnothing^2 = 404 \text{ mm}$$

$$\sigma_{sd} = F / ((\pi \cdot \varnothing^2) / 4) = 86,0 \text{ N/mm}^2$$

$$\beta = \sigma_{sd} / (f_{yk} / \gamma_s) = 0,20$$

$$\gamma_1 = \mathbf{1,58} \quad \text{Coeficiente corrector}$$

$$5\varnothing = \mathbf{80 \text{ mm}} \quad \text{Longitud anclaje en probeta}$$

$$l_{bl, \text{neta}} = \beta \cdot l_{bl} = \beta \cdot \gamma_1 \cdot \varnothing^2 \quad \mathbf{80 \text{ mm}} \quad \text{Longitud neta de anclaje}$$

FORMULACIÓN ADAPTADA A LA DEL EUROCÓDIGO 2

Probeta N.º: 1

$$\varnothing = 16 \text{ mm}$$

$$f_{ctm} = 4,0 \text{ MPa}$$

$$f_{ctd} = 2,7 \text{ MPa}$$

$$F \text{ (tracción)} = 17300 \text{ N}$$

$$\tau_{(b,u)} = f_{bd} = 2,25 \gamma_2 \eta_2 f_{ctd} = 3,0 \text{ MPa}$$

$$\eta_2 = 1,0$$

$$\sigma_{sd} = 86,0 \text{ N/mm}^2$$

$$l_{(b,rqd)} = (\varnothing/4) (\sigma_{sd}/f_{bd}) = 114 \text{ mm}$$

$$\gamma_2 = \mathbf{0,50} \quad \text{Coeficiente corrector}$$

$$5\varnothing = \mathbf{80 \text{ mm}} \quad \text{Longitud anclaje en probeta}$$

$$l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 l_{(b,rqd)} \geq l_{(b,min)} = \mathbf{80 \text{ mm}} \quad \text{Longitud neta de anclaje}$$

$$\alpha_1 = 1,0$$

$$\alpha_2 = 1,0$$

$$\alpha_3 = 1,0$$

$$\alpha_4 = 0,7$$

$$\alpha_5 = 1,0$$

FORMULACIÓN ADAPTADA A LA DEL CÓDIGO ESTRUCTURAL

Probeta N.º: 2

$$\varnothing = 16 \text{ mm}$$

$$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$$

$$F = 27300 \text{ N}$$

$$l_{bl} = \gamma_1 \cdot \varnothing^2 = 256 \text{ mm}$$

$$\sigma_{sd} = F / ((\pi \cdot \varnothing^2) / 4) = 135,8 \text{ N/mm}^2$$

$$\beta = \sigma_{sd} / (f_{yk} / \gamma_s) = 0,31$$

$$\gamma_1 = \mathbf{1,00} \quad \text{Coeficiente corrector}$$

$$5\varnothing = \mathbf{80 \text{ mm}} \quad \text{Longitud anclaje en probeta}$$

$$l_{bl, \text{neta}} = \beta \cdot l_{bl} = \beta \cdot \gamma_1 \cdot \varnothing^2 \quad \mathbf{80 \text{ mm}} \quad \text{Longitud neta de anclaje}$$

FORMULACIÓN ADAPTADA A LA DEL EUROCÓDIGO 2

Probeta N.º: 2

$$\varnothing = 16 \text{ mm}$$

$$f_{ctm} = 4,0 \text{ MPa}$$

$$f_{ctd} = 2,7 \text{ MPa}$$

$$F \text{ (tracción)} = 27300 \text{ N}$$

$$\tau_{(b,u)} = f_{bd} = 2,25 \gamma_2 \eta_2 f_{ctd} = 4,8 \text{ MPa}$$

$$\eta_2 = 1,0$$

$$\sigma_{sd} = 135,8 \text{ N/mm}^2$$

$$l_{(b,rqd)} = (\varnothing/4) (\sigma_{sd} / f_{bd}) = 114 \text{ mm}$$

$$\gamma_2 = \mathbf{0,79} \quad \text{Coeficiente corrector}$$

$$5\varnothing = \mathbf{80 \text{ mm}} \quad \text{Longitud anclaje en probeta}$$

$$l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 l_{(b,rqd)} \geq l_{(b,min)} = \mathbf{80 \text{ mm}} \quad \text{Longitud neta de anclaje}$$

$$\alpha_1 = 1,0$$

$$\alpha_2 = 1,0$$

$$\alpha_3 = 1,0$$

$$\alpha_4 = 0,7$$

$$\alpha_5 = 1,0$$

FORMULACIÓN ADAPTADA A LA DEL CÓDIGO ESTRUCTURAL

Probeta N.º: 3

$$\varnothing = 16 \text{ mm}$$

$$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$$

$$F = 25800 \text{ N}$$

$$l_{bl} = \gamma_1 \cdot \varnothing^2 = 271 \text{ mm}$$

$$\sigma_{sd} = F / ((\pi \cdot \varnothing^2) / 4) = 128,3 \text{ N/mm}^2$$

$$\beta = \sigma_{sd} / (f_{yk} / \gamma_s) = 0,30$$

$$\gamma_1 = \mathbf{1,06} \quad \text{Coeficiente corrector}$$

$$5\varnothing = \mathbf{80 \text{ mm}} \quad \text{Longitud anclaje en probeta}$$

$$l_{bl, \text{neta}} = \beta \cdot l_{bl} = \beta \cdot \gamma_1 \cdot \varnothing^2 \quad \mathbf{80 \text{ mm}} \quad \text{Longitud neta de anclaje}$$

FORMULACIÓN ADAPTADA A LA DEL EUROCÓDIGO 2

Probeta N.º: 3

$$\varnothing = 16 \text{ mm}$$

$$f_{ctm} = 4,0 \text{ MPa}$$

$$f_{ctd} = 2,7 \text{ MPa}$$

$$F \text{ (tracción)} = 25800 \text{ N}$$

$$\tau_{(b,u)} = f_{bd} = 2,25 \gamma_2 \eta_2 f_{ctd} = 4,5 \text{ MPa}$$

$$\eta_2 = 1,0$$

$$\sigma_{sd} = 128,3 \text{ N/mm}^2$$

$$l_{(b,rqd)} = (\varnothing/4) (\sigma_{sd} / f_{bd}) = 114 \text{ mm}$$

$$\gamma_2 = \mathbf{0,75} \quad \text{Coeficiente corrector}$$

$$5\varnothing = \mathbf{80 \text{ mm}} \quad \text{Longitud anclaje en probeta}$$

$$l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 l_{(b,rqd)} \geq l_{(b,min)} = \mathbf{80 \text{ mm}} \quad \text{Longitud neta de anclaje}$$

$$\alpha_1 = 1,0$$

$$\alpha_2 = 1,0$$

$$\alpha_3 = 1,0$$

$$\alpha_4 = 0,7$$

$$\alpha_5 = 1,0$$

FORMULACIÓN ADAPTADA A LA DEL CÓDIGO ESTRUCTURAL

Probeta N.º: 4

$$\varnothing = 12 \text{ mm}$$

$$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$$

$$F = 18600 \text{ N}$$

$$l_{bl} = \gamma_1 \cdot \varnothing^2 = 159 \text{ mm}$$

$$\sigma_{sd} = F / ((\pi \cdot \varnothing^2) / 4) = 164,5 \text{ N/mm}^2$$

$$\beta = \sigma_{sd} / (f_{yk} / \gamma_s) = 0,38$$

$$\gamma_1 = \mathbf{1,10} \quad \text{Coeficiente corrector}$$

$$5\varnothing = \mathbf{60 \text{ mm}} \quad \text{Longitud anclaje en probeta}$$

$$l_{bl, \text{neta}} = \beta \cdot l_{bl} = \beta \cdot \gamma_1 \cdot \varnothing^2 \quad \mathbf{60 \text{ mm}} \quad \text{Longitud neta de anclaje}$$

FORMULACIÓN ADAPTADA A LA DEL EUROCÓDIGO 2

Probeta N.º: 4

$$\varnothing = 12 \text{ mm}$$

$$f_{ctm} = 4,0 \text{ MPa}$$

$$f_{ctd} = 2,7 \text{ MPa}$$

$$F \text{ (tracción)} = 18600 \text{ N}$$

$$\tau_{(b,u)} = f_{bd} = 2,25 \gamma_2 \eta_2 f_{ctd} = 5,8 \text{ MPa}$$

$$\eta_2 = 1,0$$

$$\sigma_{sd} = 164,5 \text{ N/mm}^2$$

$$l_{(b,rqd)} = (\varnothing/4) (\sigma_{sd} / f_{bd}) = 86 \text{ mm}$$

$$\gamma_2 = \mathbf{0,96} \quad \text{Coeficiente corrector}$$

$$5\varnothing = \mathbf{60 \text{ mm}} \quad \text{Longitud anclaje en probeta}$$

$$l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 l_{(b,rqd)} \geq l_{(b,min)} = \mathbf{60 \text{ mm}} \quad \text{Longitud neta de anclaje}$$

$$\alpha_1 = 1,0$$

$$\alpha_2 = 1,0$$

$$\alpha_3 = 1,0$$

$$\alpha_4 = 0,7$$

$$\alpha_5 = 1,0$$

FORMULACIÓN ADAPTADA A LA DEL CÓDIGO ESTRUCTURAL

Probeta N.º: 5

$$\varnothing = 12 \text{ mm}$$

$$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$$

$$F = 16800 \text{ N}$$

$$l_{bl} = \gamma_1 \cdot \varnothing^2 = 176 \text{ mm}$$

$$\sigma_{sd} = F / ((\pi \cdot \varnothing^2) / 4) = 148,5 \text{ N/mm}^2$$

$$\beta = \sigma_{sd} / (f_{yk} / \gamma_s) = 0,34$$

$$\gamma_1 = \mathbf{1,22} \quad \text{Coeficiente corrector}$$

$$5\varnothing = \mathbf{60 \text{ mm}} \quad \text{Longitud anclaje en probeta}$$

$$l_{bl, \text{neta}} = \beta \cdot l_{bl} = \beta \cdot \gamma_1 \cdot \varnothing^2 \quad \mathbf{60 \text{ mm}} \quad \text{Longitud neta de anclaje}$$

FORMULACIÓN ADAPTADA A LA DEL EUROCÓDIGO 2

Probeta N.º: 5

$$\varnothing = 12 \text{ mm}$$

$$f_{ctm} = 4,0 \text{ MPa}$$

$$f_{ctd} = 2,7 \text{ MPa}$$

$$F \text{ (tracción)} = 16800 \text{ N}$$

$$\tau_{(b,u)} = f_{bd} = 2,25 \gamma_2 \eta_2 f_{ctd} = 5,2 \text{ MPa}$$

$$\eta_2 = 1,0$$

$$\sigma_{sd} = 148,5 \text{ N/mm}^2$$

$$l_{(b,rqd)} = (\varnothing/4) (\sigma_{sd} / f_{bd}) = 86 \text{ mm}$$

$$\gamma_2 = \mathbf{0,87} \quad \text{Coeficiente corrector}$$

$$5\varnothing = \mathbf{60 \text{ mm}} \quad \text{Longitud anclaje en probeta}$$

$$l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 l_{(b,rqd)} \geq l_{(b,min)} = \mathbf{60 \text{ mm}} \quad \text{Longitud neta de anclaje}$$

$$\alpha_1 = 1,0$$

$$\alpha_2 = 1,0$$

$$\alpha_3 = 1,0$$

$$\alpha_4 = 0,7$$

$$\alpha_5 = 1,0$$

FORMULACIÓN ADAPTADA A LA DEL CÓDIGO ESTRUCTURAL

Probeta N.º: 6

$$\varnothing = 12 \text{ mm}$$

$$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$$

$$F = 13800 \text{ N}$$

$$l_{bl} = \gamma_1 \cdot \varnothing^2 = 214 \text{ mm}$$

$$\sigma_{sd} = F / ((\pi \cdot \varnothing^2) / 4) = 122,0 \text{ N/mm}^2$$

$$\beta = \sigma_{sd} / (f_{yk} / \gamma_s) = 0,28$$

$$\gamma_1 = \mathbf{1,48} \quad \text{Coeficiente corrector}$$

$$5\varnothing = \mathbf{60 \text{ mm}} \quad \text{Longitud anclaje en probeta}$$

$$l_{bl, \text{neta}} = \beta \cdot l_{bl} = \beta \cdot \gamma_1 \cdot \varnothing^2 \quad \mathbf{60 \text{ mm}} \quad \text{Longitud neta de anclaje}$$

FORMULACIÓN ADAPTADA A LA DEL EUROCÓDIGO 2

Probeta N.º: 6

$$\varnothing = 12 \text{ mm}$$

$$f_{ctm} = 4,0 \text{ MPa}$$

$$f_{ctd} = 2,7 \text{ MPa}$$

$$F \text{ (tracción)} = 13800 \text{ N}$$

$$\tau_{(b,u)} = f_{bd} = 2,25 \gamma_2 \eta_2 f_{ctd} = 4,3 \text{ MPa}$$

$$\eta_2 = 1,0$$

$$\sigma_{sd} = 122,0 \text{ N/mm}^2$$

$$l_{(b,rqd)} = (\varnothing/4) (\sigma_{sd} / f_{bd}) = 86 \text{ mm}$$

$$\gamma_2 = \mathbf{0,71} \quad \text{Coeficiente corrector}$$

$$5\varnothing = \mathbf{60 \text{ mm}} \quad \text{Longitud anclaje en probeta}$$

$$l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 l_{(b,rqd)} \geq l_{(b,min)} = \mathbf{60 \text{ mm}} \quad \text{Longitud neta de anclaje}$$

$$\alpha_1 = 1,0$$

$$\alpha_2 = 1,0$$

$$\alpha_3 = 1,0$$

$$\alpha_4 = 0,7$$

$$\alpha_5 = 1,0$$

FORMULACIÓN ADAPTADA A LA DEL CÓDIGO ESTRUCTURAL

Probeta N.º: 7

$$\varnothing = 12 \text{ mm}$$

$$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$$

$$F = 12400 \text{ N}$$

$$l_{bl} = \gamma_1 \cdot \varnothing^2 = 238 \text{ mm}$$

$$\sigma_{sd} = F / ((\pi \cdot \varnothing^2) / 4) = 109,6 \text{ N/mm}^2$$

$$\beta = \sigma_{sd} / (f_{yk} / \gamma_s) = 0,25$$

$$\gamma_1 = \mathbf{1,65} \quad \text{Coeficiente corrector}$$

$$5\varnothing = \mathbf{60 \text{ mm}} \quad \text{Longitud anclaje en probeta}$$

$$l_{bl, \text{neta}} = \beta \cdot l_{bl} = \beta \cdot \gamma_1 \cdot \varnothing^2 \quad \mathbf{60 \text{ mm}} \quad \text{Longitud neta de anclaje}$$

FORMULACIÓN ADAPTADA A LA DEL EUROCÓDIGO 2

Probeta N.º: 7

$$\varnothing = 12 \text{ mm}$$

$$f_{ctm} = 4,0 \text{ MPa}$$

$$f_{ctd} = 2,7 \text{ MPa}$$

$$F \text{ (tracción)} = 12400 \text{ N}$$

$$\tau_{(b,u)} = f_{bd} = 2,25 \gamma_2 \eta_2 f_{ctd} = 3,8 \text{ MPa}$$

$$\eta_2 = 1,0$$

$$\sigma_{sd} = 109,6 \text{ N/mm}^2$$

$$l_{(b,rqd)} = (\varnothing/4) (\sigma_{sd}/f_{bd}) = 86 \text{ mm}$$

$$\gamma_2 = \mathbf{0,64} \quad \text{Coeficiente corrector}$$

$$5\varnothing = \mathbf{60 \text{ mm}} \quad \text{Longitud anclaje en probeta}$$

$$l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 l_{(b,rqd)} \geq l_{(b,min)} = \mathbf{60 \text{ mm}} \quad \text{Longitud neta de anclaje}$$

$$\alpha_1 = 1,0$$

$$\alpha_2 = 1,0$$

$$\alpha_3 = 1,0$$

$$\alpha_4 = 0,7$$

$$\alpha_5 = 1,0$$

FORMULACIÓN ADAPTADA A LA DEL CÓDIGO ESTRUCTURAL

Probeta N.º: 8

$$\varnothing = 12 \text{ mm}$$

$$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$$

$$F = 14600 \text{ N}$$

$$l_{bl} = \gamma_1 \cdot \varnothing^2 = 202 \text{ mm}$$

$$\sigma_{sd} = F / ((\pi \cdot \varnothing^2) / 4) = 129,1 \text{ N/mm}^2$$

$$\beta = \sigma_{sd} / (f_{yk} / \gamma_s) = 0,30$$

$$\gamma_1 = \mathbf{1,40} \quad \text{Coeficiente corrector}$$

$$5\varnothing = \mathbf{60 \text{ mm}} \quad \text{Longitud anclaje en probeta}$$

$$l_{bl, \text{neta}} = \beta \cdot l_{bl} = \beta \cdot \gamma_1 \cdot \varnothing^2 \quad \mathbf{60 \text{ mm}} \quad \text{Longitud neta de anclaje}$$

FORMULACIÓN ADAPTADA A LA DEL EUROCÓDIGO 2

Probeta N.º: 8

$$\varnothing = 12 \text{ mm}$$

$$f_{ctm} = 4,0 \text{ MPa}$$

$$f_{ctd} = 2,7 \text{ MPa}$$

$$F \text{ (tracción)} = 14600 \text{ N}$$

$$\tau_{(b,u)} = f_{bd} = 2,25 \gamma_2 \eta_2 f_{ctd} = 4,5 \text{ MPa}$$

$$\eta_2 = 1,0$$

$$\sigma_{sd} = 129,1 \text{ N/mm}^2$$

$$l_{(b,rqd)} = (\varnothing/4) (\sigma_{sd} / f_{bd}) = 86 \text{ mm}$$

$$\gamma_2 = \mathbf{0,75} \quad \text{Coeficiente corrector}$$

$$5\varnothing = \mathbf{60 \text{ mm}} \quad \text{Longitud anclaje en probeta}$$

$$l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 l_{(b,rqd)} \geq l_{(b,min)} = \mathbf{60 \text{ mm}} \quad \text{Longitud neta de anclaje}$$

$$\alpha_1 = 1,0$$

$$\alpha_2 = 1,0$$

$$\alpha_3 = 1,0$$

$$\alpha_4 = 0,7$$

$$\alpha_5 = 1,0$$

FORMULACIÓN ADAPTADA A LA DEL CÓDIGO ESTRUCTURAL

Probeta N.º: 9

$$\varnothing = 12 \text{ mm}$$

$$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$$

$$F = 12000 \text{ N}$$

$$l_{bl} = \gamma_1 \cdot \varnothing^2 = 246 \text{ mm}$$

$$\sigma_{sd} = F / ((\pi \cdot \varnothing^2) / 4) = 106,1 \text{ N/mm}^2$$

$$\beta = \sigma_{sd} / (f_{yk} / \gamma_s) = 0,24$$

$$\gamma_1 = 1,71 \quad \text{Coeficiente corrector}$$

$$5\varnothing = 60 \text{ mm} \quad \text{Longitud anclaje en probeta}$$

$$l_{bl, \text{neta}} = \beta \cdot l_{bl} = \beta \cdot \gamma_1 \cdot \varnothing^2 = 60 \text{ mm} \quad \text{Longitud neta de anclaje}$$

FORMULACIÓN ADAPTADA A LA DEL EUROCÓDIGO 2

Probeta N.º: 9

$$\varnothing = 12 \text{ mm}$$

$$f_{ctm} = 4,0 \text{ MPa}$$

$$f_{ctd} = 2,7 \text{ MPa}$$

$$F \text{ (tracción)} = 12000 \text{ N}$$

$$\tau_{(b,u)} = f_{bd} = 2,25 \gamma_2 \eta_2 f_{ctd} = 3,7 \text{ MPa}$$

$$\eta_2 = 1,0$$

$$\sigma_{sd} = 106,1 \text{ N/mm}^2$$

$$l_{(b,rqd)} = (\varnothing/4) (\sigma_{sd}/f_{bd}) = 86 \text{ mm}$$

$$\gamma_2 = 0,62 \quad \text{Coeficiente corrector}$$

$$5\varnothing = 60 \text{ mm} \quad \text{Longitud anclaje en probeta}$$

$$l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 l_{(b,rqd)} \geq l_{(b,min)} = 60 \text{ mm} \quad \text{Longitud neta de anclaje}$$

$$\alpha_1 = 1,0$$

$$\alpha_2 = 1,0$$

$$\alpha_3 = 1,0$$

$$\alpha_4 = 0,7$$

$$\alpha_5 = 1,0$$

FORMULACIÓN ADAPTADA A LA DEL CÓDIGO ESTRUCTURAL

Probeta N.º: 10

$$\varnothing = 12 \text{ mm}$$

$$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$$

$$F = 20200 \text{ N}$$

$$l_{bl} = \gamma_1 \cdot \varnothing^2 = 146 \text{ mm}$$

$$\sigma_{sd} = F / ((\pi \cdot \varnothing^2) / 4) = 178,6 \text{ N/mm}^2$$

$$\beta = \sigma_{sd} / (f_{yk} / \gamma_s) = 0,41$$

$$\gamma_1 = \mathbf{1,01} \quad \text{Coeficiente corrector}$$

$$5\varnothing = \mathbf{60 \text{ mm}} \quad \text{Longitud anclaje en probeta}$$

$$l_{bl, \text{neta}} = \beta \cdot l_{bl} = \beta \cdot \gamma_1 \cdot \varnothing^2 \quad \mathbf{60 \text{ mm}} \quad \text{Longitud neta de anclaje}$$

FORMULACIÓN ADAPTADA A LA DEL EUROCÓDIGO 2

Probeta N.º: 10

$$\varnothing = 12 \text{ mm}$$

$$f_{ctm} = 4,0 \text{ MPa}$$

$$f_{ctd} = 2,7 \text{ MPa}$$

$$F \text{ (tracción)} = 20200 \text{ N}$$

$$\tau_{(b,u)} = f_{bd} = 2,25 \gamma_2 \eta_2 f_{ctd} = 6,3 \text{ MPa}$$

$$\eta_2 = 1,0$$

$$\sigma_{sd} = 178,6 \text{ N/mm}^2$$

$$l_{(b,rqd)} = (\varnothing/4) (\sigma_{sd} / f_{bd}) = 86 \text{ mm}$$

$$\gamma_2 = \mathbf{1,04} \quad \text{Coeficiente corrector}$$

$$5\varnothing = \mathbf{60 \text{ mm}} \quad \text{Longitud anclaje en probeta}$$

$$l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 l_{(b,rqd)} \geq l_{(b,min)} \quad \mathbf{60 \text{ mm}} \quad \text{Longitud neta de anclaje}$$

$$\alpha_1 = 1,0$$

$$\alpha_2 = 1,0$$

$$\alpha_3 = 1,0$$

$$\alpha_4 = 0,7$$

$$\alpha_5 = 1,0$$

FORMULACIÓN ADAPTADA A LA DEL CÓDIGO ESTRUCTURAL

Probeta N.º: 11

$$\varnothing = 12 \text{ mm}$$

$$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$$

$$F = 18500 \text{ N}$$

$$l_{bl} = \gamma_1 \cdot \varnothing^2 = 159 \text{ mm}$$

$$\sigma_{sd} = F / ((\pi \cdot \varnothing^2) / 4) = 163,6 \text{ N/mm}^2$$

$$\beta = \sigma_{sd} / (f_{yk} / \gamma_s) = 0,38$$

$$\gamma_1 = \mathbf{1,11} \quad \text{Coeficiente corrector}$$

$$5\varnothing = \mathbf{60 \text{ mm}} \quad \text{Longitud anclaje en probeta}$$

$$l_{bl, \text{neta}} = \beta \cdot l_{bl} = \beta \cdot \gamma_1 \cdot \varnothing^2 \quad \mathbf{60 \text{ mm}} \quad \text{Longitud neta de anclaje}$$

FORMULACIÓN ADAPTADA A LA DEL EUROCÓDIGO 2

Probeta N.º: 11

$$\varnothing = 12 \text{ mm}$$

$$f_{ctm} = 4,0 \text{ MPa}$$

$$f_{ctd} = 2,7 \text{ MPa}$$

$$F \text{ (tracción)} = 18500 \text{ N}$$

$$\tau_{(b,u)} = f_{bd} = 2,25 \gamma_2 \eta_2 f_{ctd} = 5,7 \text{ MPa}$$

$$\eta_2 = 1,0$$

$$\sigma_{sd} = 163,6 \text{ N/mm}^2$$

$$l_{(b,rqd)} = (\varnothing/4) (\sigma_{sd}/f_{bd}) = 86 \text{ mm}$$

$$\gamma_2 = \mathbf{0,95} \quad \text{Coeficiente corrector}$$

$$5\varnothing = \mathbf{60 \text{ mm}} \quad \text{Longitud anclaje en probeta}$$

$$l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 l_{(b,rqd)} \geq l_{(b,min)} = \mathbf{60 \text{ mm}} \quad \text{Longitud neta de anclaje}$$

$$\alpha_1 = 1,0$$

$$\alpha_2 = 1,0$$

$$\alpha_3 = 1,0$$

$$\alpha_4 = 0,7$$

$$\alpha_5 = 1,0$$

FORMULACIÓN ADAPTADA A LA DEL CÓDIGO ESTRUCTURAL

Probeta N.º: 12

$$\varnothing = 12 \text{ mm}$$

$$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$$

$$F = 22700 \text{ N}$$

$$l_{bl} = \gamma_1 \cdot \varnothing^2 = 130 \text{ mm}$$

$$\sigma_{sd} = F / ((\pi \cdot \varnothing^2) / 4) = 200,7 \text{ N/mm}^2$$

$$\beta = \sigma_{sd} / (f_{yk} / \gamma_s) = 0,46$$

$$\gamma_1 = \mathbf{0,90} \quad \text{Coeficiente corrector}$$

$$5\varnothing = \mathbf{60 \text{ mm}} \quad \text{Longitud anclaje en probeta}$$

$$l_{bl, \text{neta}} = \beta \cdot l_{bl} = \beta \cdot \gamma_1 \cdot \varnothing^2 \quad \mathbf{60 \text{ mm}} \quad \text{Longitud neta de anclaje}$$

FORMULACIÓN ADAPTADA A LA DEL EUROCÓDIGO 2

Probeta N.º: 12

$$\varnothing = 12 \text{ mm}$$

$$f_{ctm} = 4,0 \text{ MPa}$$

$$f_{ctd} = 2,7 \text{ MPa}$$

$$F \text{ (tracción)} = 22700 \text{ N}$$

$$\tau_{(b,u)} = f_{bd} = 2,25 \gamma_2 \eta_2 f_{ctd} = 7,0 \text{ MPa}$$

$$\eta_2 = 1,0$$

$$\sigma_{sd} = 200,7 \text{ N/mm}^2$$

$$l_{(b,rqd)} = (\varnothing/4) (\sigma_{sd}/f_{bd}) = 86 \text{ mm}$$

$$\gamma_2 = \mathbf{1,17} \quad \text{Coeficiente corrector}$$

$$5\varnothing = \mathbf{60 \text{ mm}} \quad \text{Longitud anclaje en probeta}$$

$$l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 l_{(b,rqd)} \geq l_{(b,min)} = \mathbf{60 \text{ mm}} \quad \text{Longitud neta de anclaje}$$

$$\alpha_1 = 1,0$$

$$\alpha_2 = 1,0$$

$$\alpha_3 = 1,0$$

$$\alpha_4 = 0,7$$

$$\alpha_5 = 1,0$$

FORMULACIÓN ADAPTADA A LA DEL CÓDIGO ESTRUCTURAL

Probeta N.º: 13

$$\varnothing = 10 \text{ mm}$$

$$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$$

$$F = 12000 \text{ N}$$

$$l_{bl} = \gamma_1 \cdot \varnothing^2 = 142 \text{ mm}$$

$$\sigma_{sd} = F / ((\pi \cdot \varnothing^2) / 4) = 152,8 \text{ N/mm}^2$$

$$\beta = \sigma_{sd} / (f_{yk} / \gamma_s) = 0,35$$

$$\gamma_1 = \mathbf{1,42} \quad \text{Coeficiente corrector}$$

$$5\varnothing = \mathbf{50 \text{ mm}} \quad \text{Longitud anclaje en probeta}$$

$$l_{bl, \text{neta}} = \beta \cdot l_{bl} = \beta \cdot \gamma_1 \cdot \varnothing^2 \quad \mathbf{50 \text{ mm}} \quad \text{Longitud neta de anclaje}$$

FORMULACIÓN ADAPTADA A LA DEL EUROCÓDIGO 2

Probeta N.º: 13

$$\varnothing = 10 \text{ mm}$$

$$f_{ctm} = 4,0 \text{ MPa}$$

$$f_{ctd} = 2,7 \text{ MPa}$$

$$F \text{ (tracción)} = 12000 \text{ N}$$

$$\tau_{(b,u)} = f_{bd} = 2,25 \gamma_2 \eta_2 f_{ctd} = 5,3 \text{ MPa}$$

$$\eta_2 = 1,0$$

$$\sigma_{sd} = 152,8 \text{ N/mm}^2$$

$$l_{(b,rqd)} = (\varnothing/4) (\sigma_{sd} / f_{bd}) = 71 \text{ mm}$$

$$\gamma_2 = \mathbf{0,89} \quad \text{Coeficiente corrector}$$

$$5\varnothing = \mathbf{50 \text{ mm}} \quad \text{Longitud anclaje en probeta}$$

$$l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 l_{(b,rqd)} \geq l_{(b,min)} = \mathbf{50 \text{ mm}} \quad \text{Longitud neta de anclaje}$$

$$\alpha_1 = 1,0$$

$$\alpha_2 = 1,0$$

$$\alpha_3 = 1,0$$

$$\alpha_4 = 0,7$$

$$\alpha_5 = 1,0$$

FORMULACIÓN ADAPTADA A LA DEL CÓDIGO ESTRUCTURAL

Probeta N.º: 14

$$\varnothing = 10 \text{ mm}$$

$$f_{yk} = 500 \text{ N/mm}^2$$

$$F = 9200 \text{ N}$$

$$l_{bl} = \gamma_1 \cdot \varnothing^2 = 186 \text{ mm}$$

$$\sigma_{sd} = F / ((\pi \cdot \varnothing^2) / 4) = 117,1 \text{ N/mm}^2$$

$$\beta = \sigma_{sd} / (f_{yk} / \gamma_s) = 0,27$$

$$\gamma_1 = \mathbf{1,86} \quad \text{Coeficiente corrector}$$

$$5\varnothing = \mathbf{50 \text{ mm}} \quad \text{Longitud anclaje en probeta}$$

$$l_{bl, \text{neta}} = \beta \cdot l_{bl} = \beta \cdot \gamma_1 \cdot \varnothing^2 \quad \mathbf{50 \text{ mm}} \quad \text{Longitud neta de anclaje}$$

FORMULACIÓN ADAPTADA A LA DEL EUROCÓDIGO 2

Probeta N.º: 14

$$\varnothing = 10 \text{ mm}$$

$$f_{ctm} = 4,0 \text{ MPa}$$

$$f_{ctd} = 2,7 \text{ MPa}$$

$$F \text{ (tracción)} = 9200 \text{ N}$$

$$\tau_{(b,u)} = f_{bd} = 2,25 \gamma_2 \eta_2 f_{ctd} = 4,1 \text{ MPa}$$

$$\eta_2 = 1,0$$

$$\sigma_{sd} = 117,1 \text{ N/mm}^2$$

$$l_{(b,rqd)} = (\varnothing/4) (\sigma_{sd} / f_{bd}) = 71 \text{ mm}$$

$$\gamma_2 = \mathbf{0,68} \quad \text{Coeficiente corrector}$$

$$5\varnothing = \mathbf{50 \text{ mm}} \quad \text{Longitud anclaje en probeta}$$

$$l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 l_{(b,rqd)} \geq l_{(b,min)} = \mathbf{50 \text{ mm}} \quad \text{Longitud neta de anclaje}$$

$$\alpha_1 = 1,0$$

$$\alpha_2 = 1,0$$

$$\alpha_3 = 1,0$$

$$\alpha_4 = 0,7$$

$$\alpha_5 = 1,0$$

CÓDIGO ESTRUCTURAL

Probeta N.º: 15

 $l_{bi} = \gamma_1 \phi^{\wedge 2} \leq (f_{yk}/20) \phi =$ **50 mm** Longitud básica de anclaje
 $\phi =$ 10 mm
 $5\phi =$ **50 mm** Longitud anclaje en probeta
 $\gamma_1 =$ **0,5000** Coeficiente corrector
 $f_{yk} =$ 500 N/mm²
 $l_{bi, neta} = l_{bi} (\sigma_{sd}/f_{yd}) =$ 15 mm Longitud neta de anclaje
 F (tracción) = 10100 N
 $\sigma_{sd} =$ 128,6 N/mm²
 $l_{bi, min} \geq \max\{0,3 l_{b, rqd}; 10\phi; 150 \text{ mm}\}$ 150 mm Longitud mínima

EUROCÓDIGO ESTRUCTURAL

Probeta N.º: 15

 $\tau_{(b,u)} = f_{bd} = 2,25 \gamma_2 \eta_2 f_{ctd} =$ 6,4 MPa Tensión de adherencia
 $\gamma_2 =$ **1,0716** Coeficiente corrector
 $\eta_2 =$ 1,0 para $\phi \leq 32$ mm
 $f_{ctm} =$ 4,0 MPa
 $f_{ctd} =$ 2,7 MPa

 $l_{(b, rqd)} = (\phi/4) (\sigma_{sd}/f_{bd}) =$ **50 mm** Longitud de anclaje requerida
 F (tracción) = 10100 N
 $\phi =$ 10 mm
 $5\phi =$ **50 mm** Longitud anclaje en probeta
 $\sigma_{sd} =$ 128,6 N/mm²
 $l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 l_{(b, rqd)} \geq l_{(b, min)} =$ 35 mm Longitud neta de anclaje
 $\alpha_1 =$ 1,0 Forma de las barras
 $\alpha_2 =$ 1,0 Recubrimiento
 $\alpha_3 =$ 1,0 Armad. Transv. NO soldada
 $\alpha_4 =$ 0,7 Armad. Transv. soldada
 $\alpha_5 =$ 1,0 Presión Trasnv.

 $l_{b, min} \geq \max\{0,3 l_{b, rqd}; 10\phi; 100 \text{ mm}\}$ 100 mm Longitud mínima