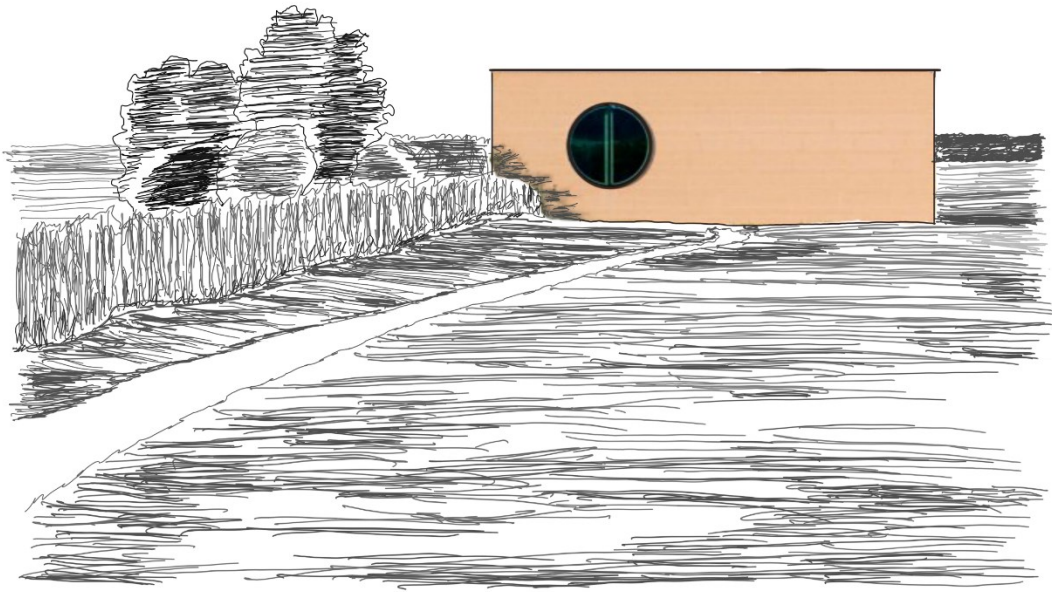


**TIERRA, RESIDUOS Y ARQUITECTURA:
CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE EN CANARIAS CON MATERIALES
DE DESECHO**



Fundamentos de la Arquitectura

5º Curso. Trabajo Final de Grado

Fecha: 22/07/2022

Tutor: Fernando Martínez Soto

Alumno: Javier Martínez Amigó

TIERRA, RESIDUOS Y ARQUITECTURA.
CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE EN CANARIAS CON MATERIALES DE DESECHO

Autor:

Javier Martínez Amigó.

Alumno de Trabajo Final de Grado de la Universidad Europea de Canarias.

Tutor:

Dr. Arquitecto Fernando Martínez Soto

Colaboradores:

Laboratorio de ensayos no destructivos Atlante:

Dr. Arquitecto Carlos A. Ruiz Pérez

Licenciado en Ciencias Químicas Leonardo Padrón Carrillo

Programa de trabajo Final de Grado en Fundamentos de la Arquitectura:

Trabajo integrado proyectivo y de investigación

Universidad Europea de Canarias

Julio de 2022

Agradecimientos

A Fernando Martínez Soto, el tutor que con ilusión ha sabido darme alas para impulsar este trabajo, y que con serenidad me ha recordado los límites. Por sus sabias recomendaciones a la hora de pulir la memoria. Por su devota dedicación a la profesión de compartir sus conocimientos con los futuros arquitectos.

A Juan Diego López Arquillo, por estar tantos años en la primera línea para alentarnos.

A cada uno de los profesores de la Universidad Europea de Canarias, por ser tan grandes profesionales, su dedicación a los alumnos y su implicación en el trabajo por una sociedad más humana, utilizando la arquitectura como arma de unión masiva.

A los investigadores. Gracias por el silencioso trabajo que realizan, secreto propulsor de los avances de la Humanidad.

Al equipo del Laboratorio de ensayos no destructivos Atlante, por abrirme las puertas y poner al servicio de este TFG su casa. Especialmente a su director, Carlos Ruíz Pérez, por ayudarme a planear la línea de ensayos a realizar.

Sin Leonardo Padrón Carrillo este TFG no sería el TFG que es. Por la ilusión, energía y mente científica, gracias a las cuales este trabajo innova y aporta perspectiva en el camino de la consolidación del uso del tapial en la arquitectura.

A Francisco Javier Rodríguez Arteaga, técnico de los laboratorios, por enseñarme el corazón de los ensayos.

A Fermín Font, por su generosidad a la hora de compartir toda su sabiduría sobre los tapiales.

A Daniel Medina, director de La Isla Sostenible, por conseguir que pudiéramos construir nuestro modelo de tapial a escala 1:1 junto a Fermín Font.

A José L. Costa-Krämer, científico del Instituto de Micro y Nanotecnología del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC), por atender a mis cuestiones y compartir desinteresadamente su investigación.

A Jorge y a Bea, por el regalo de las cenizas del Volcán de Cumbre Vieja.

A David Rodríguez Rodríguez, compañero de trabajo que ha estado apoyándome incondicionalmente durante estos cinco años de estudios.

Amigos, gracias por entender mis ausencias.

A Paula, Elena y Mateo, mis hijos. Por la comprensión.

A Blanqui, mi hermana. Por cuidarle mientras yo estudiaba.

A mis padres, por cuidarme siempre.

A Lorena. Por todo.

“La arquitectura es ensuciarse y empujar todos juntos”

Francis Kéré

Índice

Resumen.....	6
Abstract	7
Motivación	9
1. Introducción.....	10
1.1 Planteamiento de la investigación	10
1.2 Marco teórico y metodológico	10
1.3 Hipótesis de la investigación	11
1.4 Objetivos de la investigación.....	11
2. Estado de la cuestión y Corpus.....	12
2.1 Por qué reutilizar	12
2.1.1 Objetivos de desarrollo sostenible de la ONU.....	12
2.1.2 Economía Circular	12
2.1.3 Economía Circular en Canarias.	13
2.1.4 Residuos en Canarias.	13
2.1.5 Residuos insulares.	14
2.1.6 Lista Europea de Residuos (LER).	16
2.2 Por qué construir con tierra.....	17
2.2.1 Ayer y hoy de las construcciones con tierra.....	18
2.2.2 Conceptos generales sobre la construcción con tierra.	26
2.2.3 El encofrado o tapia.....	26
2.2.4 Ejecución del tapial.....	28
2.2.5 Aditivos.	28
3. Desarrollo del trabajo	31
3.1 Tierra en Canarias	31
3.1.1 Litologías de Tenerife	31
3.2 Normativa.....	36
3.3 Desarrollo experimental: Ensayos.....	38
3.3.1 Proceso de selección de ensayos.	38
3.3.2 Normativa aplicable. Ensayos a desarrollar.	39
3.3.3 UNE 103101:1995 Análisis granulométrico de suelos por tamizado	40
3.3.4 Morfología y composición química de la lava del Volcán Cumbre Vieja, obtenidas por el Instituto de Micro y Nanotecnología del Consejo Superior de Investigaciones Científicas	46

3.3.5	UNE 103103:1994 Límite líquido de un suelo. Método del aparato de Casagrande.	49
3.3.6	UNE 103104:1993 Determinación del límite plástico de un suelo.	53
3.3.7	UNE 103300:1993 Humedad de un suelo mediante secado de estufa.	55
3.3.8	UNE-EN 933-8 Ensayo del equivalente de arena.	56
3.3.9	UNE-EN 1097-6 Densidad de las partículas y la absorción de agua.	58
3.3.10	UNE-EN1744-1:2010+A1:2013 Valoración cualitativa del contenido de humus.	62
3.3.11	Resumen resultados de los ensayos a las tierras y cenizas	65
3.3.12	Elaboración de probetas de tierra comprimida.	66
3.3.13	UNE-EN 12697-30:2019 Preparación de probetas mediante compactador	66
3.3.14	UNE 103400: 1993 Ensayo de rotura a compresión simple en probetas de suelo	71
3.3.15	UNE-EN:12504-4:2022 Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos	81
3.3.16	Ejecución de muestra a escala 1:1	85
3.3.16.1	Ejecución del zócalo.	85
3.3.16.2	Ejecución del encofrado.	86
3.3.16.3	Dosificación de las tierras.	87
3.3.16.4	Ejecución del tapial.	89
3.3.17	Ensayos al tapial.	93
3.4	Comparativo con otras investigaciones	96
4.	Conclusiones finales	98
5.	Bibliografía.	100
5.1	Bibliografía principal	100
5.2	Tesis, TFGs, artículos y revistas	101
5.3	Tablas	102
5.4	Imágenes.	102

Resumen

El modelo económico de la Economía Circular tiene como uno de sus objetivos principales el reducir la generación de **residuos y aprovechar al máximo aquellos cuya generación no se haya podido evitar**.

Las medidas del Plan de Acción para una Economía Circular en Europa afectan a diferentes etapas del ciclo de la vida de los productos, entre ellas el aprovechamiento de los residuos mediante su reintroducción en la economía. Una de las áreas que la Comisión considera **prioritarias** para ello es la **construcción y demolición**.

El **Ante Proyecto de Ley de la Economía Circular en Canarias**, recuerda y aborda las consecuencias que tiene para el territorio insular la gran superficie que hay que destinar al **uso de vertederos**.

Asimismo, el **Plan Insular de Residuos de Canarias** permite que los modelos de **gestión de residuos se ajusten con la Economía Circular**. Por ello, en este trabajo de investigación, se dedica un espacio a conocer cómo funciona la gestión de residuos en las Islas y así poder tener una mejor perspectiva de dónde encontrar materiales de desecho.

Este momento histórico en el que, en Canarias, política y sostenibilidad se dan la mano, no puede pasar desapercibido para la arquitectura. De ahí nace uno de los objetivos principales de este trabajo de investigación: **ofrecer un elemento arquitectónico que permita devolver a la Tierra lo que de ella ha salido**.

En este sentido, la tierra es un producto que bien se extrae de la propia excavación en las edificaciones o de obras cercanas, lo que le confiere la cualidad de producto de Kilómetro Cero. Además de esta característica que, junto a otras muchas, la hace sostenible, son varias sus cualidades ligadas a la técnica constructiva del tapial: higroscopicidad, inercia térmica, comportamiento estructural, facilidad de ejecución, economía, ínfimo consumo hídrico y energético, acústica, reciclabilidad o su materialidad (se podría dedicar un TFG sólo a las sensaciones que transmiten las construcciones con tierra).

Todo ello lleva al autor de esta investigación a estudiar las cualidades de la **tierra en las Islas Canarias** (elaborando un mapa geológico de tierras arcillosas en Tenerife) y conocer su **idoneidad para el uso de la técnica del tapial**. Además, se investiga la **posibilidad de utilizar como árido fino** en la dosificación del tapial los residuos de la **ceniza del Volcán Cumbre Vieja de la isla de La Palma**, que recientemente expulsó más de 159 millones de metros cúbicos de lava, cubriendo los núcleos urbanos y terrenos de cultivo de una ceniza mineral que ha tomado el cariz de residuo.

Para ello se ha ideado un concienzudo plan de ensayos de tierras de dos zonas de Tenerife, conociendo así sus cualidades para poder formular las posibles dosificaciones más adecuadas a la hora de construir un tapial que se realizó a escala 1:1, siendo éste también ensayado con técnicas no destructivas

Con tres posibles dosificaciones de cada una de las tierras, se han realizado diferentes probetas que se ensayaron con métodos destructivos y no destructivos.

A pesar de todas las bondades arquitectónicas del tapial, su histórico uso en todo el mundo, incluso en recientes obras arquitectónicas de prestigiosos arquitectos, no existe una normativa en España que lo regule. Por lo que a la hora de desarrollar algunas fases de los ensayos, se ha optado por adoptar propuestas de ejecución de probetas de normas UNE no específicas para tierras no cohesionadas, lo que ha permitido al equipo de esta investigación paladear el

vértigo que produce explorar una senda por primera vez, encontrándose, en algunas ocasiones, con la necesidad de retroceder en el camino para volver a intentarlo de otras maneras.

Todo el material recabado ha permitido generar una serie de resultados que permitirán saber si las cualidades de las tierras de la isla podrían ser aptas para su uso en la arquitectura con tapial, además de conocer si los residuos de la ceniza del Volcán pudieran ser reutilizados en la construcción de tapias.

Abstract

The economic model of the Circular Economy has as one of its main objectives to reduce the generation of **waste and make the most of those whose generation could not be avoided**.

The measures of the Action Plan for a Circular Economy in Europe affect different stages of the life cycle of products, including the use of waste by reintroducing it into the economy. One of the areas that the Commission considers a **priority for this is construction and demolition**.

The **Draft Law on the Circular Economy in the Canary Islands** recalls and addresses the consequences for the island's territory of the large area that must be used as landfills.

Likewise, the **Canary Islands Waste Plan** allows **waste management models to be adjusted with the Circular Economy**. For this reason, in this research work, a space is dedicated to learning how waste management works on the Islands and thus being able to have a better perspective of where to find waste materials.

This historical moment in which politics and sustainability go hand in hand in the Canary Islands cannot go unnoticed by architecture. Hence one of the main objectives of this research work is born: **to offer an architectural element that allows returning to the Earth what has come out of it**.

In this sense, the earth is a product that is either extracted from the excavation itself in the buildings or from nearby works, which gives it the quality of a Kilometer Zero product. In addition to this characteristic that, along with many others, makes it sustainable, there are several qualities linked to the construction technique of rammed earth: hygroscopicity, thermal inertia, structural behavior, ease of execution, economy, negligible water and energy consumption, acoustics, recyclability or its materiality (a TFG could be dedicated only to the sensations transmitted by constructions with earth).

All this leads the author of this research to study the qualities of the earth **on the Islands** (preparing a geological map of clay soils in Tenerife) and to know **its suitability for the use of the rammed earth technique**. In addition, it is being investigated the **possibility of using the ash residues of the Cumbre Vieja also known as the Tajogaite Volcano on the island of La Palma**, which recently expelled more than 159 million cubic meters of lava, covering urban centers and land cultivation of a mineral ash that has taken on the appearance of residue.

To this end, a conscientious testing plan has been devised for earths from two areas of Tenerife, thus knowing their qualities in order to be able to formulate the most appropriate possible dosages when building a rammed earth wall that was carried out on a 1:1 scale, this being also tested with non-destructive techniques.

With three possible dosages of each of the earths, different specimens have been made that were tested with destructive and non-destructive methods.

Despite all the architectural benefits of rammed earth, its historical use throughout the world, even in recent architectural works by prestigious architects, there is no regulation in Spain that regulates it. Likewise, when developing some phases of the tests, it has been decided to adopt proposals for the execution of specimens of non-specific UNE standards for non-cohesive soils, which has allowed the team of this research to savor the vertigo produced by exploring a path for the first time, finding, on some occasions, the need to go back on the road to try again in other ways.

All the material collected has made it possible to generate a series of results that will reveal whether the qualities of the island's land could be suitable for use in rammed earth architecture, in addition to knowing whether the ash residues of the Cumbre Vieja Volcano could be reused in the construction of rammed earth.



Fig. 1: Tapial realizado en julio de 2022 a escala 1:1 con tierras de Tenerife y ceniza del Volcán Cubre Vieja de La Palma

Motivación

Durante el tercer tercio del siglo pasado se vivió un cambio en los hábitos de consumo de los canarios; cambios que dan lugar también a una metamorfosis en los ritmos de producción. El ámbito de la construcción también se ve afectado por estos cambios, viendo cómo se transforma un modelo constructivo de materiales autóctonos, de calidad (en la medida de las posibilidades de los propietarios) y de oficios. Se implanta un nuevo sistema en el que prima la rapidez de la ejecución, con elementos prefabricados y de gran producción procedentes del continente.

El nuevo paradigma de las empresas de construcción a finales del siglo XX y comienzos del XXI es crecer económicamente: a costa de disminuir la calidad de los materiales, sin importar los residuos que se generen ni el daño que haya que hacer al Planeta para ello.

Afortunadamente, este paradigma ha cambiado en la actualidad, impulsado por sectores de la ciudadanía, profesionales y política. Ejemplo de ello son:

- el Plan de Acción para una economía circular en Europa;
- el Anteproyecto de Ley Economía Circular Canarias;
- el Plan Territorial Especial de Ordenación de Residuos de Tenerife (PTEOR);
- el documento “Transformar nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible”, de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), con sus 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

La arquitectura con materiales naturales ha seducido desde hace años al autor de este TFG, tanto como el paradigma (mantra en la Universidad Europea de Canarias) de que la arquitectura tiene que estar al servicio de la naturaleza y de las personas. Este sentir, y la certeza de que es urgente aunar las políticas mencionadas, son el origen de este Trabajo Final de Grado.

La convicción de la necesidad de la recuperación de materiales de desecho para transformarlos en elementos constructivos (entre ellos la tierra), y una necesidad por rescatar técnicas constructivas que han caído en desuso, son la antesala que invita a realizar esta investigación: **la posibilidad de utilizar el tapial aditivado con materiales orgánicos de desecho como elemento arquitectónico en la arquitectura de las Islas Canarias.**

Esas sensaciones que transmite la arquitectura con tierra, que invita a quien la vive a fusionarse con ella, y la ilusión por algún día poder ponerla al servicio del Planeta, han sido el origen y motor de lo que a continuación se detalla.

“Si crees en algo, debes ser lo suficientemente valiente para que, si las decisiones que tomas no siguen a la manada, puedas seguir adelante”

Alejandro Aravena

1. Introducción

1.1 Planteamiento de la investigación

El (mal entendido) progreso ha llevado a nuestro Planeta al límite de sus posibilidades, estando en estos momentos en una situación de deadline que nos obliga a retroceder para poder avanzar.

La arquitectura, igual que lo ha estado históricamente, se posiciona hoy como punta de flecha de este nuevo paradigma. El recuperar técnicas constructivas ancestrales con materiales sanos para el Planeta y para sus habitantes, aplicando el conocimiento actual, hacen del tapial un elemento arquitectónico cuyas cualidades no pueden desdeñarse.

Abrir una puerta al tapial en Canarias es hacerlo al futuro. A un futuro sostenible que pasa por un presente consciente. Abrir una línea de investigación que permita conocer la idoneidad de las tierras canarias para su utilización en esta técnica arquitectónica, es el punto de partida de este Trabajo Final de Grado.

Conocer, además, si el tapial permite la utilización de cenizas proveniente del Volcán Cumbre Vieja, supondría un paso más en el binomio, ya indivisible, de sostenibilidad y arquitectura.

1.2 Marco teórico y metodológico

Se comienza con una fase estudio y recopilación de información referente a las técnicas, historia y arquitectura que permitan conocer la situación pasada y actual del tapial.

En esta primera etapa también se ahonda en la realidad de los residuos en Canarias, pudiendo así conocer diferentes posibilidades de materiales orgánicos que puedan ser incorporados al tapial, y que pudieran mejorar algunas de sus características que repercuten directamente en la confortabilidad de las edificaciones.

Asimismo, se estudiará la geología canaria para conocer la posibilidad de conseguir tierras arcillosas que permitan construir tapiales.

A continuación, se plantea una fase de experimentación. Se realizarán varios ensayos a tierras obtenidas de dos lugares diferentes de la isla de Tenerife. Así podrán conocerse sus características para poder formular diferentes dosificaciones con el árido fino.

Con estas diferentes dosificaciones se realizarán varias probetas que se ensayarán a compresión simple para conocer su resistencia, así como ensayos no destructivos con ultrasonidos. La inexistencia de una normativa que desarrolle el proceso de ejecución de probetas destinadas a ensayar las cualidades de los tapiales, hacen tomar a la palabra “ensayo” un cariz determinante en esta fase. Se investigarán métodos de creación de estas probetas de los que el autor de este trabajo no ha encontrado referencias de trabajos anteriores.

Posteriormente, se ejecutará un tapial a escala 1:1 con las mismas tierras y cenizas. Este elemento también será ensayado con la técnica de ultrasonidos.

Una última fase de análisis y conclusiones permitirá conocer las posibilidades de la utilización del tapial con residuos de ceniza volcánica como árido fino en la arquitectura, bien con datos concluyentes en lo que a su uso inmediato se refiere, o a opciones de nuevas vías de investigación que ayuden a su implantación definitiva.

1.3 Hipótesis de la investigación

La ausencia de una arquitectura de tapial en Canarias, ha llevado al asentimiento generalizado de que las tierras de las islas no son aptas para tal sistema constructivo. La experiencia de varios artesanos y constructores de oficios, así como la investigación de Alejandro Larraz Mora sobre la influencia de la arquitectura castellana en Canarias tras la conquista, inducen a pensar al autor de este trabajo que el tapial en Canarias podría ser una realidad. Lo que le lleva a plantear los objetivos que a continuación se detallan.

1.4 Objetivos de la investigación

El propósito de este Trabajo Final de Grado es determinar la posibilidad de **utilizar el tapial en la arquitectura de las Islas Canarias**. No obstante, este objetivo abre diferentes vías de investigación, que se convierten en objetivos por sí mismos.

Siguiendo una de las ideas troncales de la Economía Circular como es el **aprovechamiento de residuos**, se comprobará la posibilidad de utilizar material de deshecho proveniente de las cenizas del Volcán Cumbre Vieja de la isla de La Palma.

Además se propondrán **otras posibles vías de investigación con residuos orgánicos** que pueden aportar y/o mejorar las características de elementos constructivos. Estudiando las posibilidades reales de captación en la isla de productos que actualmente tienen la finalidad de desecho pero que son potencialmente aprovechables.

Se analizarán mapas geológicos para **conocer la ubicación de tierras arcillosas** en las islas.

El hecho de realizar probetas que simulen el comportamiento del tapial, para ser ensayadas, supondrá un grano de arena más en el **estudio en el proceso de normalización de los ensayos** para tapial. Como ya se comenta en otros puntos de la memoria, no existe una norma española que regule el proceso de ensayos para tapiales. Sí existe normativa al respecto en otros países del mundo, como la BS EN 1052-1 (1999) Methods of test for masonry—determination of compressive strength. British Standards Institution, del Reino Unido o IS 1725 (2013) Stabilized soil blocks used in general building construction—specification (2nd revision). Bureau of Indian Standards, de la India

Se pretende utilizar la información obtenida en el proceso de investigación para ejecutar un tapial modelo a escala 1:1.

Los resultados obtenidos podrán servir para seguir ahondando en el conocimiento del tapial y permitir su implantación en la arquitectura de las islas.

2. Estado de la cuestión y Corpus

2.1 Por qué reutilizar

2.1.1 Objetivos de desarrollo sostenible de la ONU

Hace cinco años, la ONU adoptó un conjunto de objetivos globales para erradicar la pobreza, proteger el planeta y asegurar la prosperidad de todos.

Dos de esos diecisiete objetivos son “Ciudades y comunidades sostenibles” y “Producción y consumo responsables”.

En el desarrollo de dichos objetivos se aportan datos devastadores como que si continuamos los actuales hábitos de consumo, en 2050 se necesitarán tres Planetas para satisfacer nuestras necesidades.

Indica dicho informe que la producción sostenible también pueden contribuir de manera sustancial a la mitigación de la pobreza y a la transición hacia economías verdes y con bajas emisiones de carbono.

Es fundamental para una producción sostenible una Economía Circular

2.1.2 Economía Circular

Según el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, la Economía Circular se define como un modelo económico en el que el valor de los productos, los materiales y los recursos se mantiene en la economía durante el mayor tiempo posible, con el objetivo de reducir la generación de **residuos y aprovechar al máximo aquellos cuya generación no se haya podido evitar**.

Se presenta por tanto como una alternativa sostenible al modelo productivo predominante, que se define por una utilización lineal de los recursos (producir, consumir y tirar residuos), modelo que se ha revelado agresivo con el medio ambiente e insostenible a medio plazo, habida cuenta de la limitación de los recursos disponibles. **El enfoque circular, por tanto, debe tenerse en cuenta tanto en los ciclos biológicos como en los ciclos tecnológicos.**

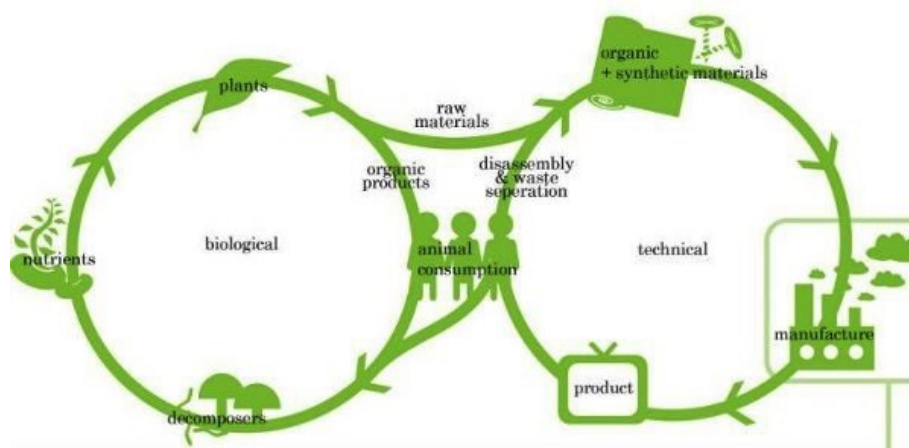


Fig. 2: Imagen e información del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico

En 2015, la Comisión Europea presentó su Plan de Acción para una Economía Circular en Europa, afectando dichas medidas:

- a las diferentes etapas del ciclo de vida de los productos (diseño y producción, consumo, gestión de residuos y aprovechamiento de los recursos contenidos en los residuos mediante su reintroducción en la economía) y,
- a cinco áreas que la Comisión considera prioritarias (los plásticos, el desperdicio alimentario, las materias primas críticas, **la construcción y la demolición** y la biomasa y **productos con base biológica**).

2.1.3 Economía Circular en Canarias. *

Actualmente se está tramitando el Ante Proyecto de Ley de la Economía Circular en Canarias.

En él se abordan las consecuencias de las emisiones, lo que significa ocupar grandes áreas del territorio insular para el uso de vertederos, y se valora lo que significa en un territorio con recursos naturales limitados la recuperación de materia prima, materia orgánica y aguas depuradas.

Entre otros ámbitos de actuación, **la nueva ley prevé generar un sistema de información para integrar la trazabilidad de los residuos en relación con su reutilización**. Aspecto este que facilita en gran medida la utilización de productos de deshecho en la construcción del tapial, en caso de que fuera necesario.

Economía Circular y productos de Kilómetro Cero van de la mano, siendo en este sentido la tierra un producto que bien se extrae de la propia excavación en las edificaciones o se encuentra cerca.

*Información obtenida del Anteproyecto de Ley de la Economía Circular en Canarias.

2.1.4 Residuos en Canarias. *

El Gobierno de Canarias ha elaborado un nuevo plan que se alinea con la estrategia de Economía Circular y con los Planes Directores Insulares de Residuos, que desarrollarán en cada isla el modelo de gestión de residuos del PIRCAN (Plan Insular de Residuos de Canarias) y las ordenanzas municipales. De esta manera, la gestión de residuos se ajustará a todos los niveles con la Economía Circular, tal y como se recoge en la futura Ley Canaria de Economía Circular.

El PIRCAN desarrolla cinco ejes de actuación:

- Fomentar la prevención de la producción de residuos.
- Maximizar la preparación para la reutilización y el reciclaje
- Aumentar la valorización de productos y energía contenidos en los residuos.
- Minimizar la eliminación de residuos en el vertedero y la afección ambiental de las instalaciones existentes.
- Gobernanza, control de gestión, participación y comunicación en materia de residuos.

Una vez aprobado el PIRCAN, su desarrollo es competencia de los Cabildos, que deben o bien modificar o bien aprobar sus Planes Insulares de Residuos, que son los que deben llevar a cabo las actuaciones para conseguir los objetivos marcados en el PIRCAN.

*Información obtenida del Plan Insular de Residuos de Canarias.

2.1.5 Residuos insulares. *

Para tener una mejor perspectiva de dónde encontrar materiales de desecho, es importante conocer cómo funciona su gestión.

Los actuales sistemas de gestión integran las siguientes posibilidades: acumulación en vertederos, incineración y separación en plantas de tratamiento para reciclaje de residuos. Ninguna de las tres opciones es totalmente inocua para el medioambiente, así:

La acumulación en vertederos puede ocasionar contaminación de los suelos y aguas colindantes, además de la emisión de gases tóxicos derivados de la descomposición de algunos residuos.



En cuanto a la incineración, hay que considerar que la combustión de los residuos libera a la atmósfera partículas y gases contaminantes, tales como dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno u óxidos de azufre. Los dos primeros están definidos como gases de efecto invernadero y contribuyen poderosamente al calentamiento global del planeta. Por otra parte, los óxidos de nitrógeno y azufre están implicados en los fenómenos de lluvia ácida.



El reciclaje de muchos materiales (no todo es reciclable) es factible siempre y cuando haya una separación previa adecuada. Es la solución más ecológica, pero tiene también su coste ambiental, ya que los procesos de reciclaje implican un consumo energético importante.



Los Complejos Ambientales quedan definidos en la Ley 1/1999, de 29 de enero, de Residuos de Canarias, como un conjunto de instalaciones en las que se descargan los residuos con destino, según su naturaleza, a la preparación para el transporte posterior a otro lugar, para la valorización, tratamiento o eliminación in situ, así como, en su caso, el depósito temporal previo a las operaciones de valorización, tratamiento o eliminación ex situ.



La Ley de Residuos de Canarias atribuye a los Cabildos Insulares la gestión de estas instalaciones.

En estos centros de tratamiento integral de residuos se procesan diferentes residuos sólidos, como, residuos municipales de los ayuntamientos, envases ligeros, residuos voluminosos, etc.

Los complejos ambientales pretenden centralizar el tratamiento y gestión de residuos domiciliarios en cada una de las islas, introduciendo para ello una serie de infraestructuras que permitan su correcta gestión reduciendo en lo posible el rechazo que irá finalmente a vertedero.

Los complejos ambientales están asociados a una zona de vertido final para los rechazos que se generen de cada una de las líneas de tratamiento.

Los Complejos Ambientales existentes en la Comunidad Autónoma de Canarias son: El Majano y La Dehesa (El Hierro), Mazo (La Palma), El Revolcadero (La Gomera), Arico (Tenerife), Salto del Negro y Juan Grande (Gran Canaria), Zurita (Fuerteventura) y Zonzamas (Lanzarote).

Las Plantas de Transferencia son instalaciones en las que se compactan los residuos procedentes de la recogida domiciliaria, logrando la reducción de su volumen para un posterior traslado a un complejo ambiental de residuos.

La finalidad de una Planta de Transferencia es servir de trasvase mediante compactación entre un sistema de recogida/transporte con vehículos de media y baja capacidad con recorridos cortos, a contenedores de alta capacidad en los que mediante vehículos dotados de equipos de fácil manipulación para la carga y descarga, se realiza el transporte (recorrido largo) hasta el centro de tratamiento de residuos (complejo ambiental), obteniéndose una optimización del coste total de gestión para la zona de influencia de dicha instalación.

Debido al papel estratégico que tienen las plantas de transferencia en la mejora de la eficacia del transporte de residuos, en la actualidad encontraremos estas infraestructuras prestando servicio en las islas de mayores dimensiones como son Fuerteventura, con las plantas PT 1 Tuineje, PT 2 Pájara, PT 3 La Oliva, Gran Canaria con las plantas PT 1 La Aldea de San Nicolás, PT 2 Sta. M^a de Guía y Tenerife con las plantas PT 1 La Guancha, PT 2 La Orotava, PT 3 Arona y PT 4 El Chorrillo.

Los Puntos Limpios son instalaciones adecuadamente equipadas para la recogida y almacenamiento de residuos urbanos, salvo basuras domésticas, y de determinados residuos de origen especial asimilables a urbanos, quedando excluidos los residuos de origen especial que tengan la consideración de peligrosos o industriales, de conformidad con la planificación vigente en materia de residuos.



*Información obtenida de Ley 1/1999 de Residuos de Canarias.

2.1.6 Lista Europea de Residuos (LER).

La Lista Europea de Residuos (LER) es una relación armonizada de residuos que se revisa periódicamente.

Los residuos de la lista se clasifican según los tipos de actividades que generan residuos.

A continuación se nombran aquellos capítulos que, a priori, pudieran tener cabida como aditivos en la construcción del tapial:

(0201) Residuos de la agricultura, horticultura, acuicultura, silvicultura, caza y pesca.

(020102) Residuos de tejidos de animales

(020103) Residuos de tejidos de vegetales

(020106) Heces de animales, orina y estiércol (incluida paja podrida) y efluentes recogidos selectivamente y tratados fuera del lugar donde se generan

(020107) Residuos de la silvicultura

(0301) Residuos de la transformación de la madera y de la producción de tableros y muebles

(030101) Residuos de corteza y corcho

(030105) Serrín, virutas, recortes, madera, tableros de partículas y chapas distintos de los mencionados en el código 03 01 04

(0303) Residuos de la producción y transformación de pasta de papel, papel y cartón

(030307) Desechos, separados mecánicamente, de pasta elaborada a partir de residuos de papel y cartón

(030308) Residuos procedentes de la clasificación de papel y cartón destinados al reciclado

(030309) Residuos de lodos calizos

(030310) Desechos de fibras y lodos de fibras, de materiales de carga y de estucado, obtenidos por separación mecánica

(17) RESIDUOS DE LA CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN (INCLUIDA LA TIERRA EXCAVADA DE ZONAS CONTAMINADAS)

(1701) Hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos

(170101) Hormigón

(170102) Ladrillos

(170103) Tejas y materiales cerámicos

(170107) Mezclas de hormigón, ladrillos, tejas y materiales cerámicos distintas de las especificadas en el código 17 01 06

(1702) Madera, vidrio y plástico

(170201) Madera

(170202) Vidrio

(170203) Plástico

(1703) Mezclas bituminosas, alquitrán de hulla y otros productos alquitranados

(170301)* Mezclas bituminosas que contienen alquitrán de hulla

(170302) Mezclas bituminosas distintas de las especificadas en el código 170301

(170303)* Alquitrán de hulla y productos alquitranados

(1704) Metales (incluidas sus aleaciones)

(170401) Cobre, bronce, latón

(170402) Aluminio

(170403) Plomo

(170404) Zinc

(170405) Hierro y acero

(170406) Estaño

(170407) Metales mezclados

(1705) Tierra (incluida la excavada de zonas contaminadas), piedras y lodos de drenaje

(170504) Tierra y piedras que no contengan sustancias peligrosas

(170506) Lodos de drenaje que no contengan sustancias peligrosas

(1708) Materiales de construcción a partir de yeso

(170802) Materiales de construcción a partir de yeso que no contengan sustancias peligrosas

(2001) Fracciones recogidas selectivamente (excepto las especificadas en el subcapítulo 1501)

(200101) Papel y cartón

(200102) Vidrio

(200138) Madera que no contengan sustancias peligrosas

(2002) Residuos de parques y jardines (incluidos los residuos de cementerios)

(200201) Residuos biodegradables

(200202) Tierra y piedras

El tapial es un elemento constructivo y arquitectónico con muy buenas prestaciones estructurales, térmicas, acústicas y al fuego. Una **posible vía de investigación** sería conocer si mejorarían dichas cualidades con la presencia de aditivos procedentes del vertido. Una cualidad que hace muy valioso al tapial desde el punto de vista de la salud, es su origen natural y orgánico. Cualidad que no se vería afectada por la incorporación de materiales de desecho como los que a continuación se proponen:

- residuos de la silvicultura y tala controlada
- residuos de ladrillos y tejas
- residuos de tierra
- residuos de la ceniza del Volcán Cumbre Vieja de la isla de La Palma

2.2 Por qué construir con tierra

Durante mucho tiempo la tierra ha sido (y es) un elemento de construcción muy importante. En algunas ocasiones ha sido un recurso a mano que sustituye a otros materiales a los que no se tiene acceso (la tierra suele ser un material abundante en la mayoría de las regiones) o simplemente ha sido la elección mejor valorada. Además de la eficiencia económica, energética y las ventajas que como material natural ofrece para la salud, actualmente tan deteriorada a raíz de muchos de los productos que se utilizan en los materiales.

Si bien hasta hace pocos años ha estado ligada a la arquitectura tradicional y vernácula, en los últimos tiempos, la arquitectura con tierra está viviendo un proceso de cambio y transformación, convirtiéndose en un símbolo de la nueva arquitectura contemporánea. Representada en gran parte en las cualidades del tapial: sostenibilidad, higroscopicidad, inercia térmica, comportamiento estructural, facilidad de ejecución, economía, ínfimo consumo hídrico y energético, acústica, reciclabilidad o su materialidad.

El gran paradigma de la arquitectura contemporánea es la sostenibilidad, entendiendo el sentido global del concepto. La construcción con tierra y otros materiales de desecho, colaborarían a afianzar la necesidad de una economía circular inherente a la arquitectura actual. Más aún en un territorio con unas características tan peculiares como el de las Islas Canarias en lo que la gestión de residuos y materiales de kilómetro cero se refiere.

Si bien es cierto que aún queda recorrido por realizar en lo que a normativa técnica se refiere, son muchos los estudios que se están realizando a nivel de tesis doctorales, TFGs y artículos de investigación que están preparando un halagüeño futuro a la construcción con tierra.

2.2.1 Ayer y hoy de las construcciones con tierra

Observando la evolución de la construcción y arquitectura con tierra desde hace 10.000 años hasta nuestros días, se contempla una inusual adaptación de la técnica actual a una tradición que ha demostrado ser efectiva en cuanto a durabilidad, prestaciones y ecología.

A lo largo de todo el mundo existen construcciones que certifican la durabilidad de la técnica del tapial.



Fig.2: Las partes primigenias de la Gran Muralla China fueron construidas con tapial hace más de 4.000 años



Fig.3: Arge Bam en Irán, existen parte de construcciones con 2.500 años de antigüedad.



Fig.4: En el Valle del Draa, Marruecos existen ciudades fortificadas construidas con tierra en el siglo XVIII



Fig.5: Mezquita de Mopti, Mali. 1935



Fig.6: Bazar de Sirdjan en Irán

Romanos y árabes introducen la técnica del tapial en la península ibérica, existiendo actualmente varios ejemplos en arquitectura defensiva. La técnica constructiva se expandió por toda la península para la arquitectura doméstica.



Fig.7: Alcazaba de la Alhambra. Siglo XIII. Granada



Fig.8: Castillo Burmajinar. Siglo X. Jaen



Fig.9: Albarrana octogonal Torre Mochada. Siglo XII. Cáceres



Fig.10: Vivienda en Ayerbe. 2015 Huesca. dobleSTUDIO

A pesar de que **en Canarias ya no se conservan** construcciones en tapial, sí que fue muy extendida a raíz de la conquista de las islas por Castilla. En su libro-artículo “La vivienda en Tenerife a raíz de la conquista. Técnicas constructivas”, Alejandro Larraz Mora describe como hay gran documentación escrita de la época que detalla cómo se construía con tapial. Destacan las Ordenanzas del Cabildo de Tenerife, que dedicaban un apartado al estudio del proceso de elaboración de la fábrica de tapial dedicado a regular el trabajo de los tapiadores (Archivo Municipal de La Laguna- nº 14, Ordenanzas Viejas, Título: “ De los oficiales”).

A continuación se muestra arquitectura contemporánea proyectada, en muchos de los casos, por arquitectos referentes a nivel mundial. Las sensaciones que transmiten gracias al protagonismo de la tierra son, en gran medida, *las culpables* del origen de este TFG.



Fig.11: Almacén para Ricola en Laufen, Suiza.2014 Herzog & de Meuron (imagen de portada)



Fig.12: Centro de Arquitectura de la Tierra.2010.Congo.Francis Kere



Fig.13: Piscina Municipal de Toro. 2010. Vier Arquitectos

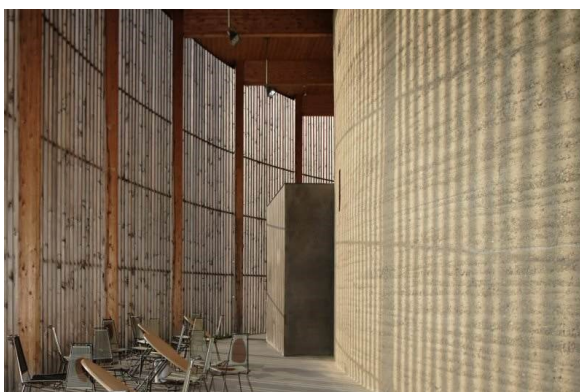


Fig.14: Capilla de la Reconciliación.Berlín. 2000. Reitermann y Sassenroth. Con la colaboración de Martin Rauch



Fig.15: Bodega Lanciego. Álava. 2008 . P. Basañez + D. Gartei



Fig.16: Escuela de Artes Visuales.Oaxaca.2008.Taller Arquitectura Mauricio Roca

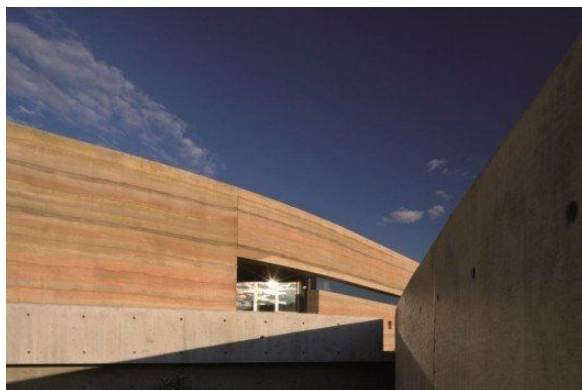


Fig.17: Centro Cultural del Desierto NK'Mip .Canadá.2006.DIALOG



Fig.18: Refugio en la Montaña Tucson.2012. DUST



Fig.19: SanBaoPeng Art Museum. China.2017 .DL Atelier



Fig.20: La Gran Muralla de Western Australia.2014. Luigi Rosselli



Fig.21: Centro de visitantes Sparrenburg. Alemania.2014. Max Dudler



Fig.22: Casa Munita González. Chile.2010 . Arias Arquitectos



Fig.23: Casa Viña. Portugal.2015. Blaanc

2.2.2 Conceptos generales sobre la construcción con tierra.

Composición. Será diferente dependiendo de su procedencia ya que tendrá diferentes componentes según el tipo de arcilla, arena, limo, etc...

No es impermeable. Por lo que ha de ser protegido contra la humedad. Bien con elementos constructivos o con elementos superficiales

Es ecológica. Debido a la escasa contaminación que produce su ejecución.

Es reutilizable. Por lo que no genera desechos una vez demolido

Conserva. La tierra mantiene a otros materiales orgánicos como la madera, gracias a su baja humedad y alta capilaridad. Esta característica será uno de los puntos de arranque de esta investigación a la hora de buscar materiales de desecho que puedan utilizarse como aditivos en los tapiales.

Según Gernot Minke en Manual de Construcción con Tierra, puede Preservar pequeñas cantidades de paja, siempre que no se utilice en una densidad menor de 500 kg/m^3 , debido a la alta capilaridad de la paja cuando se usa en esas proporciones, pudiendo llegar a pudrirse ante una exposición prolongada a la humedad.

Los muros de tierra son higroscópicos, es decir, tiene la capacidad de absorber exceso de humedad del ambiente o, por el contrario, devolverla. Lo que permite un balance de humedad en el ambiente constante. Así lo demuestran diferentes experimentos realizados, como los elaborados por el Instituto de Investigación de Construcciones Experimentales de la Universidad de Kassel.

Las características mecánicas de un tapial van a depender de :

- La composición de los materiales utilizados.
- El grado de humedad.
- La intensidad de la compactación durante su ejecución.

2.2.3 El encofrado o tapia.

El encofrado tradicional consiste en dos tableros paralelos que contendrán las tierras, unidos en su base por unas agujas que evitarán la apertura del mismo. El tamaño de estos tableros es tal que puedan ser manejados con facilidad para ser desplazados, por lo que suelen tener unos 80 cms de alto y 120 cms de largo. Una vez rellenado y desencofrado, la aguja se dejará dentro del tapial o se extraerá, dependiendo por lo general del material que sea. Es este elemento el que le confiere al tapial esa peculiar modulación de puntos que se aprecian al observar el conjunto.

Este sistema de encofrado se ha usado por todo el mundo desde hace siglos.



Fig.24: Grabado en el que se representa la construcción de la muralla de Valencia en el año 1546. Del libro 'Fiesta y urbanismo. Valencia en los siglos XVI y XVII'. Desirée Juliana



Fig.25: Ilustración del álbum de oficios de Cachemira. 1850.

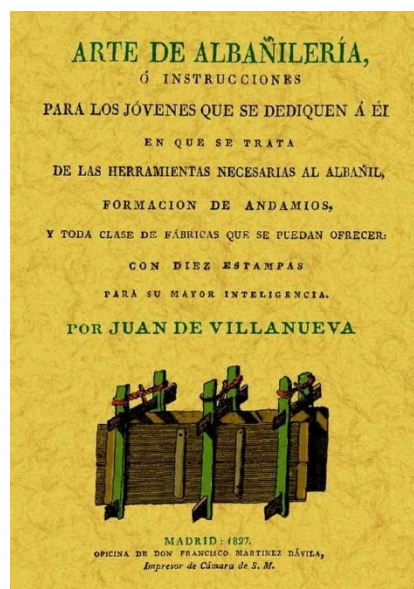


Fig.26: Portada del libro 'Arte de albañilería o instrucciones para los jóvenes que se dediquen a él' del arquitecto Juan de Villanueva 1827

En la actualidad, desde hace años vienen utilizándose encofrados provenientes de la industria del hormigón que permiten un mejor ritmo de trabajo.

2.2.4 Ejecución del tapial.

La técnica es muy sencilla, consiste en ir rellenando un encofrado con capas de tierra que se apisonan. Dependerá de la tecnología al alcance que se utilizarán encofrados más sofisticados o pisones manuales, eléctricos o neumáticos.

Al utilizarse poca cantidad de agua y tratarse de elementos monolíticos se obtienen elementos de poca retracción y gran resistencia.

Los materiales suelen ser:

- Tierra, preferiblemente arcillosa.
- Áridos de diferentes granulometrías.
- Estabilizante, usualmente cal.

Un material fundamental es el agua. Durante el proceso de ejecución hay que mantener un nivel adecuado de humedad en el conjunto, sin que llegue a formarse barro. La excesiva carencia de agua puede crear zonas con distintos niveles de compactación, mientras que un exceso tendrá como resultado un material demasiado poroso.

El espesor de las capas va a variar entre cada 10 o 15 centímetros hasta 50 o 80 centímetros, dependiendo de la técnica de encofrado utilizada. La parte superior de la capa suele estar algo más húmeda que la inferior, por lo que pudieran aparecer fisuras debido a una ligera retracción en la parte superior de la misma. Por ello hay técnicas que recomiendan la aplicación de un mortero de cal entre capa y capa. Al tener la cal un proceso de curado de semanas, se mantiene plástico hasta que la tierra deja de retraerse.

2.2.5 Aditivos.

Aditivando la tierra pueden mejorarse algunas características del tapial. No obstante, hay que tener en cuenta que algunos aditivos que mejoran ciertas cualidades, podrían empeorar otras. Así podría suceder con algunas fibras naturales que mejoran la resistencia a tracción y compresión pero, si no se dosifican correctamente, reducirían la cohesión y aumentarían la retracción.

Para reducir la retracción y aumentar la compresión:

- Arena. Reduce la retracción producida por la humedad, retracción que también dependerá del diámetro de la arena y de la composición de la tierra.

Por ejemplo para una tierra con 50% de arcilla y 50% de limo, al ser mezclada con arenas de diámetro de 0,25 a 1,00 mm alcanza antes un promedio de retracción que con un diámetro de 0 a 2,00 mm, según pruebas realizadas por el Laboratorio de Investigación de Construcciones Experimentales de Alemania.

- Fibras. También reducen la retracción ya que permiten reducir el contenido de arcilla y absorben parte del agua. Estas fibras colaboran en mejorar la cohesión de la mezcla. Algunas de las más utilizadas son paja, coco, bambú, sisal (fibra del agave) o paja.

- Cal. Se utiliza como estabilizador de la arcilla para evitar el aumento de volumen de ésta. Puede interferir en la cohesión entre la tierra y los minerales, por lo que cuanto más minerales hayan, más cantidad de cal hay que añadir.

Son dos los tipos de cales que de manera más generalizada se han utilizado y se utilizan en construcción:

- La cal aérea, procedente de una caliza pura (carbonato de calcio)

- La cal hidráulica, que procede de una caliza marga (con mayor porcentaje de presencia de arcilla que la aérea).

En la cal aérea, cuando se produce la cocción del carbonato cálcico, se transforma en óxido de cal, al que se le añade agua (apagado de la cal) para transformarse en hidróxido cálcico. En el momento en que se elabora el mortero de cal, al añadirle agua comienza el proceso de carbonización, proceso lento que dura meses y que precisa tanto del agua del mortero como del gas carbónico del aire. Una vez desaparece el agua del mortero, el proceso continúa con el vapor de agua del ambiente. De ahí su término de aérea.

Una de las cualidades principales de las cales aéreas es su plasticidad, lo que hace que tengan muy buena respuesta ante las retracciones.

En el proceso de cocción de la cal hidráulica, los elementos que conforman la arcilla, como hierro, aluminio o sílice se combinan con el calcio de la caliza, formando ferro-aluminatos o silicatos de calcio. Éstos son los elementos que en contacto con agua van a formar hidratos.

La **cal hidráulica** tiene un buen **comportamiento ante la compresión**, por lo que suelen ser **las más utilizadas en los tapiales**.

Dentro de las cales hidráulicas, las más frecuentes son las NHL 5, con una resistencia mínima a la compresión a los 28 días de 5 MPa. El otro tipo de cal hidráulica es la NHL 3,5, con menor porcentaje de arcillas en la caliza de origen y una resistencia a la compresión a los 28 días de 3,5 MPa

El proceso de endurecimiento de la cal es muy lento, por lo que meses después de su ejecución puede seguir aumentando la resistencia del tapial. Por ello es importante mantener la humedad y protegerlo del viento y asoleamiento.

- Estiércol animal. El intercambio de iones entre estiércol y arcilla producen un efecto estabilizador en ésta.

- Minerales. La adición de ciertos minerales puede mejorar la resistencia a compresión del tapial considerablemente.

Por ejemplo minerales ricos en montmorillonita, como la bentonita, pueden aumentar la resistencia a compresión el doble.

Para aumentar el aislamiento térmico:

- Minerales. Hay que analizar las proporciones adecuadas para evitar la retracción del conjunto a la hora de añadir minerales que aumentan la capacidad de aislamiento térmico.

Perlita u otros minerales de origen volcánico son los más recomendados.

- Corcho natural. Se trata de un material de baja densidad con cualidades aislantes de sobra conocidas

- Madera. Restos de madera triturados pueden aumentar la capacidad aislante térmica. Si bien hay que tener en cuenta el riesgo de putrefacción y aparición de moho.

3. Desarrollo del trabajo

3.1 Tierra en Canarias

Como ya se ha indicado en otros puntos del trabajo, la tierra utilizada en tapial ha de ser arcillosa. Por ello a continuación se exponen mapas geológicos de las islas donde se indican los lugares donde encontrar los diferentes tipos de tierras arcillosas existentes en el territorio.

Para ello se ha analizado el mapa geológico de Tenerife y se han seleccionado las composiciones que a continuación se indican. Dicho mapa geológico se realizó mediante un convenio entre el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) y GRAFCAN en el año 2003. Posteriormente en 2010 se actualizó y generó la base de datos gráfica y alfanumérica del Mapa Geológico Digital Continuo de Canarias. Para su elaboración se utilizó como información de base el Mapa Geológico Nacional (MAGNA).

3.1.1 Litologías de Tenerife

Brecha basáltica polimíctica [32]

Es la unidad de transición entre la Formación tabular y los edificios Inferior y Carrizales. Constituye un nivel muy continuo que se extiende desde la degollada de la Hoya de la Cumbre hasta el oeste de Masca.

Su espesor es bastante constante, entre 10 y 15 m, y está compuesta por basaltos diversos y fragmentos de diques basálticos, dentro de una matriz arcilloso-arenosa fina. No hay una estructuración interna muy marcada lo que indica un depósito caótico de avalancha.

Depósitos de ladera y conos de deyección [208]

Se encuentran en todas las laderas de relieves escarpados de la isla. Son depósitos de vertiente que constituyen los coluviones y los depósitos de abanicos o conos de deyección generados a la salida de algunos barrancos. Los depósitos de vertiente están constituidos por una acumulación caótica de cantos y bloques angulosos de tamaños muy heterogéneos, entremezclados con una matriz fina de arenas y arcillas. En sus partes bajas presentan una transición a los depósitos de relleno de fondo de valle.

Depósitos sedimentarios indiferenciados [209]

El afloramiento más importante es el de Tegueste, que se extiende a lo largo de la base del escarpe del Macizo de Anaga. Otro segundo afloramiento de importancia es el de la isla baja de Buenavista, donde presenta una longitud de casi 5 km.

Son depósitos detríticos de génesis diversa, relacionados con suelos piroclásticos descompuestos. Están formados por lentejones de bloques, gravas, arenas y productos arcillosos, procedentes de la degradación de materiales volcánicas.

Depósitos aluviales y de fondo de valle [213]

Son similares a los del no 217 de leyenda, salvo que se localizan en zonas de cauces más estrechos. Están constituidos por paquetes de gravas, arenas, arcillas y limos de colores diversos, generados por aguas de arroyos.

Depósitos de ladera indiferenciados [214]

Los principales afloramientos se encuentran en la península de Teno, en las laderas bajas del macizo basáltico. Son depósitos detríticos de génesis diversa (fondos de valle, abanicos, etc.) constituidos por lechos y lentejones de bloques, gravas, arenas y arcillas procedentes de la degradación de materiales volcánicos.

Suelos [215]

La mayoría son depósitos arenoso-arcillosos desarrollados como alteración de coladas y piroclastos. El afloramiento más importante es, sin duda, el que ocupa la depresión de La Laguna. Tiene unas dimensiones de 6 km de longitud por 4 km de anchura, en su parte mayor, y se encuentra ligado a los depósitos lagunares residuales de la antigua laguna.

Sedimentos lacustres [216]

Se encuentran en La Laguna y parte baja del valle de Las Mercedes. Es una unidad residual de la antigua gran laguna que había en este lugar. Están formados por limos arcillosos con ausencia de granulometrías gruesas y potencia variable hacia el centro del valle, que pueden llegar hasta los 20 m.

Depósitos de barranco/rambla [217]


En el fondo de la mayoría de los barrancos, sobre todo en el curso bajo, hay depósitos de cantos redondeados y bloques rodados de todos los tipos de rocas volcánicas que afloran en la cuenca.


La zona donde presentan mayor desarrollo es en el valle de Güimar, donde llegan a tener espesores visibles de más de 100 m, y según datos de sondeos, de hasta 300-400 m. Son grandes conos de deyección de los barrancos principales, especialmente del barranco de Badajoz, entre los que se intercalan coladas básicas delgadas.

En base a estas litografías, el autor de este TFG, destaca en el mapa geológico de Tenerife cada uno de los lugares donde se localizan estas tierras con contenido de arcilla.

A pesar de no encontrarse señaladas en el mapa, existen varios lugares en la isla cuyas tierras tienen componentes arcillosos que pueden ser utilizados en la construcción con tapial. Este hecho se corrobora con una de las tierras escogidas para ensayar y realizar el tapial a escala 1:1, con las tierras de la zona de Tabaiba, en el sureste de la isla.

Se recogerán tierras de dos lugares diferentes de la isla de Tenerife, así como árido fino proveniente de las cenizas de la reciente eclosión del Volcán Cumbre Vieja de la isla de La Palma.

 Tierras de El Camino Tornero de La Laguna, junto a antigua fábrica de tejas. A priori, uno de los tipos de suelo más arcillosos de la isla, según el mapa geológico.

 Tierras de Tabaiba Alta, lugar no destacado en el mapa geológico por composiciones arcillosas.

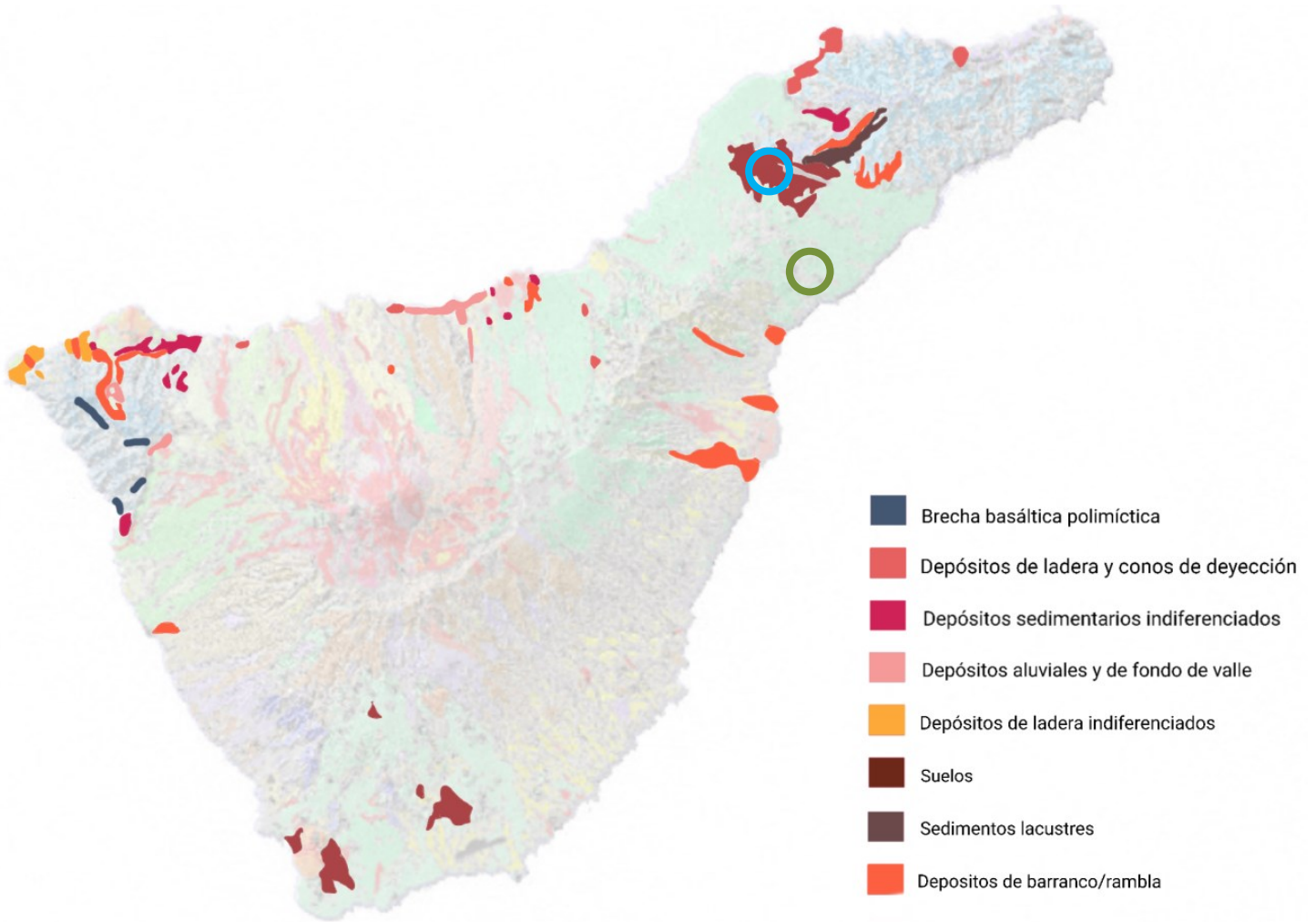


Fig.27: Mapa geológico de Tenerife con tierras minerales arcillosos

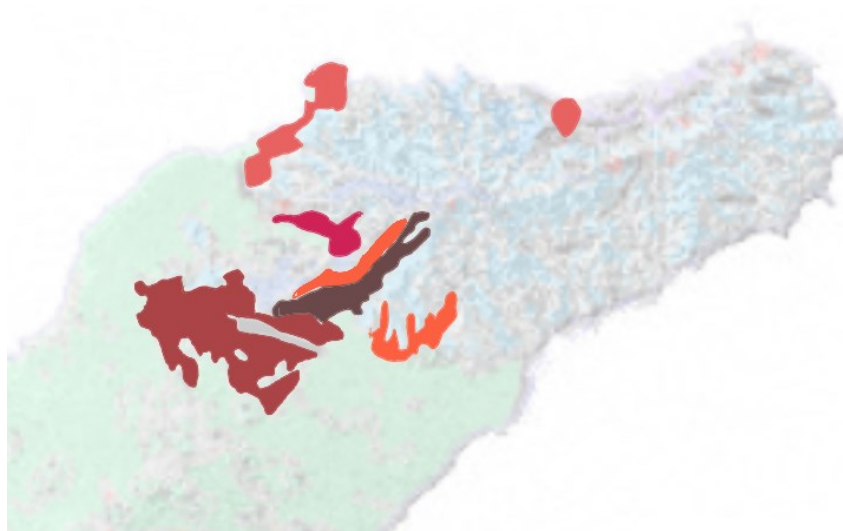


Fig.28: Zona Noreste

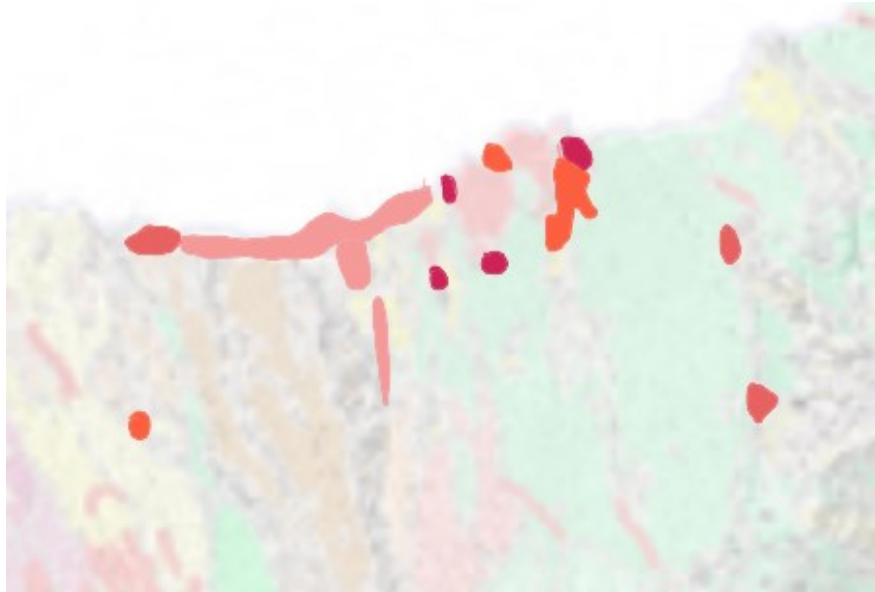


Fig.29: Zona Norte



Fig.30: Zona Oeste

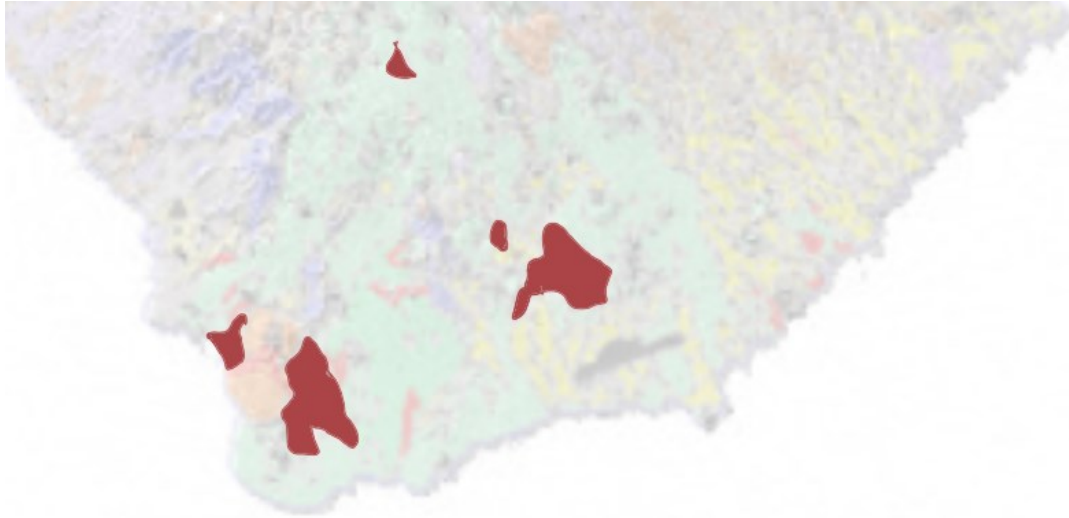


Fig.31: Zona Sur

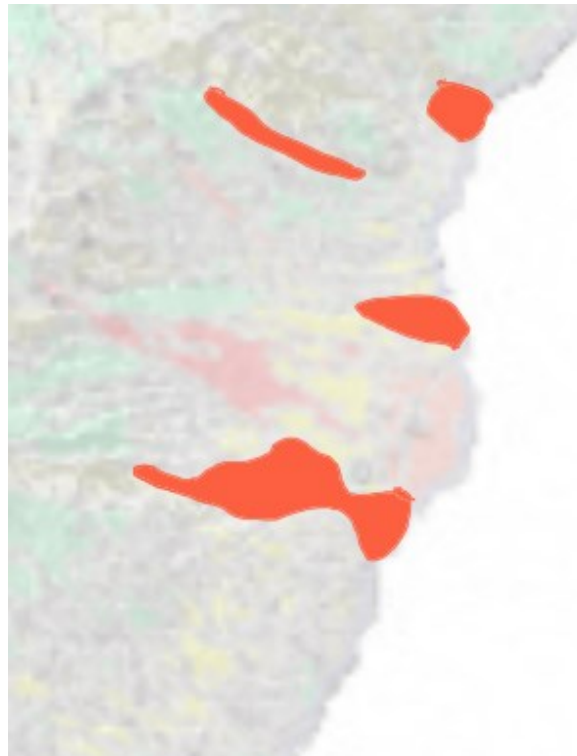


Fig.32: Zona Este

3.2 Normativa.

No existe una normativa española que defina las características del tapial en lo que a proceso constructivo, características finales o ensayos se refiere.

Sí que puede encontrarse normativa en numerosos países americanos, asiáticos o africanos.

A continuación se muestra un cuadro resumen de las normativas del tapial, obtenido de Las normativas de construcción con tierra en el mundo. de J. Cid, F. R. Mazarrón y I. Cañas.

Pais/Grupo	Norma/Reglamento	REF.	EST.	Técnica	Campo de aplicación	Selección suelos	Requisitos productos	Ensayos	Fabricación	Construcción	Diseño	
Brasil 1	NBR 8491, 1986.	7	x	Bloque comprimido macizo	Condiciones exigibles para recibir los bloques	x	x					
	NBR 8492, 1986.	8			Ensayos de resistencia a compresión y absorción de agua para bloques				x			
	NBR 10832, 1989	9						x		x		
	NBR 10833, 1989	10		Bloque comprimido macizo y perforado	Procedimiento de fabricación con prensa manual/hidráulica	x			x			
	NBR 10834, 1994.	11		Bloque comprimido perforado sin función estructural.	Condiciones de recepción	x	x					
	NBR 10835, 1994	12			Forma y dimensiones de los bloques		x					
	NBR 10836, 1994	13			Ensayos de resistencia a compresión y absorción de agua				x			
	NBR 12023, 1992	14		Bloques suelo-cemento	Procedimientos de ensayos				x			
	NBR 12024, 1992	15							x			
	NBR 12025, 1990	16							x			
	NBR 13554, 1996	17							x			
	NBR 13555,1996	18							x			
NBR 13553, 1996	19	Pared monolítica sin función estructural	Condiciones exigibles para los materiales para paredes monolíticas sin función estructural.	x	x							
Colombia 2	NTC 5324,2004	20	x	Bloques macizos de suelo-cemento para muros y divisiones.	Caracterización y métodos de ensayo de los bloques macizos suelo-cemento.	x	x	x				
EEUU 3	NMAC, 14.7.4, 2004	21		Adobe, Bloques de tierra comprimida y tapial	Reglamento de construcción	x	x	x		x		
4	ASTM E2392 M-10	22		Adobe, tapial	Guía para construcción de sistemas con tierra	x		x	x	x		
España 5	UNE 41410:2008	23		Bloques de tierra comprimida	Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo	x	x	x				
Francia 6	XP P13-901,2001	24		Bloques de tierra comprimida	Terminología, dimensiones y métodos de ensayo	x	x	x				
India 7	IS 2110 : 1980	25	x	Pared in-situ de suelo-cemento	Especificaciones técnicas para paredes no mayores de 3,2 m de altura y anchura >300mm muros de carga o >200mm particiones.	x	x			x		
	IS 1725 : 1982.	26	x	Bloques de tierra comprimidos estabilizados.	Requisitos y pruebas para bloques de tierra de uso en construcción en general. Procedimientos de ensayos.	x	x	x				
	IS 13827 : 1993	27		Adobe y tapial	Directrices para la mejora de la resistencia sísmica de edificios de tierra		x			x		

Pais/Grupo	Norma/Reglamento	REF.	EST.	Técnica	Campo de aplicación	Selección suelos	Requisitos productos	Ensayos	Fabricación	Construcción	Diseño	
Regional África 12	ARS 670, 1996	39		Bloques de tierra comprimida	Terminología BTC.	x						
	ARS 671, 1996	40			Clasificar los BTC							
	ARS 672, 1996	41			Clasificación de morteros de tierra.							
	ARS 673, 1996	42			Definir formas de albañilería							
	ARS 674, 1996	43			Requisitos de BTC ordinarios	x	x					
	ARS 675, 1996	44			Requisitos aplicables a BTC vistos	x	x					
	ARS 676, 1996	45			Requisitos de morteros ordinarios		x					
	ARS 677, 1996	46			Requisitos de morteros vistos		x	x				
	ARS 678, 1996	47			Requisitos para albañilería revestida						x	x
	ARS 679, 1996	48			Requisitos para albañilería vista						x	x
	ARS 680, 1996	49			Estado del arte fabricación BTC	x				x		
	ARS 681, 1996	50			Estado del arte para morteros tierra.	x				x		
	ARS 682, 1996	51			Estado del arte para construcción						x	
	ARS 683, 1996	52			Pruebas requeridas	x	x					
Sri Lanka 13	SLS 1382-1:2009	53	x	Bloques de tierra comprimida	Requerimientos	x	x					
	SLS 1382-2:2009	54		Bloques de tierra comprimida	Métodos de ensayo			x				
	SLS 1382-3:2009	55		Bloques de tierra comprimida	Guía sobre producción, diseño y construcción				x	x	x	
Túnez 14	NT 21.33:1996	56		Bloques de tierra comprimida	Especificaciones para BTC ordinarios, características geométricas, físico-químicas...		x	x				
	NT 21.35:1996	57			Definición y clasificación de BTC		x					
Zimbabue 15	SAZS 724, 2001.	61		Tapial	Guías para el diseño, construcción y ensayos para estructuras de tapial.	x	x	x		x	x	
Kenya 8	KS 02-1070:1,1999.	30	x	Bloques de suelo estabilizados con cemento o cal	Requisitos para la construcción con este bloque	x	x	x				
Nueva Zelanda 9	NZS 4297, 1998.	32		Adobe, bloque comprimido, tierra vertida, tapial	Diseño estructural y de durabilidad de los edificaciones de tierra					x	x	
	NZS 4298, 1998.	33			Caracterización de materiales y especificaciones de construcción para el uso de tierra cruda. Procedimientos de ensayos	x	x	x	x	x		
	NZS 4299, 1999.	34		Adobe, bloque comprimido, tapial	Requisitos de diseño y construcción para adobe, bloques comprimido o tapial que no necesitan diseño específico.						x	x
Perú 10	NTE E 0.80, 2000	35		Adobe	Requisitos para la construcción de adobe simple y adobe estabilizado	x	x	x	x	x	x	
11	NTP 331.201, 1979	36	x	Adobe estabilizado con asfalto	Definiciones, condiciones generales y requisitos		x	x	x			
	NTP 331.202, 1979.	37			Procedimientos de ensayo	x						
	NTP 331.203, 1979.	38			Muestreo y recepción.		x					

Fig.33: Normativas del tapial

3.3 Desarrollo experimental: Ensayos.

3.3.1 Proceso de selección de ensayos.

La ausencia de una descripción de las características que han de cumplir las construcciones con tapial en el Código Técnico de la Edificación o en las Normas UNE, dejan un vacío que conlleva a la incertidumbre de qué ensayos debieran realizarse.

Para ello se plantean las características a conocerse sobre las tierras a utilizar.

En base a la bibliografía consultada, planificación con el tutor del TFG y los técnicos de laboratorio, se detallan las características de las tierras y áridos que debieran conocerse para poder decidir posteriormente las dosificaciones utilizadas en el tapial. En una primera aproximación se barajan las siguientes opciones:

- granulometría
- sedimentometría
- límite líquido
- límite plástico
- límite de retracción y contracción
- mecánica de suelos (límites de Atterberg y Carta de Casagrande)
- densidad
- humedad natural
- peso específico
- cambio de volumen
- deformabilidad
- expansibilidad
- colapsabilidad
- permeabilidad
- ensayo de corte directo
- compresión/tracción
- módulo elástico o de Young
- coeficiente de Poisson
- límites de rotura

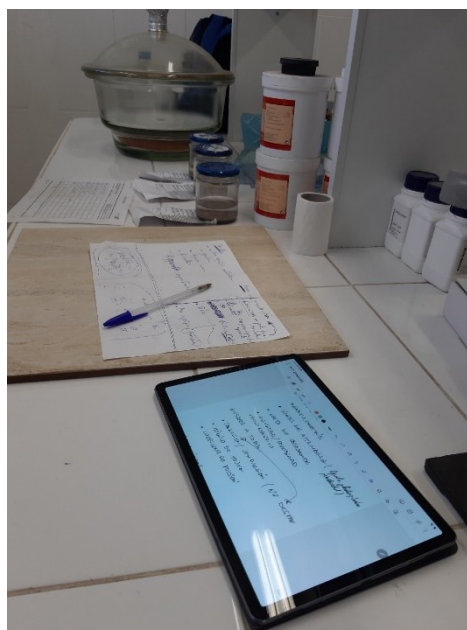


Fig.34: Planificación de ensayos en laboratorio

3.3.2 Normativa aplicable. Ensayos a desarrollar.

Finalmente los ensayos a realizar son los siguientes:

UNE 103101:1995

Análisis granulométrico de suelos por tamizado.

UNE 103103:1994

Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande.

UNE 103104:1993

Determinación del límite plástico de un suelo.

UNE-EN 933-8:2012+A1:2015/1M:2016

Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena.

UNE-EN 1097-6:2014

Ensayos para determinar las propiedades mecánicas y físicas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de partículas y la absorción de agua.

UNE-EN 12504-4:2022

Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos. (onda P directa sobre el material)

UNE-EN 1744-1:2010+A1:2013

Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico. Apdo. 15.1 (valoración cualitativa del contenido de humus)

UNE-EN 12697-30:2019

Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo. Parte 30: Preparación de probetas mediante compactador de impactos. (Energía de compactación: 20 golpes/cara. Maza: $4\ 535 \pm 15$ g; H caída: 355 mm)

UNE 103400:1993

Ensayo de rotura a compresión simple en probetas de suelo. (rotura uniaxial probetas confinadas para lectura de comportamiento carga-deformación)

Otra normativa aplicable:

UNE-EN 196-7:2008: Métodos de ensayo de cementos. Parte 7: Métodos de toma y preparación de muestras de cemento.

UNE-EN 459-1: 2011: Cales para la construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad.

A continuación se describen los ensayos realizados según las recomendaciones de las Normas UNE.

El examen de la textura, el color, la resistencia seca del terrón del suelo, el patrón de grietas en la superficie del suelo y el ancho de las grietas, la prueba de sensación al tacto y la prueba de lavado representan algunas de las pruebas de campo para la evaluación preliminar de la idoneidad del TIPO DE ÁRIDOS. Estas pruebas dan pistas definitivas sobre la idoneidad para la construcción del tapial canario de tierra apisonada. Los detalles de estas pruebas de campo se describen posteriormente entre otros.



Fig.35: Muestras: tierras de camino El Tornero, Tabaiba y áridos de cenizas de La Palma

3.3.3 UNE 103101:1995 Análisis granulométrico de suelos por tamizado

Objeto:

Determinar los diferentes tamaños de las partículas de un suelo y obtener la cantidad, expresada en tanto por ciento de éstas, que pasan por los distintos tamices de la serie empleada.

Aparatos y material:

- Una serie de tamices de malla cuadrada y tejido de alambre que cumplan con lo especificado en la Norma UNE 7 050-21). Una serie de tamices de uso frecuente podría ser la de abertura de malla en mm siguiente: 100; 80; 63; 50; 40; 25; 20; 12,5; 10; 6,3; 5; 2; 1,25; 0,40; 0,160 y 0,080.
- Una balanza de unos 10 kg de capacidad que aprecie 1 g y otra de unos 200 g de capacidad y que aprecie 0,01 g.
- Un agitador mecánico o batidora.
- Secadores, con circulación de aire frío o caliente, con temperatura regulable hasta 60 °C.
- Una estufa de desecación, con temperatura regulable hasta 115 °C.
- Un mortero con manilla, que tenga la parte inferior de goma, y un mazo del mismo material para desmenuzar los terrones compuestos por las partículas del suelo.
- Un vaso de precipitados, de unos 600 ml de capacidad.
- Un cepillo y una brocha, para limpiar las mallas de los tamices.
- Agua destilada.

- Solución de hexametáfosfato sódico al 4%.
- Cuarteadores de diferentes pasos.

Preparación de la muestra:

Del suelo recibido se separa mediante cuarteo la cantidad necesaria hasta obtener una muestra representativa para la realización del ensayo.



Fig.36: Operación de cuarteo (paso 1)



Fig.37: Operación de cuarteo (paso 2)

A continuación se dan unos valores que pueden servir de orientación de la cantidad de muestra a tomar en función del tamaño máximo de la partícula de suelo:

Tamaño máximo de la partícula del suelo en mm	Cantidad mínima de muestra que debe quedar retenida en el tamiz de 2,00 mm, en gr
10	500,00
20	1.000,00
25	2.000,00
40	3.000,00
50	4.000,00
80	5.000,00
100	8.000,00

Tabla 1: cantidad de muestra a tomar en función del tamaño máximo de la partícula de suelo

La muestra se seca al aire, en estufa o por medio de secadores con circulación de aire frío o caliente, pero siempre a menos de 60 °C, hasta que aquélla se pueda deshacer por medio del mortero o mazo de goma.

Se anota su masa con una precisión de 1 gr.

Procedimiento:

La muestra así preparada se tamiza por el 20,0 mm (Norma UNE 7 050-2), hasta que pasen todas las partículas que realmente sean inferiores a la abertura del tamiz. De la fracción que pasa por este tamiz, se separa mediante cuarteo una porción de unos 2 kg. Se anota su masa con una precisión de 1 gr. En el caso en que la fracción que pasa por dicho tamiz tenga una masa próxima a 2 kg, no es necesaria la operación de cuarteo.



Fig.38: Operación de tamizado

Se tamiza esta porción por el 2,00 mm, hasta obtener dos fracciones. La fracción retenida se lava sobre este tamiz, recogiendo todo el material que pasa por él. Éste se decanta, se deseca en estufa, se deja que se enfríe para que se equilibre su temperatura, y se agrega a la fracción que pasa por dicho tamiz. La fracción retenida se deseca en estufa hasta masa constante, se deja enfriar para que se equilibre su temperatura, y se tamiza por la serie elegida, entre el 20,0 mm y el 2,00 mm. Se anota la masa de la porción retenida en cada uno de ellos.



Fig.40: Secado en estufa

La fracción inferior a 2 mm se cuartea, hasta obtener dos porciones de unos 80 gr cada una, por tratarse de suelos arcillosos (en el caso de suelos arenosos se separarán unos 150 gr) . De una de las porciones se toman unos 20 g, se determina la humedad higroscópica, **es decir la humedad que alcanza esa porción de suelo en equilibrio con la atmósfera del laboratorio.**

De la otra porción, se toman unos 50 gr en el de arcillosos o limosos, anotando su masa. Se pasan a un vaso de precipitados y se añade lentamente, al mismo tiempo que se agita con una varilla de vidrio, unos 125 cm³ de solución de hexametáfosfato sódico al 4%. Se deja en reposo durante unas 18 h. Se pasa la suspensión al vaso de agitación o al recipiente de cristal. Se añade agua destilada hasta unos 5 cm del borde y se agita lentamente la suspensión durante 1 min a no menos de 10.000 r.p.m. en el caso de disponer del agitador mecánico y durante unos 5 min en el caso de emplear el recipiente de cristal.

Si únicamente se realiza el análisis granulométrico por tamizado, se vierte esta suspensión sobre el tamiz 0,080 mm y se lava hasta que se elimine todo el material que sea inferior a 0,080 mm. Se traslada lo retenido en el tamiz a una cápsula o bandeja y **se deseca en estufa** hasta masa constante. Se deja enfriar hasta que se equilibre su temperatura y se tamiza por la serie elegida, entre el 2,00 mm y el 0,080 mm.

Se anota la masa de la cantidad retenida en cada tamiz.

Obtención de los resultados:

Con los datos obtenidos, siguiendo los pasos indicados en el punto 6 de la norma UNE 101103, se obtendrán:

- Los gr retenidos parciales en cada tamiz.
- Los gr retenidos totales.
- Los gr que pasan en la muestra total.
- El porcentaje que pasa en la muestra total.

Con las indicaciones del punto 6 también se obtendrá la **humedad higroscópica** (humedad que mantiene el suelo en equilibrio con el vapor de agua atmosférico).

Arido ceniza del Volcán Cumbre Vieja	Tierra Camino El Tornero	Tierra Tabaiba
%	%	%
0,98	16,57	10,56

Tabla 2: Humedad higroscópica de las tierras y árido

Análisis granulométrico por tamizado en suelos

	Arido ceniza del Volcán Cumbre Vieja	Tierra Camino El Tornero	Tierra Tabaiba
Tamiz (mm)	% que pasa	% que pasa	% que pasa
10,00	100	100	100
5,00	98	99	100
2,00	87	97	99
1,60	80	96	97
1,25	73	95	97
0,63	45	90	85
0,40	26	86	77
0,32	19	85	74
0,25	14	82	70
0,16	7	79	64
0,08	3	75	57

Tabla 3: Análisis granulométrico por tamizado en suelos

Con los referidos datos, podrá trazarse la curva granulométrica, en base al tamaño de las partículas, el porcentaje que pasa y el que retiene.

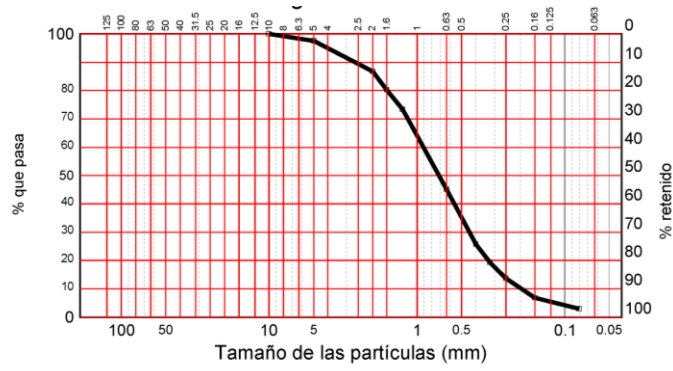


Fig.41: Curva granulométrica del árido de La Palma

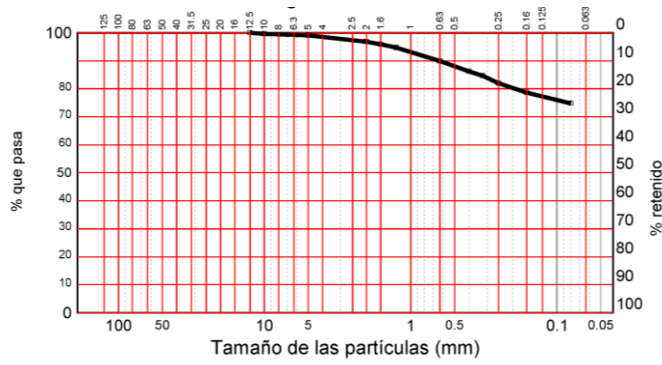


Fig.42: Curva granulométrica de la tierra de El Tornero

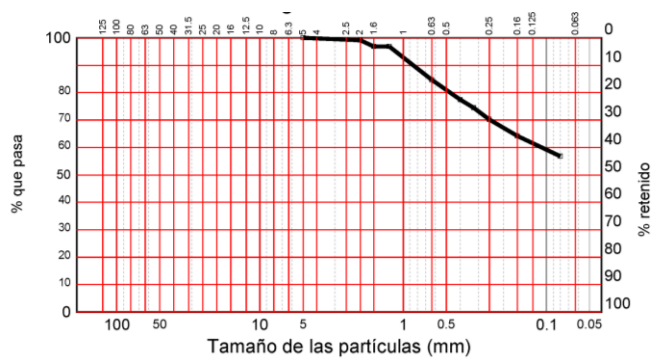


Fig.43: Curva granulométrica de la tierra de Tabaiba Alta

Asimismo, con los datos obtenidos, se podrá calcular:

-El coeficiente de uniformidad $C_u = D_{60}/D_{10}$

-El coeficiente de concavidad $C_c = D_{30}^2/(D_{60} \cdot D_{10})$

-El módulo granulométrico $M_g = \Sigma \text{retenidos} / 100$

	Arido ceniza del Volcán Cumbre Vieja	Tierra Camino El Tornero	Tierra Tabaiba
Coficiente de uniformidad	4,76	6,00	8,13
Coficiente de concavidad	1,05	1,50	1,11
Módulo granulométrico	5,48	1,17	1,80

Tabla 4: Características granulométricas

Conclusiones:

A la vista de los resultados del ensayo se comprueba que se trata de tierras con una variedad granulométrica rica que favorece una pequeña heterogeneidad que favorece la cohesión de los componentes del tapial. Por el contrario, el árido de La Palma tiene una homogeneidad en su granulometría que es lo que se precisa de dicho componente en el proceso de cohesión.

3.3.4 Morfología y composición química de la lava del Volcán Cumbre Vieja, obtenidas por el Instituto de Micro y Nanotecnología del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC).

A raíz de una nota de prensa publicada por el CSIC, el autor de este TFG se pone en contacto con el investigador José L. Costa-Krämer, quien ha liderado el proyecto de investigación para obtener la morfología y composición química de la lava mediante técnicas de microscopía electrónica (Scanning Electron Microscopy) y difracción de rayos X (X Ray Diffraction).

Informado sobre la naturaleza del Trabajo Final de Grado, José L. Costa-Krämer comparte la información que se describe a continuación.

La muestra ha sido procesada con dos de las tecnologías más punteras disponibles en el Instituto de Micro y Nanotecnología: el microscopio electrónico de barrido FEI Verios 460 (SEM) y el difractor de Rayos X de Bruker D8 Discover (XRD).

Con el SEM y mediante espectroscopia dispersiva de energía de rayos X (EDX), se han identificado y cuantificado (de mayor a menor presencia) los elementos químicos (átomos de una misma clase) presentes en la lava.

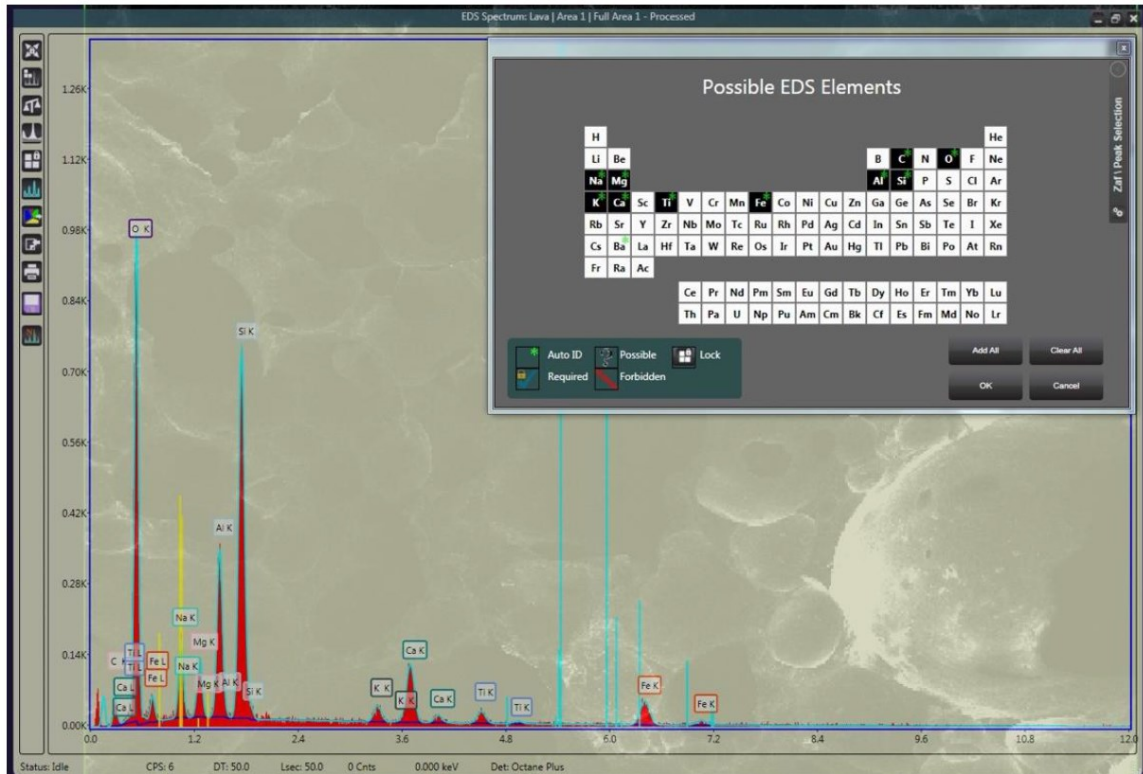


Fig.44: Imagen software EDX-SEM. Presencia elementos químicos de la muestra

Elemento	Porcentaje presencia
Oxígeno (O)	42%
Silicio (Si)	16%
Hierro (Fe)	9%
Carbono (C)	7%
Calcio (Ca)	7%
Aluminio (Al)	7%
Sodio (Na)	5%
Magnesio (Mg)	3%
Titanio (Ti)	2%
Potasio (K)	1%

Fig.45: Porcentaje de presencia de elementos químicos en mineral de lava

En un segundo análisis, la lava fue triturada para, mediante difracción de rayos X del polvo, obtener información de las fases cristalinas e identificar los compuestos químicos presentes, entre los que de manera preliminar destacan: dióxidos, augitas, forasteritas y perovskitas.

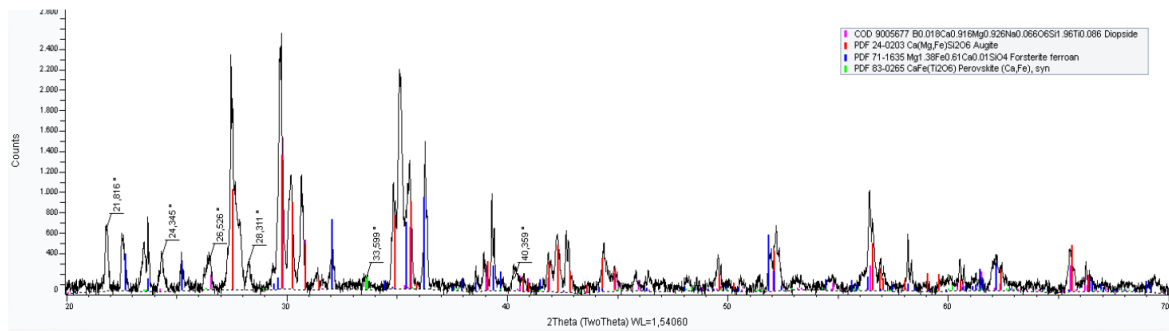


Fig.46: Difracción de rayos X en polvo molido e identificación de fases preliminares

El IMN cuenta con el microscopio electrónico de barrido FEI Verios 460, uno de los más potentes de Europa, utilizado normalmente para el análisis de óxidos, metales y polímeros en escalas micro y nanométricas. En esta ocasión, el análisis de esta roca volcánica ha sido una novedad. “Este microscopio es tan avanzado que, pese a ser la muestra aislante, no precisa de ningún tratamiento adicional pudiendo obtener información morfológica a escala micro y nanométrica sin el recubrimiento de oro que hasta ahora se necesitaba depositar en muestras aislantes en microscopios convencionales. Esto ha permitido eliminar los efectos de carga y observar la lava a escala nanométrica”:

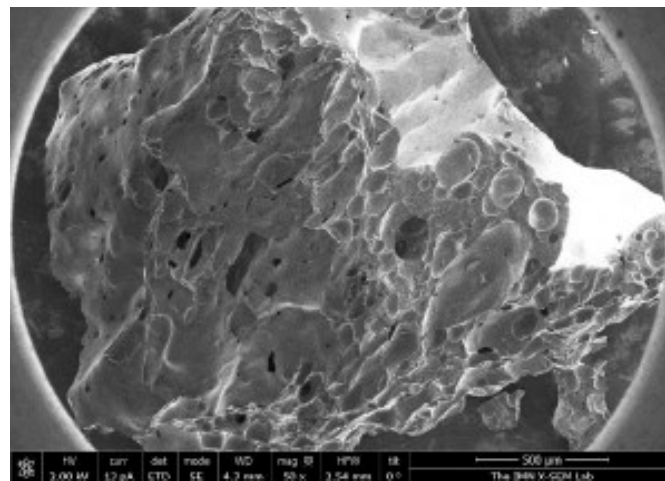


Fig.47: Muestra completa de la lava introducida en el portamuestras del SEM (aprox. 2mm)

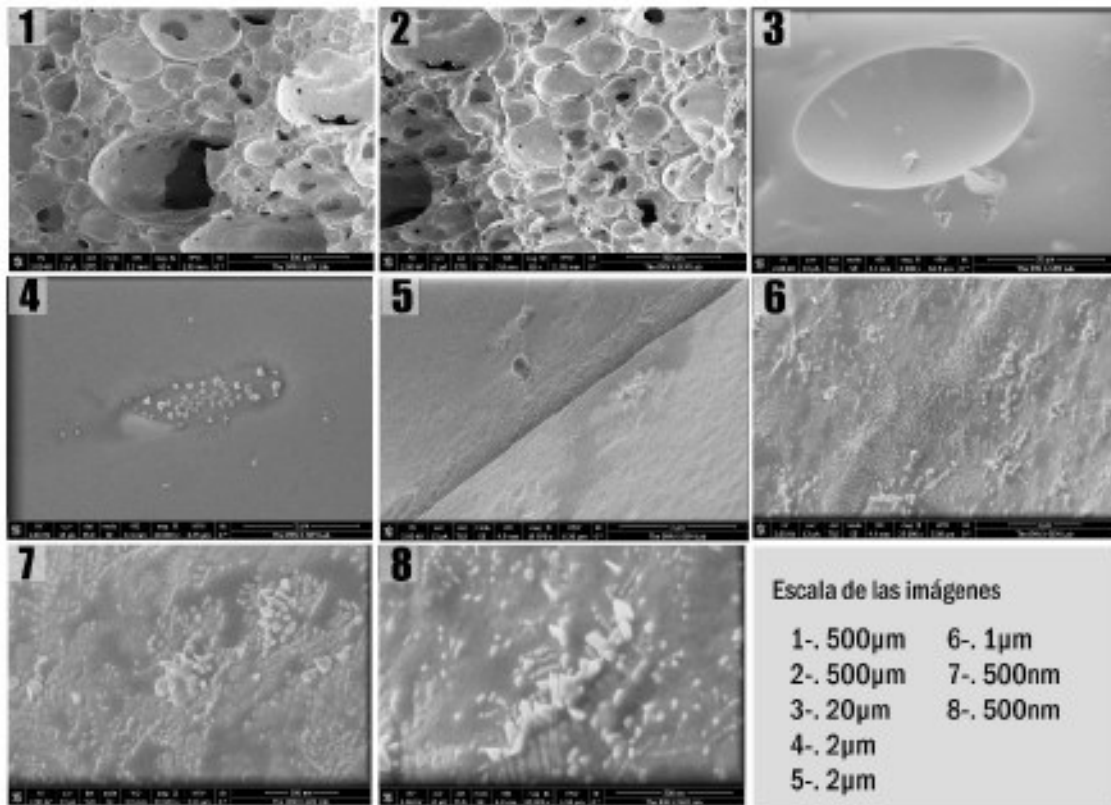


Fig.48: Imágenes de SEM de la lava de menor a mayor aumento, en escalas que van de micras a nanómetros

Conclusiones:

Vista la composición de la lava del Volcán Cumbre Vieja, se toma como muy favorable el dato de la carencia de sulfuros en su composición.

Se abre como posible vía de investigación conocer las consecuencias que podría tener para el tapial la existencia de los otros componentes, de manera especial hierro (9%) y aluminio (7%)

3.3.5 UNE 103103:1994 Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande.

Objeto:

Determinar el **límite líquido** de un suelo, entendiendo como tal la humedad que tiene un suelo amasado con agua y colocado en una cuchada normalizada, cuando un surco realizado con un acanalizador normalizado, que divide dicho suelo en dos mitades, se cierra una distancia de 13 mm, tras haber dejado caer 25 veces la cuchara desde una altura de 10 mm con una cadencia de dos golpes por segundos.



Fig.49: Surco y acanalizador en cuchara de Casagrande.

Aparatos y material:

- Aparato de Casagrande. Utensilio consistente en una cuchara de aleación de cobre, suspendida de un dispositivo diseñado para controlar su caída sobre una base dura.



Fig.50: Aparato de Casagrande y acanalador

- Acanalador normalizado.
- Espátulas.
- Balanza de 100 gr.
- Pesasustancias.
- Tamiz 400 μm .
- Superficie lisa (como por ejemplo un cristal de 300 mm x 300 mm).
- Estufa de desecación hasta 115°C.
- Mortero.
- Cámara húmeda que mantenga una humedad relativa de 95% y una temperatura de unos 20°C.

- Agua destilada.

Preparación de la muestra:

- **Por secado y desmenuzado.** Cuando el suelo se encuentre en un estado tal que no sea posible individualizar manualmente sus partículas se procede de la siguiente manera para preparar la muestra a ensayar.

Se seca al aire o en estufa sin exceder los 60°C, hasta que los terrones de tierra se desmenucen fácilmente, una porción representativa del suelo a ensayar. Se pasan unos 200 gr por un tamiz 400 μm . Se pulveriza la muestra en un mortero, sin que se destruyan los granos individuales.

Dicho material se amasa sobre el cristal mediante espátulas y se deja en cámara húmeda durante 2 horas.

- **Vía directa.** Cuando el suelo sea orgánico o inorgánico con alto contenido en limo o arcilla, el proceso de secado previo puede dar lugar a una variación apreciable del límite líquido. Por lo que en suelos homogéneos de grano fino, en los que su contenido de humedad natural permita el amasado mediante espátula, se operará de la siguiente manera.

Se toman 200 gr de muestra, dividiéndose sobre la superficie del cristal en varias porciones. Si contiene algunas partículas apreciables mayores de 400 μm (concreciones, conchas, etc,...) se retiran con una pinza y se determina su masas para conocer la proporción que representa con respecto del total de la muestra tomada. Se añade agua destilada y amasa convenientemente hasta conseguir una masa homogénea. A continuación se deja 24 horas en la cámara húmeda para que homogeneice la humedad.

- **Vía húmeda.** Cuando se trate de un suelo de grano fino que contenga una apreciable proporción de otros materiales de grano más grueso, se debe proceder por vía húmeda para la separación de la fracción necesaria para la realización del ensayo a fin de evitar el secado previo.

Se toma una porción representativa del suelo tal que se pueda obtener una muestra de 300 gr de material inferior a 400 μm . Se coloca en un recipiente, se le añade agua destilada hasta cubrirla y se remueve con una varilla hasta conseguir un líquido denso. Se vierte éste sobre un tamiz 400 μm , y se lava con agua destilada el material que queda en el tamiz. La suspensión obtenida se deja sedimentar, eliminando el agua limpia que haya por encima del material depositado. Se seca al aire o bajo la acción de una corriente de aire caliente a no más de 60°C, agitando la pasta para conseguir un secado uniforme.

El proceso puede considerarse finalizado cuando la consistencia de dicha pasta sea la adecuada para iniciar el amasado con la espátula sobre el cristal, siguiendo el proceso descrito anteriormente por secado y desmenuzado.

En cualquiera de los tres casos, cuando se trate de un suelo de elevada plasticidad (como el de las tierras ensayadas en este caso, el período de curado en cámara húmeda debe ampliarse hasta 48 horas. Por el contrario, si se tratase de suelos limosos con bajo contenido de arcilla puede reducirse a unas 2 horas.

Procedimiento operatorio:

Se separa la cuchara del resto del aparato. Por medio una espátula, se coloca en la parte inferior de la cuchara una porción del suelo amasado, extendiéndose dentro de la cuchara. Se

realiza un surco con el acanalador y se coloca la cuchara en el aparato. Se gira la manivela a razón de dos vueltas por segundo hasta que las paredes del surco se unan por el fondo del mismo a una distancia de 13 mm. Se repite el ensayo hasta obtener una determinación entre 25 y 15 golpes, y otra entre 35 y 25.

Si después de varias determinaciones, el número de golpes requeridos para cerrar el surco fuese siempre inferior a 25, se trataría de un **suelo no plástico**.



Fig.51: Muestra con surco sobre la cuchara

Procedimiento operatorio:

Se llevan las dos determinaciones a un gráfico que tenga en abscisas el número de golpes, y en ordenadas la humedad, ambos en escala logarítmica.

Se traza la paralela a la línea de trazos dibujada en dicho gráfico, que equidiste de los dos últimos puntos anteriores. La humedad del punto de intersección de esta recta con la ordenada correspondiente a los 25 golpes, expresada con una cifra decimal, **será el límite líquido**.

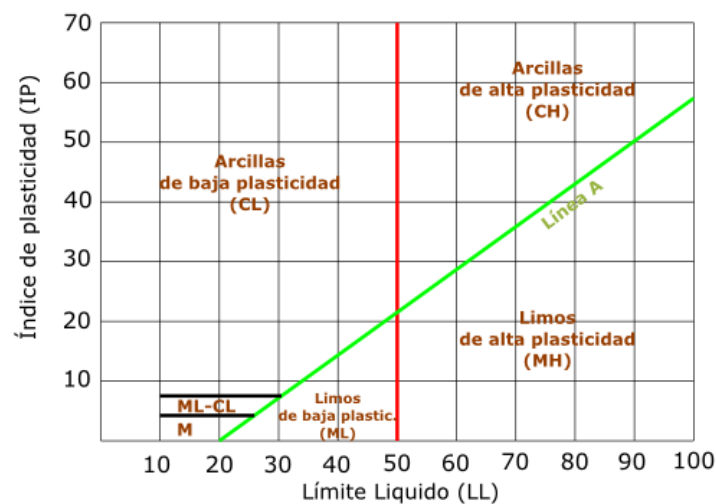


Fig.52: Carta de plasticidad de Casagrande (Imagen de Diccionario de Geotecnia)

3.3.6 UNE 103104:1993 Determinación del límite plástico de un suelo.

Objeto:

Determinar el **límite plástico** de un suelo, entendiéndose como tal la humedad más baja con la que puede formarse con un suelo, cilindros de 3 mm de diámetro, rodándolos por una superficie lisa, hasta que comiencen a resquebrajarse.

Aparatos y material:

- Espátula.
- Balanza de 100 gr.
- Tamiz 400 μm .
- Superficie lisa (como por ejemplo un cristal de 300 mm x 300 mm).
- Estufa de desecación hasta 115°C.
- Mortero.
- Agua destilada.

Preparación de la muestra para ensayo:

Se obtienen una porción de suelo de 20 gr que pase por un tamiz 400 μm , siguiendo el procedimiento descrito anteriormente en la norma UNE 103-103 de Determinación del límite líquido de un suelo por el método del aparato de Casagrande.

Se amasa con agua destilada hasta formar una bola de la que se tomarán 15 gr para el ensayo.

Método operatorio:

Se moldea la mitad de la muestra en forma elipsoide y, a continuación se hace rodar entre los dedos de la mano y la superficie lisa con la presión estrictamente necesaria para formar un cilindro.



Fig.53: Cilindro de 3 mm de diámetro

Si al llegar a un diámetro 3 mm no se ha resquebrajado, se deshace el cilindro, partiéndolo en unos seis trozos, para volver a amasarlos todos juntos y repetir el proceso cuantas veces haga falta hasta que el cilindro se resquebraje.



Fig.54: Resquebrajamiento del cilindro

Se colocan las porciones de suelo así obtenidas hasta una cantidad mínima de 5 gr en un pesasustancias. Se determina la humedad de acuerdo con la Norma Une 103-300 (que será descrita más adelante)



Fig.55: Pesada de la muestra con surco sobre la cuchara

Se repite, con la otra mitad de la muestra, el método operatorio completo.

Obtención de los resultados:

El límite elástico será la media de las humedades de ambas determinaciones, expresada en tanto por ciento.

	Arido ceniza del Volcán Cumbre Vieja	Tierra Camino El Tornero	Tierra Tabaiba
Límite líquido	---	40,20	38,70
Límite plástico	---	27,40	26,00
Índice de plasticidad	no plástico	12,80	12,70
Clasificación en gráfico de Casagrande	no procede	ML&OL	ML&OL

Tabla 5: Determinación de la plasticidad

Conclusiones:

Ambas tierras tienen características similares, teniendo una clasificación en el gráfico de Casagrande de limos de baja plasticidad. La tierra para tapial ha de poseer cierta plasticidad que favorezca la cohesión, aunque demasiada no es recomendable por la posibilidad de que retraiga en demasía. Por ello, podría decirse que se trata de tierras adecuadas para la ejecución de tapiales

3.3.7 UNE 103300:1993 Determinación de la humedad de un suelo mediante secado de estufa.

Objeto:

Determinar la humedad de una muestra de suelo mediante secado de estufa, definida como el cociente (expresado en tanto por ciento) entre la masa de agua que pierde el suelo al secarlo y la masa del suelo seco.

Aparatos y material:

- Balanza de 100 gr.
- Superficie lisa (como por ejemplo un cristal de 300 mm x 300 mm).
- Estufa de desecación hasta 115°C.
- Recipientes que soporten las temperaturas de la estufa.
- Pinzas para manipular los recipientes en caliente.

Método operatorio:

Determinar la masa del recipiente M_1 . Seleccionar una muestra representativa, colocarla en el recipiente y determinar su masa M_2 . Introducirla en la estufa, secándola hasta masa constante. Dejar enfriar y anotar su masa M_3 .



Fig.56: Estufa con muestras a secar

Obtención de resultados:

El resultado se expresará en tanto por ciento mediante la siguiente expresión:

$$W(\%) = \frac{M2 - M3}{M3 - M1} \times 100$$

3.3.8 UNE-EN 933-8 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 8: Evaluación de los finos. Ensayo del equivalente de arena.

Objeto:

Esta norma europea especifica el método para la determinación del valor equivalente de arena de la fracción granulométrica 0/2 mm de los áridos finos y de la mezcla total de los áridos naturales.

Aparatos y material:

- Dos probetas cilíndricas graduadas.
- Pistón tarado.
- Cronómetro.
- Regla.
- Tamiz de ensayo con aberturas de 2 mm.
- Escobilla para limpieza de tamices.
- Espátula.
- Tubo lavador.
- Tubo de plástico.
- Embudo.
- Agitador.
- Balanza.
- Papel de filtro.

Método operatorio:

La muestra se debe realizar con la fracción granulométrica 0/2mm con un contenido en humedad inferior al 2% y una temperatura en torno al 23°C. La muestra de ensayo no se secará en estufa.

En una probeta graduada, se vierte la muestra de ensayo de arena y una pequeña cantidad de solución floculante que se agita para liberar los recubrimientos de arcilla de las partículas de arena. A continuación “se irriga” la arena con una cantidad adicional de la misma solución floculante para favorecer la suspensión de las partículas finas sobre la arena. Tras 20 minutos, se calcula el valor del equivalente de arena a partir de la altura del sedimento, expresado como porcentaje de la altura total del material floculado en la probeta.



Fig.57: Probetas con la disolución de la muestra

Obtención de resultados:

Se calcula el valor del equivalente de arena como la media de la siguiente expresión obtenida de cada una de las probetas:

$$SE = \frac{h_2}{h_1} \times 100$$

	Árido ceniza del Volcán Cumbre Vieja	Tierra Camino El Tornero	Tierra Tabaiba
Fracción ensayada (mm)	0-2	0-2	0-2
Equivalente de arena	84,00	0,00	0,00

Tabla 6: Determinación del equivalente de arena

Conclusiones:

A la vista de los resultados del ensayo se comprueba el alto contenido en arena del árido proveniente de la ceniza del Volcán Cumbre Vieja de La Palma.

3.3.9 UNE-EN 1097-6 Ensayos para determinar las propiedades geométricas de los áridos. Parte 6: Determinación de la densidad de las partículas y la absorción de agua.

Objeto:

Esta norma europea especifica el método para la determinación de la densidad de partículas y absorción de agua de áridos.

Campo de aplicación:

Dependiendo del tamaño del árido se utilizará un método con balanza hidrostática o un método con picnómetro. En el caso de los áridos provenientes de la ceniza del Volcán Cumbre Vieja se utilizará el método con picnómetro por menores a 4 mm.

Principio del método :

La densidad de partículas se calcula a partir de la relación entre masa y volumen. La masa se determina por pesada de la porción de ensayo en la condición saturada y secada superficialmente, y de nuevo en la condición secada en estufa. En el método del picnómetro, el volumen se determina a partir de la masa de agua desplazada, mediante pesadas.

Aparatos y material:

- Estufa ventilada hasta 115°C.
- Balanza de 100 gr.
- Baño de agua
- Termómetro.
- Tamices.
- Cronómetro.
- Picnómetro.
- Molde metálico troncocónico.
- Pisón metálico.
- Embudo.
- Bandeja.
- Aire caliente (secador de pelo).



Fig.58: Parte del material de trabajo

Método operatorio:

Este método se utilizará para partículas de árido que pasen el tamiz de 4 mm y queden el de 0,063 mm, como ha sido el caso de la ceniza del Volcán de Cumbre Vieja.

Se lava la muestra (unos 300 gr.) sobre el tamiz de 4 mm y el de 0,063 para eliminar las partículas más finas.



Fig.59: Árido lavado en tamiz (Paso 1)

Se sumerge la porción preparada en agua en el picnómetro, eliminando el aire atrapado mediante giros y cuidadosas sacudidas, inclinándolo ligeramente. Se deja reposar durante 24 horas. Se saca el picnómetro del baño de agua. Se rellena mediante adición de agua, se pesa (M_2) y se registra la temperatura del agua.

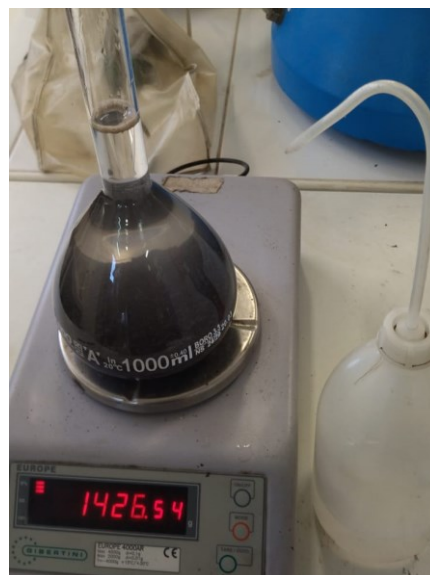


Fig.60: Picnómetro y pesa (Paso 2)

Se decanta la mayoría del agua que cubre la porción de ensayo y se vacía el picnómetro en una bandeja.

Se vuelve a llenar el picnómetro con agua, se pesa (M_3) y se registra la temperatura del agua. Se esparce la porción de ensayo sumergida en una sola capa uniforme sobre la parte inferior de la bandeja. Se expone el árido a una corriente de aire templada con cuidado para evaporar la humedad superficial. Se deja enfriar mientras se agita.



Fig.62: Árido siendo secado (Paso 3)

Para evaluar si se ha alcanzado el estado de secado, se sujeta el molde con su cara abertura mayor hacia abajo sobre el fondo de la bandeja. Se llena más o menos el molde cónico con parte de la porción de ensayo seca. A través del agujero en la parte superior del molde se coloca el pisón metálico sobre la superficie del árido. Se compacta la superficie 25 veces dejando caer el pisón por su propio peso. No se vuelve a rellenar el molde después del compactado.



Fig.63: Cono, pisón y árido (Paso 4)

Cuidadosamente se levanta el molde sin el árido. Si el cono no se desmorona, se continúa secando y se repite el ensayo del cono hasta que se produzca el desmoronamiento al retirar el molde.



Fig.64: Árido sin desmoronar (Paso 5)



Fig.65: Árido desmoronado (Paso 6)

Se pesa la porción de ensayo saturada y secada superficialmente (M_1). Se seca el árido en una estufa ventilada a una temperatura de unos 110°C hasta alcanzar una masa constante. Se deja enfriar a temperatura constante y se pesa (M_4)

Cálculo de los resultados:

Se calculan las densidades de partículas en megagramos por metro cúbico de acuerdo con las siguientes fórmulas:

$$\text{Densidad aparente de partículas, } \rho_a = \rho_w \frac{M_4}{M_4 - (M_2 - M_3)}$$

$$\text{Densidad de partículas secadas en estufa, } \rho_{rd} = \rho_w \frac{M_4}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

$$\text{Densidad de partículas saturadas y secadas superficialmente, } \rho_{ssd} = \rho_w \frac{M_1}{M_1 - (M_2 - M_3)}$$

$$\text{Absorción del agua después de la inmersión durante 24 horas, } WA_{24} = \frac{100 \times (M_1 - M_4)}{M_4}$$

Donde

ρ_w es la densidad del agua a la temperatura de ensayo, en megagramos por m^3 ;

M_1 es la masa del árido saturado y secado superficialmente, pesado al aire, en gramos;

M_2 es la masa del picnómetro que contiene la muestra del árido saturado y el agua, en gramos;

M_2 es la masa del picnómetro que contiene la muestra del árido saturado y el agua, en gramos;

M_3 es la masa del picnómetro lleno solo con agua, en gramos;

M_4 es la masa de la porción de ensayo secada en estufa, pesada al aire, en gramos.

	Árido ceniza del Volcán Cumbre Vieja
Densidad aparente (g/cm ³)	2,35
Absorción	1,90

Tabla 7: Densidad y absorción de arenas

Conclusiones:

Una vez obtenidas la densidad aparente y absorción del árido de La Palma se abre una vía de investigación para ser comparado con áridos de otras procedencias.

3.3.10 UNE-EN1744-1:2010+A1:2013

Ensayos para determinar las propiedades químicas de los áridos. Parte 1: Análisis químico. Apdo. 15.1 (valoración cualitativa del contenido de humus)

Objeto:

Esta norma europea especifica el procedimiento para la aplicación método para la determinación de presencia de humus en un árido.

Principio del método:

El humus es una sustancia orgánica que se forma en el suelo por descomposición de los residuos animales o vegetales. El contenido en humus de un árido se determina por el color que aparece cuando una porción de ensayo se agita en una disolución de hidróxido de sodio.

Este método se basa en el principio de que el humus desarrolla un color oscuro cuando reacciona con hidróxido de sodio (NaOH). La intensidad del color depende del contenido en humus. Si la disolución no se oscurece o lo hace ligeramente, el árido no contiene cantidades significativas de humus. Un color fuerte es consecuencia, normalmente, de un contenido en humus elevado, pero también puede deberse a otros factores. En este caso el método no proporciona una conclusión definitiva.

Aparatos y material:

- Tamiz de 4 mm.
- Botella cilíndrica de vidrio transparente con tapón, con una capacidad aproximada de 450 ml y un diámetro de 70 mm.
- Estufa ventilada para una temperatura hasta 150°C
- Horno de mufla para una temperatura hasta 800°C
- Equipo de trituración y molienda para reducir los áridos.
- Balanza hasta 10 kgr.
- Balanza hasta 1 kgr.
- Balanza hasta 100 gr.
- Placa calefactora con agitador magnético.
- pH-metro con escala graduada

Reactivos:

- Disolución de hidróxido de sodio al 3% . Se disuelven 30 gr de hidróxido de sodio (NaOH) en agua destilada, dejando enfriar la disolución a temperatura ambiente y diluyendo hasta 1 litro en un matraz aforado.

- Disolución coloreada patrón, preparada disolviendo 45.0 gr de cloruro de hierro con seis moles de agua ($\text{FeCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) y 5,50 gr de fosgeno con seis moléculas de agua ($\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) en 279,5 gr de agua con 1 ml de cloruro de hidrógeno (HCl) concentrado.

La disolución patrón es equivalente al color de patrón Gardner número 11. La escala de color de Gardner es una escala que se utiliza para medir el tono del color amarillo.

Preparación de la porción de ensayo:

Se seca la muestra en una estufa a 40°C. Se tamizan las partículas secas con un tamiz de 4 mm, reteniendo la fracción que haya pasado por el tamiz.

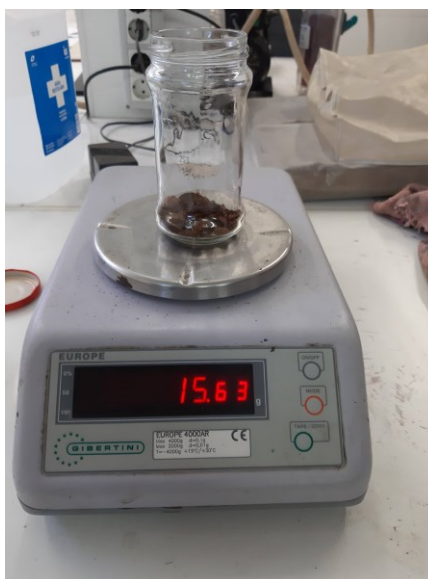


Fig.66: Pesada de muestra de tierra de El Tornero



Fig.67: Pesada de muestra de árido del Volcán Cumbre Vieja

Procedimiento:

Se vierte una disolución de NaOH, al 3% en la botella de vidrio hasta conseguir una altura de unos 80 mm. A continuación, se vierte parte de la porción del ensayo en la botella hasta una altura del árido y de la disolución alcance los 120 mm. Se agita la botella para eliminar las burbujas de aire.

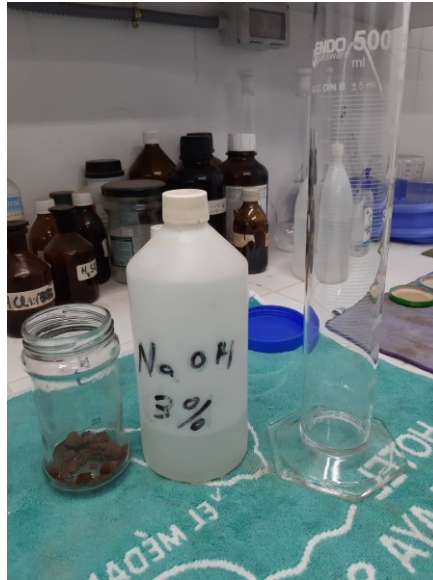


Fig.68: Muestra de tierra de El Tornero e hidróxido de sodio

Se tapa la botella y se sacude vigorosamente durante 1 minuto. Se deja reposar 24 horas.

Se compara el color de la disolución con el de la disolución coloreada patrón con tenida en una botella cilíndrica transparente similar. Se registra si el color de la disolución es más claro o más oscuro que el color patrón.

En la imagen siguiente, se puede apreciar el color transparente adquirido por los áridos provenientes del Volcán Cumbre Vieja, indicio de la ausencia de materia orgánica. Obsérvese el tono oscuro adquirido por la muestra de tierra de La Laguna. Todo ello tras las 24 horas de reposo en combinación con el hidróxido de sodio.



Fig.69: Muestras tras 24 h de reposo. A la derecha, la disolución patrón.

Expresión de resultados:

El resultado del ensayo debe establecer si el color de la disolución es Ensayo Negativo (más claro que el color patrón) o Ensayo Positivo (más oscuro que el color patrón).

	Árido ceniza del Volcán Cumbre Vieja	Tierra Camino El Tornero
Coloración	Transparente	Muy oscuro (moscatel)
Contenido cualitativo en humus	Nulo	Muy alto

Tabla 8: Determinación del contenido de humus

Conclusiones:

El resultado del ensayo corrobora lo que se espera de un árido y una tierra en lo que a contenido de humus se refiere.

3.3.11 Resumen de los resultados de los ensayos a las tierras y cenizas del Volcán Cumbre Vieja de La Palma.

	Árido ceniza del Volcán Cumbre Vieja	Tierra Camino El Tornero	Tierra Tabaiba
Coefficiente de uniformidad	4,76	6,00	8,13
Coefficiente de concavidad	1,05	1,50	1,11
Módulo granulométrico	5,48	1,17	1,80
Humedad higroscópica (%)	0,98	16,57	10,56
Límite líquido	no procede	40,20	38,70
Límite plástico	no procede	27,40	26,00
Índice de plasticidad	no plástico	12,80	12,70
Clasificación en gráfico de Casagrande	no procede	ML&OL	ML&OL
Equivalente de arena	84,00	0,00	0,00
Coloración para contenido humus	Transparente	Muy oscuro (moscatel)	No ensayado
Contenido cualitativo en humus	Nulo	Muy alto	No ensayado
Densidad aparente (g/cm ³)	2,35	no procede	no procede
Absorción	1,90	no procede	no procede

Tabla 9: Resumen de características de las tierras y del árido

3.3.12 Elaboración de probetas de tierra comprimida.

Como ya se ha indicado en otros puntos de esta memoria, no existe una norma que desarrolle los pasos a seguir para ensayar probetas de tierra comprimida. Por ello, se ha decidido planificar cómo realizar las probetas de las tierras con las diferentes dosificaciones, en base a la compilación de diferentes normas. Aportando así un **novedoso proceso** de elaboración de probetas para tapiales.

Una de las características principales de los tapiales es la cohesión de las tierras gracias al imprescindible acto de apisonarlas. Cómo trasladar este acto a una pequeña probeta de 101,6 mm de diámetro y 63,5 mm de altura, se convirtió en un aspecto que se sabía fundamental para la correcta ejecución de la misma. Finalmente se decidió utilizar como modelo de proceso la Parte 30 de la UNE-EN 12697-30:2019 de Mezclas bituminosas: Método de ensayo para la preparación de probetas mediante **compactador de impactos**. A continuación se describe dicha norma y cómo se adaptó para la elaboración de las probetas.

También se ha tenido como referencia la norma UNE 103400: 1993 Ensayo de rotura a compresión simple en probetas de suelo.

3.3.13 UNE-EN 12697-30:2019 Mezclas bituminosas. Métodos de ensayo. Parte 30: Preparación de probetas mediante compactador de impactos.

Objeto:

Esta norma europea describe métodos de moldeo de probetas de mezclas bituminosas mediante compactación por impactos.

Esta mezcla europea se aplica a mezclas bituminosas obtenidas en laboratorio o pie de obra.

Equipo:

- Compactador de impactos con yunque de acero.
- Molde de compactación.
- Probetas compuestas por cilindro de 101,6 mm de diámetro y 63,5 mm de altura.

Proceso de compactación:

Se llena el molde y se coloca en el compactador. Se compacta la probeta con 50 impactos en un minuto. El pisón cae desde una altura de unos 450 mm. Se da la vuelta al cuerpo del molde y se repite la operación.



Fig.70: Muestra de tierra antes de apisonar



Fig.71: Números de golpes de compactación



Fig.72: Compactador con probeta

Como puede observarse en la siguiente imagen, los 50 impactos causaron daños en la superficie de la probeta. Por ello se realizan diferentes pruebas hasta obtener unas probetas apropiadas a los **20 impactos**. Asimismo, pudo comprobarse que la compactación mejoraba humedeciendo ligeramente la superficie de la probeta y colocando un papel sobre ésta para evitar el golpeo directo.



Fig.73: Probeta con 50 impactos



Fig.74: Serie de probetas de prueba con 20 impactos

Finalmente se prepararon 18 probetas, seis series de tres probetas. Cada una de las series se realizó con las siguientes dosificaciones:

- Tierras de La Laguna sin árido.
- Tierras de La Laguna con árido de La Palma en dosificación 1:1
- Tierras de La Laguna con árido de La Palma en dosificación 1:1,5
- Tierras de Tabaiba sin árido.

-Tierras de Tabaiba con árido de La Palma en dosificación 1:1

-Tierras de Tabaiba con árido de La Palma en dosificación 1:1,5

La finalidad de realizar tres probetas con la misma dosificación, estriba en poder obtener tres resultados del ensayo a compresión, lo que posibilitará un resultado más fidedigno.

A continuación se muestra el aspecto de cada una de las series de probetas:



Fig.76: Tierras de La Laguna sin árido



Fig.77: Tierras de La Laguna con árido de las cenizas del Volcán con dosificación 1:1



Fig.78: Tierras de La Laguna con árido de las cenizas del Volcán con dosificación 1:1,5



Fig.79: Tierras de Tabaiba sin árido



Fig.80: Tierras de Tabaiba con árido de las cenizas del Volcán con dosificación 1:1



Fig.81: Tierras de Tabaiba con árido de las cenizas del Volcán con dosificación 1:1,5

Para la compresión simple de las muestras se aplica la carga uniaxial de manera manual y continuada tomando lecturas de carga y deformación hasta que se produzca la rotura (bajada en resistencia tras aplicar carga en los intervalos de deformación definidos= 0.25 mm). Es necesario, evidentemente, que la muestra permanezca confinada en todo momento.

	Tornado 1 sin árido			Tornado 1 : árido 1			Tornado 1 : árido 1,5		
Molde	1.322,60	1.288,60	1.304,80	1.316,80	1.291,10	1.317,10	1.381,60	1.342,00	1.312,10
Molde + muestra	2.044,40	2.020,00	2.030,50	2.029,20	2.020,50	2.011,70	2.103,60	2.084,80	2.052,80
Diámetro	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14
Altura	6,10	6,10	6,10	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00	6,00
Densidad aparente	1,47	1,48	1,47	1,47	1,51	1,43	1,49	1,53	1,53
Valor medio	1,47			1,47			1,52		

Tabla 10: Densidad aparente en probetas de tierra de El Tornado

	Tabaiba 1 sin árido			Tabaiba 1 : árido 1			Tabaiba 1 : árido 1,5		
Molde	1.322,60	1.288,60	1.304,80	1.400,30	1.309,40	1.312,20	1.310,70	1.311,90	1.299,10
Molde + muestra	2.044,40	2.020,00	2.030,50	2.143,70	2.052,20	2.052,10	2.044,80	2.051,60	2.039,20
Diámetro	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14
Altura	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,00	6,00	6,00
Densidad aparente	1,47	1,48	1,47	1,51	1,51	1,50	1,52	1,53	1,53
Valor medio	1,47			1,51			1,52		

Tabla 11: Densidad aparente en probetas de tierra de Tabaiba

Conclusiones:

Comparando la densidad media obtenida con resultados de otras investigaciones, se puede concluir que el valor está dentro de los parámetros usuales de otros tipos de muestras

3.3.14 UNE 103400: 1993 Ensayo de rotura a compresión simple en probetas de suelo. (rotura uniaxial probetas confinadas para lectura de comportamiento carga-deformación)

Introducción:

Esta norma detalla el proceso para realizar pruebas a un suelo con cohesión. Por ello realiza la descripción de cómo realizar la probeta con unos parámetros que no son válidos para las probetas de tierra comprimida. Por ello no se describe esa parte de la norma en este epígrafe.

Para la realización de estos ensayos se utilizaron las probetas preparadas por el método del compactador, ya descritas en el apartado anterior.

Objeto:

Esta norma tiene por objeto describir la manera en que ha de realizarse el ensayo de rotura a compresión simple en suelos que tengan cohesión.

Material:

- Prensa para rotura, con velocidad controlada y medidor de deformaciones.
- Moldes y mazas para preparar probetas.



Fig.82: Máquina de compresión 50 kN uniaxial

Método operatorio:

Se mide la altura de la probeta, diámetro y se determina su masa.

Se coloca la probeta centrada entre los cabezales de la prensa, iniciándose el proceso de carga de la probeta.

Se toman las medidas de las deformaciones y las cargas hasta que la deformación axial sea del 15%.

Una vez finalizado el ensayo se realiza un esquema de la forma de rotura. En el caso de que exista un plano de rotura, se debe medir el ángulo de inclinación del mismo.

Se determina una pequeña porción de la parte de la probeta en la que se ha producido la rotura y se determina su humedad.



Fig.83: Proceso de rotura

Siguiendo el proceso descrito fueron ensayadas cada una de las 18 probetas descritas en el apartado anterior.

Obtención y expresión de los resultados:

Se puede proceder de dos formas.

-Utilizando el gráfico de rectas inclinadas, tensión-deformación que introduce la variación de sección de la probeta producida durante el ensayo y se basa en la hipótesis de que su volumen se mantiene constante.

Se calculan las tensiones, dividiendo las cargas C , por el área de la sección inicial de la probeta.

En el gráfico de dicha figura, se representan los valores correspondientes a las deformaciones en abscisas y a las tensiones en ordenadas, definiéndose así la curva de tensión corregida-deformación.

Una vez representada la curva, si tiene un máximo relativo, se traza la tangente horizontal por su punto más alto hasta que corte el eje de ordenadas. Si no presenta un máximo relativo se traza una línea horizontal por el punto de la curva correspondiente al 15% de la deformación. La Lectura correspondiente es la tensión de rotura corregida, denominada **resistencia a compresión simple**.

-Otro procedimiento para el cálculo de la resistencia a compresión simple es el método analítico. Para ello se procede de la siguiente forma.

Se calcula el área de la sección corregida de la probeta para cada deformación.

Se dividen las cargas axiales entre los correspondientes valores del área corregida, obteniendo tensiones.



Fig.84: Detalle del lector de deformación

Una vez representada la curva de tensión corregida-deformación en un sistema de ejes cartesianos, si presenta un máximo relativo, su ordenada corresponde al valor de la resistencia a compresión simple, y su abscisa al de la deformación en rotura. Si no presenta un máximo relativo se toma como valor de la resistencia a compresión simple el correspondiente al 15% de deformación.

Resultados obtenidos:

Probeta	Tornado 1 sin árido				Tornado 1 : árido 1				Tornado 1 : árido 1,5			
	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Promedio
Altura (cm)	6,10	6,10	6,10	6,10	6,02	6,20	6,20	6,11	6,40	6,40	6,40	6,30
Diámetro (cm)	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14
Sección (cm ²)	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75
Volumen (cm ³)	492,6	492,6	492,6	492,60	486,1	486,1	486,1	488,27	487,8	487,8	487,8	487,96
Carga (KN)	31,00	34,80	36,25	34,02	1,52	17,70	25,56	17,75	25,45	24,04	22,58	22,41
Resistencia (N/mm ²)	3,56	4,08	4,10	3,91	0,18	2,08	2,94	2,06	2,92	2,83	2,41	2,60
Deformación (mm)	4,50	3,25	4,25	4,00	3,00	3,00	4,25	3,33	4,50	3,00	8,25	3,61
Densidad natural aparente (gr/cm ³)	1,47	1,48	1,47	1,47	1,47	1,50	1,43	1,48	1,48	1,52	1,52	1,49

Tabla 12: Resistencia a compresión de probetas de El Tornado

Probeta	Tabaiba 1 sin árido				Tabaiba 1 : árido 1				Tabaiba 1 : árido 1,5			
	1	2	3	Promedio	1	2	3	Promedio	1	2	3	Promedio
Altura (cm)	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,00	6,00	6,00	6,00
Diámetro (cm)	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14
Sección (cm ²)	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75
Volumen (cm ³)	492,6	492,6	492,6	492,60	492,6	492,6	492,6	492,60	484,5	484,5	484,5	484,50
Carga (KN)	19,19	18,43	21,50	19,71	13,20	15,83	15,47	14,83	10,65	9,75	9,87	10,09
Resistencia (N/mm ²)	2,28	2,17	2,56	2,34	1,53	1,85	1,77	1,72	1,20	1,16	1,18	1,18
Deformación (mm)	2,50	3,00	2,25	2,58	3,75	3,50	4,50	3,92	5,50	2,50	2,00	3,33
Densidad natural aparente (gr/cm ³)	1,49	1,50	1,49	1,49	1,51	1,50	1,50	1,50	1,52	1,53	1,53	1,53

Tabla 13: Resistencia a compresión de probetas de Tabaiba

La resistencia a compresión simple obtenida en las probetas realizadas con la tierra de El Tornado, es considerablemente superior a las de Tabaiba. En ambos casos, la dosificación que he resultado ofrecer mayor resistencia es la que contiene árido. En las conclusiones, al final de este apartado, se analizan los posibles motivos.

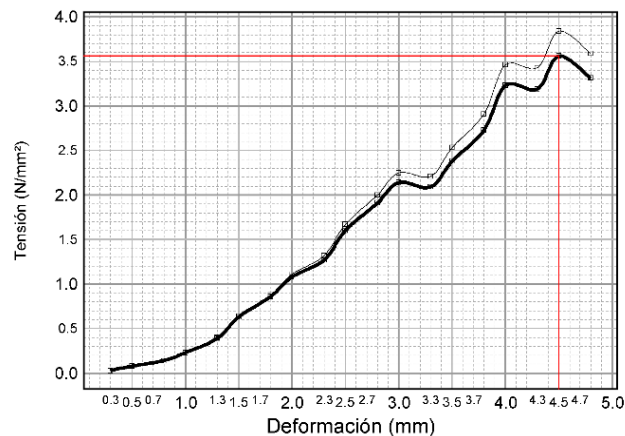


Fig.85: Gráfica de rotura a compresión El Tornado sin árido. Probeta 1

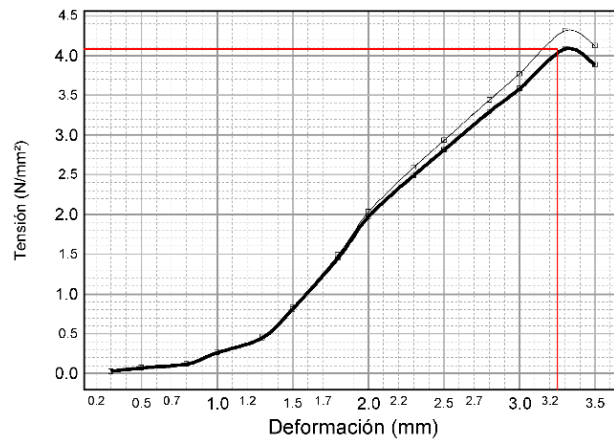


Fig.86: Gráfica de rotura a compresión El Tornero sin árido. Probeta 2

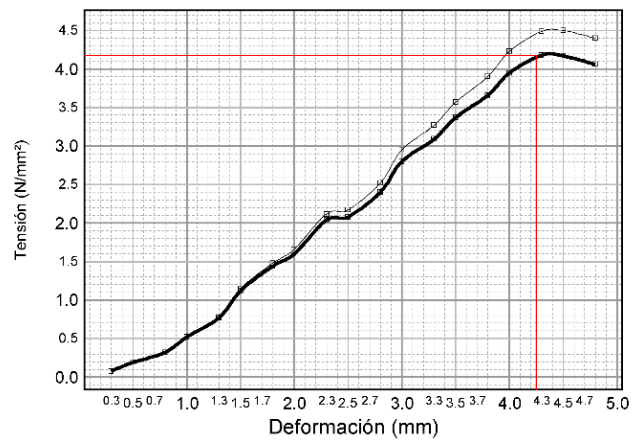


Fig.87: Gráfica de rotura a compresión El Tornero sin árido. Probeta 3

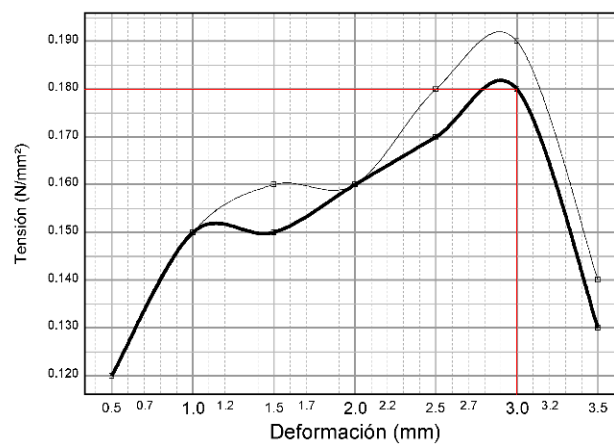


Fig.88: Gráfica de rotura a compresión El Tornero 1:1. Probeta 1

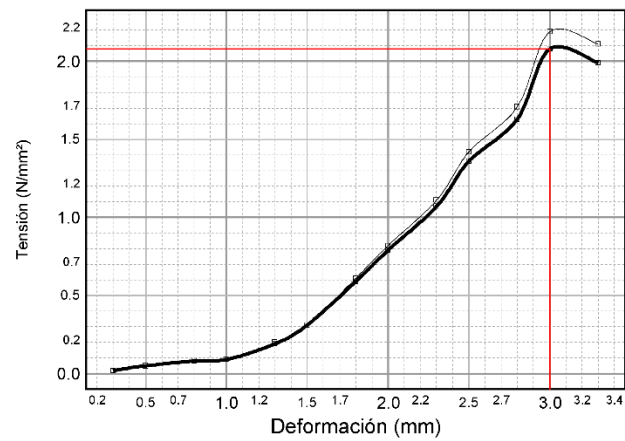


Fig.89: Gráfica de rotura a compresión El Tornero 1:1. Probeta 2

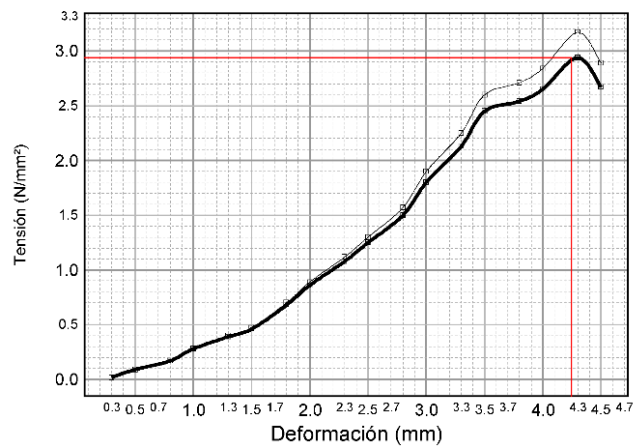


Fig.90: Gráfica de rotura a compresión El Tornero 1:1. Probeta 3

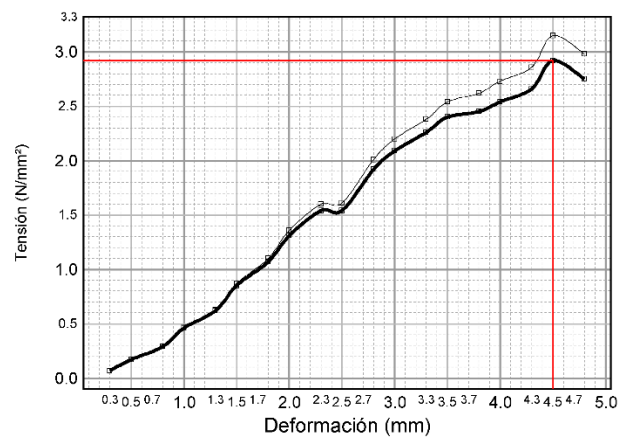


Fig.91: Gráfica de rotura a compresión El Tornero 1:1,5. Probeta 1

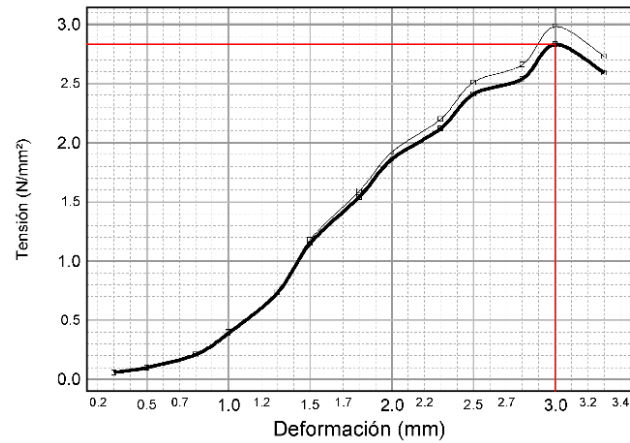


Fig.92: Gráfica de rotura a compresión El Tornero 1:1,5. Probeta 2

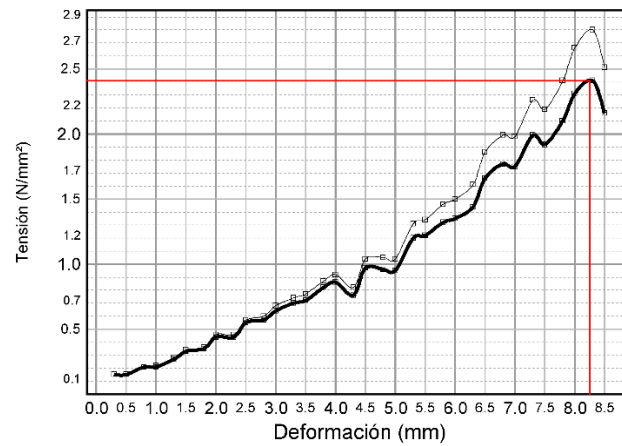


Fig.93: Gráfica de rotura a compresión El Tornero 1:1,5. Probeta 3

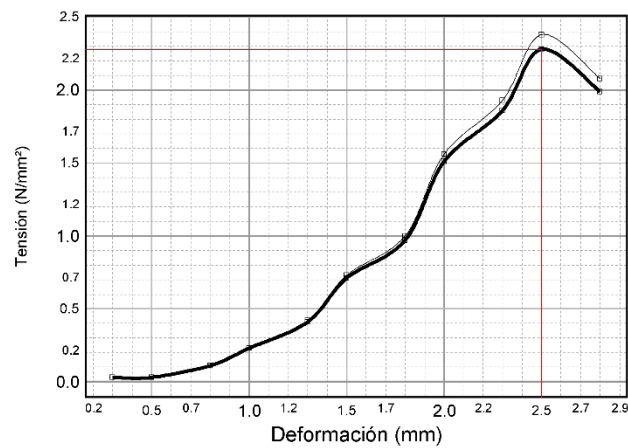


Fig.94: Gráfica de rotura a compresión Tabaiba sin árido. Probeta 1

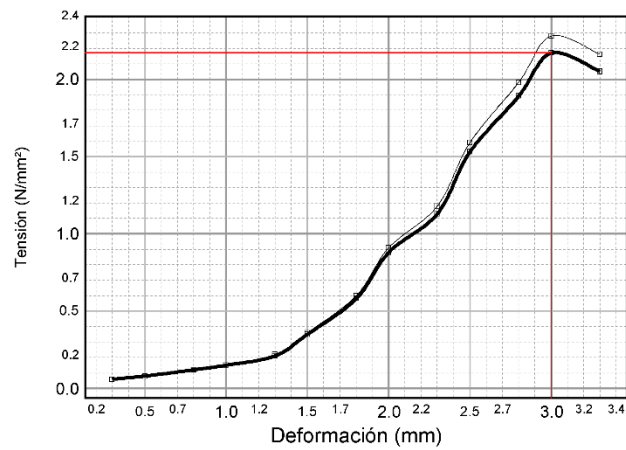


Fig.95: Gráfica de rotura a compresión Tabaiba sin árido. Probeta 2

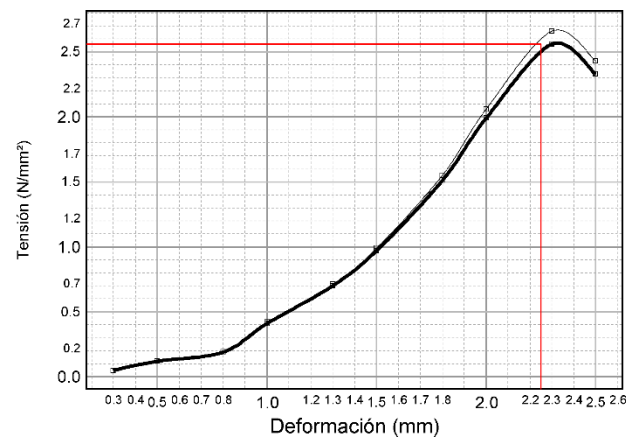


Fig.96: Gráfica de rotura a compresión Tabaiba sin árido. Probeta 3

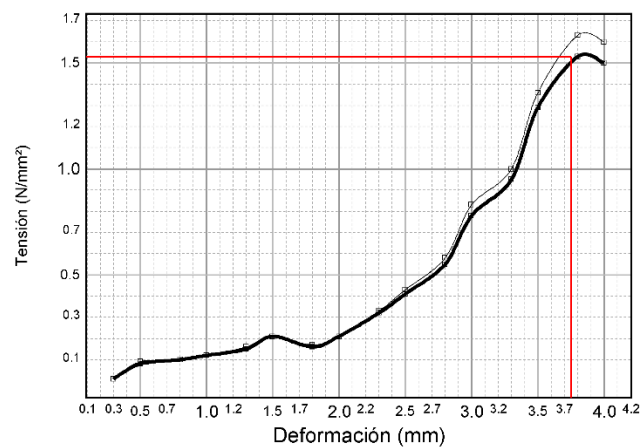


Fig.97: Gráfica de rotura a compresión Tabaiba 1:1. Probeta 1

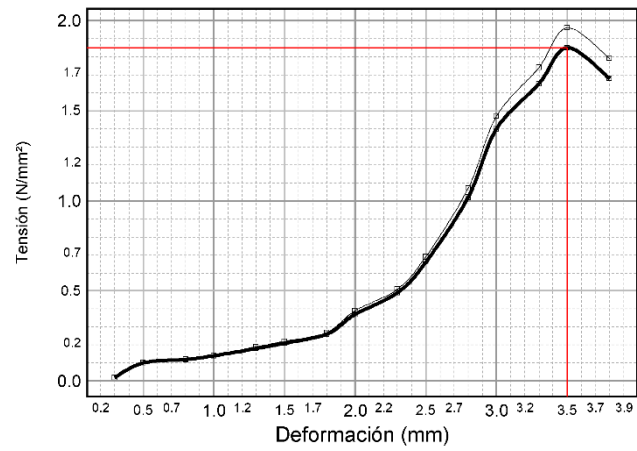


Fig.98: Gráfica de rotura a compresión Tabaiba 1:1. Probeta 2

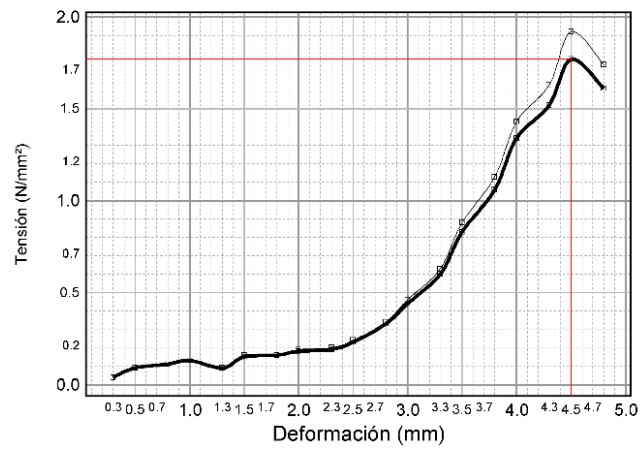


Fig.99: Gráfica de rotura a compresión Tabaiba 1:1. Probeta 3

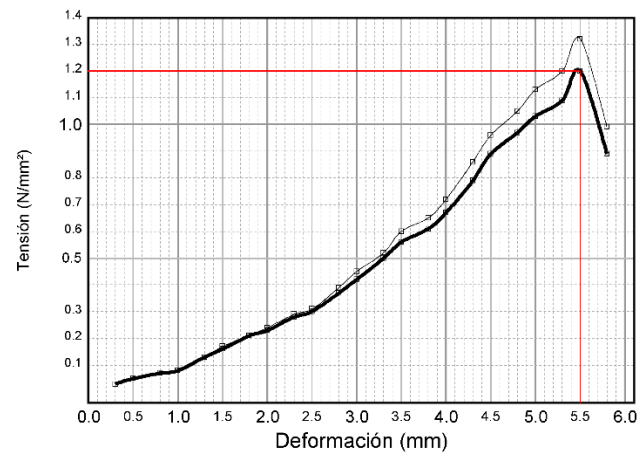


Fig.100: Gráfica de rotura a compresión Tabaiba 1:1,5. Probeta 1

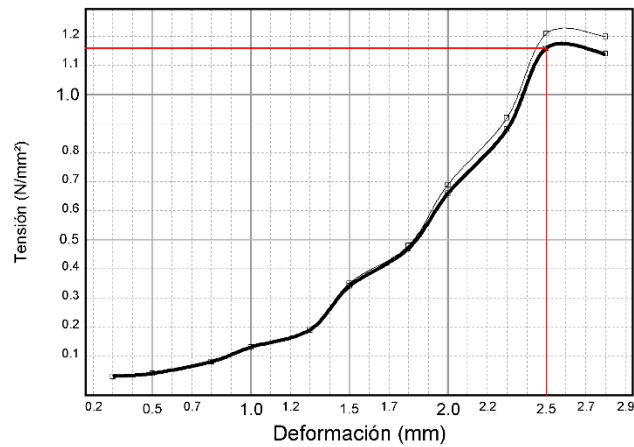


Fig.101: Gráfica de rotura a compresión Tabaiba 1:1,5. Probeta 2

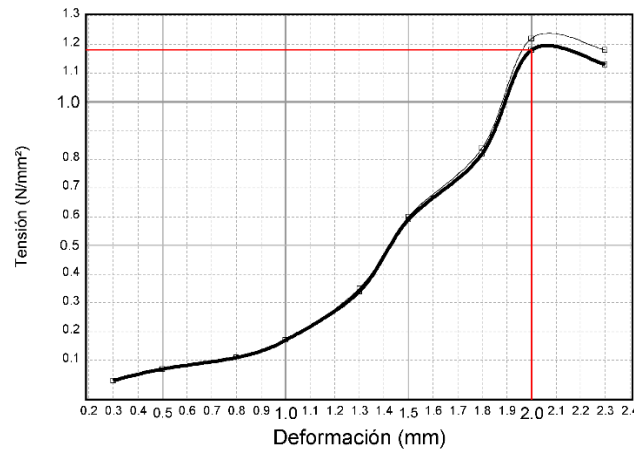


Fig.102: Gráfica de rotura a compresión Tabaiba 1:1,5. Probeta 3

Conclusiones:

Se descarta el resultado de la primera probeta que se realizó: Probeta 1 del Tornero 1:1

	Tabaiba 1 sin árido	Tabaiba 1 : árido 1	Tornero 1 : árido 1,5	Tabaiba 1 sin árido	Tabaiba 1 : árido 1	Tornero 1 : árido 1,5
Probeta	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio
Resistencia (N/mm ²)	3,91	2,51	2,72	2,34	1,72	1,18
Densidad natural aparente (gr/cm ³)	1,47	1,47	1,51	1,49	1,50	1,53

Tabla 14: Resumen de promedio de las tres probetas de resistencia a compresión simple y densidad aparente

El hecho de que prácticamente no ha habido cambio de densidad aparente de manera significativa al añadir árido a la arcilla y de los resultados a compresión simple, se deduce que la aportación de árido y la no humectación del material hace que dicho aporte haga disminuir la capacidad portante respecto a las arcillas por sí solas, lo cual implicaría que la mezcla arcilla-árido ha supuesto en ese caso el aumento de porosidad.

En las conclusiones finales de esta investigación, se comentará el proceso de creación de probetas.

Con los resultados obtenidos se abre una vía de investigación que permita compararlos con los resultados de otros estudios similares: Hall y Djerbid (2004) Rammed earth sample production: context, recommendations and consistency / Maniatidis y Walker (2008) Structural Capacity of Rammed Earth in Compression / Lombillo et al. (2014) In situ mechanical investigation of rammed earth: Calibration of minor destructive testing / Toufigh y Kianfar (2019). The effects of satabilizers on the termal and the mechanical properties of rammed earth at various humidities and their environmental impacts / Shrestha et al. (2020). In Plane shear resistance between the rammed earth blocks with simple interventions: experimentation and finite element study / Book compressed earth block & rammed earth structures. B. V. Benkatarama reddy / Tensile strength of compacted rammed earth materials. Hiroyuki Arakia, Junichi Kosekib, Takeshi Satoc / Experimental evaluation of the optimum lime content and strength development of lime-stabilized rammed earth. Fernando Ávila, Esther Puertas y Rafael Gallego / Characterization of the mechanical and physical properties of stabilized rammed earth. Fernando Ávila, Esther Puertas y Rafael Gallego.

3.3.15 UNE-EN:12504-4:2022

Ensayos de hormigón en estructuras. Parte 4: Determinación de la velocidad de los impulsos ultrasónicos. (onda P directa sobre el material)

Introducción:

Especificar un método para la determinación de la velocidad de propagación de impulsos

Objeto:

Especificar un método para la determinación de la velocidad de propagación de impulsos de ondas longitudinales ultrasónicas o de ondas transversales ultrasónicas en el hormigón endurecido.

Fundamento:

Un palpador ultrasónico mantenido en contacto con la superficie del hormigón en ensayo emite impulsos de vibraciones longitudinales o transversales. Después de atravesar en el hormigón una trayectoria de longitud conocida, el impulso de vibraciones se convierte en una señal eléctrica por un segundo palpador ultrasónico, mientras que dispositivos electrónicos de temporización miden el tiempo de recorrido del impulso.



Fig.103: Equipo de ultrasonidos con transductores troncocónicos de 54 kHz

Procedimiento:

Aunque la dirección en la que se propaga la energía máxima es en ángulo recto respecto a la cara del palpador transmisor, es factible la detección de impulsos que circulen a través del hormigón en cualquier otra dirección. Por tanto, es posible efectuar mediciones de velocidad de impulso situando los dos palpadores en caras opuestas (transmisión directa), o en caras adyacentes (transmisión semidirecta), o en la misma cara (transmisión indirecta o superficial; transmisión de impulsos por eco) de la estructura de hormigón o de la probeta. En el caso de la transmisión de impulsos por eco, el receptor detecta impulsos que han viajado a través del hormigón hacia la superficie opuesta y se han reflejado de vuelta a la primera superficie. Un palpador ultrasónico mantenido en contacto con la superficie del hormigón en ensayo.

La elección de la posición del palpador dependerá de la accesibilidad a las caras del hormigón.

Una vez colocados los palpadores, se procede a la medición con el equipo de ensayo ultrasónico. El tiempo de recorrido vendrá indicado por cada fabricante.

Cálculo y expresión de los resultados:

La velocidad de impulso se calcula mediante la fórmula $V = \frac{L}{T}$

Donde

V es la velocidad del impulso en m/s.

L es la longitud de la trayectoria en mm.

T es el tiempo de recorrido en μs .

A continuación se muestran algunos de los gráficos de onda obtenidos en las diferentes lecturas :

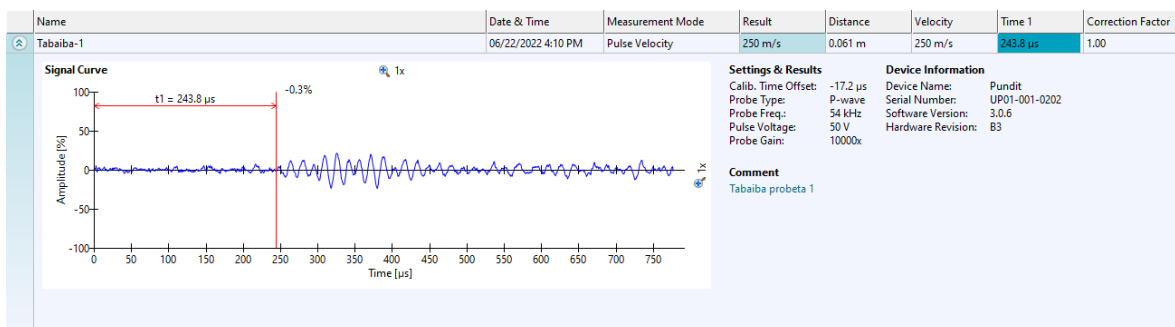
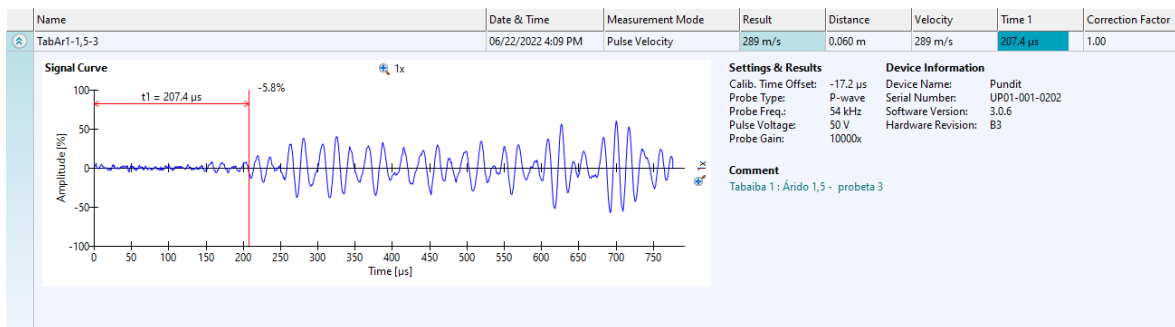
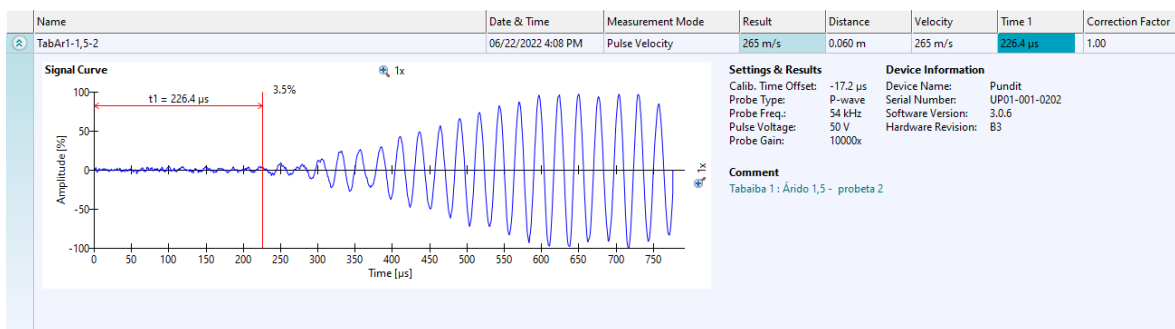
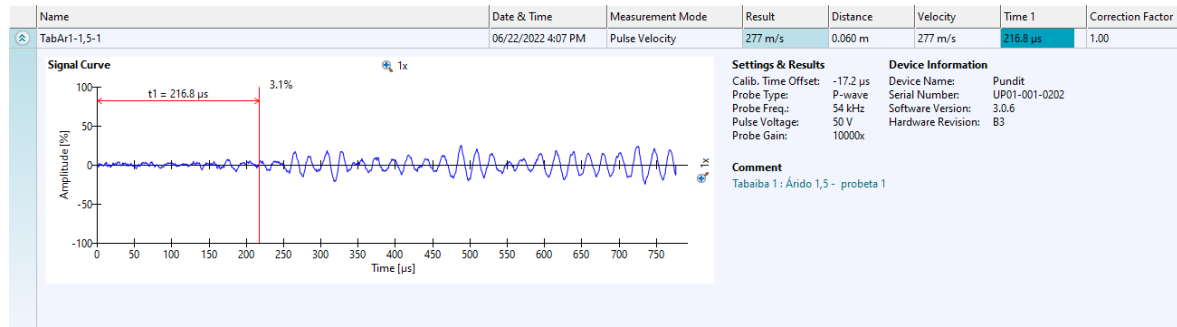


Fig.104: Gráficos de lectura de ondas

	Tornero 1 sin árido			Tornero 1 : árido 1			Tornero 1 : árido 1,5		
Probeta	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3	Probeta 1	Probeta 2	Probeta 3
Altura (cm)	6,10	6,10	6,10	6,02	6,20	6,20	6,40	6,40	6,40
Diámetro (cm)	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14
Sección (cm ²)	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75
Volumen (cm ³)	492,6	492,6	492,6	486,1	486,1	486,1	487,8	487,8	487,8
Tiempo de propagación (μs)	153,40	153,40	168,00	195,00	215,00	217,40	195,00	195,00	162,10
Velocidad de propagación (m/s)	391,00	391,00	357,00	308,00	279,00	276,00	308,00	308,00	370,00
Velocidad de propagación media (m/s)	380,00			288,00			329,00		

Tabla 15: Resultado de prueba de ultrasonido a probetas de El Tornero

	Tabaiba 1 sin árido			Tabaiba 1 : árido 1			Tabaiba 1 : árido 1,5		
Probeta	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Altura (cm)	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,00	6,00	6,00
Diámetro (cm)	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14
Sección (cm ²)	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75
Volumen (cm ³)	492,6	492,6	492,6	492,6	492,6	492,6	484,5	484,5	484,5
Tiempo de propagación (μs)	243,80	236,10	244,40	231,80	228,90	199,80	216,80	226,40	207,40
Velocidad de propagación (m/s)	246,00	254,00	245,00	259,00	262,00	300,00	277,00	265,00	289,00
Velocidad de propagación media (m/s)	250,00			274,00			277,00		

Tabla 16: Resultado de prueba de ultrasonido a probetas de Tabaiba

	Tornero 1 sin árido				Tornero 1 : árido 1				Tornero 1 : árido 1,5			
Probeta	1	2	3	Promedio	1	2	3	Promedio	1	2	3	Promedio
Altura (cm)	6,10	6,10	6,10	6,10	6,02	6,20	6,20	6,14	6,40	6,40	6,40	6,40
Diámetro (cm)	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14
Sección (cm ²)	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75
Volumen (cm ³)	492,6	492,6	492,6	492,60	486,1	486,1	486,1	486,10	487,8	487,8	487,8	487,80
Resistencia (N/mm ²)	3,56	4,08	4,10	3,91	0,18	2,08	2,94	2,51	2,92	2,83	2,41	2,72
Velocidad de propagación (m/s)	391,00	391,00	357,00	379,67	308,00	279,00	276,00	287,67	308,00	308,00	370,00	328,67

Tabla 17: Comparativo de resultados de compresión simple y de ultrasonidos a probetas de El Tornero

	Tabaiba 1 sin árido				Tabaiba 1 : árido 1				Tabaiba 1 : árido 1,5			
Probeta	1	2	3	Promedio	1	2	3	Promedio	1	2	3	Promedio
Altura (cm)	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,10	6,00	6,00	6,00	6,00
Diámetro (cm)	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14
Sección (cm ²)	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75
Volumen (cm ³)	492,6	492,6	492,6	492,60	492,6	492,6	492,6	492,60	484,5	484,5	484,5	484,50
Resistencia (N/mm ²)	2,28	2,17	2,56	2,34	1,53	1,85	1,77	1,72	1,20	1,16	1,18	1,18
Velocidad de propagación (m/s)	246,00	254,00	245,00	248,33	259,00	262,00	300,00	273,67	277,00	265,00	289,00	277,00

Tabla 18: Comparativo de resultados de compresión simple y de ultrasonidos a probetas de Tabaiba

Conclusiones:

Existe una correlación entre los resultados: a mayor resistencia a compresión de las probetas, mayor velocidad de propagación de las ondas.

3.3.16 Ejecución de muestra a escala 1:1

Bajo el marco del curso “La arquitectura de tapia. Técnica constructiva, su restauración y puesta en valor”, organizado por La Isla Sostenible, con la colaboración de la Fundación Laboral de la Construcción y la Cámara de Comercio de Santa Cruz de Tenerife, se realizaron los trabajos que a continuación se describen. Dicho curso fue impartido por Fermín Font, autor, junto a Pere Hidalgo, del libro Arquitecturas de Tápia.

3.3.16.1 Ejecución del zócalo

Para evitar humedades por capilaridad, el tapial ha de ejecutarse sobre un zócalo. Este puede ser de diferentes materiales, lo elegidos en esta ocasión han sido un hormigón blanco ciclópeo. La preferencia en esta ocasión por el cemento blanco, en lugar de una cal hidráulica NHL5, se debe a la necesidad de un rápido fraguado por los tiempos exigidos para la ejecución del tapial. El cemento utilizado ha sido UNE-EN 197-1 CEM II/B-L 32,5 N Cemento Portland con caliza.



Fig.105: Ejecución del zócalo con hormigón blanco ciclópeo



Fig.106: Zócalo desencofrado

Según la Instrucción para la recepción de cementos RC-16 del Real Decreto 256/2016, de 10 de junio, “se consideran cementos blancos aquéllos que presenten una blancura-referente a las coordenadas CIELAB determinadas según el método de ensayo de la norma UN 80117-L* no inferior a 87, que estén definidos en la norma UNE 80305 y que sean conformes con la norma

UNE-EN 197-1 (véase apartado A.1.1), la UNE-EN 14216 (véase apartado A1.2) o la norma UNE-EN 412-1 (véase apartado A.1.4).

El clínker de cemento pórtland blanco es el componente fundamental presente en todos los cementos blancos y se define en el Anejo III de esta Instrucción”

3.3.16.2 Ejecución del encofrado.

En un gesto de romanticismo y homenaje a los oficios del pasado, se ha realizado un encofrado de madera respetando la tipología y medidas históricas de los utilizados en la zona de la Península Ibérica, según datos de Fermín Font.

A continuación se muestra el esquema del propio Fermín Font que sirvió como plano de trabajo de carpintería.

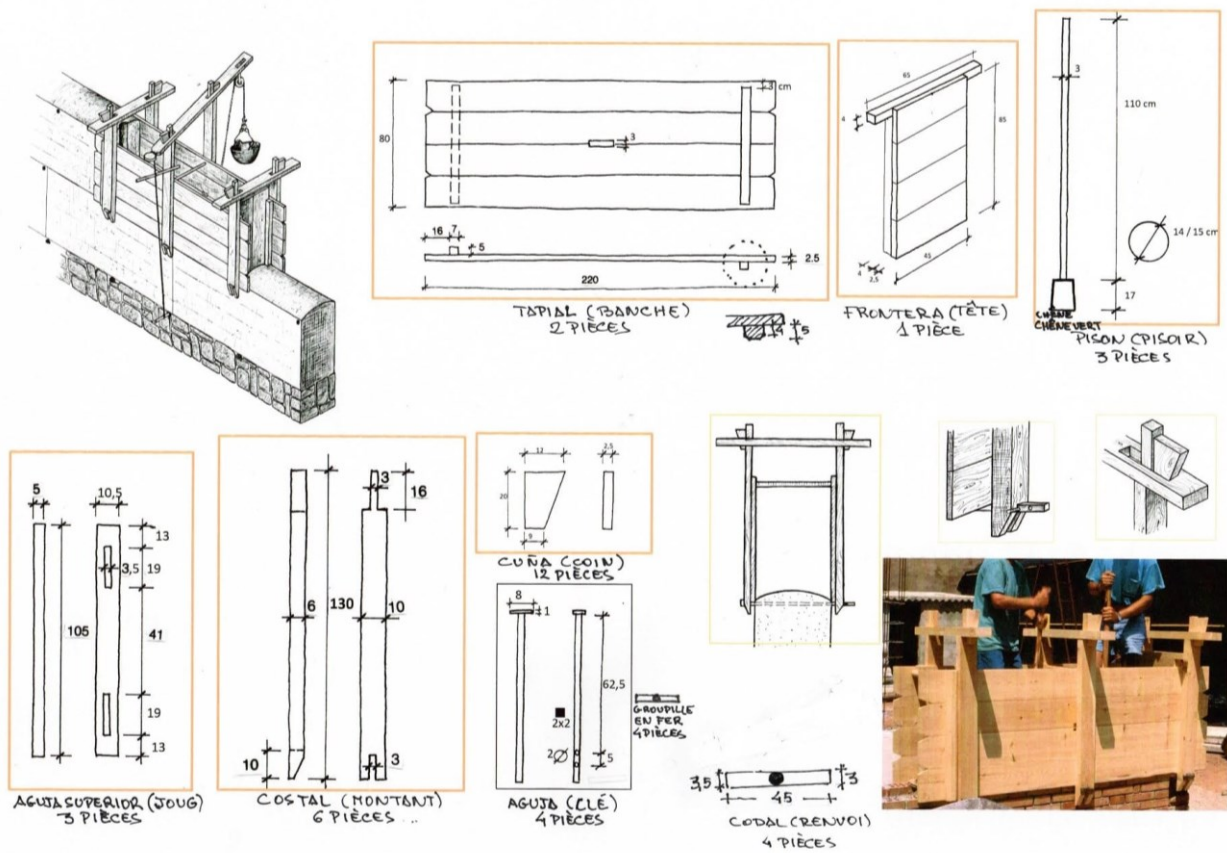


Fig.107: El autor de este TFG durante los trabajos de ejecución del encofrado en el almacén de La Isla Sostenible



Fig.108: Las piezas del encofrado



Fig.109: Encofrado listo para ejecutar el tapial

3.3.16.3 Dosificación de las tierras.



Fig.110: Cal hidráulica NHL5, ceniza del Volcán, tierra de Tabaiba y Tierra de Tórnero

En una práctica habitual realizar sencillas pruebas in situ para obtener una idea de la plasticidad de las tierras.



Fig.111: Amasado de la tierra de El Tornero (paso1)



Fig.112: Ejecución del cilindro (paso2)



Fig.113: Comprobación del grado de resquebrajamiento del cilindro (paso 3)

En una combinación del conocimiento del oficio y de los resultados obtenidos previamente en laboratorio se dosifica la tierra de El Tornero con 1 parte de tierra, 1 parte de grava de 20 mm, 0,5 partes de árido del Volcán Cumbre Vieja y un 5% de cal hidráulica NHL5.



Fig.114: Tierra de El Tornero, grava de 20 mm, árido del Volcán Cumbre Vieja y cal hidráulica



Fig.115: Mezclado del conjunto

3.3.16.4 Ejecución del tapial.

Se han ido depositando tongadas del conjunto dosificado de unos 10 cmts de espesor que se apisonaron con pisones de madera. En una de las caras del tapial se realizó un calicostrado de cal y grava de 20 mm que servirá para protegerlo en caso de zona de fuertes lluvias.



Fig.116: Apisonado (paso1)



Fig.117: Apisonado de borde (paso2)



Fig.118: Ejecución del calicostrado (paso3)



Fig.119: Apisonado de tierra con capa de cal en unión de dos tipos de tierras (paso 4)

Se ha aprovechado la ejecución del tapial para experimentar con diferentes tonalidades de tierras o incorporación de técnicas de ladrillo, muy común esta última en la zona del Mediterráneo peninsular.



Fig.120: Tapial recién desencofrado



Fig.121: Zona del tapial recubierta con calicostrado



Fig.122: Detalle de tapial



Fig.123: Detalle de tapial



Fig.124: El tapial a los 14 días de ejecutado. Nótese el cambio de tonalidad

3.3.17 Ensayos al tapial

A los 14 días de fraguado y curado del tapial, se realizó una campaña de ensayos no destructivos mediante evaluación del perfil de velocidad de impulso, hecho mediante propagación de ondas P internas por medio del equipo de ultrasonidos y detección de defectos.



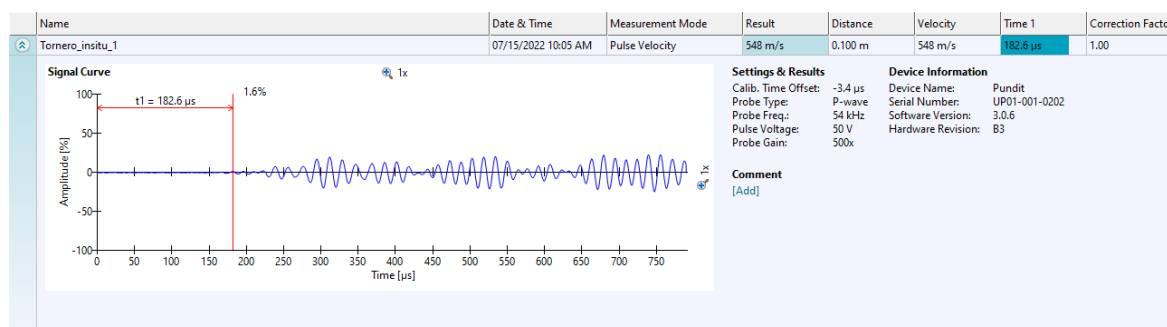
Fig.125: Ensayo no destructivo al tapial

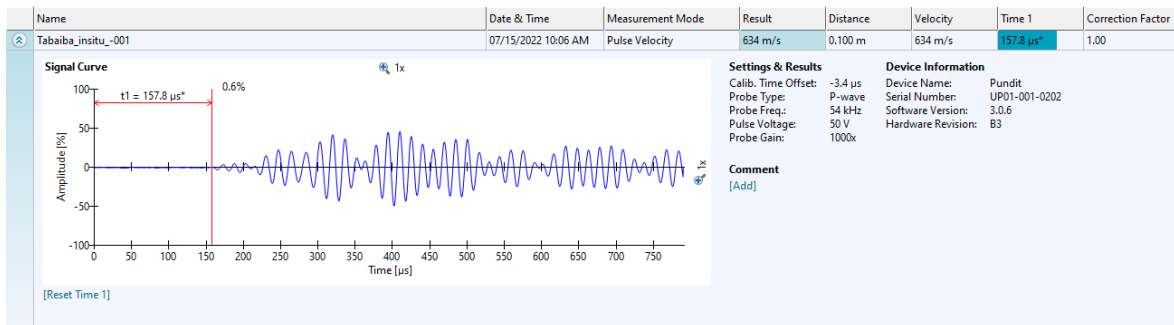
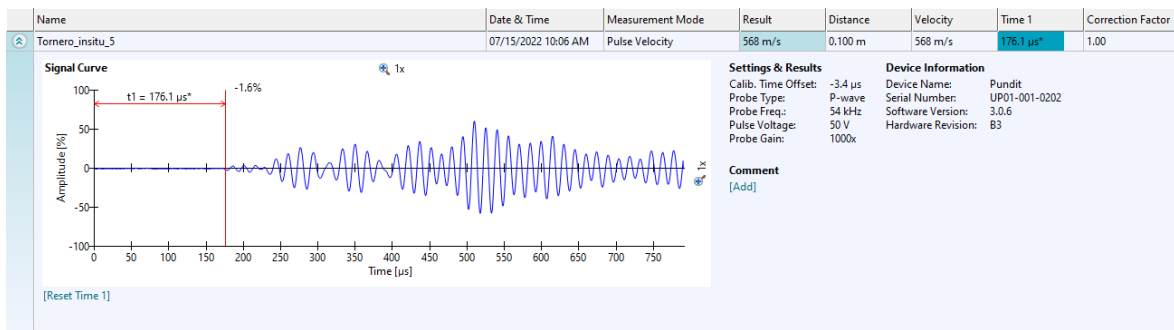
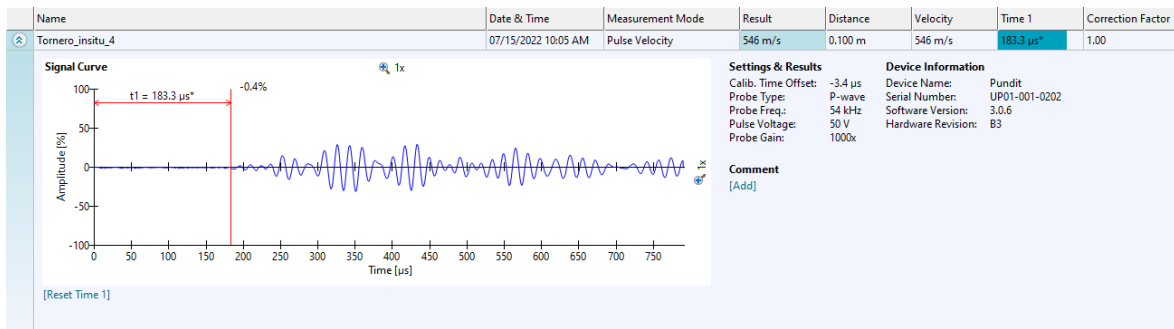
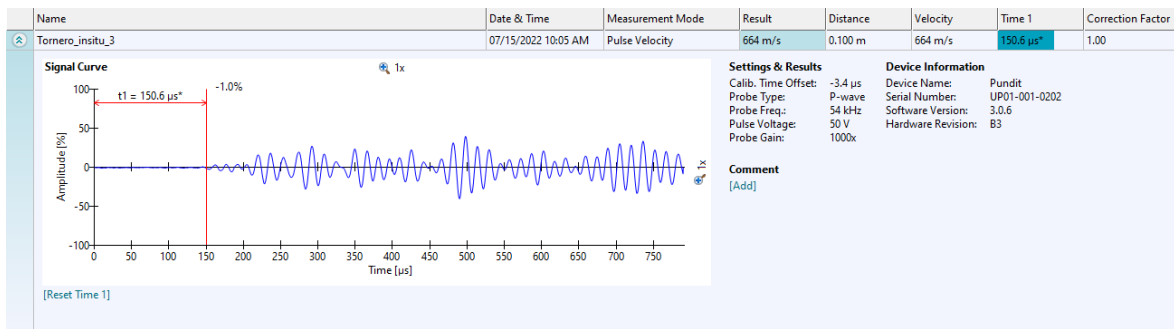
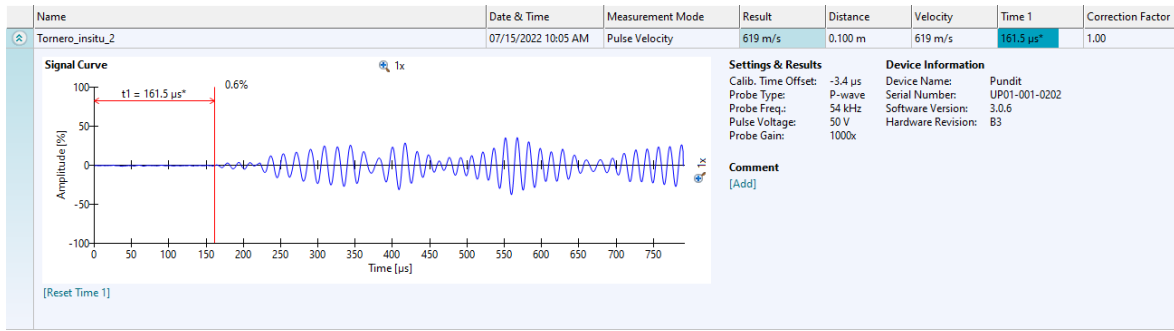
En esta ocasión, las lecturas de impulso ultrasónico torio se realizaron de manera indirecta y con palpadores circulares con gel acoplante.



Fig.126: Palpadores circulares en toma indirecta

Las lecturas de ondas son las siguientes:





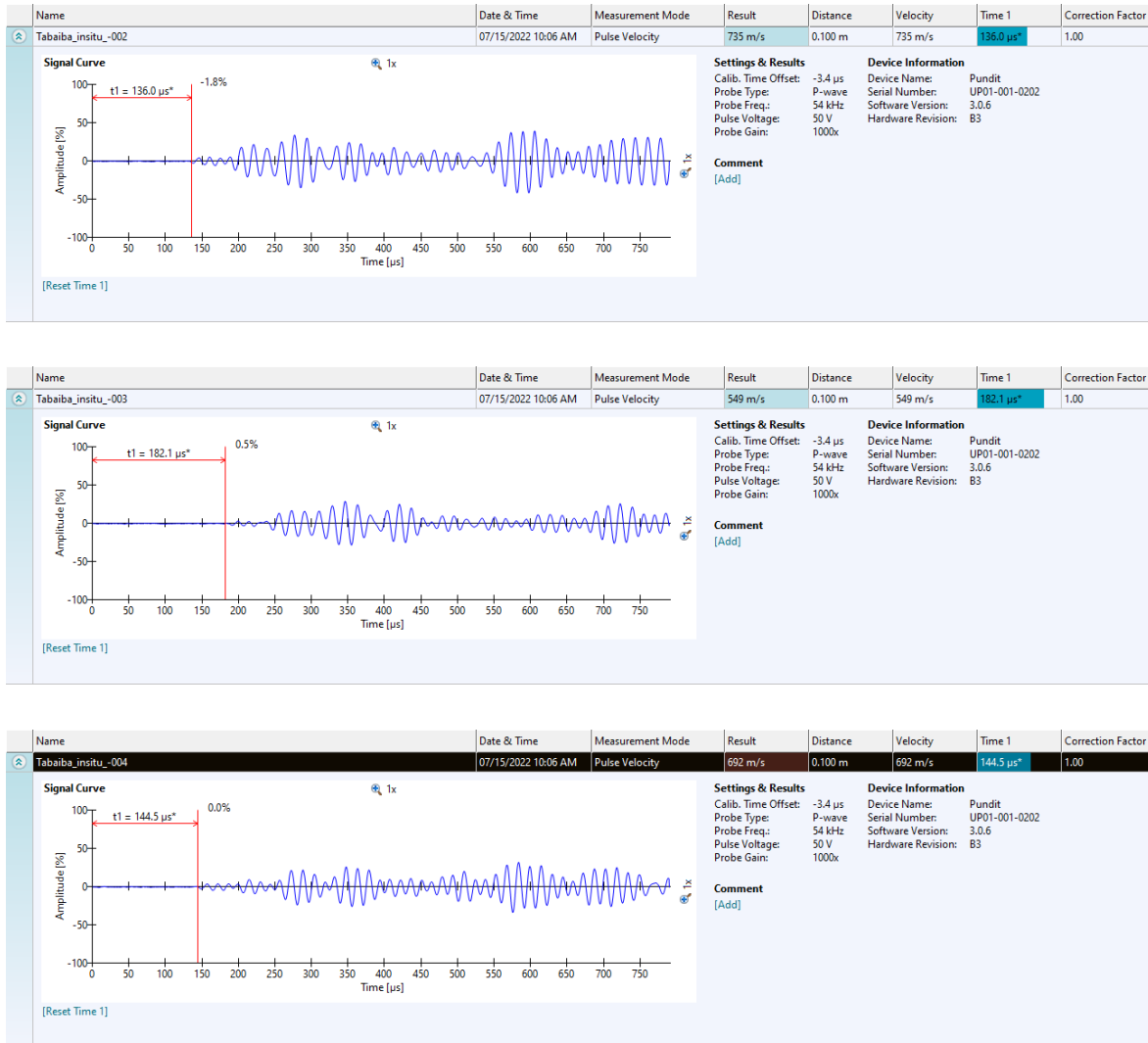


Fig.127: Gráficos de lectura de ondas sobre el tapial

Emplazamiento	Tornado 1, grava 1, árido La Palma1, cal 5% (in situ)					Tabaiba 1, grava 1, (in situ)			
	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4	Lectura 5	Lectura 1	Lectura 2	Lectura 3	Lectura 4
Ancho (cm)	55,00	55,00	55,00	55,00	55,00	55,00	55,00	55,00	55,00
Distancia entre palpadores (cm)	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00	10,00
Tiempo de propagación (µs)	182,60	161,50	150,60	183,30	176,10	157,80	136,00	182,10	144,50
Velocidad de propagación (m/s)	548,00	619,00	664,00	546,00	568,00	634,00	735,00	549,00	692,00
Velocidad de propagación media (m/s)	589,00					652,00			

Tabla 20: Resultados de ensayo de ultrasonidos a tapial

Conclusiones:

La velocidad de propagación es mucho más alta que la alcanzada por la probetas, llegando casi a triplicarse. La velocidad de la dosificación de la tierra de Tabaiba es mayor que la de El Tornado. Se abre en este sentido una vía de investigación, comparando con otros trabajos los motivos de este aspecto.

3.4 Comparativo con otras investigaciones

Como base de este trabajo se ha procedido a una selección de investigaciones previas de autores citados en bibliografía, para confrontar y contrastar los resultados obtenidos con una base científica validada:

- Hall y Djerbid (2004) Rammed earth sample production: context, recommendations and consistency.

Comparan la carga máxima a compresión y la densidad del material. Indican que no existe relación directa entre la variación de la densidad seca y la resistencia a compresión característica. Relaciona la capacidad a compresión con una dosificación entre agregados y aglutinantes.

Densidad p (g/cm^3) 2.09 Compresión f_c (MPa) 0.75-1.46

- Maniatidis y Walker (2008) Structural Capacity of Rammed Earth in Compression.

En este documento se pone de manifiesto la importancia del tamaño de la probeta en la realización de pruebas de laboratorio, pudiendo llegar a tener valores comuna variación de hasta un 50%. Las condiciones de ejecución de las probetas y las de su curado pueden hacer que los resultados varíen en esa proporción.

Igualmente influirán en el resultado la forma y tamaño de las mismas.

Densidad p (g/cm^3) :1.92 Compresión f_c (MPa): 0.81 Mod Elástico (Mpa): 65

- Lombillo et al. (2014) In situ mechanical investigation of rammed earth: Calibration of minor destructive testing.

Se utilizan técnicas de bajo impacto sobre un muro de tapial construido con una determinada proporción de materiales, para conocer su capacidad mecánica y comparar los datos así obtenidos con otros antecedentes de los sistemas habituales.

Compresión f_c (MPa): 1.06-1.45 Mod Elástico (Mpa): 42

- Toufigh y Kianfar (2019). The effects of satabilizers on the termal and the mechanical properties of rammed earth at various humidities and their environmental impacts.

Los autores realizan una seri de probetas con distintos aditivos para comprobar la forma en que estos afectan a los parámetros mecánicos y a al comportamiento del tapial frente a la temperatura o humedad.

Densidad p (g/cm^3): 1.97 Compresión f_c (MPa):3.70

- Shrestha et al. (2020). In Plane shear resistance between the rammed earth blocks with simple interventions: experimentation and finite element study.

Se ejecutan cuatro bloques de tapial (de dimensiones similares al ejecutado para este Trabajo Final de Grado) ejecutados con espesores de tongadas distintos. La diferencia de

comportamiento de los muros con diferentes tongadas es uno de los aspectos estudiados. A la vez analiza el comportamiento de probetas en dos momentos temporales concretos, encontrando que los valores de tensión máxima un 120% superior en probetas con diferencia de cinco meses.

Densidad p (g/cm^3) :2.08 Compresión f_c (MPa) :0.56 Mod Elástico (Mpa) :67

A continuación se muestra un cuadro comparativo de los resultados de todos los trabajos. Puede observarse la gran disparidad en los resultados obtenidos debido a la diversidad de las probetas utilizadas, tipo de compactación, curado, humedad interior de las probetas, proporciones, calidades de las tierras, etc...

Autor	Año	Densidad natural aparente (gr/cm^3)	Resistencia compresión (N/mm^2)
Hall y Gjerbib	2004	2,09	0,75-1,46
Maniatidis	2008	1,92	0,81
Lombillo et al.	2014	-	1,06-1,45
Toufigh y Kianfar	2019	1,97	3,70
Sherestha et al.	2020	2,08	0,56
TFG Javier M. Amigó	2022	1,50	4,00

Tabla 21: Comparativo de resultados de investigaciones de diferentes autores

4. Conclusiones finales

Son muchas las cualidades ligadas a la técnica constructiva del tapial: higroscopicidad, inercia térmica, comportamiento estructural, facilidad de ejecución, economía, ínfimo consumo hídrico y energético, acústica, reciclabilidad o su materialidad. Aunque una de sus principales características es que la tierra puede ser obtenida de la propia excavación de la edificación o de obras cercanas, lo que le confiere la cualidad de producto de Kilómetro Cero.

Esta cualidad es a la vez uno de sus principales inconvenientes, ya debido a la gran variedad de tierras que se pueden conseguir aptas para su ejecución.

Es por ello que, probablemente, no exista una norma en España que regule su ejecución, debido a que es una técnica tradicional que estuvo en desuso en el siglo pasado. Por ello es fundamental que se realicen estudios e investigaciones como la desarrollada en este TFG. Cuanto mayor variedad de datos se tengan, más efectiva será la norma que se realice.

En ese sentido, serán muy útiles aquellos ensayos realizados a muestras de tierras, ya que permitirán entender mejor su comportamiento en el tapial.

De la amplia bibliografía analizada, se saca la conclusión de que urge estandarizar las dimensiones de las probetas y de cómo realizarlas, ya que los resultados obtenidos en las diferentes investigaciones referenciadas dependen en gran medida de las características de éstas. Hecho que no permite realizar una comparación directa entre todos los trabajos estudiados.

Las probetas utilizadas para la investigación origen de este TFG, son las empleadas en los ensayos normalizados de asfaltos. La problemática surge cuando se plantea la fabricación de las probetas con los componentes en condiciones de humedad natural, sin añadir nada de agua, buscando las condiciones que peor podrían darse en obra. Dada la baja humedad de los mismos el grado de cohesión previsto resulta muy bajo, más aún en las muestras de mezclas con el árido de la ceniza del Volcán Cumbre Vieja, cuya cohesión en las condiciones de trabajo es prácticamente nula.

Por ello se optó por la solución de realizar la compactación en estos moldes normalizados utilizados para hacer probetas de asfalto. Una vez compactado no se realiza la extrusión de las mismas ya que implicaría su desmoronamiento. Por este hecho, los resultados obtenidos del ensayo de compresión simple, serían extrapolables para las condiciones del interior del tapial, es decir en zona confinada.

Para la compresión simple de las muestras se aplica la carga uniaxial de manera manual y continuada tomando lecturas de carga y deformación hasta que se produce la rotura (bajada en resistencia tras aplicar carga en los intervalos de deformación definidos= 0.25 mm). Es necesario evidentemente que la muestra permanezca confinada en todo momento.

Del resultado a compresión simple se concluye que la aportación de árido y la no humectación del material hace que dicho aporte haga disminuir la capacidad portante respecto a las arcillas por sí solas; lo cual implica que la mezcla arcilla-árido ha supuesto en ese caso el aumento de porosidad. Este hecho también queda patente en que no ha habido cambio de densidad aparente de manera significativa al añadir árido a la arcilla. Este dato recuerda la importancia de tener controlado en todo momento las dosificaciones del aporte de agua en obra.

En definitiva, entre que el árido no aporta finos y no se ha añadido el agua necesaria a la muestra no se produce una óptima compacidad de la arcilla, tanto sola como mezclada.

Por otro lado, las lecturas de impulso ultrasónico en laboratorio se realizaron de manera directa y con palpadores troncocónicos, habiéndose descartado el uso de palpadores circulares,

ya que al añadir acoplante (gel), podría suponer un desmoronamiento superficial parcial de la muestra.

Tras la visita al tapial se corrobora mediante los ensayos de ultrasonidos in situ que el añadido de agua y cal hay un incremento importante en cuanto a las propiedades de velocidad de transmisión; traducido seguramente en una mejora en la capacidad portante, pero esto ya forma parte de un estudio más exhaustivo, que se espera forme parte de un futuro trabajo del autor de este TFG.

También sería una maravillosa línea para futuros Trabajos Final de Carrera poder desarrollar un primer borrador para una norma UNE sobre ensayos para tapiales o de un CTE.

La recopilación de los datos obtenidos en esta investigación y la comparación de los mismos con investigaciones de otros autores, indicarían que las tierras analizadas poseen características comunes a las tierras que se han utilizado en edificaciones consolidadas desde hace años.

Asimismo, la incorporación del árido proveniente de la ceniza del Volcán Cumbre Vieja de La Isla de La Palma, no modifica sustancialmente las cualidades y características del tapial, por lo que podría recomendarse su utilización en la ejecución de los mismos.

De esta manera se dan por ciertas las dos hipótesis de partida de esta investigación, habiéndose alcanzado los objetivos y pudiéndose plantear el tapial con árido procedente del Volcán Cumbre Vieja de La Palma como alternativa de futuro en Canarias.

	Árido ceniza del Volcán Cumbre Vieja	Tierra Camino El Tornero	Tierra Tabaiba
Coefficiente de uniformidad	4,76	6,00	8,13
Coefficiente de concavidad	1,05	1,50	1,11
Módulo granulométrico	5,48	1,17	1,80
Humedad higroscópica (%)	0,98	16,57	10,56
Límite líquido	no procede	40,20	38,70
Límite plástico	no procede	27,40	26,00
Índice de plasticidad	no plástico	12,80	12,70
Clasificación en gráfico de Casagrande	no procede	ML&OL	ML&OL
Equivalente de arena	84,00	0,00	0,00
Coloración para contenido humus	Transparente	Muy oscuro (moscatel)	No ensayado
Contenido cualitativo en humus	Nulo	Muy alto	No ensayado
Densidad aparente (g/cm ³)	2,35	no procede	no procede
Absorción	1,90	no procede	no procede

Tabla 22: Resumen de características de tierras y ceniza

	Tornero 1 sin árido	Tornero 1 : árido 1	Tornero 1 : árido 1,5	Tabaiba 1 sin árido	Tabaiba 1 : árido 1	Tabaiba 1 : árido 1,5
Probeta	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio	Promedio
Altura (cm)	6,10	6,14	6,14	6,10	6,10	6,00
Diámetro (cm)	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14	10,14
Sección (cm ²)	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75	80,75
Volumen (cm ³)	492,60	486,10	486,10	492,60	492,60	484,50
Resistencia (N/mm ²)	3,91	2,51	2,72	2,34	1,72	1,18
Velocidad de propagación (m/s)	379,67	287,67	328,67	2,48,33	273,67	277,00

Tabla 23: Comparativo de resultados promedios de compresión simple y de ultrasonidos a probetas

5. Bibliografía

5.1 Bibliografía principal

- EARTH ARCHITECTURE. Ronald Rael
- RAMMED EARTH, Lehm un architektur. Martin Rauch, Otto Kapfinger
- ARQUITECTURES DE TÀPIA. Fermín Font, Pere Hidalgo
- RAMMED EARTH. Design and construction guidelines. Peter Walker, Rowland Keable, Joe Martin, Vasiliou Mania-tidis
- MANUAL DE CONSTRUCCIÓN EN TIERRA. Gernot Minke
- TERRA INCOGNITA. VV.AA.
- ARQUITECTURAS DE TERRA. Jean Dethier
- BOOK COMPRESSED EARTH BLOCK & RAMMED EARTH STRUCTURES. B. V. Benkatarama Reddy
- LA TIERRA. MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN. VV.AA., Instituto Eduardo Torroja
- MECÁNICA DE SUELOS Y ROCAS: Prácticas y Ensayos. José Chacón, C. Irigaray, R. El Hamdouni, Francisco Lamas
- BASES PARA EL DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN CON TAPIAL. Bauluz, G.; Bárcena, P. Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Madrid, 1992. ISBN
- VIVIENDAS ANTISÍSMICAS . Gernot Minke
- FRANCIS KERE. RADICALLY SIMPLE. Hatje Cantz
- CRITERIOS DE INTERVENCIÓN EN LA ARQUITECTURA CON TIERRA. Proyecto Coremans_Ministerio de Educación
- REFINED EARTH. DETAL. Martin Rauch
- CONSTRUIR CON TIERRA. Carlos Guigou. Universidad de Las Palmas
- CONSTRUCCIÓN CON TIERRA PRESENTE, PASADO Y FUTURO. Félix Jové Sandoval, José Luis Sainz Guerra
- NORMAS UNE
- CODIGO TÉCNICO DE LA EDIFICACIÓN (CTE)
- STANDARD GUIDE FOR DESIGN OF EARTHEN WALL BUILDING SYSTEMS
- FIESTA Y URBANISMO. VALENCIA EN LOS SIGLOS XVI Y XVII. Desirée Juliana
- ANTEPROYECTO DE LEY DE LA ECONOMÍA CIRCULAR EN CANARIAS.
<https://www.gobiernodecanarias.org/participacionciudadana/iniciativas/iniciativas/detalle/PPP-Propuesta-de-Anteproyecto-de-Ley-Canaria-de-Economia-Circular/>
- PLAN INSULAR DE RESIDUOS DE CANARIAS.
- LEY 1/1999 DE RESIDUOS DE CANARIAS.
- INSTRUCCIÓN PARA LA RECEPCIÓN DE CEMENTOS RC-16. REAL DECRETO 256/2016, de 10 de junio

5.2 Tesis, TFGs, artículos y revistas

- Caracterización mecánica del tapial y su aplicación a estructuras existentes mediante el uso de ensayos no destructivos (Tesis doctoral). Ignacio Arto Torres. Universidad de Granada Arquitectura de tierra.
- La vivienda en Tenerife a raíz de la conquista. Los sistemas constructivos. Alejandro Larraz Mora.
- Tensile strength of compacted rammed earth materials. Hiroyuki Arakia, Junichi Kosekib, Takeshi Satoc.
- Experimental evaluation of the optimum lime content and strength development of lime-stabilized rammed earth. Fernando Ávila, Esther Puertas y Rafael Gallego
- Characterization of the mechanical and physical properties of stabilized rammed earth. Fernando Ávila, Esther Puertas y Rafael Gallego
- ASTM E2392M (2010). Standard Guide for Design of Earthen Wall Building Systems
- Rammed earth sample production: context, recommendations and consistency. Hall y Djerbid
- Structural Capacity of Rammed Earth in Compression. Maniatidis y Walker
- In situ mechanical investigation of rammed earth: Calibration of minor destructive testing. Lombillo et al.
- The effects of satabilizers on the termal and the mechanical properties of rammed earth at various humidities and their environmental impacts. Toufigh y Kianfar
- Tipos edificatorios. Beatriz Yuste. Politécnica Cataluña
- Revista Estructuras. Año 1 – Nº 2 Bioarquitectura: diseño y construcción con tierra. ISSN . Rodolfo Rotondaro, María Rosa Mandrini, Jorge Tomasi, Laura Bellmann y Nahuel Ghezan
- Análisis comparativo de aspectos térmicos y resistencias, mecánicas de los materiales y los elementos de la construcción con tierra. María Guadalupe Cuitiño-Rosales, Rodolfo Rotondaro y Alfredo Esteves. Investigación Universidad de Cuyo. Argentina
- Cerramientos de Tierra con materiales de reciclaje. Francisco Javier Blanco Martín y Javier Arias Madedero. Universidad de Valladolid
- Paredes de tapial y su industrialización. A. von Mag y M. Rauch
- Comportamiento térmico de los edificios de tierra. K. Heathcote
- Construcción con tierra del S XXI. S. Bestraten, E. Hormías y A. Altemir
- Patologías en las construcciones con tierra. M. A. Rodríguez, I. Monteagudo, B. Saroza, P. Nolasco y Y. Castro
- Transferencia de humedad durante la construcción con tierra. H. Schroeder
- Arquitectura y Construcción en tierra. Estudio comparativo de técnicas actuales. Tesina de Fabio Gatti. Universidad Politécnica Cataluña
- Utilización de fibras naturales en adobe. Pedro Bel-Anzué, Jesús García Mainar, Juan Moreno Ortolano, Alfonso Zavala, Paloma Folache y Ignacio Abad Cayuela.
- Técnicas y formales de la tierra prensada. Paula Orío Pérez, Íñigo Rodríguez Vidal,
- Bioarquitectura: diseño y construcción con tierra - Noviembre 2018 ISSN N°2 , año1
- Las normativas de construcción con tierra en el mundo. J. Cid, F. R. Mazarrón y I. Cañas.
- Revista Detail (nº 3, 2004)

5.3 Tablas

- Tabla 1: Cantidad de muestra a tomar en función del tamaño máximo de la partícula de suelo
- Tabla 2: Humedad higroscópica de las tierras y árido
- Tabla 3: Análisis granulométrico por tamizado en suelos
- Tabla 4: Características granulométricas
- Tabla 5: Determinación de la plasticidad
- Tabla 6: Determinación del equivalente de arena
- Tabla 7: Densidad y absorción de arenas
- Tabla 8: Determinación del contenido de humus
- Tabla 9: Resumen de características de las tierras y del árido
- Tabla 10: Densidad aparente en probetas de tierra de El Tornero
- Tabla 11: Densidad aparente en probetas de tierra de Tabaiba
- Tabla 12: Resistencia a compresión de probetas de El Tornero
- Tabla 13: Resistencia a compresión de probetas de Tabaiba
- Tabla 14: Resumen de promedio de las tres probetas de resistencia a compresión simple y densidad aparente
- Tabla 15: Resultado de prueba de ultrasonido a probetas de El Tornero
- Tabla 16: Resultado de prueba de ultrasonido a probetas de Tabaiba
- Tabla 17: Comparativo de resultados de compresión simple y de ultrasonidos a probetas de El Tornero
- Tabla 18: Comparativo de resultados de compresión simple y de ultrasonidos a probetas de Tabaiba
- Tabla 20: Resultados de ensayo de ultrasonidos a tapial
- Tabla 21: Comparativo de resultados de investigaciones de diferentes autores
- Tabla 22: Resumen de características de tierras y ceniza
- Tabla 23: Comparativo de resultados promedios de compresión simple y de ultrasonidos a probetas

5.4 Imágenes

- Fig. 1: Tapial realizado en julio de 2022 a escala 1:1 con tierras de Tenerife y ceniza del Volcán Cubre Vieja de La Palma
- Fig.2: Las partes primigenias de la Gran Muralla China fueron construidas con tapial hace más de 4.000 años
- Fig.3: Arge Bam en Irán, existen parte de construcciones con 2.500 años de antigüedad.
- Fig.4: En el Valle del Draa, Marruecos existen ciudades fortificadas construidas con tierra en el siglo XVIII
- Fig.5: Mezquita de Mopti, Mali. 1935
- Fig.6: Bazar de Sirdjan en Irán
- Fig.7: Alcazaba de la Alhambra. Siglo XIII. Granada

- Fig.8: Castillo Burmajinar. Siglo X.Jaen Fig.9: Albarrana octogonal Torre Mochada. Siglo XII. Cáceres
- Fig.10: Vivienda en Ayerbe. 2015 Huesca. dobleSTUDIO
- Fig.11: Almacén para Ricola en Laufen, Suiza.2014 Herzog & de Meuron (imagen de portada)
- Fig.12: Centro de Arquitectura de la Tierra.2010.Congo.Francis Kere
- Fig.13: Piscina Municipal de Toro. 2010. Vier Arquitectos
- Fig.14: Capilla de la Reconciliación.Berlín. 2000. Reitermann y Sassenroth. Con la colaboración de Martin Rauch
- Fig.15: Bodega Lanciego. Álava. 2008 . P. Basañez + D. Gartei
- Fig.16: Escuela de Artes Visuales.Oaxaca.2008.Taller Arquitectura Mauricio Roca
- Fig.17: Centro Cultural del Desierto Nk'Mip .Canadá.2006.DIALOG
- Fig.18: Refugio en la Montaña Tucson.2012. DUST
- Fig.19: SanBaoPeng Art Museum. China.2017 .DL Atelier
- Fig.20: La Gran Muralla de Western Australia.2014. Luigi Rosselli
- Fig.21: Centro de visitantes Sparrenburg. Alemania.2014. Max Dudler
- Fig.22: Casa Munita González. Chile.2010 . Arias Arquitectos
- Fig.23: Casa Viña. Portugal.2015. Blaanc
- Fig.24: Grabado en el que se representa la construcción de la muralla de Valencia en el año 1546. Del libro 'Fiesta y urbanismo. Valencia en los siglos XVI y XVII'. Desirée Juliana
- Fig.25: Ilustración del álbum de oficios de Cachemira. 1850.
- Fig.26: Portada del libro Arte de albañilería o instrucciones para los jóvenes que se dediquen a él" del arquitecto Juan de Villanueva 1827
- Fig.34: Planificación de ensayos en laboratorio
- Fig.35: Muestras: tierras de camino El Tornero, Tabaiba y áridos de cenizas de La Palma
- Fig.36: Operación de cuarteo (paso 1)
- Fig.37: Operación de cuarteo (paso 2)
- Fig.38: Operación de tamizado
- Fig.40: Secado en estufa
- Fig.41: Curva granulométrica del árido de La Palma
- Fig.42: Curva granulométrica de la tierra de El Tornero
- Fig.43: Curva granulométrica de la tierra de Tabaiba Alta
- Fig.44: Imagen software EDX-SEM. Presencia elementos químicos de la muestra
- Fig.45: Porcentaje de presencia de elementos químicos en mineral de lava
- Fig.46: Difracción de rayos X en polvo molido e identificación de fases preliminares
- Fig. 47: Muestra completa de lava introducida en el portamuestras del SEM (aprox. 2 mm)
- Fig.48: Imágenes de SEM de la lava de menor a mayor aumento, en escalas que van de micras a nanómetros
- Fig.49: Surco y acanalizador en cuchara de Casagrande.
- Fig.50: Aparato de Casagrande y acanalador
- Fig.51: Muestra con surco sobre la cuchara
- Fig.52: Carta de plasticidad de Casagrande (Imagen de Diccionario de Geotecnia)
- Fig.53: Cilindro de 3 mm de diámetro
- Fig.54: Resquebrajamiento del cilindro
- Fig.55: Pesada de la muestra con surco sobre la cuchara
- Fig.56: Estufa con muestras a secar

- Fig.57: Probetas con la disolución de la muestra
- Fig.58: Parte del material de trabajo
- Fig.59: Árido lavado en tamiz (Paso 1)
- Fig.60: Picnómetro y pesa (Paso 2)
- Fig.62: Árido siendo secado (Paso 3)
- Fig.63: Cono, pisón y árido (Paso 4)
- Fig.64: Árido sin desmoronar (Paso 5)
- Fig.65: Árido desmoronado (Paso 6)
- Fig.66: Pesada de muestra de tierra de El Tornero
- Fig.67: Pesada de muestra de árido del Volcán Cumbre Vieja
- Fig.68: Muestra de tierra de El Tornero e hidróxido de sodio
- Fig.69: Muestras tras 24 h de reposo. A la derecha, la disolución patrón.
- Fig.70: Muestra de tierra antes de apisonar
- Fig.71: Números de golpes de compactación
- Fig.72: Compactador con probeta
- Fig.73: Probeta con 50 impactos
- Fig.74: Serie de probetas de prueba con 20 impactos
- Fig.76: Tierras de La Laguna sin árido
- Fig.77: Tierras de La Laguna con árido de las cenizas del Volcán con dosificación 1:1
- Fig.78: Tierras de La Laguna con árido de las cenizas del Volcán con dosificación 1:1,5
- Fig.79: Tierras de Tabaiba sin árido
- Fig.80: Tierras de Tabaiba con árido de las cenizas del Volcán con dosificación 1:1
- Fig.81: Tierras de Tabaiba con árido de las cenizas del Volcán con dosificación 1:1,5
- Fig.82: Máquina de compresión 50 kN uniaxial
- Fig.83: Proceso de rotura
- Fig.84: Detalle del lector de deformación
- Fig.85: Gráfica de rotura a compresión El Tornero sin árido. Probeta 1
- Fig.86: Gráfica de rotura a compresión El Tornero sin árido. Probeta 2
- Fig.87: Gráfica de rotura a compresión El Tornero sin árido. Probeta 3
- Fig.88: Gráfica de rotura a compresión El Tornero 1:1. Probeta 1
- Fig.89: Gráfica de rotura a compresión El Tornero 1:1. Probeta 2
- Fig.90: Gráfica de rotura a compresión El Tornero 1:1. Probeta 3
- Fig.91: Gráfica de rotura a compresión El Tornero 1:1,5. Probeta 1
- Fig.92: Gráfica de rotura a compresión El Tornero 1:1,5. Probeta 2
- Fig.93: Gráfica de rotura a compresión El Tornero 1:1,5. Probeta 3
- Fig.94: Gráfica de rotura a compresión Tabaiba sin árido. Probeta 1
- Fig.95: Gráfica de rotura a compresión Tabaiba sin árido. Probeta 2
- Fig.96: Gráfica de rotura a compresión Tabaiba sin árido. Probeta 3
- Fig.97: Gráfica de rotura a compresión Tabaiba 1:1. Probeta 1
- Fig.98: Gráfica de rotura a compresión Tabaiba 1:1. Probeta 2
- Fig.99: Gráfica de rotura a compresión Tabaiba 1:1. Probeta 3
- Fig.100: Gráfica de rotura a compresión Tabaiba 1:1,5. Probeta 1
- Fig.101: Gráfica de rotura a compresión Tabaiba 1:1,5. Probeta 2
- Fig.102: Gráfica de rotura a compresión Tabaiba 1:1,5. Probeta 3
- Fig.103: Equipo de ultrasonidos con transductores troncocónicos de 54 kHz
- Fig.104: Gráficos de lectura de ondas

- Fig.105: Ejecución del zócalo con hormigón blanco ciclópeo
- Fig.106: Zócalo desencofrado
- Fig.107: El autor de este TFG durante los trabajos de ejecución del encofrado en el almacén de La Isla Sostenible
- Fig.108: Las piezas del encofrado
- Fig.109: Encofrado listo para ejecutar el tapial
- Fig.110: Cal hidráulica NHL5, ceniza del Volcán, tierra de Tabaiba y Tierra de El Tornero
- Fig.111: Amasado de la tierra de El Tornero (paso1)
- Fig.112: Ejecución del cilindro (paso2)
- Fig.113: Comprobación del grado de resquebrajamiento del cilindro (paso 3)
- Fig.114: Tierra de El Tornero, grava de 20 mm, árido del Volcán Cumbre Vieja y cal hidráulica
- Fig.115: Mezclado del conjunto
- Fig.116: Apisonado (paso1)
- Fig.117: Apisonado de borde (paso2)
- Fig.118: Ejecución del calicostrado (paso3)
- Fig.119: Apisonado de tierra con capa de cal en unión de dos tipos de tierras (paso 4)
- Fig.120: Tapial recién desencofrado
- Fig.121: Zona del tapial recubierta con calicostrado
- Fig.122: Detalle de tapial
- Fig.123: Detalle de tapial
- Fig.124: El tapial a los 14 días de ejecutado. Nótese el cambio de tonalidad
- Fig.125: Ensayo no destructivo al tapial
- Fig.126: Palpadores circulares en toma indirecta
- Fig.127: Gráficos de lectura de ondas sobre el tapial