

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE ARQUITECTURA



TRABAJO FIN DE GRADO

Eloy Cristóbal Gambau

Aplicaciones de la construcción con tierra en la
construcción actual

Eloy Cristóbal Gambau

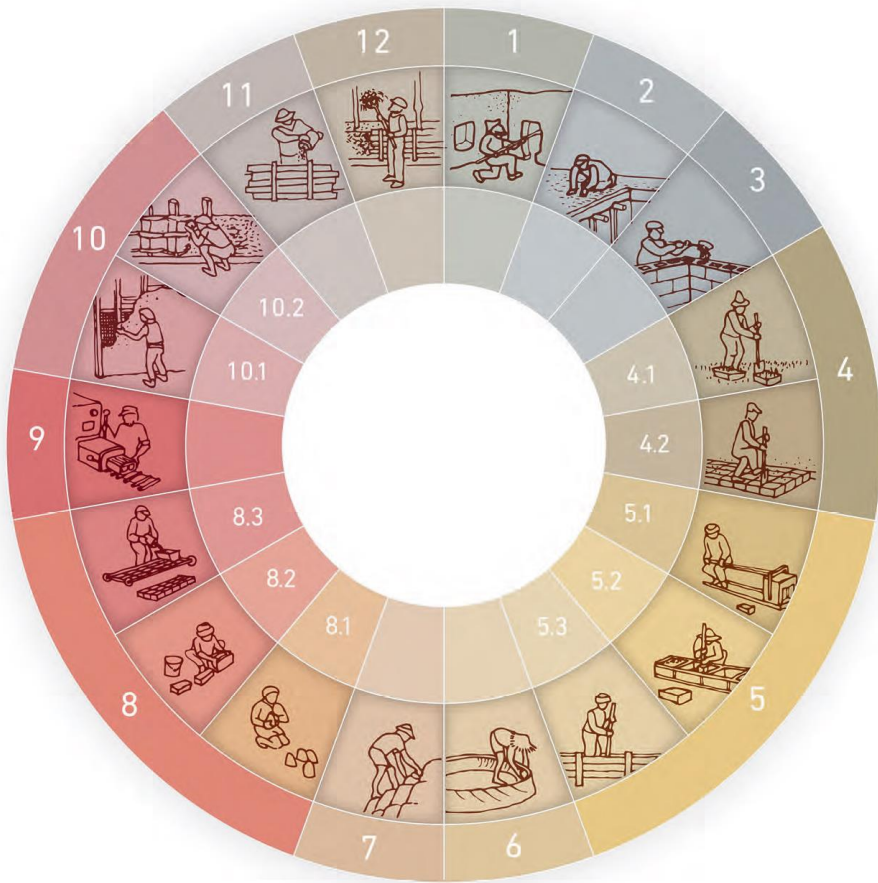
Ernesto Abdon Rodriguez

Aula TFG 7

Coordinador: **GÓMEZ PIOZ, EDUARDO JAVIER** (*Departamento de Ideación
Gráfica Arquitectónica*)

Adjunta: **HORNA ALMAZÁN, PILAR** (*Departamento de Matemática Aplicada*)

Fecha de entrega: 31 de mayo, 2024



<< La tierra es un material erosionado que se encuentra en todas partes. Puedes tomarlo, mezclarlo con agua y darle forma y al final, devolverlo a la naturaleza >>

Martin Rauch

Resumen:

Este trabajo explora la relevancia y las aplicaciones contemporáneas de la construcción con tierra, una técnica milenaria que ha perdurado a lo largo del tiempo y que actualmente está experimentando un resurgimiento en el ámbito de la arquitectura sostenible. La construcción con tierra, que incluye métodos como el tapial, adobe y bloque de tierra comprimida, ofrece una serie de ventajas significativas como alta resistencia estructural, buen aislamiento térmico y acústico, y una notable sostenibilidad ambiental debido a su bajo impacto ecológico. Sin embargo, también enfrenta desafíos, especialmente en términos de vulnerabilidad a la humedad y la percepción negativa asociada a su uso en entornos urbanos modernos.

El objetivo de este estudio es analizar las razones por las cuales la construcción con tierra ha sido relegada en favor de materiales como el hormigón y el ladrillo, y evaluar las oportunidades para su reintegración en la arquitectura contemporánea. A través de un análisis comparativo de casos de estudio y la exploración de técnicas constructivas tradicionales y modernas, se pretende destacar cómo la tierra puede ser una alternativa viable y competitiva en la construcción actual. Se abordan tanto las ventajas como las limitaciones de este material, proponiendo soluciones innovadoras y la combinación con otros materiales para superar sus desventajas.

La investigación concluye que, a pesar de los desafíos, la construcción con tierra tiene un potencial considerable para contribuir a la sostenibilidad y eficiencia energética en la arquitectura moderna. Se subraya la importancia de la educación y la sensibilización sobre los beneficios de este método constructivo para cambiar la percepción actual y fomentar su uso. En última instancia, la combinación de avances tecnológicos y una mayor conciencia ambiental puede facilitar la aceptación y expansión de la construcción con tierra, integrándola plenamente en el panorama de la construcción contemporánea.

Palabras clave: Construcción con tierra, adobe, tapial, sostenibilidad, ciclo de vida, materiales de construcción

INDICE

1. Introducción.....	7
- Contextualización del tema	
- Justificación del estudio	
- Objetivos de la investigación	
- Antecedentes y contexto histórico	
2. Técnicas de construcción con tierra.....	9
- Tradicionales	
- Contemporáneas	
3. Tendencias arquitectónicas y cambios en el paradigma constructivo.....	21
- Percepciones sociales, culturales y económicas	
- Normativa actual	
- Ventajas y desventajas de la construcción con tierra	
4. Materiales	24
- Materialidad del suelo en España	
- La tierra como material	
- Ventajas y desventajas de la construcción con tierra	
5. Análisis comparativo con otros materiales de construcción.....	30
- Ciclo de vida de los materiales	
- Huella de carbono	
- Rendimiento	
- Repercusión	
6. Estudios de caso de construcción con tierra en España.....	42
- Estudio de casos representativos: características y particularidades de cada proyecto	
7. Integración de la construcción con tierra en el contexto actual.....	44
- Desafíos en la arquitectura contemporánea	
- Oportunidades: Uso de la tierra como aislante térmico y acústico	
- Barreras y limitaciones a superar	
8. Conclusiones.....	47
9. Propuestas para promover el uso de la construcción con tierra.....	48
- Áreas de estudio pendientes y posibles enfoques para futuras investigaciones	
- Referencias bibliográficas	

1. INTRODUCCIÓN

La construcción en tierra ha sido una práctica histórica arraigada, especialmente en regiones de climas cálidos y secos, dando lugar a una diversidad de estructuras que van desde viviendas hasta edificaciones públicas y religiosas. Se estima que aproximadamente un tercio de la población mundial reside en edificios de tierra (*Fig. 1*), llegando incluso al 40% en áreas menos desarrolladas. En países como India o China, se estima que más de 50 millones de edificaciones estén construidas con este material. En Europa, sin embargo, la construcción con tierra esta prácticamente fuera del panorama de construcción actual, aunque podemos encontrar diversos ejemplos en zonas rurales, normalmente vinculados a arquitectura vernácula encontrando muy pocos ejemplos de arquitectura contemporánea. (12)

A pesar de la larga historia de la construcción en tierra, los países más industrializados han optado mayormente por materiales como ladrillo, hormigón, acero y vidrio, considerados más nobles y socialmente aceptados. Sin embargo, en años recientes, ha surgido un movimiento gradual hacia la revalorización de esta arquitectura, tanto en entornos desfavorecidos como en contextos más industrializados. Este resurgimiento se fundamenta en la búsqueda de una arquitectura más sostenible y en el reconocimiento de la calidad constructiva y estética de las edificaciones de tierra. (1)

Diversas organizaciones, movimientos e individuos han promovido esta tendencia, entre ellos el laboratorio "CRATerre", una de las asociaciones más destacadas en Europa surgida tras la crisis energética de los años 70. Figuras influyentes en esta corriente incluyen a:

- Anna Heringer: Arquitecta alemana nacida en 1977, reconocida internacionalmente por su compromiso con la arquitectura social en Bangladesh y Marruecos, entre otros lugares.
- Martin Rauch: Artista austriaco nacido en 1958, colaborador en numerosos proyectos de arquitectura de tierra en todo el mundo.
- Francis Kéré: Arquitecto originario de Burkina Faso, con base en Berlín, nacido en 1965. Pionero en la aplicación de técnicas tradicionales de construcción en tierra para desarrollar arquitectura contemporánea, particularmente en su país natal. (*Fig. 2*)

La visión innovadora y controvertida de Martin Rauch destaca por su búsqueda de una estética contemporánea y atractiva mediante el uso de materiales como el barro en la construcción. Esto subraya la versatilidad, sostenibilidad y capacidad de trabajo de este material en el ámbito de la construcción contemporánea, ofreciendo soluciones a desafíos como inercias térmicas y acústicas, producción de residuos y reutilización de materiales. (2)

En la historia de la arquitectura española, el uso de la tierra como material constructivo ha sido común, especialmente en entornos rurales (*Fig.3*) debido a su disponibilidad y versatilidad. Sin embargo, con el tiempo, ha habido un declive en su uso, relegándolo en gran medida en el panorama actual de la construcción.

La evolución de las tendencias arquitectónicas y las preferencias hacia materiales modernos han contribuido al descenso en la construcción con tierra, generando un estigma asociado a este método, especialmente en entornos urbanos que privilegian la modernidad y la innovación tecnológica.

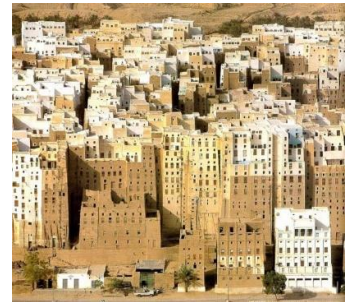


Fig. 1: Shibam, Yemen

Fuente:

<https://arquitecturayempresa.es/>



Fig. 2: Centro de salud, Gando – Francis Kéré, (2014)

Fuente:

<https://www.kerearchitecture.com>

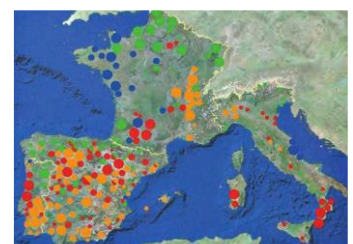


Fig. 3: Mapa de construcciones con tierra en España

(Rojo) – Adobe

(Verde y Amarillo) – Tapial

Fuente: Terra Incognita.

No obstante, en los últimos años, ha surgido un renovado interés en la arquitectura sostenible y el uso de materiales naturales y locales, impulsando una nueva apreciación por la construcción en tierra como una alternativa viable y respetuosa con el medio ambiente en el diseño y la edificación de estructuras contemporáneas. (3)

Justificación del estudio

La construcción con tierra ha sido un método ampliamente utilizado en la arquitectura a nivel internacional. En España, existen numerosos ejemplos de este tipo de arquitectura distribuidos por todo el territorio nacional, especialmente en zonas rurales (*Fig. 4*) donde ha prevalecido sobre otros métodos constructivos. Sin embargo, en la actualidad, la construcción con tierra ha quedado en desuso, dando paso a otros métodos constructivos que, aunque son de mayor coste y menor sostenibilidad, se han vuelto predominantes en el sector.

Mi objetivo es estudiar este tipo constructivo y ver por qué se ha quedado en desuso en el ámbito de la construcción actual, dejando paso a otros métodos constructivos de mayor coste y menor sostenibilidad. Con esto, intentar desarrollar maneras de reintroducir este material en la actualidad.



Fig. 4: Sepúlveda, España
Fuente: Google imágenes

Objetivos de la investigación

Los objetivos del presente trabajo se centran en analizar en profundidad la historia y evolución de la construcción con tierra en España. Se pretende investigar las razones que han contribuido a su relegación a un segundo plano, limitando su uso principalmente a zonas rurales, áreas apartadas y arquitecturas vernáculas. Asimismo, se examinarán las ventajas y desventajas de este método constructivo en comparación con otros materiales de construcción como el hormigón o el ladrillo, y se explorarán sus posibilidades de aplicación en la arquitectura contemporánea.

Además, se llevará a cabo un análisis de ejemplos de construcciones desarrolladas exclusivamente con este material, con el fin de comprender su potencial y sus limitaciones en el contexto actual. Por último, se estudiarán las oportunidades para integrar la construcción con tierra dentro del marco de la arquitectura sostenible y rentable, con miras a su futuro desarrollo y promoción en el ámbito de la construcción moderna.

Antecedente y contexto social

La construcción con tierra en España tiene una rica historia que se remonta a siglos atrás. Desde tiempos inmemoriales, la tierra ha sido un recurso abundante y accesible utilizado por las comunidades locales para la construcción de viviendas y estructuras adaptadas a las necesidades del entorno y la cultura. Esta técnica, reconocida por su durabilidad, resistencia y adaptabilidad a diferentes climas y condiciones geográficas, ha dejado un legado arquitectónico notable en todo el país.

A lo largo de la historia, la construcción con tierra ha sido una práctica arraigada en España (Fig.5), especialmente en áreas rurales donde la disponibilidad de materiales y el conocimiento tradicional han facilitado su empleo. Las casas de adobe y los tapias son ejemplos emblemáticos de la arquitectura vernácula que ha perdurado a lo largo de generaciones, reflejando una estrecha relación entre el ser humano y su entorno natural.



Fig. 5: Castillo de Baños de la Encina, Jaén

Fuente: Google Imágenes

Sin embargo, con los cambios económicos, culturales y tecnológicos experimentados por la sociedad, la construcción con tierra ha visto disminuir su popularidad y uso. El auge de la industrialización y la urbanización en el siglo XX llevó a una preferencia por materiales de construcción más modernos y estandarizados, como el hormigón y el acero, relegando a la tierra a un segundo plano en el ámbito de la construcción contemporánea.

Además, factores socioeconómicos y culturales han contribuido a la percepción negativa de la construcción con tierra en ciertos contextos. En muchas ocasiones, esta técnica constructiva ha sido asociada con la pobreza, la ruralidad y la falta de desarrollo, generando un estigma en torno a su uso y práctica. En entornos urbanos y cosmopolitas, donde se valora la modernidad y la innovación tecnológica, la construcción con tierra ha sido vista como un vestigio del pasado, careciendo de relevancia en el mundo contemporáneo.

No obstante, en los últimos años, hemos sido testigos de un cambio de paradigma en la arquitectura y la construcción, impulsado por una creciente conciencia ambiental y la búsqueda de soluciones más sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. Este cambio ha revitalizado el interés por la construcción con tierra, reconociendo sus cualidades intrínsecas de sostenibilidad, bajo impacto ambiental y conexión con la naturaleza. En este contexto, se abren nuevas oportunidades para promover y revitalizar esta técnica constructiva, integrándola en proyectos arquitectónicos contemporáneos que buscan armonizar la tradición con la innovación y la sostenibilidad. (4)

2. Técnicas de construcción con tierra

Métodos tradicionales

Los métodos tradicionales de construcción en tierra, como el tapial, el adobe y el bloque de tierra comprimido (BTC), junto con técnicas como el cob, la quincha y el bahareque, representan técnicas ancestrales que han dejado un legado arquitectónico significativo en todo el mundo. A pesar de sus diferencias regionales, estos métodos comparten características comunes, tales como la utilización de materiales locales, su durabilidad y su capacidad para integrarse armoniosamente con el entorno natural.

En este trabajo, se dará especial importancia a los métodos de tapial, adobe y BTC, debido a su relevancia y adaptabilidad en la arquitectura contemporánea. Exploraremos estas técnicas en profundidad, analizando sus similitudes, ventajas y su relevancia en el contexto actual de la arquitectura sostenible y la construcción respetuosa con el medio ambiente. A través de este análisis, se destacará como estos métodos tradicionales pueden ofrecer soluciones

innovadoras y ecológicas a los desafíos de la construcción moderna, al tiempo que preservan y celebran el patrimonio cultural y arquitectónico.

Adobe

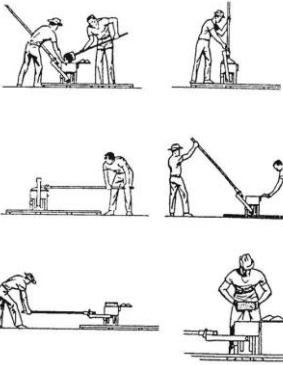


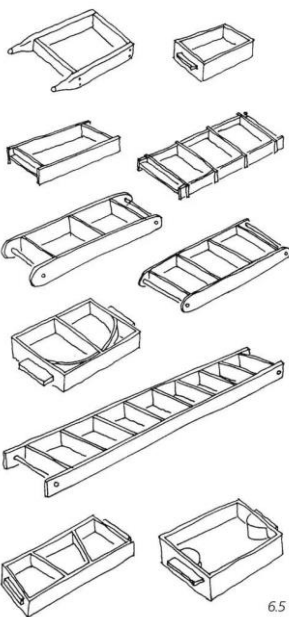
Fig. 6: Fases de creación de adobe

Fuente:

Building with earth, Gernot Minke

La técnica del adobe consiste en la fabricación de ladrillos de tierra cruda mezclada con fibras vegetales y agua, los cuales se moldean (Fig. 6) en formas rectangulares denominadas gradillas (Fig. 7) y, tras su extracción de este tipo de molde/recipiente y se dejan secar al sol. Esta mezcla básica se vierte en moldes rectangulares, formando piezas de forma rectangular paralelepípedo que se secan naturalmente sin necesidad de cocción. Posteriormente, las piezas de adobe se apilan y se unen con mortero de barro para construir muros, proporcionando una estructura robusta y eficiente en términos de aislamiento térmico.

Para asegurar un manejo fácil y eficiente, las dimensiones adecuadas para las piezas de adobe deben permitir su manipulación con una sola mano, es decir, mampuestos. Las proporciones comunes son de 1:2 entre el ancho y el largo, variando su espesor entre 6 y 10 cm. Una de las medidas más habituales es de 7,1 x 11,5 x 24 cm. Estas dimensiones permiten que los mampuestos sean manejables durante el proceso de construcción, facilitando su colocación y alineación en los muros. (6)



6.5

Fig. 7: Moldes de adobe

Fuente:

Building with earth, Gernot Minke

Una de las principales ventajas de la construcción con adobe es la capacidad de elaborar los bloques en casi cualquier terreno, sin necesidad de contar con personal altamente cualificado. Sin embargo, es esencial realizar un estudio previo del material que se va a utilizar para asegurar su idoneidad. En algunos casos, es necesario emplear aditivos naturales o químicos para mejorar las características y la trabajabilidad del material. Estos aditivos pueden incluir elementos como cal, cemento o estabilizadores naturales que mejoran la durabilidad y la resistencia al agua del adobe.

En comparación con el tapial, los bloques de adobe presentan una menor resistencia a la compresión. No obstante, ofrecen una mayor flexibilidad en el diseño de muros construidos con tierra, permitiendo una variedad de formas y acabados. Esta versatilidad hace del adobe una opción popular en muchas regiones del mundo, especialmente en áreas con climas cálidos y secos donde la capacidad de mantener una temperatura interior confortable es crucial.

El adobe ha evolucionado con el tiempo, y una de sus mejoras más significativas es el desarrollo del BTC. Esta técnica mejorada consiste en comprimir la mezcla de tierra y aditivos bajo alta presión para formar bloques más densos y resistentes. Los BTC combinan las ventajas del adobe tradicional con una mayor durabilidad y resistencia, lo que los hace adecuados para una amplia gama de aplicaciones constructivas. De este método hablaremos posteriormente.

Las piezas de adobe presentan varias ventajas destacables. En primer lugar, son relativamente fáciles y económicos de fabricar, ya que se utilizan materiales locales y se requiere una mínima mano de obra. Además, ofrecen una buena capacidad de aislamiento térmico y acústico, lo que contribuye a la eficiencia energética de los edificios construidos con este material. Los ladrillos de adobe también son resistentes al fuego y, si se mantienen adecuadamente protegidos del agua, pueden ser muy duraderos.

Sin embargo, también existen algunas limitaciones asociadas con los ladrillos de adobe. Son vulnerables a la humedad y la erosión si no se protegen adecuadamente con revestimientos o techos salientes, lo que puede comprometer su integridad estructural. Asimismo, requieren un tiempo de secado prolongado antes de poder ser utilizados en la construcción, lo que puede retrasar los proyectos. Además, los edificios construidos con adobe pueden necesitar un mantenimiento periódico para reparar grietas y el desgaste natural, lo que puede implicar costos adicionales a lo largo del tiempo.

Tapial

Este método constructivo, que se estima que ha estado en uso desde aproximadamente el año 5.000 a.C., implica la disposición de moldes contruados con tableros de madera denominados cajones (Fig. 8 y 9), dentro se vierte la mezcla de tierra cruda, es decir, sin cocer, combinada con paja u otros materiales vegetales. Se pueden fijar finos palos de madera en el suelo o a los cimientos, los cuales se atan a una madera en rollo horizontal más delgada, que sirve de atado entre las caras del cajón para compensar el empuje creado por el relleno de la tierra, creando así un patrón de cuadrícula sobre el cual se aplica la tierra en ambos lados.

Como ejemplo, la técnica brasileña surgió de la fusión de métodos empleados por los colonizadores portugueses y las poblaciones africanas esclavizadas. Frecuentemente se utilizaba para las paredes interiores de viviendas más grandes debido a su menor peso, así como en la construcción de viviendas para esclavos, lo que reforzaba la jerarquía social a través de la arquitectura. A pesar de ello, la tierra apisonada se consideraba asociada con una construcción más humilde y temporal, lo que resultaba en que se pasara por alto en la lista de "grandes" ejemplos de arquitectura brasileña. (13)

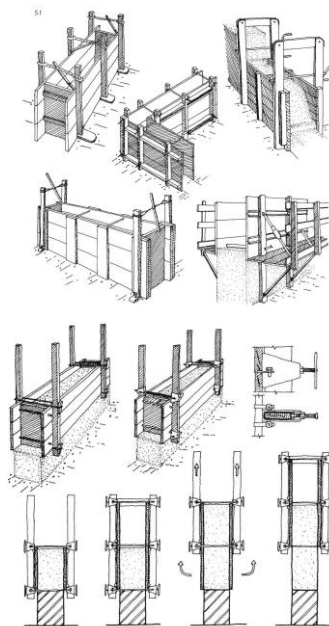


Fig. 8 y Fig. 9: Fases de construcción de tapial

Fuente: Building with earth, Gernot Minke

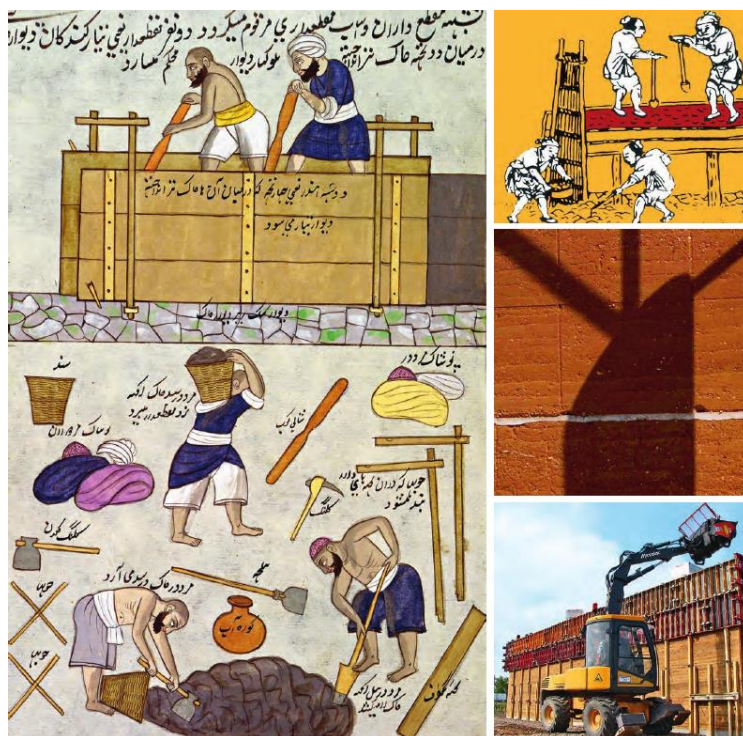
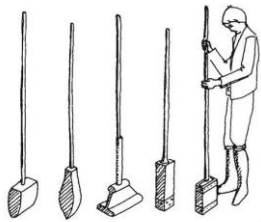


Fig. 10: Desarrollo del tapial
Fuente: Habiter la Terre- Jean Dethier



57

Fig. 11: Instrumentos para apisonar la tierra en el tapial.

Fuente: *Building with earth, Gernot Minke*

Esta técnica se basa en compactar tierra (Fig. 10 y 11) en capas de unos 10 cm de grosor dentro del denominado cajón, y al retirarlo, se obtienen muros de tierra comprimida con una alta resistencia estructural. Tradicionalmente, este proceso se realizaba manualmente, como se ilustra en la (Fig. 10), pero en la actualidad se utilizan máquinas específicas que aplican mayor presión y facilitan el proceso de construcción. Este procedimiento debe llevarse a cabo con la tierra en estado húmedo, ya que la hidratación de las arcillas permite un mejor amasado y compactación del material.

Martin Rauch es pionero en esta técnica tradicional, comenzándola a tratar como una técnica para diseñar muros autoportantes, pero sin carácter estructural. Un buen ejemplo para este tipo de muros es el que podemos ver en la (Fig. 12), donde utiliza una estructura externa metálica y deja el tapial como muro exterior.

Martin Rauch en sus obras comenzó su utilización como muro no portante, por lo que no soportaba peso. Esto limitaba sus usos y complicaba el crear estructuras completas de tierra, teniendo que hacer uso de madera o bambú en forma de armado estructural.

Otro buen ejemplo es el Hospital Feldkirch (Fig. 13), donde se realiza un tapial curvo de 6 metros de altura y 35 centímetros de espesor, sin carácter estructural, pero con una gran actuación como aislante acústico y térmico, dando pie a las exploraciones de este muro como regulador térmico.

La utilización del tapial para la realización de muros de carácter estructural comenzó a dar otra posibilidad de realizar muros estructurales sin necesidad de armado.

Un buen ejemplo de este tipo de muro tapial es el realizado en La Capilla de Reconciliación (Fig. 14), con la colaboración de Martin Rauch, crea una capilla donde la estructura es de tapial y recibe el peso de la cubierta y de la cubierta ligera de madera.

Además de esto, en comparación con otros materiales como el hormigón, cuando se termina su vida útil no es reutilizable, en cambio el tapial crea una huella de carbono casi nula, pudiendo ser el material reutilizado en más de una ocasión.

El espesor del muro tradicional puede variar desde 50 a 80 cm, dependiendo de las características de la tierra empleada. La construcción con tapial es más económica y rápida que con adobe, puesto que no precisa de tiempo de secado prolongado como el adobe.

El uso de técnicas de construcción con tierra, como el tapial o los bloques de tierra comprimidos, ofrece varias ventajas significativas. Una de las principales es su alta resistencia estructural, que se logra gracias a la compactación intensiva del material. Además, estos métodos proporcionan una excelente capacidad de aislamiento térmico y acústico, mejorando la eficiencia energética de las edificaciones. Si se protegen adecuadamente contra la humedad, las estructuras de tierra pueden ser muy duraderas, lo que las convierte en una opción viable y sostenible para la construcción.

Sin embargo, también presentan algunas limitaciones importantes. La construcción con tierra requiere una gran cantidad de mano de obra y tiempo, lo que puede aumentar los costos y prolongar los plazos de los proyectos. Además, una vez que la estructura está terminada, es difícil realizar modificaciones o



Fig. 12: Interior del Estudio.
Estructura de pilares metálicos.
Tapial como paramento exterior.
Fuente: Pinterest



Fig. 13: Interior del Estudio.
Estructura de pilares metálicos.
Tapial como paramento exterior.
Fuente: Pinterest



Fig. 14: Tapial interior de la Capilla de Reconciliación
Fuente: <https://arquitecturayempresa.es/>

reparaciones, lo que puede limitar su adaptabilidad a cambios futuros. Por último, estas estructuras son vulnerables a la humedad si no se protegen adecuadamente con revestimientos o cubiertas con vuelos suficientes para proteger a los parámetros de la acción del agua de lluvia, así como con una preparación de las cimentaciones para evitar la difusión de la humedad proveniente del suelo, lo que puede comprometer su integridad y longevidad.

Bloque de tierra comprimida (BTC)

El Bloque de Tierra Comprimida (BTC) representa una combinación exitosa de técnicas tradicionales y modernas (*Fig. 15*), ofreciendo una solución de construcción que es tanto sostenible como eficiente. Su uso creciente en proyectos alrededor del mundo demuestra su viabilidad y beneficios, convirtiéndolo en una opción atractiva para la arquitectura contemporánea que busca ser respetuosa con el medio ambiente y culturalmente significativa.

Esta técnica de construcción es una técnica de construcción que combina principios tradicionales con innovaciones modernas para crear un material de construcción sostenible, duradero y eficiente. Utilizado en diversas partes del mundo, el BTC ha demostrado ser una opción viable tanto para construcciones simples como complejas, destacándose por su eficiencia energética, sostenibilidad y capacidad para integrarse armoniosamente con el entorno natural. Sus principales dimensiones son: 29,5 x 14 x 9 cm (14)

El uso de la tierra como material de construcción se remonta a miles de años, con ejemplos notables en antiguas civilizaciones como Mesopotamia y Egipto. La técnica específica del Bloque de Tierra Comprimida comenzó a desarrollarse más formalmente a mediados del siglo XX, cuando la necesidad de encontrar alternativas sostenibles y económicas a los materiales de construcción convencionales impulsó la investigación y el desarrollo en este campo. La estabilización de la tierra con cemento o cal para mejorar sus propiedades mecánicas es una innovación que ha permitido que los BTC se utilicen en una variedad de aplicaciones modernas.

El BTC se fabrica mezclando tierra local con una pequeña cantidad de algún conglomerante como estabilizante, tradicionalmente cal y, en las últimas décadas, cemento, que mejoran sus propiedades mecánicas. La mezcla se coloca en moldes específicos y se comprime bajo alta presión para formar bloques densos y uniformes. Este proceso de compresión aumenta significativamente la resistencia y durabilidad del bloque, haciéndolo adecuado para diversas aplicaciones estructurales.

Un gran ejemplo es la Escuela primaria de Gando, de Francis Kéré (*Fig. 16*), donde usa el BTC para la estructura del edificio, protegiéndolo correctamente con una cubierta ventilada, evitando así las altas temperaturas y la humedad.

Otro ejemplo notable de la aplicación del BTC es la Makoko Floating School en Lagos, Nigeria (*Fig. 17*). Diseñada por NLE Architects, esta innovadora estructura utiliza BTC estabilizados para crear una escuela flotante que puede adaptarse a las condiciones cambiantes de la laguna de Makoko. Este proyecto no solo destaca la durabilidad y resistencia de los BTC, sino también su capacidad para integrarse en soluciones arquitectónicas innovadoras y sostenibles. (14)



Fig. 15: Bloque de tierra comprimido (Ceyfor)

Fuente: (14)



Fig. 16: Escuela primaria, Gando-Francis Kéré

Fuente:

<https://arquitecturayempresa.es/>



Fig. 17: Makoko Floatin School, Lagos, Nigeria

Fuente: www.archdaily.com

Las ventajas de los bloques de tierra comprimida (BTC) son notables. En primer lugar, ofrecen una alta resistencia y durabilidad, comparable a la de los bloques de hormigón. La adición de estabilizantes mejora aún más su durabilidad y resistencia a factores ambientales como el agua y el desgaste. En términos de eficiencia energética, los BTC poseen una alta inercia térmica, lo que permite que los muros regulen eficazmente la temperatura interior. Durante el día, los bloques absorben calor y lo liberan lentamente durante la noche, contribuyendo a un ambiente interior confortable y reduciendo la necesidad de calefacción y refrigeración artificial. Además, son sostenibles, ya que utilizan tierra local como material principal, lo que reduce la necesidad de transporte y la energía asociada a la producción de materiales de construcción convencionales. Los bloques también son reciclables al final de su vida útil, minimizando su impacto ambiental. Finalmente, la versatilidad en el diseño permite que los BTC se fabriquen en diversas formas y tamaños, adaptándose a una amplia gama de diseños arquitectónicos y usos, desde viviendas unifamiliares hasta grandes instalaciones públicas.

Sin embargo, los BTC también presentan algunas limitaciones. Una de las principales es su vulnerabilidad a la humedad; si no se protegen adecuadamente, la exposición prolongada al agua puede provocar la desintegración del material y comprometer su integridad estructural. Además, la fabricación e instalación de bloques de tierra comprimida requiere habilidades de construcción específicas y conocimientos técnicos. Es fundamental seguir prácticas de construcción adecuadas para garantizar una estructura segura y duradera. Por lo tanto, aunque los BTC ofrecen muchas ventajas, es importante considerar estos desafíos y asegurarse de que se implementen correctamente para aprovechar plenamente sus beneficios.

A continuación se muestra una tabla de usos, tipos de suelo utilizado y mejoras de los distintos métodos tradicionales:

TÉCNICA	USOS	TIPOS DE SUELOS DOMINANTE	MEJORA DE LAS PROPIEDADES
ADOBE	Vivienda rústica	Suelos arcillosos o arenosos-arcillosos	Compactación 2 – 10% estabilizador
TAPIAL	Vivienda social y moderna, edificios públicos...	Suelos con sedimentación de río o glacial	Compactación 2 – 10% estabilizador
BTC	Vivienda social y moderna, edificios públicos	Suelos arcillosos y ricos en sedimentación	Compresión 2 – 10% estabilizador

Tabla 1: Relación de las técnicas con los suelos más apropiados, usos y mejoras de sus propiedades.

Fuente: Elaboración propia

OTROS METODOS MENOS CONOCIDOS

Cob

Esta palabra es un término inglés que se utiliza para designar masas redondas de tierra. Esta técnica se trata de realizar muros in situ de norma manual (Fig. 18), sin emplear encofrados. Es un proceso completamente artesanal y esto consigue que el agua no se pueda colar a través del muro, algo muy buscado en la construcción con tierra. Un ejemplo es el que podemos ver en la (Fig. 18), localizada en Avón, Inglaterra. (15)

La tierra utilizada para este tipo de construcción idealmente debería de ser 40% arcilla y 60% arena, mezclado con fibras vegetales o plantas de 2 a 4 mm de grosor, importante para la correcta distribución de cargas en el muro, y da cierta resistencia a tracción al mismo. (5)

Las ventajas de utilizar ciertos materiales de construcción son numerosas. En primer lugar, destacan por su bajo costo tanto en materiales como en mano de obra, lo que los convierte en una opción económica para diversos proyectos. Además, ofrecen una gran flexibilidad de diseño y forma, permitiendo adaptarse a una amplia variedad de estilos arquitectónicos y necesidades específicas. Otra ventaja importante es su buena capacidad de aislamiento térmico y acústico, lo que contribuye a un ambiente interior más confortable y eficiente energéticamente. Con una protección adecuada contra la humedad, estos materiales pueden ser bastante duraderos, asegurando la longevidad de las estructuras construidas con ellos.

Sin embargo, también presentan algunas limitaciones significativas. Uno de los principales inconvenientes es que requieren un tiempo de secado prolongado antes de poder ser utilizados en la construcción, lo que puede retrasar el progreso de los proyectos. Además, son vulnerables a la erosión si se exponen a la lluvia intensa o a la humedad constante, lo que puede comprometer su integridad estructural con el tiempo. Por último, necesitan un mantenimiento periódico para reparar grietas y desgaste, lo que puede aumentar los costos y el esfuerzo a largo plazo. A pesar de estas limitaciones, con el cuidado y las precauciones adecuadas, estos materiales pueden ofrecer un rendimiento satisfactorio en muchas aplicaciones de construcción.

Quincha

Esta técnica combina el uso de cañas o bambú con tierra y paja (Fig.20) Las cañas se entrelazan para formar un enrejado que se rellena con una mezcla de tierra y paja. Se utilizan tanto para paredes como para techos, creando estructuras resistentes y duraderas.

Las ventajas de este tipo de materiales de construcción son diversas. En primer lugar, permiten la utilización de materiales locales y requieren una mano de obra mínima, lo que reduce los costos y promueve la sostenibilidad. Además, ofrecen una gran flexibilidad de diseño y forma, adaptándose a diferentes estilos arquitectónicos y necesidades constructivas. Estos materiales también destacan por su buena capacidad de aislamiento térmico y acústico, contribuyendo a un ambiente interior más confortable y eficiente. Con la protección adecuada contra



Fig. 18: Ejemplo de Cob

Fuente:

<https://ervnaturalbuilding.weebly.com/>



Fig. 19: Casa construida con cob, Avon, Inglaterra

Fuente:

“Volver a la tierra, el mejor material de construcción”. Jordi Alemany



Fig. 20: Quincha

Fuente:

tectonica.archi

la humedad, pueden ser muy duraderos, asegurando la longevidad de las estructuras.

No obstante, estos materiales presentan algunas limitaciones. Una de las principales es que requieren un encofrado para mantener la forma de la estructura durante la construcción, lo que puede incrementar el tiempo y el costo del proceso constructivo. También son vulnerables a la erosión si se exponen a la lluvia intensa o la humedad constante, lo que puede comprometer su integridad estructural. Además, necesitan un tiempo de secado prolongado antes de poder ser utilizados en la construcción, lo que puede retrasar los proyectos. A pesar de estas limitaciones, con las medidas adecuadas, estos materiales pueden ser una opción viable y eficiente para diversas aplicaciones constructivas.

Bahareque

Similar a la quincha, el bahareque utiliza cañas o bambú (Fig. 19) entrelazados como armazón, pero se rellena con una mezcla de barro y paja en lugar de tierra compactada. Es una técnica común en América Latina y otras regiones tropicales. Crea una fachada limpia y muy resistente al agua. (Fig. 20) (16)

Las ventajas de utilizar materiales como cañas, bambú o madera en la construcción son numerosas. Primero, estos materiales son locales y de bajo costo, lo que los hace económicamente accesibles y sostenibles. Además, ofrecen una gran flexibilidad de diseño y forma, permitiendo la creación de estructuras curvas y orgánicas que se adaptan a diversas necesidades arquitectónicas. También poseen una buena capacidad de aislamiento térmico y acústico, contribuyendo a un ambiente interior confortable. Otra ventaja es el menor tiempo de construcción en comparación con otras técnicas de construcción con tierra, lo que acelera el proceso constructivo. Con una adecuada protección contra la humedad, estas estructuras pueden ser muy duraderas.

Sin embargo, también presentan algunas limitaciones. Una de las principales es que requieren un enrejado de soporte, que puede ser más complejo y costoso que otras técnicas de construcción. Además, son vulnerables a la humedad y la pudrición si no se protegen adecuadamente contra la exposición directa al agua, lo que puede comprometer la integridad de la estructura. También pueden necesitar mantenimiento periódico para reparar daños en las cañas o el enrejado, lo que puede aumentar los costos y el esfuerzo a largo plazo. A pesar de estas limitaciones, con el cuidado y las medidas adecuadas, estos materiales pueden ofrecer soluciones constructivas eficientes y sostenibles.

Métodos contemporáneos

BTC estabilizado

Los ladrillos de BTC, también conocidos como bloques ecológicos, son materiales de construcción compuestos por subsuelo inorgánico seco, arcilla no expansiva, áridos y cemento Portland. Para fabricarlos de manera óptima, se requiere un contenido de arena superior al 50% y un contenido arcilloso entre un 20% y un 30%. Se emplea un porcentaje de entre un 2 – 5 % de estabilizante, cemento o

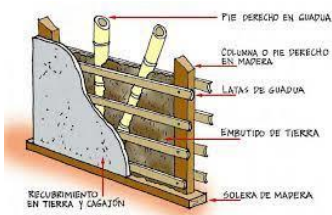


Fig. 21: Bahareque

Fuente:

www.desenredando.org



Fig. 22: Bahareque

Fuente:

blog.structuralia.com

cal, y se completa el porcentaje con agua hasta estabilizar la mezcla. A lo largo del tiempo, se han desarrollado diversas técnicas para mejorar la producción y el uso de estos materiales, incluyendo selecciones avanzadas de suelo, porcentajes precisos de aglutinante, métodos de compresión y técnicas de curado. (5)

El proceso de fabricación es relativamente simple. Comienza con la preparación y mezcla del suelo con una pequeña cantidad de cemento, agregando gradualmente agua hasta alcanzar la consistencia deseada. Luego, la mezcla se compacta utilizando una prensa, aplicando presión para formar ladrillos sólidos, que pueden tener o no agujeros. Una vez compactados, los bloques se apilan y se dejan “curar” bajo una lona o cubierta de plástico para retener la humedad necesaria durante el proceso de curado. Esto permite el reciclaje de un porcentaje del agua utilizado, el cual tendremos en cuenta posteriormente en el ciclo de vida de los materiales. (17)

Estos bloques ofrecen varias ventajas significativas. Son más económicos de producir en comparación con los ladrillos cerámicos tradicionales, pero ofrecen una resistencia y durabilidad impresionantes, lo que asegura la construcción de estructuras robustas y capaces de soportar diversas condiciones climáticas. Además, pueden servir como estructuras autoportantes, permitiendo el paso de barras de acero y ocultando conductos de plomería y electricidad.

A pesar de sus beneficios, los ladrillos de BTC también presentan desafíos. La necesidad de equipos especializados, como prensas manuales o hidráulicas, puede representar una inversión inicial considerable para algunos constructores. Además, el control de calidad es fundamental para garantizar la integridad estructural de los bloques, lo que requiere una cuidadosa selección del suelo, proporciones exactas de cemento y métodos de curado adecuados. (14)

Como ejemplo, utilizaremos viviendas creadas en Auroville, India (*Fig. 23*), durante su construcción. Encontramos viviendas que se asemejan a construcción con ladrillo original. Los BTC estabilizados dan una gran seguridad estructural y una gran durabilidad.

En comparación con el BTC tradicional, el BTC estabilizado ofrece una solución más resistente y duradera para aplicaciones exteriores, lo que compensa su mayor costo inicial con beneficios a largo plazo en términos de durabilidad y reducción de los costos de mantenimiento.

Tapial prefabricado

La prefabricación de la tapia implica la creación previa de módulos en talleres industriales, utilizando maquinaria pesada y condiciones controladas para garantizar la calidad del producto. Esta técnica requiere una mano de obra experimentada y se lleva a cabo en varias etapas, desde la fabricación y secado de los módulos hasta su ensamblaje en el sitio de construcción. El uso de estos módulos prefabricados marca un avance significativo en la arquitectura de tapial, permitiendo una construcción más rápida y de mayor calidad.

La técnica de tierra apisonada se complementa con la arquitectura bioclimática, considerando el entorno natural en el diseño de las edificaciones. La metodología de prefabricación en naves industriales ofrece un control más eficiente de estos elementos, mejorando el sistema constructivo en su conjunto.



Fig. 23: Auroville, India

Fuente:

<https://construyediferente.com>



Fig. 24: Edificio Ricola
Kräuterzentrum en Suiza

Fuente:

arquitecturaviva.com



Fig. 25: Edificio Ricola
Kräuterzentrum en Suiza

Fuente:
"Building with earth". Gernot Minke



Fig. 26: Tapial casa L, Suiza

Fuente: Google imágenes

El constructor y ceramista austriaco Martin Rauch ha sido también pionero en la construcción con tapial prefabricado, explorando opciones para ocultar las conexiones entre los módulos utilizando mortero de arcilla. Sus contribuciones incluyen edificaciones destacadas como el Edificio Ricola Kräuterzentrum (Fig. 24) en Suiza y la planta de impresión Gugler en Austria. (18)

El Edificio Ricola (2010-2014) (Fig. 25) destaca por sus muros de fachada prefabricados con tierra local, que ofrecen un excelente rendimiento energético al regular la temperatura y la humedad. En la planta de impresión Gugler (1999-2000), los módulos prefabricados de tapial se integran en una estructura de madera, proporcionando estabilidad y conducción para la climatización del edificio. Ambos proyectos ejemplifican un enfoque sostenible y eficiente en el uso de recursos, aprovechando la inercia térmica de la tapia y la energía solar de manera consciente.

Igual que el tapial tradicional comenzó como muro autoportante, esta vez con el prefabricado no pudo ser diferente. Las primeras muestras de tapial prefabricado eran utilizadas para muros separadores como biombos. Un buen ejemplo podemos verlo en la casa L, en Sublingen, Suiza(1997) (Fig. 26). En un principio, se iba a realizar in situ, pero una serie de dificultades temporales y horarias llevaron a experimentar y crear el primer muro de tapial prefabricado, dándose cuenta de la gran libertad de diseño que conseguían con esta técnica.

Superadobe



Fig. 27: Superadobe

Fuente:
www.multisac.es

El superadobe es una técnica de construcción que utiliza sacos de polipropileno llenos de tierra apisonada para crear estructuras resistentes y duraderas (Fig. 27). Esta técnica fue desarrollada por el arquitecto iraní Nader Khalili en la década de 1980 como parte de su trabajo en el Instituto de Arquitectura y Permacultura Cal-Earth.

El proceso de construcción de superadobe:

-Preparación del terreno: Se prepara el sitio de construcción eliminando cualquier vegetación no deseada y nivelando el suelo según sea necesario.

-Colocación de los sacos: Se llenan sacos de polipropileno con tierra del sitio y se apisonan para compactarla. Los sacos se disponen en capas concéntricas siguiendo el diseño planificado de la estructura.

-Encadenado y refuerzo: Se colocan alambres de púas entre las capas de sacos para proporcionar refuerzo estructural. Además, se pueden agregar barras de refuerzo verticales a intervalos regulares para mayor resistencia.

-Acabado: Una vez que se completa la estructura principal, se pueden aplicar capas adicionales de yeso u otros materiales para mejorar la estética y la resistencia a la intemperie.

El superadobe se ha utilizado en una variedad de aplicaciones, desde viviendas individuales hasta edificios comunitarios y estructuras de emergencia en áreas

propensas a desastres. Sus principales ventajas incluyen su bajo costo, su durabilidad y su capacidad para resistir terremotos y otros desastres naturales.

Esta técnica constructiva es muy criticada por la utilización de sacos de propileno, siendo este un material no adecuado para este tipo de construcción puesto que se biodegrada con el sol, pero si se revoca no se consigue eliminar y termina contaminando, y dejando de ser un método tan sostenible. La utilización de sacos de yute natural, en este caso limo, proporcionan unas mayores prestaciones y es más ecológico y con ello, más sostenible. El coste de los sacos de yute puede ser hasta 5 veces mayor que los de propileno, pero no llegando a ser caro. (7)

“Swallow brick”

Este producto fue diseñado en España y consiste en un bloque aligerado de tierra y paja que se utiliza como cerramiento exterior o interior de todo tipo de estructuras, siempre sobre un material aislante que lo proteja del suelo. Se trata de un sistema más mecanizado que el cob. Los bloques son de 48x30x24cm, con un peso aproximado de 26kg, bastante mayor a un ladrillo convencional. Además, se unen entre si con barro creado con la misma mezcla normalmente que el ladrillo. Se puede revestir ambas caras, pero se recomienda enfoscado de cal en el exterior y de tierra en el interior. Otra peculiaridad de esta empresa es que crean también bloques de dimensiones específicas y con formas específicas como puede ser un muro entero en una sola pieza. Esta tecnología modular consigue crear un bloque de adobe a tamaño de tapial.

Aislamiento Acústico	Índice ponderado de reducción sonora	46,7 dB
	Índice global de reducción acústica	47 dB
Aislante Térmico	Conductividad térmica	0,4 W/mK
	Flujo calor paralelo a longitud	0,73 W/m2K
	Flujo calor paralelo a anchura	1,1 W/m2K
Aislante al fuego	Reacción al fuego	BS1D0

Tabla 2: Comportamiento térmico, acústico y contra el fuego de Swallow Brick Fuente: www.swallowbrick.com

World’s Advanced Saving Project (WASP)

La tierra extruida es una técnica innovadora en la construcción que utiliza una máquina extrusora, similar a una gran impresora 3D, para 'imprimir' muros mediante un método aditivo (Fig. 30). Esta máquina construye capa por capa utilizando un mortero de tierra y cal, lo que permite la creación rápida y eficiente de estructuras de tierra. Este enfoque tiene el potencial de transformar la industria de la construcción al reducir el consumo de materiales, la necesidad de mano de obra y el tiempo de construcción.

Además de la técnica de extrusión para la creación de muros, también se utiliza la tierra extruida en la fabricación de ladrillos cerámicos o bloques de termoarcilla. Algunas empresas emplean este método para producir ladrillos macizos y huecos sin cocer, utilizando una mezcla clásica de tierra, arcilla y estabilizante. Esta mezcla puede incluso incluir serrín, lo que mejora las propiedades aislantes y portantes de los ladrillos. Estas piezas se secan a bajas

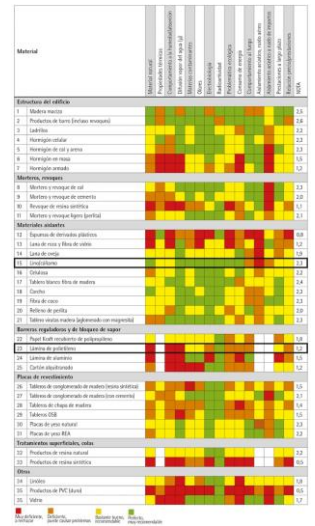


Fig. 28: Superadobe Fuente: TFG “Superadobe: problemas y soluciones” (6)



Fig. 29: Paneles modulares Fuente: www.swallowbrick.com



Fig. 30: Impresora WASP Fuente: https://culturainquieta.com

temperaturas y son similares a las ofrecidas por la industria cerámica, especialmente para la distribución interior y el trasdosado de muros.

Un ejemplo destacado de esta aplicación es la empresa alemana ProCrea, que fabrica una pared de tierra por extrusión, demostrando la versatilidad de la tierra extruida en la creación de estructuras eficientes y sostenibles. Esta tecnología no solo ofrece beneficios en términos de rendimiento y durabilidad, sino que también promueve prácticas de construcción más respetuosas con el medio ambiente al aprovechar los recursos naturales disponibles

Como ejemplo, la impresora de 12 metros de alto y 7 de ancho (Fig. 31), donde se podrá utilizar material para crear estructuras o vivienda de hasta 3 metros utilizando arcilla, barro y otras fibras vegetales.

Vivienda de cierta calidad en zonas de pocos recursos, a coste muy reducido y con muy poca mano de obra, que ni siquiera requiere de especialización. Se construye la estructura y luego se incorpora un armazón y abres los huecos de las ventanas y puertas.

Funciona a un ritmo aproximado de 50cm diarios, pudiendo construir una vivienda normal en 1 semana. El resultado máximo es una estructura de 6m de diámetro y 4m de altura, hueca y sin techo. Lo sorprendente es que el coste de la estructura rondaría los 35 euros incluyendo gastos de gasolina para mover las tierras. (19)



Fig. 31: Casa tecla, a
Fuente: www.archdaily.cl
aa

Adobe	Arcilla	20-30%
	Arena	70-80%
	Limo	
	Fibras naturales	5-10%
	Agua	Hasta lograr la cohesión buscada
BTC	Arcilla	70-80%
	Arena	
	Limo	
	Cemento o cal	5-10%
	Agua	Hasta encontrar la compactación adecuada
Tapial	Arcilla	70-80%
	Arena	20-30%
	Limo	
	Agua	Para humedecer y lograr la compactación adecuada
BTC estabilizado	Arcilla	20-30%
	Arena	<50%
	Limo	
	Estabilizante (cal)	5-10%
	Cemento	5-10%
	Agua	Hasta estabilizar la mezcla
Tapial prefabricado	Arcilla	20 – 30%
	Arena	70 – 80%
	Limo	5 – 10%
	Cal	5 – 10%
	Cemento	
	Agua	Hasta lograr cohesión necesaria

Tabla 3: Composición de principales técnicas de construcción con tierra tradicional y contemporánea.

Fuente: (6), (20)

3. Tendencias arquitectónicas y cambios en el paradigma constructivo

El mundo de la construcción ha sufrido numerosos cambios con el tiempo. Como ya hemos comentado, los materiales empleados para diseñar las ciudades han cambiado, dejando de lado materiales como la tierra y dando paso a materiales más industrializados como el hormigón, el ladrillo, acero, madera...

Esta arquitectura tiene grandes ventajas en temas de sostenibilidad ambiental, puesto que los materiales (arcilla, arena y limo) son abundantes y renovables, lo que hace que este material reduzca la huella ecológica de la construcción, que actualmente es uno de los mayores problemas. Además de su ventajosa sostenibilidad, encontramos un punto a favor en el bajo coste de los materiales y de la mano de obra.

Percepciones sociales, ambientales y económicas

La elección de materiales de construcción tiene significativos impactos ambientales, sociales y económicos. El hormigón, aunque duradero y ampliamente utilizado, genera grandes emisiones de CO₂ debido a la producción de cemento y la extracción de grava y arena, lo que degrada suelos y hábitats. El ladrillo, por su parte, requiere la quema de combustibles fósiles, incrementando también las emisiones de CO₂ y afectando negativamente el paisaje a través de la extracción de arcilla.

Los BTC presentan una alternativa más sostenible, siendo renovables y consumiendo menos energía en su producción sin emitir CO₂. El tapial, que usa tierra cruda compactada, minimiza la huella de carbono al evitar la cocción, similar al adobe, aunque este último requiere más agua.

En términos sociales, el hormigón y el ladrillo pueden generar conflictos por la explotación de recursos naturales y riesgos para los trabajadores. Sin embargo, BTC y tapial fomentan el empleo y preservan conocimientos locales, promoviendo el desarrollo comunitario. Económicamente, el hormigón es costoso pero duradero, mientras que el ladrillo tiene un costo de producción aceptable. BTC y tapial tienen costos bajos, pero requieren inversiones iniciales en maquinaria y mano de obra especializada. El adobe es económico, pero su baja durabilidad puede resultar en costos de mantenimiento constantes.

Uno de los desafíos más significativos para la construcción con tierra es su percepción negativa en los grandes núcleos poblacionales. En muchas sociedades urbanas e industrializadas, la construcción con tierra es vista como un vestigio del pasado, asociado con la pobreza y el atraso rural. Este estigma social dificulta su aceptación y expansión en contextos modernos y urbanos, a pesar de sus beneficios ambientales y económicos.

Para cambiar esta percepción, es crucial promover estudios y proyectos que demuestren las ventajas de la tierra como material de construcción sostenible y eficiente. La construcción con tierra puede ofrecer soluciones ecológicas y económicas, pero necesita superar las barreras culturales y de percepción que limitan su uso en las áreas urbanas y desarrolladas.

Normativa vigente:

El marco normativo de la construcción con tierra muestra una gran variabilidad a nivel internacional. En general, el desarrollo de normativas específicas para este tipo de arquitectura no suele ser una prioridad en muchos países, lo que genera diversas dificultades a la hora de emplear estas técnicas de construcción.

Sin embargo, hay países que han avanzado en la creación de normativas específicas para la construcción con tierra, especialmente aquellos con una tradición histórica en el uso de este material. Entre estos países se encuentran Perú, Nueva Zelanda, Brasil y varias naciones del continente africano, donde la construcción con tierra es una práctica arraigada.

En España, la regulación de la construcción con tierra es relativamente reciente. La norma UNE 41410, vigente desde 2008, es la primera y única normativa específica sobre este tema en el país. Esta norma representa un hito, ya que es la primera norma no experimental destinada a los bloques de tierra comprimida, y fue desarrollada por el subcomité AEN/CTN 41 SC de AENOR. La UNE 41410 cubre un amplio espectro, incluyendo definiciones, especificaciones y métodos de ensayo. Además, establece criterios para la selección de suelos, los requisitos de los productos y los tipos de ensayos a realizar. A diferencia de otras normativas, no se limita a un solo propósito, sino que abarca múltiples finalidades. (20)

En 2010, se redactó una guía para el cumplimiento del Código Técnico de la Edificación (CTE) en edificios de tierra, promovida por el Ministerio de la Vivienda y el Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (IETcc). Esta guía proporciona orientaciones adicionales para facilitar el uso de tierra en la construcción, integrando prácticas tradicionales con los requisitos modernos de edificación.

El Código Técnico de la Edificación en España ofrece una flexibilidad significativa para la construcción con tierra. En lugar de imponer soluciones específicas, establece objetivos generales que el proyectista debe alcanzar. Esto significa que el proyectista tiene la libertad de proponer diferentes soluciones constructivas siempre que estas cumplan con los objetivos establecidos y estén adecuadamente justificadas.

Ventajas y desventajas

Ventajas

Sostenibilidad ambiental: Los materiales: barro, la arcilla y la arena. Son abundantes y renovables, lo que reduce la huella ecológica de la construcción, que hoy en día es un problema.

Bajo costo: Los materiales para la construcción con tierra suelen ser económicos y están disponibles localmente en muchas regiones, lo que puede reducir significativamente los costos de construcción.

Aislamiento térmico y acústico: Las paredes de tierra tienen una capacidad natural para regular la temperatura interior de los edificios, lo que reduce la necesidad de utilizar calefacción y refrigeración artificiales para aclimatar las viviendas y edificios. Además, proporcionan un buen aislamiento acústico

Resistencia al fuego: Los materiales empleados en este tipo de construcciones, como el adobe y el tapial, pueden ser bastante resistentes al fuego, lo que mejora la seguridad frente a incendios de los ocupantes y permite una más rápida extinción.

Flexibilidad y diseño creativo: Permite una gran flexibilidad en términos de diseño arquitectónico, lo que permite la creación de estructuras únicas y creativas. Además, se están desarrollando actualmente formas de construir con tierra impresa en 3D por máquinas y permiten gran cantidad de formas y tipos de construcción. Esto no sucede con el tapial, por ejemplo, el cual no cuenta con esta facilidad de diseño una vez construido.

Desventajas:

Vulnerabilidad a la humedad: La tierra es un material muy vulnerable al agua y la humedad. Si no se protege de forma adecuada, la estructura podría deteriorarse con facilidad. Actualmente, y como veremos más adelante en el trabajo, existen estabilizadores químicos y mezclas con materiales, como la cal, capaces de reducir este problema

Necesidad de mantenimiento regular: Uno de los grandes problemas de la construcción con tierra se trata de su mantenimiento, puesto que son muy vulnerables a humedad, desgaste y erosión. Algunas de las soluciones son revoques o sellados, que protegen la estructura de estos problemas y facilitan para lograr un mantenimiento más sencillo y poco costoso.

Baja resistencia estructural inicial: Aunque los edificios de tierra pueden ser duraderos, pueden requerir refuerzos estructurales adicionales para resistir cargas sísmicas o de viento, especialmente en áreas propensas a terremotos o huracanes. Este es un gran problema de la construcción con tierra ya que los movimientos de tierras y vientos excesivamente fuerte o constantes pueden dar a agrietamiento de la estructura y erosión del material.

Limitaciones en condiciones climáticas extremas: En regiones con climas extremadamente húmedos o secos, la construcción con tierra puede presentar estos mismos desafíos, humedad o agrietamiento. También puede llegar a complicar y alargar la construcción por causa de lluvias, causando una humedad extrema y no dejando secar correctamente la mezcla para una eficacia máxima.

Percepción estética: Algunas personas pueden percibir la construcción con tierra como anticuada o poco atractiva estéticamente, lo que puede afectar su popularidad en ciertos contextos urbanos o sociales. Hoy en día esta idea se está olvidando dado que las nuevas tecnologías están permitiendo experimentar y crear estructuras y formas antes impensables como cúpulas o muros curvos.

4. Materiales

Materialidad del suelo en España (21)

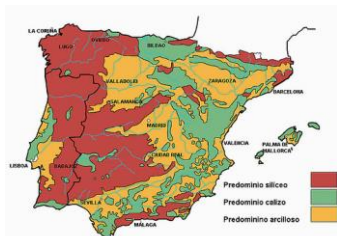


Fig. 32: Mapa tipología de suelos en España

Fuente: www.swallowbrick.com



Fig. 29: Presencia de la tapia en la Península Ibérica.

Fuente: La Restauración de la Tapia en la Península Ibérica - Mileto, C. y Vegas, F., 2014, p. 34



Fig. 33: Clasificación Climática según Köppen.

Fuente: Centro de Descargas del Instituto Geográfico Nacional.

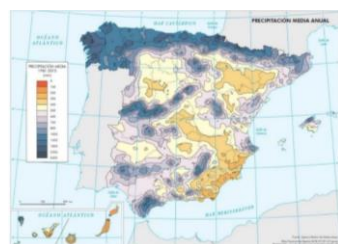


Fig. 34: Precipitación Medio Anual.

Fuente: Centro de Descargas del Instituto Geográfico Nacional.

La península ibérica es en gran porcentaje, compuesto por suelos blandos, con ausencia de roca. Este factor hizo que la arquitectura popular fuese la que ausentaba las materias primas, como la roca. El único material también abundante en mayor parte de la península es la madera, extraída de los bosques y esencial para la construcción de tapial o adobe.

La península ibérica cuenta con 3 tipos de suelo: calizo, arcilloso y silíceo. Cada uno de ellos tiene ventajas y desventajas para su empleo en arquitectura con tierra. (Fig. 32)

	PROS	CONTRAS
Suelo calizo	-Sólidos y estables -Cal: buen estabilizante para mejorar la resistencia de los materiales	Mucho calcio puede dificultar la cohesión de los materiales, lo que puede requerir ajustar las proporciones de la mezcla
Suelo arcilloso	-Alta capacidad de retención de agua -Cohesión alta -Ideal para adobe, tapial o BTC	Pueden ser propensos a la contracción y expansión con cambios en la humedad
Suelo silíceo	- Buena capacidad de drenaje -Pueden ofrecer una buena estabilidad estructural -Óptimo con una buena mezcla con otros materiales	Menos cohesivos que los suelos arcillosos, por lo que, requieren de otros materiales para lograr una consistencia óptima.

Tabla 3: Ventajas y desventajas de los distintos tipos de suelo encontrados en la península ibérica.

Fuente: (3)

Entre todos estos suelos, encontramos el suelo arcilloso como el más favorable para este tipo de arquitectura, por su alto contenido en arcilla, materia prima más importante de la construcción con tierra. Casualmente, encontramos que las grandes fábricas de ladrillo y cerámica de la península se encuentran en terreno arcilloso, impulsando con esto la construcción empleando este material. Para la construcción de tapial, adobe o BTC también necesitamos suelo arcilloso, facilitando y mejorando la composición de estos. (Fig. 33)

Condiciones climáticas (Fig. 34)

España, ubicada en la Península Ibérica, cuenta con una diversidad climática marcada por tres tipos principales: oceánico, mediterráneo y continental. Cada uno de estos climas está influenciado por su proximidad al mar y la topografía circundante. El clima oceánico predomina en el norte, el mediterráneo en la costa sur y del levante, y el continental en el centro peninsular.

Estas condiciones climáticas tienen un impacto significativo en la arquitectura tradicional. Por ejemplo, la arquitectura con tapial es más común en regiones con climas templados y esteparios, donde las precipitaciones son menores y las temperaturas son más altas, como en las zonas continental y mediterránea.

Sin embargo, las abundantes precipitaciones y la alta humedad (Fig. 35) representan desafíos para la arquitectura con tierra. En regiones con clima oceánico, donde las precipitaciones anuales pueden alcanzar entre 1400 y 2600 mm, el exceso de agua puede dañar gravemente las estructuras de tapial si no se tratan adecuadamente. La humedad también puede causar grietas y fisuras en las paredes de tierra, lo que ha llevado a excluir la arquitectura con tierra apisonada de estas áreas.



Fig. 35: Humedad Relativa Media Anual.

Fuente: Centro de Descargas del Instituto Geográfico Nacional.

La tierra como material

La tierra es un material natural cuya composición varía en función de los factores que la han influenciado a lo largo del tiempo. Está compuesta principalmente por arena y arcilla (Fig. 36), y las proporciones de estos componentes determinan sus propiedades mecánicas, térmicas y de resistencia al agua. La arcilla aporta plasticidad y cohesión a la mezcla, permitiendo que los muros construidos con este material tengan un buen comportamiento mecánico y sean suficientemente sólidos para soportar cargas de compresión. Por otro lado, la arena contribuye a la resistencia general de la mezcla, fortaleciendo el material de construcción. La tierra ideal carece de raíces y restos vegetales y se encuentra en capas subyacentes. Sus proporciones aproximadas son: 0-15% de grava, 40-65% de arena, 18-35% de limo y 15-20% de arcilla.. (3)



Fig. 36: Mapa Geológico.

Fuente: Centro de Descargas del Instituto Geográfico

CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL	Resistencia de compresión
Contención inicial de humedad	8,20 %
Retracción	0,15 %
Resistencia a compresión	3,2 N/mm ²
Módulo de elasticidad	650 N/mm ²
Resistencia a flexión	0,63 N/mm ²
Resistencia a cortante	0,79 N/mm ²

Tabla 4: Características de arcilla.

Fuente: Martin Rauch

Comportamiento mecánico:

La tierra es un material que, por sí sola, solo trabaja a compresión. Sin embargo, no todos los tipos de suelos tienen las mismas propiedades ni ofrecen el mismo rendimiento. La composición del suelo y el grosor de los elementos estructurales son factores cruciales para comprender el comportamiento de este material (Fig. 37). Dado que la tierra solo soporta bien las cargas de compresión, es importante señalar que las estructuras horizontales de tierra, como techos o forjados, requieren el uso de otros materiales para su construcción. Entre los materiales más comúnmente empleados junto a la tierra se encuentra la madera. En la construcción con tierra, las únicas soluciones viables para techos son las cúpulas y las bóvedas, ya que estas estructuras también trabajan a compresión.



Fig. 37: Ejemplos de tierra arcillosa al secarse (izq.) y secada (der.)

Fuente: Martin Rauch

MATERIAL	Densidad (Kg/m ³)	Resistencia a compresión (N/mm ²)
Adobe	1200 - 1500	0,53 – 1,72
Tapial	1900 - 2200	3 - 4
Tapial prefabricado	1600 - 2000	1 - 10
BTC	1700 - 2000	1 - 5
BTC estabilizado (Bioterre)	1700	11
Cob	1615	1

Tabla 5: Resistencia a compresión simple (4)

Fuente: Martin Rauch

Para la construcción de adobe se necesita agua y arcilla, en cambio para otros métodos como tapial o BTC se necesita una mayor cantidad de arena y grava. Por lo tanto, para el adobe necesitara más estabilizadores para evitar que se agrieten.

La normativa española exige un 10% de arcilla en la tierra para poder ser usada como material de construcción. También exige un mínimo de 15% de cemento, cal o yeso si fuese necesario un estabilizador.(20)

Dependiendo del uso que se le quiera dar a la tierra, esta necesita estabilizadores para lograr unas mejores propiedades.

	MATERIAL	PROPIEDADES
NATURALES	Arena y arcilla	Corregir la calidad de la composición
	Paja y fibras de planta	Refuerza la mezcla Permitir esfuerzos a tracción Aligeran peso y aumentan aislante térmico
	Cenizas de madera	Mejora resistencia a la erosión Disminuyen absorción de agua
	Excremento animal	Mejora la resistencia a compresión en seco
	Jugo de plantas	Para estabilizar enlucidos
MANUFACTURADOS	Cal puzolana	Mejora resistencia a compresión Suelos arcillosos
	Cemento Portland	Mejora resistencia mecánica, resistencia al agua y a dilataciones y contracciones Suelos arenosos
	Yeso	Poca contracción, apariencia lisa y alta resistencia mecánica Resistencia al fuego y repelente de insectos
	Silicato de sodio	Impermeabilizante y evita aparición de hongos. Suelos arenosos

Tabla 6: Estabilizadores y sus propiedades Fuente: (20)

Comportamiento frente el agua

Al construir con tierra, uno de los principales desafíos es el agua, ya que erosiona y debilita el material. Por ello, es crucial seguir ciertas “normas” de buena construcción. Primero, es esencial instalar una base sólida (Fig. 35) que eleve el

edificio del suelo, protegiéndolo de la humedad. Además, se debe cubrir la parte superior de la estructura para impedir la entrada de agua de lluvia.

El cimiento debe ser de un material impermeable, como cemento u hormigón, y con un borde que separe la construcción del terreno. Para dejar el muro de tierra expuesto, es necesario utilizar estabilizadores, como se mencionó anteriormente, para asegurar una buena compactación y manejabilidad de la mezcla.

Históricamente, la cal ha sido el estabilizador preferido antes de la aparición del cemento. La cal permite que la edificación respire sin permitir la entrada de agua. Sin embargo, el uso de cemento como revestimiento en construcciones de tierra ha resultado problemático, ya que el cemento, al solidificarse, no es permeable como la cal. Esto provoca que el vapor de agua quede atrapado dentro del muro, condensándose y causando daños como pudrición del material, humedades y grietas.

Existen dos tipos de cal utilizados en la construcción para revestir la tierra: la cal aérea y la cal hidráulica, las cuales se diferencian en su porcentaje de cal y, por tanto, sus propiedades de aislamiento contra el agua. Ambas mejoran la resistencia del material frente al agua y la humedad. Para su aplicación, se mezcla con arena y arcilla en capas muy finas, variando el grosor de la arena, comenzando con arena gruesa y terminando con una capa fina para los acabados.

Otra técnica de revestimiento es el “calicostrado” en tapial, que consiste en verter una capa de mortero de cal, formando una cuña contra las paredes del tapial. Luego, se vierte y apisona la tierra en cada tongada, creando una capa exterior continua de cal que protege el muro de tapial del agua y la humedad. Esta costra puede dejarse expuesta o revestirse, siendo común enlucir el interior con yeso. (11)

Comportamiento térmico

Tradicionalmente, los muros de tierra no requerían aislamiento térmico debido a su alta masa o inercia térmica, que les permitía acumular calor y liberarlo gradualmente, mitigando así las fluctuaciones de temperatura. Sin embargo, con la implementación del Código Técnico de la Edificación (CTE) en España, se ha establecido la necesidad de incorporar aislamiento térmico en los muros, lo que puede resultar en un aumento significativo en el espesor de estos.

MATERIAL	Densidad (Kg/m3)	Conductividad (W/mk)
Adobe	1200	0,46
Tapial	1400 - 2000	0,6 – 1,6
Tapial prefabricado	1600 - 2000	0,8 – 18
BTC	1700	0,81
BTC estabilizado	1700	0,81
Hormigón armado	2300 - 2500	2,3
Hormigón en masa in situ	2000 - 2300	1,65
Pared de ladrillo macizo	2170	1,04
Pared de ladrillo hueco	670	0,22

Tabla 7: Conductividad de materiales

Fuente: CTE y Martin Rauch (9)



Fig. 35: Solución contra el agua. Fuente: Centro de Descargas del Instituto Geográfico

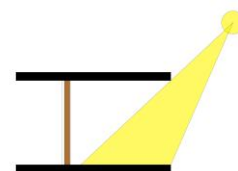


Fig. 36: Solución contra el agua. Fuente: Elaboración propia

Según el CTE, la conductividad térmica de un muro de tierra depende de la densidad seca del material, con valores que oscilan entre 0,46 y 1,60 W/mK. Esto significa que, para cumplir con los estándares de eficiencia energética establecidos por la normativa, el espesor del muro debe estar entre 0,70 y 1,10 metros sin aislamiento adicional. En particular, para los muros orientados al sur en España, donde la exposición solar es más directa y prolongada, se puede mantener un espesor convencional de 40 cm, aprovechando la optimización de la inercia térmica de esta orientación. Sin embargo, es crucial considerar que, aunque la orientación sur mejora la eficiencia térmica, se requiere un análisis detallado de las necesidades específicas de aislamiento térmico según las condiciones climáticas y las normativas locales.(9)

Una característica destacada de este material es su capacidad para retener y absorber el calor. Durante el invierno, el muro capta el calor solar durante el día y lo libera gradualmente hacia el interior de la vivienda. En verano, sigue el mismo proceso, reteniendo el calor y liberándolo lentamente durante la noche, lo que elimina la necesidad de dispositivos o sistemas externos para mantener una temperatura confortable en la vivienda. No obstante, este tipo de construcción no es ideal para viviendas temporales, ya que la falta de calor humano dificulta la climatización hasta alcanzar una temperatura confortable, lo que podría requerir el uso de otros dispositivos para aclimatar la casa rápidamente.

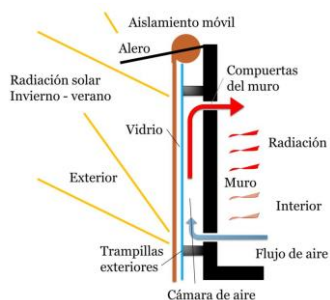


Fig. 38: Muro Trombé

Fuente:

<https://angelsinocencio.com/>

Una solución utilizada para mejorar la climatización y la inercia térmica es el “muro Trombé” (Fig. 38), un sistema de calefacción solar pasiva empleado en la arquitectura sostenible. Este sistema consiste en un muro de masa térmica, generalmente de hormigón o mampostería, pintado de negro o un color oscuro para absorber mejor el calor del sol, y situado detrás de una capa de vidrio, con un espacio de aire entre el vidrio y el muro, creando el mismo efecto de día y noche que el muro de tapial convencional. Este sistema es particularmente eficaz en climas con grandes variaciones diurnas de temperatura.

El empleo de estrategias pasivas en la construcción es crucial para reducir el consumo energético de los sistemas de climatización, contribuyendo así a niveles óptimos de confort en los edificios. Entre estas estrategias, destaca el uso de materiales con alta inercia térmica o capacidad calorífica, como el agua, el granito, la tierra seca o el adobe, cuya capacidad calorífica varía entre 500 y 1000 Kcal/m³°C. Estos materiales se utilizan en la construcción de elementos bioclimáticos, permitiendo una regulación eficiente de la temperatura interior del edificio. Además de estos, otros materiales comúnmente usados en construcción, como la madera, el ladrillo o el hormigón, presentan una capacidad calorífica aceptable, alrededor de 400 Kcal/m³°C. Por otro lado, los materiales aislantes térmicos, como la lana mineral, el EPS, el poliuretano o la celulosa, tienen una capacidad calorífica inferior a 40 Kcal/m³°C y se utilizan ampliamente como aislamiento térmico, ayudando a reducir la transferencia de calor entre el interior y el exterior del edificio, mejorando así su eficiencia energética.

MATERIAL	Capacidad calorífica (Kcal/m ³ °C)
Adobe	500 – 1000
Tapial	500 - 1000
Ladrillo	400
Hormigón	400
Aislantes térmicos	40

Tabla 8: Capacidad calorífica de los materiales

Fuente: Martin Rauch

Comportamiento acústico

El comportamiento acústico de la tierra como material de construcción es una faceta interesante y relevante en el diseño arquitectónico y la ingeniería civil. Aunque la tierra no es típicamente considerada un material aislante acústico como lo son la fibra de vidrio o la espuma acústica, tiene ciertas propiedades que pueden influir en la propagación del sonido.

En términos de absorción acústica, la tierra puede ser considerada un material relativamente poroso, especialmente en técnicas de construcción como el adobe o la tierra apisonada. Estas estructuras pueden absorber una cantidad significativa de sonido debido a su composición porosa y textura irregular.

En cuanto a la transmisión del sonido, la tierra tiende a tener una capacidad limitada para bloquear el paso del sonido en comparación con materiales más densos como el concreto o el acero. Sin embargo, su espesor y densidad pueden influir en su capacidad para atenuar la transmisión del sonido a través de las paredes.

El aislamiento acústico proporcionado por la tierra puede variar dependiendo de cómo se utiliza en la construcción y de otros materiales con los que se combine. Por ejemplo, en sistemas de construcción mixta donde la tierra se combina con materiales más densos como la madera o el concreto, se puede lograr un mejor aislamiento acústico que si se utiliza únicamente tierra.

En general, aunque la tierra puede no ser el material más eficaz para el aislamiento acústico en todas las situaciones, su uso en técnicas de construcción sostenibles y de bajo impacto ambiental puede ofrecer beneficios adicionales en términos de confort térmico y sostenibilidad, lo que la convierte en una opción atractiva en muchos contextos de diseño arquitectónico contemporáneo.

5. Análisis comparativo con otros materiales de construcción.

En este estudio vamos a comparar materiales de construcción utilizados en España, como son:

Construcción con tierra	Cerámica	Hormigón
-------------------------	----------	----------

Vamos a estudiar la sostenibilidad de estos materiales mediante:

- Estudio del ciclo de vida
- Estudio de huella de carbono
- Estudio de rendimiento
- Estudio de repercusión

Ciclo de vida

Para el estudio del ciclo de vida (*Fig. 39*), primero tenemos que entender su composición, conocer sus etapas de fabricación y por último, estudiaremos cuánta agua es necesaria para la fabricación de cada tipo constructivo, teniendo en cuenta todas sus etapas.

Composición:

La composición de un material son las materias primas necesarias para la elaboración de este, teniendo en cuenta proporciones tanto de cada una de las materias como de estabilizadores naturales y químicos. La composición de este puede variar en su comportamiento físico y químico.

Fabricación:

Extracción y producción:

La extracción de materias primas supone, en muchas ocasiones, un serio impacto ambiental por la destrucción de paisajes y hábitats para la extracción (explotación de maderas tropicales, bauxita, canteras y graveras), la producción de emanaciones nocivas (minas de carbón) o el riesgo de desastre medioambiental que conlleva (extracción y transporte de petróleo y productos clorados). La extracción de estos materiales puede crear cambios de paisajes o de ambientes, creando un gran impacto visual para el ser humano.

Además, durante la fase de producción, los diferentes procesos de transformación de materias primas producen emisiones, vertidos y residuos contaminantes para los suelos, el agua y el aire; así como un elevado consumo de energía.

El transporte de materiales en sus distintas fases, como materia prima, producto semifabricado o terminado, también conlleva altos consumos energéticos y contaminación. Los materiales de construcción de origen

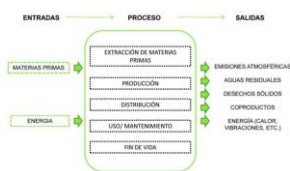


Fig. 39: Esquema del ciclo de vida de los materiales.

Fuente: (9)

local suponen un importante ahorro de energía en su transporte al lugar de uso, gasto que aumenta en función de la lejanía del lugar de extracción.

Puesta en obra

Durante el proceso de puesta en obra, los principales efectos medioambientales producidos son el consumo de energía y agua, la producción de residuos y la polución creada por las máquinas necesarias para su manipulación o transporte. También hay que tener en cuenta la contaminación producida por el ruido, las vibraciones o, incluso, el polvo generado.

Dentro de esta fase, el material forma parte de la envolvente del alojamiento y los efectos ambientales afectan de una manera directa a los usuarios de la edificación. Determinados materiales liberan algunos de sus componentes, en ocasiones perjudiciales para la salud (pinturas, adhesivos, etc.). También resulta importante la elección de los materiales de cara a la calidad del ambiente interior (según sus propiedades de aislamiento, inercia térmica y permeabilidad al vapor de agua). (10)

Demolición, reciclaje y reutilización

Una vez finalizado el período de vida útil de la edificación, tres cosas pueden suceder: abandono, derribo o rehabilitación del inmueble. En todos los casos se producirán residuos de demolición, cuyo impacto ambiental puede ser de diferente valor según el destino final elegido: reutilización, reciclaje o eliminación. Algunos materiales tienen ciertas ventajas en aspectos de reciclaje y reutilización gracias a su composición, su durabilidad...

Agua durante la fabricación:

El agua es una materia muy utilizada dependiendo del tipo de construcción que queramos realizar. En el proceso de extracción, suele ser empleado el agua para extraer áridos para la elaboración de hormigón. En el proceso de fabricación, el agua utilizada suele contar con un circuito cerrado para la reutilización de estas. Durante la puesta en obra, el agua también es utilizado para procesos de fraguado, para elaboración de materiales como cemento, hormigón o tierra estabilizada, y otros procesos de obra para mejorar las composiciones.

	COMPOSICIÓN	FABRICACIÓN	AGUA
CERÁMICA	Arcilla + Silicatos de aluminio hidratados	<ol style="list-style-type: none"> 1. Extracción de arcillas. 2. Transporte a fábrica. 3. Molienda. 4. Amasado. 5. Moldeo. 6. Cortar y apilar. 7. Secado. 8. Cocción. 9. Empaquetado. 10. Expedición. 	<p>El consumo de agua es mínimo en el proceso de fabricación gracias a las instalaciones modernas que se utilizan. Estas tienen unos circuitos cerrados que recuperan el agua, la filtran y la reciclan. En el momento del moldeo, la cerámica contiene la mayor cantidad de agua y se sitúa entre un 15-20% del peso de la materia. 1000kg de materia → 200L de agua Hasta un 30% se evapora y se recicla para su reutilización.</p>
HORMIGÓN: MORTERO, EN MASA Y ARMADO	Cemento Portland + Arena + Agua	<ol style="list-style-type: none"> 1. Obtención y preparación de materias primas 2. Molienda y cocción de materias primas 3. Molienda de cemento. 4. Fabricación del hormigón. 	<p>Para la fabricación del cemento: 30.000 litros de agua por tonelada de producto. Para el lavado de la arena para eliminar finos: 1500 y 3500 litros de agua por tonelada</p>
TAPIAL	Tierra + Estabilizadores naturales y/o químicos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Extracción de tierra 2. Preparación de la mezcla 3. Colocación y compactación en encofrados 4. Secado 	1600 litros de agua por tonelada de tierra para las etapas de preparación y compactación
ADOBE	Tierra + Paja o fibras naturales	<ol style="list-style-type: none"> 1. Extracción de tierra 2. Preparación de la mezcla 3. Colocación y compactación en encofrados 4. Secado 	1750 litros de agua por tonelada de tierra para fabricación y secado.
BTC	Tierra + Estabilizadores naturales y/o químicos	<ol style="list-style-type: none"> 1. Extracción de tierra 2. Preparación de la mezcla 3. Compactación y compresión 4. Curado 	1600 litros de agua por tonelada de tierra para las etapas de mezcla y curado

Tabla 9: Comparación de composición, fabricación y uso de agua
Fuente: (10)

Huella de carbono: la contaminación causada en el ciclo de vida del material.

De igual forma que la construcción desempeña un papel crucial en el desarrollo de nuestras comunidades, también representa una de las principales fuentes de emisiones de carbono. Cada material utilizado en la construcción contribuye a esta huella de carbono, que abarca las emisiones de gases de efecto invernadero durante su producción, transporte, instalación y eventual eliminación. Desde el hormigón y el acero hasta la madera y la tierra, cada material ejerce impactos particulares en el medio ambiente.

Estos últimos años, algunos materiales como la tierra han ganado atención como material de construcción, especialmente en técnicas como la construcción con tapial, BTC o adobe, debido a su bajo impacto ambiental y su disponibilidad local. Sin embargo, es importante reconocer que incluso la tierra crea una huella de carbono que debe ser considerada, dado que la extracción, procesamiento y transporte pueden generar emisiones significativas.

Tablas de recopilación de datos:

	ETAPAS	MATERIA PRIMA	COMBUSTIBLE	AGUA (l)	ENERGÍA (MJ)	CO ₂ (kg/tn)
CERÁMICA	ETAPA 1					
	Extracción	1,25 tn	0,49 l Gasoil	-	4,27 MJ	1,30 kg
	Fabricación	-	82,49 m ³ G.N.	200 l	3453,03 MJ	177,36 kg
	ETAPA 2					
	Expedición	-	5,84 l Gasoil	-	62,38 MJ	16,29 kg
	ETAPA 3					
	Agua	-	-	30 l	0,18 MJ	0,0087 kg
	Transporte	-	0,34 l Gasoil	-	3,65 MJ	0,95 kg
	ETAPA 4					
	Mantenimiento	-	-	-	-	-
	ETAPA 5					
	Retroexcavadora	-	42,73 l Gasoil	-	456,47 MJ	119,23 kg
	Pala cargadora	-	54,13 l Gasoil	-	578,19 MJ	151,02 kg
	Transporte	-	6,84 l Gasoil	-	73,03 MJ	19,08 kg
	TOTAL			230 l	4631,20 MJ	485,24 kg

Tabla 10: Ciclo de vida de la cerámica (10)

	ETAPAS	MATERIA PRIMA	COMBUSTIBLE	AGUA (l)	ENERGÍA (MJ)	CO ₂ (kg/tn)
MORTERO M10	ETAPA 1					
	Extracción áridos	800 kg	-	2000 l	120 MJ	6,40 kg
	Fabricación cemento	200 kg	64,52 l Gasoil	6000 l	654,84 MJ	180,00 kg
	ETAPA 2					
	Expedición	-	5,84 l Gasoil	-	62,38 MJ	16,29 kg
	ETAPA 3					
	Puesta en obra	-	-	176 l	1,06 MJ	0,05 kg
	ETAPA 4					
	Mantenimiento	-	-	-	-	-
	ETAPA 5					
	Retroexcavadora	-	42,74 l Gasoil	-	456,47 MJ	119,23 kg
	Pala cargadora	-	54,13 l Gasoil	-	578,19 MJ	151,02 kg
	Transporte	-	6,84 l Gasoil	-	73,03 MJ	19,08 kg
	TOTAL		375,09 l Gasoil	8176 l	1946,43 MJ	492,07 kg

Tabla 11: Ciclo de vida del mortero (10)

ETAPAS	MATERIA PRIMA	COMBUSTIBLE	AGUA (l)	ENERGÍA (MJ)	CO ₂ (kg/tn)
HORMIGÓN EN MASA					
ETAPA 1					
Extracción clínquer	-	-	-	-	-
Extracción áridos	792,09 kg	-	1980,23 l	118,81 MJ	6,34 kg
Fabricación cemento	143,39 kg	46,25 l Gasoil	4301,7 l	469,49 MJ	129,05 kg
Fabricación hormigón	-	-	64,52 l	0,39 MJ	0,02 kg
ETAPA 2					
Expedición	-	6,31 l Gasoil	-	63,34 MJ	17,59 kg
TOTAL (HM)					
		90,10 l Gasoil	-	652,03 MJ	153 kg
HORMIGÓN ARMADO					
ETAPA 3					
Vibrado	-	-	-	7,46 MJ	1,09 kg
ETAPA 4					
Mantenimiento	-	-	-	-	-
ETAPA 5					
Retroexcavadora	-	42,74 l Gasoil	-	456,47 MJ	119,23 kg
Pala cargadora	-	54,13 l Gasoil	-	578,19 MJ	151,02 kg
Transporte	-	6,84 l Gasoil	-	73,03 MJ	19,08 kg
TOTAL (HA)					
		103,71 l Gasoil	-	1115,15 MJ	290,42 kg
TOTAL (HM Y HA)					
		193,81 l Gasoil	-	2148,18 MJ	530,83 kg

Tabla 12: Ciclo de vida de la cerámica (10)

Para el estudio del ciclo de vida y la huella de carbono de los materiales relacionados con la construcción con tierra, hemos cogido las tablas de un trabajo de investigación (10) que estudia estos 2 parámetros del hormigón y del ladrillo. Tomando como referencia los datos de dichas tablas, he solicitado a una inteligencia artificial que desarrolle un estudio aproximado del ciclo de vida en la construcción con tierra, utilizando los datos previamente presentados. Es importante destacar que los datos obtenidos no son completamente precisos, ya que carecen de información detallada, pero el objetivo principal es visualizar las diferencias significativas en el gasto entre los tres tipos de construcción. Los tres métodos tradicionales de construcción con tierra deberían tener un gasto de agua y una huella de carbono muy similares

ETAPAS	MATERIA PRIMA	COMBUSTIBLE	AGUA (l)	ENERGÍA (MJ)	CO ₂ (kg/tn)
ETAPA 1					
Extracción de tierra	1,25 tn	0,49 l Gasoil	1000 l	4,27 MJ	1,30 kg
Preparación de mezcla	-	5,84 l Gasoil	500 l	62,38 MJ	16,29 kg
ETAPA 2					
Transporte a obra	-	5,84 l Gasoil	-	62,38 MJ	16,29 kg
ETAPA 3					
Compactación en tapial	-	20 l Gasoil	100 l	60 MJ	10,00 kg
ETAPA 4					
Mantenimiento	-	5 l Gasoil	-	20 MJ	5,00 kg
TOTAL					
		37,17 l Gasoil	1600 l	208,27 MJ	48,88 kg

Tabla 13: Aproximación de los valores de ciclo de vida del adobe

Fuente: Inteligencia artificial

ETAPAS	MATERIA PRIMA	COMBUSTIBLE	AGUA (l)	ENERGÍA (MJ)	CO ₂ (kg/tn)
ETAPA 1					
Extracción de tierra	1,25 tn	0,49 l Gasoil	1000 l	4,27 MJ	1,30 kg
Fabricación de adobes	-	20 l Gasoil	600 l	50 MJ	10,00 kg
Secado de adobes	-	-	100 l	-	-
ETAPA 2					
Transporte a obra	-	5,84 l Gasoil	-	62,38 MJ	16,29 kg
ETAPA 3					
Colocación de adobes	-	15 l Gasoil	50 l	60 MJ	10,00 kg
ETAPA 4					
Mantenimiento	-	5 l Gasoil	-	20 MJ	5,00 kg
TOTAL	-	46,33 l Gasoil	1750 l	196,65 MJ	42,59 kg

Tabla 14: Aproximación de los valores de ciclo de vida del adobe

Fuente: Inteligencia artificial

ETAPAS	MATERIA PRIMA	COMBUSTIBLE	AGUA (l)	ENERGÍA (MJ)	CO ₂ (kg/tn)
ETAPA 1					
Extracción de tierra	1,25 tn	0,49 l Gasoil	1000 l	4,27 MJ	1,30 kg
Fabricación de BTC	-	25 l Gasoil	500 l	70 MJ	15,00 kg
ETAPA 2					
Transporte a obra	-	5,84 l Gasoil	-	62,38 MJ	16,29 kg
ETAPA 3					
Colocación de BTC	-	15 l Gasoil	100 l	60 MJ	10,00 kg
ETAPA 4					
Mantenimiento	-	5 l Gasoil	-	20 MJ	5,00 kg
TOTAL	-	51,33 l Gasoil	1600 l	216,65 MJ	47,59 kg

Tabla 14: Aproximación de los valores de ciclo de vida del adobe

Fuente: Inteligencia artificial

Con estas tres tablas, observando su gran similitud de resultados, he creado una tabla común de construcción con tierra para una mejor comparación.

ETAPAS	ACTIVIDADES PRINCIPALES	MATERIA PRIMA	COMBUSTIBLE	AGUA (l)	ENERGÍA (MJ)	CO ₂ (kg/tn)
ETAPA 1	Extracción y Preparación de la Materia Prima					
Extracción de tierra	Extracción de tierra del sitio o cercano	Tierra cruda	0,49 l Gasoil	-	4,27 MJ	1,30 kg
Preparación de mezcla	Mezcla de tierra con agua y aditivos	-	20 l Gasoil	1000 l	60 MJ	10,00 kg
ETAPA 2	Fabricación					
Moldeado/Compactación	Formación de bloques/adobes o compactación	-	25 l Gasoil	600 l	70 MJ	15,00 kg
Secado/Curado	Secado al sol o curado controlado	-	-	200 l	-	-
ETAPA 3	Transporte					
Transporte a obra	Transporte de materiales al sitio de construcción	-	5,84 l Gasoil	-	62,38 MJ	16,29 kg
ETAPA 4	Construcción					
Colocación/Ensamblaje	Colocación de bloques/adobes o tapial en obra	-	15 l Gasoil	100 l	60 MJ	10,00 kg
ETAPA 5	Uso y Mantenimiento					
Mantenimiento	Reparaciones menores y mantenimiento	-	5 l Gasoil	-	20 MJ	5,00 kg
ETAPA 6	Demolición o Reutilización					
Demolición/Reutilización	Desmontaje o reutilización de materiales	-	10 l Gasoil	100 l	40 MJ	8,00 kg
TOTAL		-	101,33 l Gasoil	2000 l	316,65 MJ	65,59 kg

Tabla 11: Aproximación de huella de carbono y gasto de agua de la construcción con tierra

Fuente: Elaboración propia

Observando estos datos, podemos observar la gran sostenibilidad de la tierra en comparación con el hormigón y el ladrillo, dos de los métodos constructivos más utilizados en la actualidad en España y en la gran mayoría del mundo. Esto crea una pregunta clara, ¿tiene sentido comenzar a construir con tierra en las ciudades más industrializadas? Los grandes núcleos poblacionales necesitan de construir en altura para aprovechar al máximo el suelo. Esto no podría ser resuelto de forma segura con solo construcción con tierra debido a su baja seguridad estructural, que veremos ahora después.

La solución óptima para introducir la tierra en el panorama de la construcción actual sería con métodos constructivos mixtos entre hormigón y tierra. Los muros de tierra tienen gran potencial como muro autoportante, muro exterior... lo que

podría abaratar el coste de obra y reducir un poco la huella de carbono al utilizar menos cerámica u hormigón

Rendimiento: tiempo de construcción.

El rendimiento de un edificio se refiere a la eficiencia con la que cumple su función principal y otros objetivos secundarios, como la comodidad, la sostenibilidad y la seguridad. Este concepto abarca diversos aspectos, que incluyen:

- **Eficiencia energética:** Se refiere a la capacidad del edificio para utilizar la energía de manera eficiente, minimizando el consumo de recursos y reduciendo las emisiones de gases de efecto invernadero.
- **Confort térmico:** Implica mantener una temperatura interior adecuada y estable en todas las estaciones del año, evitando variaciones excesivas que puedan causar incomodidad a los ocupantes.
- **Calidad del aire interior:** Se refiere a la pureza y frescura del aire dentro del edificio, evitando la acumulación de contaminantes que puedan afectar la salud de los ocupantes.
- **Acústica:** Se refiere al control del ruido dentro del edificio, asegurando niveles de ruido adecuados para actividades específicas y minimizando la transmisión de ruido entre espacios.
- **Seguridad estructural:** capacidad del edificio para resistir cargas estructurales, como vientos fuertes, terremotos o incendios, garantizando la seguridad de los ocupantes en caso de eventos adversos.
- **Sostenibilidad:** Se refiere a la capacidad del edificio para minimizar su impacto ambiental a lo largo de su ciclo de vida, mediante la utilización de materiales sostenibles, el uso eficiente de recursos naturales y la implementación de prácticas de diseño y construcción respetuosas con el medio ambiente.

Parámetro	Hormigón Armado	Ladrillo	Tapial	Adobe	BTC
Eficiencia Energética	Alta, con buen aislamiento térmico si se combinan con sistemas adecuados de aislamiento.	Media, depende del grosor y del uso de aislantes adicionales.	Media, tiene buena inercia térmica, pero puede necesitar aislamiento adicional.	Baja a media, buena inercia térmica pero pobre aislamiento sin mejoras adicionales.	Alta, buena inercia térmica y puede mejorarse con aditivos.
Confort Térmico	Alto, mantiene temperaturas estables con buen diseño de aislamiento.	Medio, depende de la construcción y el grosor de las paredes.	Medio, buena inercia térmica, pero requiere aislamiento en climas extremos.	Bajo a medio, requiere optimización para mejorar estabilidad térmica.	Alto, buena capacidad para mantener temperaturas estables.
Calidad del Aire Interior	Alta, especialmente si se usan materiales de baja emisión y ventilación adecuada.	Media, depende de los materiales y el mortero utilizado.	Media, si se combinan con otros materiales puede mejorar.	Alta, materiales naturales y transpirables que mejoran la calidad del aire.	Alta, si se utilizan materiales naturales sin contaminantes.
Acústica	Alta, buen aislamiento acústico con diseño adecuado.	Media, puede requerir mejoras adicionales.	Media a baja, requiere tratamientos para mejor aislamiento acústico.	Baja a media, pobre aislamiento sin mejoras adicionales.	Alta, buen aislamiento acústico inherente.
Seguridad Estructural	Muy alta, excelente resistencia a cargas estructurales y eventos sísmicos.	Alta, buena resistencia estructural si se diseña adecuadamente.	Media, buena en áreas con baja actividad sísmica pero limitada en resistencia a cargas laterales.	Baja a media, menos resistente a cargas y eventos sísmicos.	Alta, buena resistencia con diseño adecuado.
Sostenibilidad	Media, alta emisión de CO2 en la producción de cemento, pero puede mitigarse con prácticas sostenibles.	Media a baja, depende del proceso de producción y transporte.	Alta, bajo impacto ambiental y uso de materiales locales.	Muy alta, uso de materiales naturales y locales con bajo impacto ambiental.	Alta, uso de materiales naturales y potencial para aditivos sostenibles.

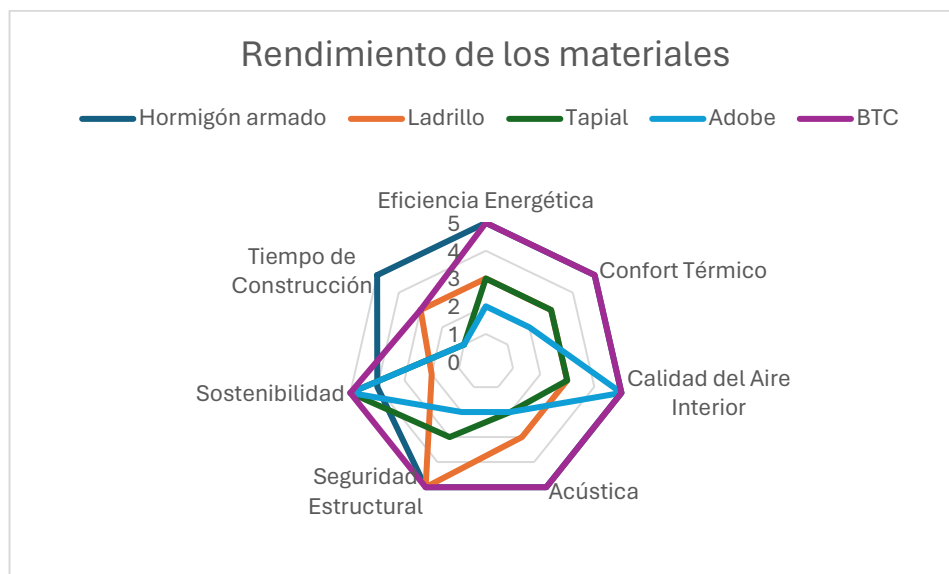
Tabla 12: Tabla de rendimiento de los materiales

Fuente: Elaboración propia (9)

Conclusiones de la tabla:

El hormigón no destaca por su excelente aislamiento térmico y acústico, necesitando de otros sistemas de aislamiento para proporcionar un alto nivel de confort térmico y una buena calidad del aire interior. Su gran resistencia estructural lo convierte en uno de los materiales más seguros para la construcción. Sin embargo, no es el material más sostenible, ya que la producción de cemento, componente principal del hormigón, genera una alta emisión de CO₂. Aunque existen métodos para reducir esta huella de carbono, sigue siendo significativa. Un punto a favor del hormigón es su rápido tiempo de construcción, lo que lo hace ideal para proyectos que requieren celeridad.

La eficiencia energética y el confort térmico de los muros de ladrillo dependen del grosor del ladrillo, el número de huecos y la inclusión de otros aislantes como cámaras de aire, lo que incrementa el grosor del muro. La calidad del aire interior y el aislamiento acústico también dependen del diseño y la correcta aplicación de las juntas de mortero. Aunque el ladrillo es un material tradicionalmente robusto, su producción y transporte generan una considerable huella de carbono debido al uso de cemento. El tiempo de construcción puede variar según el tamaño del proyecto y la disponibilidad de materiales y mano de obra.



Gráfica 1: Rendimiento de los materiales

Fuente: Elaboración propia

El tapial es eficiente en términos de confort térmico y eficiencia energética, especialmente cuando se utilizan estabilizadores o aislantes adicionales en climas extremos. La calidad del aire interior y el aislamiento acústico pueden mejorarse con la adición de ciertos aditivos. Aunque el tapial es resistente en zonas de baja actividad sísmica, no alcanza la robustez del hormigón o el ladrillo en términos de seguridad estructural. La gran ventaja del tapial es su sostenibilidad, ya que la tierra utilizada no deja casi huella de carbono ni genera residuos. Sin embargo, el método tradicional de construcción con tapial es lento, aunque el uso de paneles prefabricados puede acelerar significativamente el proceso.

El adobe necesita estabilizadores para alcanzar un nivel medio de eficiencia energética, aislamiento acústico y confort térmico. Este material es excelente para la calidad del aire interior, ya que los bloques de adobe permiten la

transpiración y limpieza del aire. Al igual que el tapial, el adobe es altamente sostenible, pero presenta una baja seguridad estructural y requiere un tiempo prolongado de construcción.

Estas características lo hacen más adecuado para construcciones en zonas rurales o donde la sostenibilidad y el bajo impacto ambiental son prioritarios.

El BTC ofrece una excelente inercia térmica y eficiencia energética, que puede mejorarse aún más con la adición de aditivos. Mantiene una muy buena calidad del aire interior si no se utilizan excesivos aditivos y proporciona un buen aislamiento acústico sin necesidad de mejoras adicionales. En términos de sostenibilidad, el BTC es muy favorable y, con un diseño adecuado, puede alcanzar altos niveles de seguridad estructural. Comparado con el tapial y el adobe, el BTC tiene un tiempo de construcción más rápido, aunque sigue siendo más lento que el hormigón.

Cada material de construcción presenta ventajas y desventajas específicas que lo hacen más o menos adecuado según el contexto y los objetivos del proyecto. El hormigón y el ladrillo son ideales para construcciones que requieren rapidez y alta resistencia estructural, aunque a costa de una mayor huella de carbono. El tapial y el adobe son opciones sostenibles y eficaces para proyectos que priorizan el bajo impacto ambiental, aunque requieren más tiempo y tienen limitaciones estructurales. El BTC emerge como una opción equilibrada, combinando sostenibilidad, buena eficiencia energética y una construcción relativamente rápida. La elección del material adecuado dependerá de las necesidades específicas del proyecto, las condiciones climáticas y las prioridades en términos de sostenibilidad y rendimiento.

Repercusión: coste y mantenimiento

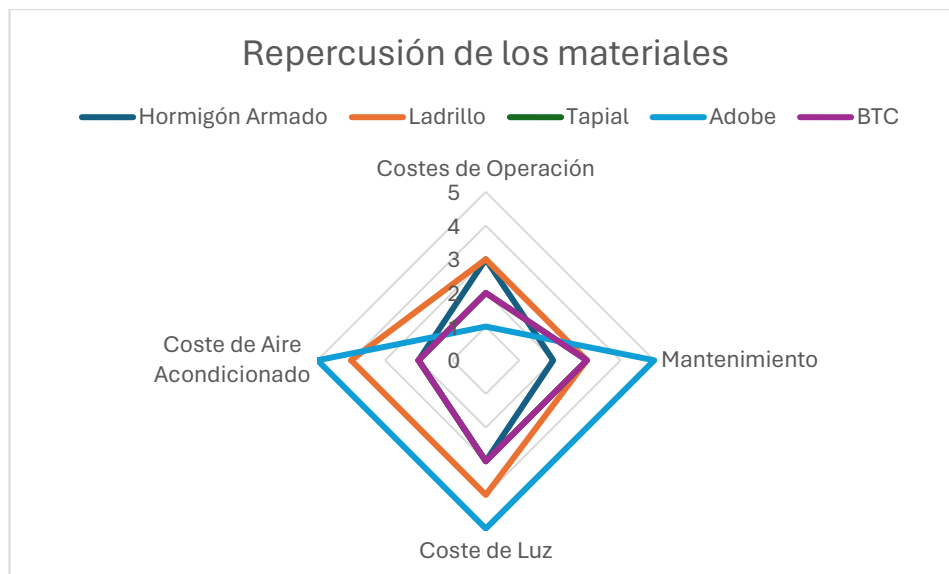
La repercusión de cada material vamos a analizarlas según los siguientes parámetros:

- Los costes de operación y mantenimiento de un edificio comprenden todos los gastos asociados con su funcionamiento.
- Energía: gastos relacionados con la electricidad, el gas natural u otras fuentes de energía necesarias para la iluminación, calefacción, refrigeración, ventilación y otros sistemas energéticos del edificio.
- Aire acondicionado: gastos destinados a la climatización del edificio, garantizando un confort térmico.
- Mantenimiento: gastos destinados al mantenimiento preventivo y correctivo del edificio, que pueden incluir reparaciones de equipos, inspecciones periódicas, limpieza, pintura, renovaciones menores, etc.

Parámetro	Hormigón Armado	Ladrillo	Tapial	Adobe	BTC
Costes de Operación	Medio: Coste moderado debido a la durabilidad y menor necesidad de reparaciones frecuentes.	Medio: Moderado, con necesidad ocasional de reparaciones de juntas y mortero.	Bajo a Medio: Material duradero con bajos costes operativos, pero puede necesitar protección contra la humedad.	Bajo: Material natural con mínimos costes operativos, aunque puede requerir protección contra la humedad.	Bajo a Medio: Costes operativos bajos, con buen rendimiento si se mantienen adecuadamente.
Mantenimiento	Bajo a Medio: Poco mantenimiento necesario, pero puede requerir reparaciones estructurales con el tiempo.	Medio: Necesidad de mantenimiento periódico de juntas y potenciales reparaciones de grietas.	Medio: Requiere mantenimiento regular para asegurar la durabilidad, especialmente en climas húmedos.	Alto: Puede necesitar mantenimiento frecuente para evitar degradación por humedad y otros factores ambientales.	Medio: Requiere mantenimiento para asegurar la durabilidad, especialmente en climas húmedos.
Coste de Luz	Medio: Depende de la eficiencia energética del diseño y el aislamiento incorporado.	Medio a Alto: Eficiencia variable que puede resultar en costes elevados si no está bien aislado.	Medio: Buen comportamiento térmico puede reducir costes de iluminación en climas templados.	Alto: Pobre aislamiento puede resultar en mayores costes de iluminación.	Medio: Buena eficiencia térmica puede reducir costes de iluminación si está bien diseñado.
Coste de Aire Acondicionado	Bajo a Medio: Buena eficiencia energética puede reducir los costes de aire acondicionado.	Medio a Alto: Costes pueden ser altos si la estructura no está bien aislada.	Bajo a Medio: Buena inercia térmica reduce la necesidad de aire acondicionado en climas templados.	Alto: Pobre aislamiento puede resultar en altos costes de aire acondicionado.	Bajo a Medio: Buena eficiencia térmica puede reducir los costes de aire acondicionado.

Tabla 13: Tabla de repercusión de los materiales

Fuente: Elaboración propia (11)



Gráfica 2: Rendimiento de los materiales

Fuente: Elaboración propia

Como conclusión del estudio de la repercusión de los materiales, se destaca que el BTC (bloque de tierra comprimida) muestra un gran potencial para competir con materiales convencionales como el ladrillo y el hormigón, incluso superando a este último en términos de costes de operación. Por otro lado, el adobe presenta desventajas significativas en todos los aspectos evaluados, quedando rezagado en el contexto de la construcción industrial moderna. El tapial, sin embargo, responde casi igual de bien que el BTC, consolidándose como otra opción competitiva en la construcción actual, aunque es fundamental tener en cuenta sus limitaciones estructurales. El tapial podría mejorar sus valores de coste de luz y aire acondicionado mediante el uso de estabilizadores como la cal o el cemento, optimizando así sus propiedades de aislamiento térmico.

6. Estudios de caso

Casa tapial de Ayerbe, Huesca (España) (20)



Fig. 40: Fachada de Tapial de Ayerbe, Huesca.

Fuente:
<https://arquitectura.edraculturaynat.com>

La vivienda de Àngels Castellarnau en Ayerbe (Fig. 40) ha sido seleccionada para un premio internacional por su enfoque en la arquitectura vernácula del siglo XXI. La migración rural en el siglo XX en esta localidad oscense causó la pérdida de técnicas tradicionales de construcción, y Castellarnau busca revivir el interés por métodos más sostenibles y conectados con el entorno.

Características del proyecto:

La vivienda se ubica en Ayerbe, un pueblo del pre-Pirineo de Huesca (norte de España) en un contexto rural. Este entorno ha sufrido degradación y desvalorización debido a la despoblación y la pérdida del uso tradicional del suelo y la edificación. El proyecto, comprometido localmente con el medio natural y social, pretende promover un cambio hacia un nuevo paradigma y ha conseguido despertar la curiosidad de la comunidad. (20)

La concepción de esta vivienda de nueva planta está precedida de un estudio exhaustivo de la arquitectura vernácula local, del cual se extraen las claves del proyecto. La nueva vivienda surge de lo aprendido en cuanto a orientación, morfología, materiales, adaptación al medio material y climático, utilización de medios técnicos y humanos locales y gestión tradicional del usuario, combinados con un esmerado diseño solar pasivo y bioclimático.

La construcción local utiliza materiales del entorno, principalmente tierra, y de forma complementaria piedra arenisca, madera y caña. Estos materiales contienen una baja carga energética, se encuentran en el entorno inmediato, son de fácil extracción y se utilizan sin procesar, lo que minimiza su impacto ambiental. Además, son saludables ya que no contienen aditivos ni en su composición ni en su puesta en obra.

Para la nueva edificación, se utiliza la tierra como material de construcción, debido a su omnipresencia y accesibilidad, su bajo impacto ambiental y porque forma parte de la identidad y del imaginario colectivo de los habitantes de la zona.

Se construye con la técnica de la “tapia calicostrada”, un sistema constructivo de tradición local que consiste en la construcción de muros de carga a base de tierra



Fig. 41: Fachada de Tapial de Ayerbe, Huesca.

Fuente:
<https://arquitectura.edraculturaynat.com>

no manufacturada Km0, con mejoras técnicas como la adición de paja de cebada para mejorar su comportamiento térmico y la mecanización de la puesta en obra para reducir el coste de ejecución. (Fig. 42)

La vivienda se ubica en un solar rectangular entre medianeras de edificios de tierra. Se abre un patio al sur que permite la captación solar pasiva a través de grandes huecos, lucernarios y muros.

La estructura se resuelve mediante una planta semienterrada construida en hormigón en masa (100% reciclable y de árido local) que alberga el garaje y el cuarto de calderas. Sobre un forjado de viguetas pretensadas de hormigón armado y vuelta cerámica, se levanta el muro perimetral de carga de 45 cm de espesor construido en “tapia calicostrada”. Este muro monolítico está compuesto por una mezcla de tierra y paja con costras de mortero de cal hidráulica contruidos simultáneamente al levantamiento de la tapia.

Los acabados interiores se resuelven con revocos de arcilla local y pavimentos de madera de pino. En la carpintería y las protecciones solares también se utiliza madera de pino. Estos materiales podrán reintroducirse directamente en la naturaleza al finalizar la vida útil del edificio, siendo nuevamente materias primas.



Fig. 42: Ejemplo tapia “calicostrada”
Fuente: Google Imágenes

Piscinas de toro, Zamora (11)

La construcción de la piscina municipal en Toro (Zamora) (Fig. 43) con tapial, un método tradicional de construcción con tierra compactada presenta una serie de desafíos y beneficios tanto técnicos como ambientales que son pertinentes para un trabajo de fin de grado (TFG) enfocado en la construcción con tierra y en el manejo de la condensación de agua en piscinas.

Características del proyecto:

La elección de tapial para la construcción de la piscina en Toro se fundamenta en varias ventajas inherentes a este método. El tapial, como ya hemos visto anteriormente posee una alta inercia térmica, lo que significa que tiene la capacidad de almacenar y liberar calor de manera lenta, ayudando a mantener una temperatura interna estable y confortable. Además, la tierra compactada utilizada en tapial tiene una excelente capacidad de control de humedad, lo que mejora la calidad del aire interior y reduce la necesidad de sistemas de climatización complejos y costosos.

En el proyecto de Toro, los muros de tapial se diseñaron con un grosor de 60 cm, proporcionando una robusta estructura perimetral que no solo define el aspecto exterior del edificio sino también su ambiente interior. La masa térmica de estos muros contribuye significativamente a la eficiencia energética del edificio, lo cual es especialmente relevante en un clima continental como el de Zamora, donde las variaciones de temperatura entre el día y la noche pueden ser extremas.

Uno de los principales desafíos en la construcción de una piscina cubierta es la gestión de la condensación (Fig. 43), que puede dañar la estructura y disminuir el confort de los usuarios. En el caso de la piscina de Toro, se implementaron varias soluciones innovadoras para abordar este problema.



Fig. 43: Fachada de la Piscina de Toro, Zamora
Fuente: E. Antelo, S. Sánchez, C. Crespo y A. Raya. “Construir con tapial: piscina de toro”. (2012)



Fig. 43: Separación interior de espacios para evitar condensación
Fuente: E. Antelo, S. Sánchez, C. Crespo y A. Raya. “Construir con tapial: piscina de toro”. (2012)



Fig. 44: Detalle del tapial junto a la piscina

Fuente: E. Antelo, S. Sánchez, C. Crespo y A. Raya. "Construir con tapial: piscina de toro". (2012)

Primero, se utilizó una estructura de techo que incluye vigas de madera laminada y un sistema de triangulación que rigidiza el plano horizontal de la cubierta. Este diseño es crucial para garantizar la estabilidad de los muros altos de tapial, especialmente en un entorno donde las cargas de viento y posibles sismos son considerables. Además, la estructura de techo incorpora un sistema de ventilación forzada que ayuda a controlar la humedad y prevenir la condensación

El uso de un sistema de impulsión de aire tratado dentro de una cámara de 1250 mm de altura también es una medida clave. Este sistema asegura que el aire dentro del recinto esté adecuadamente deshumidificado, lo que minimiza el riesgo de condensación en las superficies frías. La incorporación de materiales hidrofugantes, como el siloxano aplicado en la superficie del tapial, proporciona una capa adicional de protección contra la humedad.(11)

De igual manera que en el caso anterior, se opta por construir con tapial con el objetivo de responder a consideraciones ecológicas. El proyecto no solo preserva el patrimonio arquitectónico de la región, sino que también promueve la sostenibilidad y la eficiencia energética.

El proyecto de la piscina municipal de Toro (*Fig. 44*) es un ejemplo notable de cómo la combinación de técnicas tradicionales y soluciones modernas puede resultar en una construcción eficiente, sostenible y adecuada para el clima local. La experiencia obtenida de este proyecto proporciona valiosas lecciones para futuras construcciones con tierra, destacando la importancia de una planificación cuidadosa y la implementación de tecnologías que mitiguen problemas comunes como la condensación.

Este ejemplo demuestra que el tapial no solo es viable en la construcción moderna, sino que también ofrece ventajas significativas en términos de eficiencia energética y control de humedad, aspectos cruciales para el confort y la durabilidad de los edificios.

7. Integración de la construcción con tierra en el contexto actual

Desafíos en la arquitectura contemporánea

Durante la realización de este trabajo de investigación, he notado una ausencia significativa de información sobre la sostenibilidad de la construcción con tierra en comparación con otros métodos constructivos más comunes. Esta carencia de datos subraya la necesidad de investigaciones más profundas y estudios comparativos para evaluar adecuadamente los beneficios y limitaciones de la tierra como material de construcción sostenible frente al resto de materiales actualmente pioneros en la construcción actual.

Como hemos visto anteriormente, la tierra enfrenta varios desafíos importantes para convertirse en un material pionero en la industria de la construcción. Entre los problemas más notables se encuentran:

- Limitación de alturas: La tierra, debido a su baja resistencia a la compresión, no es adecuada para construcciones en altura. En la

mayoría de los casos, es seguro construir hasta un máximo de dos plantas, lo cual restringe su uso en áreas urbanas donde se requiere edificación en altura. Esta limitación impide que la tierra compita con materiales como el hormigón y el acero, que permiten la construcción de rascacielos y edificios de múltiples plantas.

- Limitación de luces: La tierra, por sí sola, no puede cubrir grandes luces (distancias entre soportes) sin la ayuda de otros materiales. Esto limita su aplicación en diseños arquitectónicos modernos que demandan espacios abiertos y amplios. Para superar esta barrera, es necesario combinar la tierra con elementos estructurales adicionales, como vigas de madera o acero, que pueden soportar mayores cargas y proporcionar estabilidad.
- Limitación estructural: Las propiedades estructurales de la tierra son inferiores en comparación con materiales como el hormigón o el acero. Aunque es posible mejorar la resistencia de la tierra mediante la adición de estabilizantes como la cal o el cemento, esto reduce su sostenibilidad y contraviene uno de los principales beneficios del material. La construcción con tierra requiere técnicas y conocimientos especializados para asegurar que las estructuras sean seguras y duraderas.

Oportunidades: Uso de la tierra como aislante térmico y acústico

Una de las razones principales de este trabajo de investigación es analizar el potencial de la tierra como material de construcción, específicamente su capacidad para actuar como aislante térmico y acústico en edificios. La investigación se centra en evaluar si la tierra puede llegar a sustituir materiales más convencionales como el ladrillo, el hormigón o la madera en la construcción de muros.

La tierra destaca notablemente por su eficacia como aislante térmico y acústico. Una de sus propiedades más sobresalientes es su alta capacidad de inercia térmica, lo que significa que puede almacenar y liberar calor de manera lenta y gradual. Esta característica contribuye significativamente a la estabilidad de la temperatura interior de los edificios, reduciendo las fluctuaciones térmicas.

Como resultado, el uso de tierra en la construcción de muros puede traducirse en un menor consumo de energía para calefacción y refrigeración, incrementando así la eficiencia energética del edificio. Esta propiedad no solo tiene beneficios ambientales, sino que también puede reducir los costos operativos asociados al mantenimiento de una temperatura confortable en el interior de los edificios.

Este estudio busca proporcionar una base sólida para la incorporación de la tierra como material de construcción viable en el contexto de la arquitectura moderna, promoviendo su uso no solo por su sostenibilidad, sino también por sus beneficios prácticos y económicos.

Aunque la tierra tiene una baja resistencia a la compresión y limitaciones estructurales, sus propiedades de cerramiento son comparables a las del ladrillo o el hormigón. Sus ventajas adicionales incluyen un bajo coste, sostenibilidad y fácil reciclaje. Este tipo de cerramientos es viable para muros no portantes o autoportantes, tanto interiores como exteriores, siempre que se protejan contra climas extremos con revestimientos adecuados.

La combinación de tierra con otros materiales, como tablones de madera para revestimiento exterior y yeso interior, resulta particularmente interesante. Se pueden emplear técnicas como muros de tapial prefabricado, BTC estabilizado (Bloques de Tierra Comprimida) o incluso "swallow brick". Estas combinaciones no solo mejoran las propiedades estructurales y de aislamiento, sino que también permiten un diseño más versátil y contemporáneo.

Sin embargo, es crucial abordar el problema de la condensación, que puede dañar la tierra y hacer que pierda sus propiedades. Para evitar esto, se deben seleccionar cuidadosamente los materiales de revestimiento y asegurar una adecuada ventilación y protección contra la humedad.

El tapial o BTC también puede dejarse expuesto en el interior, siempre que esté correctamente protegido para reducir el mantenimiento, y en el exterior, en áreas que eviten la exposición directa al sol y la lluvia, protegidos con cal u otros aditivos. Esta práctica no solo mejora la durabilidad del material, sino que también resalta su valor estético natural.

Tras el análisis comparativo pormenorizado de los diversos sistemas, se abre la posibilidad de elaborar una metodología ampliando el campo de variables para, con ayuda de la aplicación de Método de Ayuda a la Decisión (DMD, Decisión Multicriterio Discreta), introducir de manera objetiva la construcción con tierra como una alternativa que, en función de las características del proyecto y las necesidades a cubrir con unas condiciones de contorno precisas y parametrizables. Puede resultar como una prescripción posible entre otros sistemas constructivos, según el caso.

Barreras y limitaciones a superar

La baja capacidad estructural de la tierra como material de construcción sostenible es una de sus principales limitaciones. Para superar esta barrera, la tierra a menudo debe ser apoyada por otros materiales como bambú, madera o incluso acero. Estos materiales proporcionan el soporte necesario para estructuras más altas y complejas.

Se ha intentado mejorar la capacidad estructural de la tierra mediante la adición de aditivos como cemento y cal. Sin embargo, para alcanzar una capacidad estructural comparable a la del ladrillo o el hormigón, se necesita añadir una cantidad significativa de aditivos, lo que disminuye la sostenibilidad del material y reduce su atractivo ecológico.

No obstante, los avances tecnológicos han permitido el desarrollo de muros de tapial prefabricados y BTC estabilizados que cumplen con las expectativas estructurales, aunque su uso se limita a edificios de hasta cuatro plantas. Estos avances hacen que la tierra sea una opción viable para proyectos de baja y media altura, particularmente en contextos rurales o suburbanos donde la construcción en altura no es tan demandada.

Otra barrera significativa es la percepción social de la arquitectura con tierra. En grandes núcleos urbanos, es casi imposible encontrar construcciones de tierra, lo que ha generado una asociación de este tipo de arquitectura con áreas rurales y de bajos recursos. Esta percepción se debe en parte a la falta de ejemplos contemporáneos en entornos urbanos y al estigma asociado a la construcción con tierra como un método anticuado o inferior.

Los ejemplos existentes de edificaciones antiguas y patrimoniales se conservan por su valor histórico, pero perpetúan la imagen de una arquitectura del pasado y en desuso. Para cambiar esta percepción, es crucial educar tanto a profesionales de la construcción como al público en general sobre los beneficios y posibilidades de la arquitectura con tierra.

Iniciativas como proyectos piloto, demostraciones y la integración de técnicas modernas pueden ayudar a revitalizar y legitimar la construcción con tierra en el contexto contemporáneo.

Para una comprensión más visual, he llevado a cabo una comparación de seis tipos de muros, evaluándolos en términos de aislamiento térmico, acústico y resistencia al fuego. Esta comparación se basa en ejemplos reales de materiales como el ladrillo, el BTC, entre otros. Las observaciones derivadas de este análisis están detalladas en las fichas correspondientes de cada muro. Los muros analizados son:

- Tapial estilo tradicional con mortero de cal
- Tapial prefabricado revestido de mortero de cal
- Muro de fábrica de ladrillo
- Muro de fábrica de ladrillo con trasdós de placa de aislante térmico
- Muro de fábrica de ladrillo con cámara de aire y tabicón
- Muro de BTC con mortero de tierra

El objetivo de este estudio es proporcionar una herramienta útil para la toma de decisiones en proyectos, sugiriendo la conveniencia de realizar más variantes para una comparación más completa.

8. Conclusiones

En conclusión, la integración de la construcción con tierra en la arquitectura contemporánea presenta tanto oportunidades como desafíos. Sus propiedades como aislante térmico y acústico, junto con su sostenibilidad, la convierten en una opción atractiva para la construcción ecológica. Sin embargo, las limitaciones estructurales y las barreras sociales deben ser abordadas para que su uso se expanda y se acepte más ampliamente.

Combinar la tierra con otros materiales como madera, metal y hormigón puede ofrecer soluciones híbridas que aprovechen las fortalezas de cada material. Además, la educación y la sensibilización sobre los beneficios de la arquitectura con tierra son esenciales para superar las barreras sociales y cambiar la percepción de este método constructivo.

Con los avances tecnológicos y una mayor conciencia sobre la sostenibilidad, la arquitectura con tierra tiene el potencial de convertirse en una opción viable y atractiva en el contexto de la construcción contemporánea, ofreciendo soluciones que no solo son eficientes y sostenibles, sino también estéticamente agradables y culturalmente significativas.

Durante la realización de este trabajo de investigación, he observado una notable carencia de información sobre la sostenibilidad de la construcción con tierra en comparación con otros métodos constructivos más comunes. Esta falta de datos subraya la necesidad de estudios más exhaustivos que evalúen adecuadamente las ventajas y desventajas de la tierra como material de construcción sostenible.

La tierra, como material de construcción, enfrenta importantes desafíos que deben superarse para convertirse en una opción viable y pionera en el mundo de la construcción moderna. Estos desafíos han llevado a que la construcción con tierra sea percibida en el mundo industrial como un vestigio del pasado, más apropiada para restauraciones históricas o proyectos rurales de baja altura. Sin embargo, no se deben subestimar sus potenciales ventajas, especialmente en términos de sostenibilidad, eficiencia energética y bajo impacto ambiental.

Para que la construcción con tierra pueda ser considerada una opción viable y competitiva en el sector de la construcción contemporánea, es necesario abordar estos desafíos mediante la innovación en técnicas constructivas y la combinación de la tierra con otros materiales que puedan compensar sus limitaciones. Además, es crucial fomentar la investigación y la educación en este campo para cambiar la percepción actual y destacar los beneficios que ofrece la tierra como material de construcción sostenible.

9. Propuestas para promover el uso de la construcción con tierra

A lo largo del desarrollo de este trabajo, he adquirido un conocimiento profundo sobre la tierra como material de construcción, apreciando sus propiedades, gran sostenibilidad y disponibilidad. Basándome en esta experiencia, propongo dos áreas de estudio pendientes que podrían ser de gran interés para futuras investigaciones:

- Desarrollo de la Construcción Mediante Extrusión 3D de Estructuras de Tierra:

Innovación Tecnológica: La construcción mediante extrusión 3D está emergiendo rápidamente como una tecnología prometedora. Este método permite la creación de estructuras con tierra de manera eficiente y económica.

Sostenibilidad y Reciclaje: La tierra utilizada en este proceso es fácilmente reciclable y reutilizable, con gastos mínimos en la extracción. Esta característica hace que la construcción con extrusión 3D sea altamente sostenible.

Aplicaciones Prácticas: Esta técnica tiene un gran potencial para la creación de viviendas temporales y de bajo costo, además de ser una opción viable para estructuras que se integran armoniosamente con la naturaleza y ofrecen una belleza estética notable.

- Estudio de las Propiedades de la Tierra como Aislante Térmico y Acústico:

Propiedades Aislantes: Un estudio más exhaustivo sobre las capacidades de la tierra como aislante térmico y acústico podría abrir nuevas posibilidades en su aplicación.

Aplicación en Muros: Investigar su potencial para ser utilizada en muros autoportantes o exteriores en edificios donde la estructura principal esté diseñada con otros materiales como hormigón, madera o acero. Esto podría optimizar la eficiencia energética y mejorar el confort acústico de las edificaciones.

Estas propuestas no solo buscan resaltar las cualidades inherentes de la tierra como material de construcción, sino también explorar su aplicación innovadora y su integración con tecnologías modernas y otros materiales constructivos. La investigación en estas áreas podría contribuir significativamente al avance de la construcción sostenible y la reducción del impacto ambiental de las edificaciones.

Referencias bibliográficas

1. Heringer, A., & Lang, A. (2019). Anna Heringer: Handmade Architecture. Hatje Cantz.
2. Rauch, M., & Steiner, S. (2012). Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture. Birkhäuser Architecture.
3. S.Bestraten, E.Hormías, A. Altemir. "Construcción con tierra en el siglo XXI", 2010
4. Vargas, J., & Rincón, L. (2007). Arquitectura en Tierra: Tradición e Innovación. Editorial Gustavo Gili.
5. Minke, G. (2012). Building with Earth: Design and Technology of a Sustainable Architecture. Birkhäuser.
6. Houben, H., & Guillaud, H. (1994). Earth Construction: A Comprehensive Guide. Intermediate Technology Publications.
7. TFG "Superadobe: problemas y soluciones". Arantza Redondo Hernández.
8. TFM "Arquitectura y construcción en Tierra". Fabio Gatti (2012)
9. Normativa CTE
10. PFC "Análisis del ciclo de vida de los materiales de construcción". Ana Ruiz Frutos, 2012
11. E. Antelo, S. Sánchez, C. Crespo y A. Raya. " Construir con tapial: piscina de toro". (2012)

Bibliografía web:

12. <https://www.terra.org/categorias/articulos/construir-con-tierra>
13. https://www.archdaily.com/1011722/what-is-the-difference-between-hand-rammed-earth-and-rammed-earth-with-a-mold?ad_campaign=normal-tag
14. https://www.ceyfor.es/Bloque_Tierra_Comprimida.html
15. <https://ervnaturalbuilding.weebly.com/cob.html>
16. <https://blog.structuralia.com/el-bahareque-el-remoto-sistema-constructivo-que-respeta-el-medio-ambiente>
17. <https://www.archdaily.com/1013235/the-future-beneath-our-feet-soil-cement-bricks-and-the-path-to-sustainable->
18. <https://arquitecturaviva.com/obras/edificio-ricola-krauterzentrum>
19. <https://www.archdaily.cl/cl/985435/casa-impresa-en-3d-y-tecnologia-tecla-mario-cucinella-architects>
20. Norma UNE 41410 (2008). Construcción con tierra: Requisitos de diseño y ejecución para edificios de tierra comprimida. AENOR.
21. <http://www.restapia.es/59515/la-tapia>
22. <https://arquitectura.edraculturaynaturay.com/portfolio-item/casa-de-tapial/>

ANEXO:

Referencias de datos sobre los materiales:

- Tapial estilo tradicional con mortero de cal
WEB:
<https://galicia.asfes.org/wp-content/uploads/2016/09/04-Ficha-Tecnica-Adobe-Tapial.pdf>

- Tapial prefabricado revestido de mortero de cal
WEB:
<https://www.fetdeterra.com/wp-content/uploads/ficha-tecnica-tapialblock-40.pdf>

- Muro de fábrica de ladrillo
WEB:
https://www.ceramicamazarron.com/Docs/Docs_Calidad/LM10_09_FichaTecnica_es.pdf

- Muro de fábrica de ladrillo con trasdós de placa de aislante térmico
WEB:
https://www.ceramicamazarron.com/Docs/Docs_Calidad/LM10_09_FichaTecnica_es.pdf

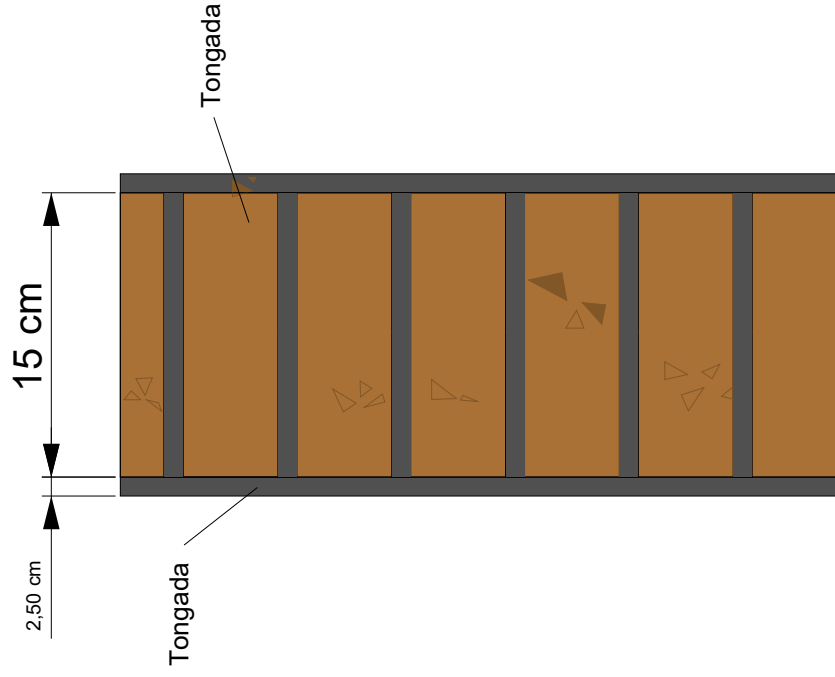
- Muro de fábrica de ladrillo con cámara de aire y tabicón
https://paredesdeladrillo.com/wp-content/uploads/documentos/manual_tecnico_ladrillo_y_bloque_ceramico_hispalyt_sep_2022.pdf

- Muro de BTC con mortero de tierra
WEB:
http://www.bioarkiteco.com/uploads/1/1/3/2/11328176/bioterre_ficha.pdf

Además:

TFG “Comparativa de aislamiento acústico entre construcciones de diferentes épocas” Germán Márquez Lavado, 2014

Tapial estilo tradicional con mortero de cal



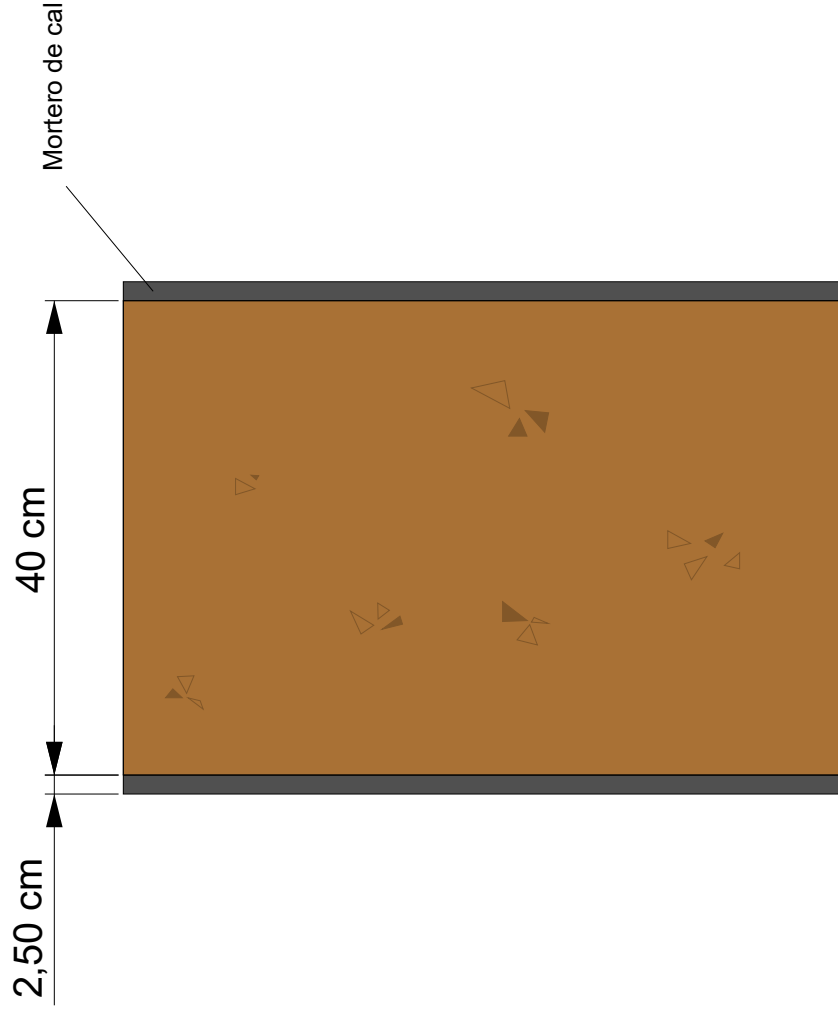
Características de aislamiento	
Densidad	400 kg/m ²
Espesor total	17,5 cm
Aislamiento térmico	Conductividad térmica 0,6 W/mK
Aislamiento ignífugo	Resistencia térmica 1,72 m ² K/W
	Calor específico 0,836 MJ/m ³ K
	Reacción al fuego A1
	Resistencia al fuego REI120
Aislamiento acústico	Aislamiento acústico 58 dBA
	Resistencia a compresión 1,5 N/mm ²

Observaciones:

El tapial tradicional lleva un estucado de cal interior y exterior normalmente añadido durante el apisonado, igual que una capa de cal entre tongadas. Dejar este muro a cara vista, requeriría mucho mantenimiento y no tendría suficiente protección contra el agua o humedad.

Como ya hemos visto, la tierra no tiene problemas con el fuego. En este caso, la diferencia en el aspecto térmico es notable con los muros actuales, puesto que este método precisa de estabilizar la mezcla para lograr mejores resultados y en términos de acústica, logra resultados muy altos para el espesor de muro que estamos estudiando.

Tapial revestido de mortero de cal (Tapialblock 40, FETDETERRA)

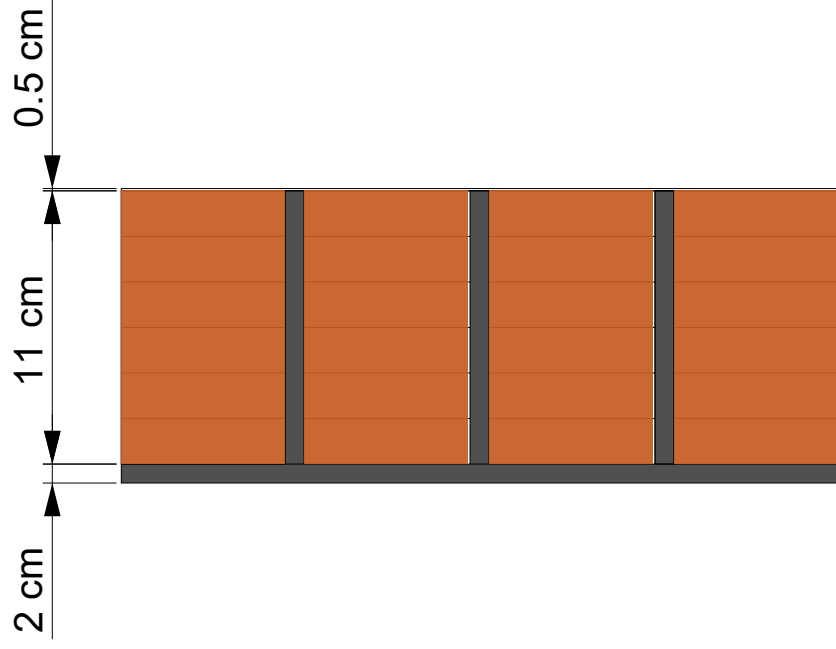


Características de aislamiento	
Densidad	2000 kg/m ²
Espesor total	45 cm
Aislamiento térmico	Conductividad térmica 0,778 W/mK
	Resistencia térmica 0,514 m ² K/W
Aislamiento ignifugo	Calor específico 2,05 MJ/m ³ K
	Reacción al fuego A1
	Resistencia al fuego REI120
Aislamiento acústico	Aislamiento acústico 66 dBA
	Resistencia a compresión 5 N/mm ²

Observaciones:

El tapial prefabricado de Tapialblock40, puede estar revestido por el interior y exterior con madera, estucado de cal, pladur, de la misma manera, dejarlo a cara vista tanto hacia el interior como hacia el exterior. Podemos observar que la tierra no tiene problemas con el fuego. Además logramos unas resistencias térmicas muy similares a las del ladrillo, y en terminos de acústica, logra mejores resultados que el muro de fábrica de ladrillo (1/2 pie) con camara de aire y tabicón.

Muro de fábrica de ladrillo



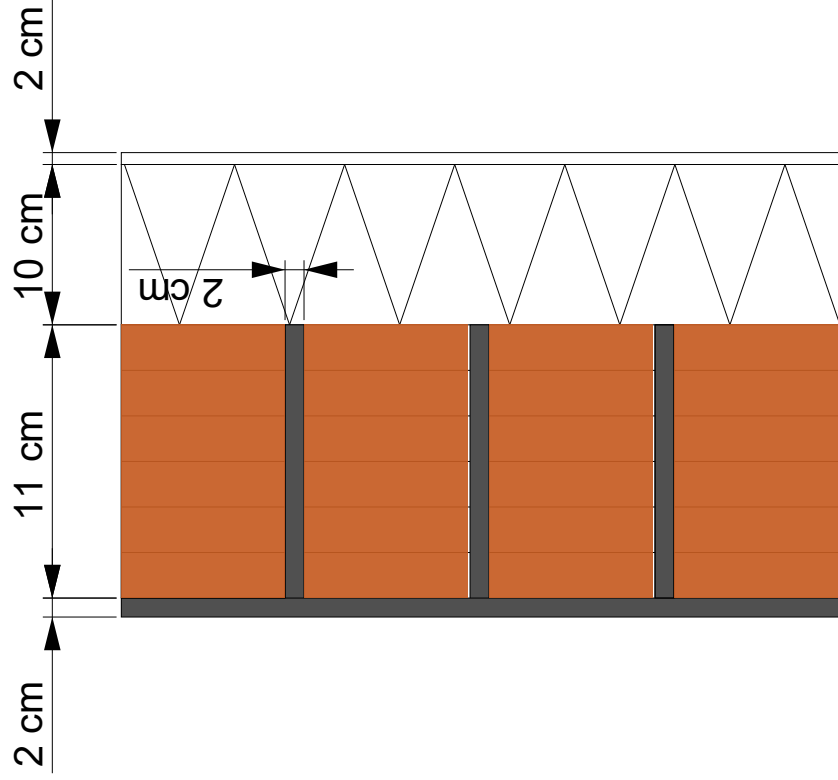
Características de aislamiento	
Densidad	1950 kg/m ²
Espesor total	13,5 cm
Aislamiento térmico	Conductividad térmica 0,35 W/mK
	Resistencia térmica 0,23 m ² K/W
Aislamiento ignifugo	Calor específico -
	Reacción al fuego A1
	Resistencia al fuego F0
Aislamiento acústico	Aislamiento acústico 52 dBA
	Resistencia a compresión 10 N/mm ²

Observaciones:

Se trata de un muro de hoja monolítica. El ladrillo también cuenta con una gran resistencia al fuego, logrando sercalificado como A1. También tiene una gran resistencia de compresión, pudiendo así ser un muro portante.

En términos térmicos, veremos que no logra los mejores resultados pero posteriormente añadiendo aislante, logramos resultados ejemplares.

Muro de fábrica de ladrillo con trasdó de placa de aislamiento térmico

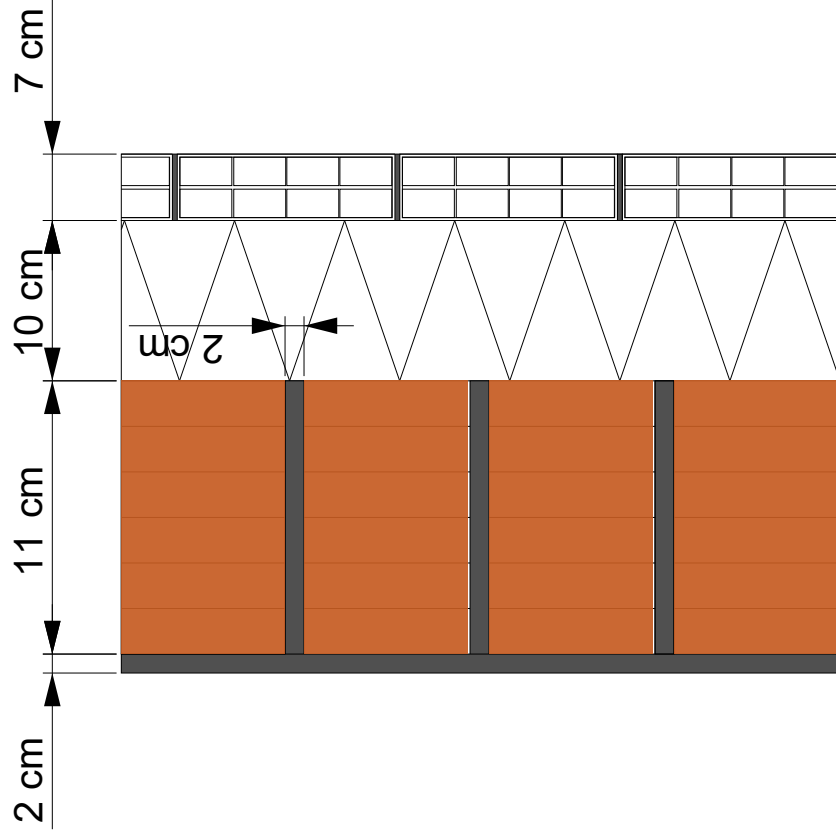


Características de aislamiento	
Densidad	1950 kg/m ²
Espesor total	17,5 cm
Conductividad térmica	0,204 W/mK
Resistencia térmica	1,96 m ² K/W
Calor específico	-
Reacción al fuego	EI-180
Resistencia al fuego	REI120
Aislamiento acústico	61 dBA
Resistencia a compresión	10 N/mm ²

Observaciones:

Mediante la aplicación del trasdós de material aislante, mejoramos las propiedades aislantes del muro.

Muro de fábrica de ladrillo con cámara de aire y tabicón

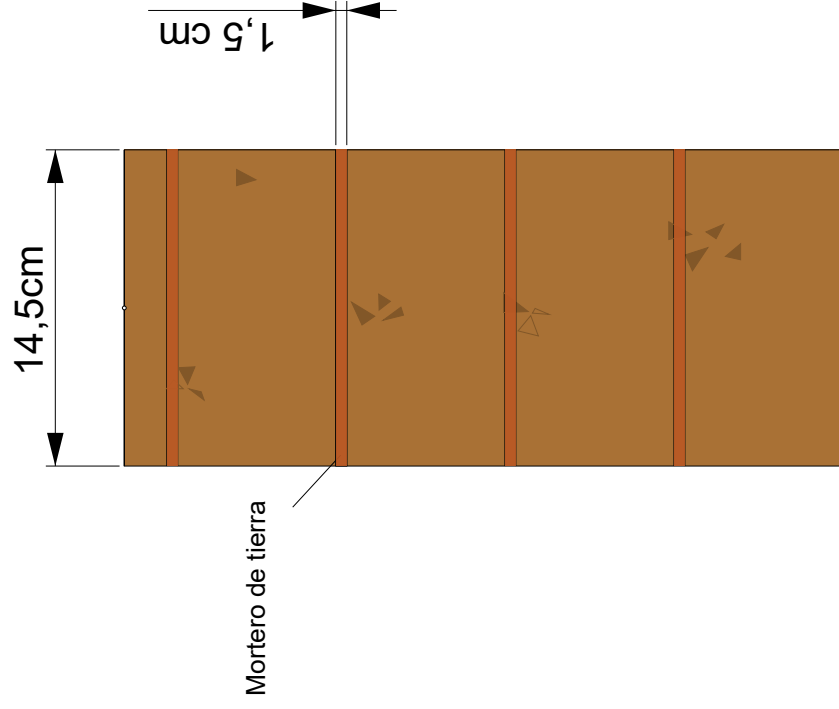


Características de aislamiento	
Densidad	1950 kg/m ²
Esesor total	30 cm
Aislamiento térmico	Conductividad térmica 0,204 W/mK
	Resistencia térmica 1,85 m ² K/W
Aislamiento ignifugo	Calor específico -
	Reacción al fuego -
	Resistencia al fuego EI-240
Aislamiento acústico	Aislamiento acústico 64 dBA
	Resistencia a compresión 10 N/mm ²

Observaciones:

Con la ayuda del tabicón, conseguimos unas mejores propiedades de aislamiento, pero también creamos un muro de espesor elevado.

BTC con mortero de tierra



Características de aislamiento	
Densidad	1800 kg/m ²
Espesor total	14,5 cm
Aislamiento térmico	Conductividad térmica 0,5 W/mK
	Resistencia térmica 1,96 m ² K/W
Aislamiento ignifugo	Calor específico -
	Reacción al fuego -
	Resistencia al fuego M0
Aislamiento acústico	Aislamiento acústico 52 dBA
	Resistencia a compresión 7 N/mm ²

Observaciones:

En el muro de BTC encontramos muy buenos resultados de aislamiento, logrando igualar casi el muro de fabrica de ladrillo (1/2 pie) con camara de aire y tabicón, perdiendo un poco en terminos acústicos, mejorable añadiendo revestimiento a los bloques. En términos de compresión, tam, bien responde adecuadamente, pudiendo crear muro portantes de edificaciones de alturas limitadas. También cuenta con una gran resistencia al fuego, al ser tierra.