



Universidad
Zaragoza

Trabajo Fin de Grado

Análisis del sistema constructivo tapia dentro
del marco normativo del Código Técnico de la
Edificación

Analysis of the rammed earth construction
system within the Spanish Building Code (CTE)
framework

Autor/es

Ricardo Martínez Melendo

Director/es

Almudena Espinosa Fernández

Grado en Estudios en Arquitectura
Escuela de Ingeniería y Arquitectura (EINA)
2025



DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y ORIGINALIDAD

(Este documento debe remitirse a seceina@unizar.es dentro del plazo de depósito)

D./D^a.

,
en aplicación de lo dispuesto en el art. 14 (Derechos de autor) del Acuerdo de
11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se
aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,
Declaro que el presente Trabajo de Fin de Estudios de la titulación de
(Título del Trabajo)

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser
citada debidamente.

Zaragoza,

Fdo:

Resumen

En las últimas décadas, la demanda por reducir el impacto ambiental de la construcción ha despertado el interés de muchos profesionales a nivel internacional por recuperar técnicas y materiales de construcción que parecían propias del pasado. Este es el caso de la construcción con tierra cruda, que quedó prácticamente olvidada tras la modernización del sector de la edificación durante el siglo XX y que, por sus propiedades y su conexión con la naturaleza, está siendo implementada lentamente en el panorama arquitectónico actual. A la dificultad de recuperar este tipo de construcciones del olvido, se suman las exigencias normativas actuales, que en la mayor parte de los casos son redactadas desde el punto de vista de la construcción convencional.

En el desarrollo de este Trabajo de Fin de Grado se evaluará el comportamiento de las construcciones actuales realizadas en tapia en los aspectos relativos a las exigencias energéticas y de salubridad del Código Técnico de la Edificación. Con este objetivo, se desarrollará la técnica de la tapia o tapial y sus variantes, se explicarán los referentes normativos de interés para este método constructivo tanto en España como a nivel internacional y se explorarán las incorporaciones de la técnica a la arquitectura normativa actual.

Palabras clave: tapia, tapial, arquitectura en tierra, sostenibilidad, Código Técnico de la Edificación, masa térmica, técnica constructiva

Contenidos

| | | |
|-------|--|----|
| I. | Motivación, objetivos y metodología..... | 5 |
| | A. Motivación personal..... | 5 |
| | B. Objetivos del trabajo..... | 6 |
| | C. Metodología..... | 7 |
| II. | Introducción..... | 9 |
| III. | Antecedentes y contexto de la construcción con tapias..... | 11 |
| | A. Definición y conocimientos del sistema constructivo..... | 11 |
| | B. Incorporación de los sistemas tradicionales a la arquitectura normativa..... | 17 |
| | C. Evolución en el tiempo del CTE..... | 19 |
| | D. Documentos técnicos, certificados... que validan el tapial a su aplicación..... | 20 |
| IV. | Análisis normativo de la tapia: Energía y estanqueidad..... | 25 |
| | A. Parámetros de análisis en base a las exigencias básicas del CTE..... | 25 |
| | a. Documento Básico de Ahorro de Energía (DB-HE)..... | 25 |
| | b. Documento Básico de Salubridad (DB-HS)..... | 30 |
| | B. Análisis cualitativo y cuantitativo..... | 33 |
| | a. Selección de los casos de estudio..... | 33 |
| | b. Análisis de los casos en base al DB-HE..... | 45 |
| | c. Análisis de los casos en base al DB-HS..... | 53 |
| V. | Conclusiones..... | 63 |
| VI. | Bibliografía..... | 65 |
| VII. | Referencias de las figuras..... | 68 |
| Anexo | Datos de los materiales y cálculos..... | 71 |

I. Motivación, objetivos y metodología

I.A. Motivación personal

A la hora de elegir un tema sobre el que poder investigar, he tenido claro desde el principio de mis estudios dos aspectos fundamentales que quería que este tuviera. Quería conocer más sobre las técnicas de construcción tradicional, así como la arquitectura bioclimática. Dos conceptos que parecen distantes, uno suena ligado al pasado y otro al futuro, pero que tienen bastante relación.

Es muy común entre quienes vivimos en la ciudad el pensar en la *casa del pueblo* como un lugar en el que es fácil refugiarse cuando el clima es más adverso. Esos muros que ayudan a mantener el calor en invierno y el frío en verano en el interior de la casa de mis abuelos siempre me han llamado la atención. ¿Cómo puede ser, si desde fuera parecen muros normales? La respuesta que siempre he oído: están hechos de adoba (palabra aragonesa para el adobe). Esa "humilde adoba que cubre contra el tiempo la sombra del hogar", en palabras de José Antonio Labordeta que siempre he conocido, no es otra que bloques de barro y paja secados al sol. Es por esto que conceptos como el aislamiento y la masa térmica, así como la arquitectura vernácula, me han sido familiares y me han fascinado desde antes de comenzar a estudiarlos. Conocer el comportamiento de la tierra cruda y sus propiedades más a fondo ha sido una de las motivaciones principales del trabajo.

Ya en años más recientes, al empezar la carrera de arquitectura despertó mi interés la importancia de construir pensando en el entorno, importancia que viene ligada al conocimiento desarrollado durante milenios, aunque en ocasiones parezca olvidada. Una forma de construir que es consciente del paisaje del que se rodea y que, desde el respeto, se aprovecha de él y a él vuelve al final de su vida. En muchos casos he podido leer sobre esta forma de construir, y no es poca la cantidad de estudios y profesionales que intentan recuperar técnicas tradicionales de construcción por estos mismos motivos. El uso de materiales como la piedra y la madera, y en particular la tierra, la paja y la cal, resultan poco convencionales frente al acero y el hormigón, pero son el foco de investigación de esta arquitectura ligada al entorno por su bajo impacto ambiental y sus cualidades. Investigando sobre este tipo de construcciones fue como descubrí las nuevas adaptaciones de la técnica del tapial que se están realizando, y las capacidades y posibilidades que tienen esos expresivos muros de tierra.

Porque no pienso que la construcción tradicional deba ser cosa del pasado, no quería limitar el trabajo a un inventario de edificios o un análisis sin contexto. Considero que, en el marco normativo en el que se encuentra el sector de la edificación en España, era conveniente realizar este análisis desde el punto de vista de una obra actual. Conocer las ventajas de ahorro energético de este material, su respuesta al calor y la humedad, así como el modo de preservar sus cualidades, son los aspectos técnicos que quiero abordar en el desarrollo del trabajo.

I.B. Objetivos del trabajo

Los objetivos principales para abordar en la elaboración del trabajo se pueden resumir en los siguientes puntos:

1. Conocer en profundidad la técnica de construcción de la tapia y las variantes presentes en España. Las zonas que cuentan con presencia de construcciones de tapia pueden arrojar una idea sobre los criterios que se tienen en cuenta a la hora de elegir este método constructivo.
2. Observar cómo se adapta la técnica a la construcción contemporánea mediante la incorporación de nuevos materiales o herramientas.
3. Investigar sobre el soporte normativo de la construcción con tierra tanto en España como a nivel internacional.
4. Saber qué exigencias técnicas ha de superar el material en el marco normativo del Código Técnico de la Edificación, especialmente en materia de comportamiento higrotérmico y de respuesta ante la humedad.
5. Conocer las propiedades del material, revisando los estudios realizados por diversos autores y los datos disponibles.
6. Analizar en profundidad construcciones contemporáneas que emplean la técnica de la tapia de forma distinta. Conocer la cantidad de obras de tapial que se han ejecutado en los últimos años en España.

I.C. Metodología

Para la elaboración del trabajo, el primer paso es conocer en profundidad el sistema constructivo de la tapia y sus variantes en la geografía española. Para ello me sirvo de libros, documentales y artículos que expliquen en detalle el proceso constructivo y la historia del tapial en un contexto tradicional.

A continuación, es importante conocer el estado de la normativa relativa al tapial tanto en contexto español como internacional, así como los estudios realizados en torno a la tierra comprimida. Ante la falta de soporte normativo para el método constructivo de la tapia en España, es importante conocer sobre sistemas similares que tengan una mayor documentación, como los Bloques de Tierra Comprimida (BTC). También es necesaria ver los documentos elaborados en otros países que hablan del tapial en clave técnica, teniendo en cuenta las exigencias de la industria de la edificación actual.

Para conocer los criterios a seguir a la hora de analizar las construcciones, se investiga sobre la evolución del Código Técnico de la Edificación a lo largo de los años, así como sobre la deriva que tendrá en el futuro. Se estudia más a fondo las exigencias del CTE en lo relativo a los sistemas tradicionales de construcción y, en particular, aquellas que sean de interés para las construcciones de tapia.

Se recopilan todas las obras que se encuentren realizadas en tapia desde la entrada en vigor del Código Técnico, para posteriormente realizar una selección de los que serán los casos de estudio. Se tendrán en cuenta las condiciones de su ubicación, zonas climáticas y composición de los muros a la hora de realizar la selección.

De los casos de estudio elegidos, se describen en lo relativo a los parámetros del Código Técnico de la Edificación y se realiza el análisis correspondiente.

Con los resultados obtenidos y conociendo el comportamiento de los diferentes casos analizados, se extraen las conclusiones de todo el proceso.

II. Introducción

El interés por la construcción de tierra puede renacer, pues la crisis de la energía ha impuesto una nueva crítica de la actual construcción, consumo (Alvarez Alonso et al., 1984) e impacto ambiental.

En los últimos años se está produciendo un repunte de arquitectura resuelta con tierra y se espera que haya un aumento de las contribuciones científicas sobre esta tipología constructiva, sobre todo si tenemos en cuenta su relación con otros aspectos de creciente interés para la arquitectura contemporánea, como los problemas de la sostenibilidad en la construcción, el respeto al medio ambiente y el ahorro energético, así como las experiencias en el campo de la autoconstrucción y de la cooperación al desarrollo (Maldonado y Vela-Cossío, 2011).

En España, la construcción con tapia en todas sus variantes se ha desarrollado a lo largo de la historia tanto en la arquitectura monumental como en la tradicional y vernácula hasta que, a principios del siglo pasado, entró progresivamente en declive, llegando prácticamente a desaparecer. Este fenómeno puede atribuirse principalmente al desarrollo industrial y a la introducción de nuevos materiales de construcción que fueron sustituyendo los sistemas constructivos tradicionales de tierra, por considerarlos de peores prestaciones técnicas y, en definitiva, obsoletos. (Mileto et al., 2018).

Concluida la Guerra Civil Española (1936-1939), el país debió afrontar una durísima etapa de reconstrucción. Con una Europa en guerra hasta 1945 y sumida después en un duro aislamiento hasta bien entrados los años cincuenta, en la España de la posguerra los arquitectos no disponen de los materiales que habían hecho posible el desarrollo de la arquitectura moderna. La escasez de hierro, acero y cemento obligan a volver la vista sobre los sistemas y técnicas de construcción tradicionales, desarrollándose así numerosas experiencias de autoconstrucción mediante el empleo de las viejas y eficaces técnicas de construcción con tierra (adobe, tapial) o ladrillo (bóvedas tabicadas) (Maldonado y Vela-Cossío, 2011).

La construcción con tierra desapareció casi por completo en nuestro país a mediados del siglo XX (Font e Hidalgo, 2011). La tapia, coincidiendo con la irrupción de materiales industrializados y las facilidades para el transporte de mercancías, fue perdiendo oportunidades de aplicación.

En Europa, tras la crisis energética de finales de los años setenta del pasado siglo, la tierra como material de construcción despierta el interés de un sector de la población y se inicia, tímidamente al principio, el rescate de materiales y antiguas técnicas constructivas que pudieran suponer una alternativa viable al encarecido y depredador proceso edificatorio imperante (Font e Hidalgo, 2011). A principios de los años ochenta surgieron iniciativas edificatorias e investigaciones en torno a la utilización de la tierra cruda para la consecución de los nuevos desafíos de la construcción sostenible. "Muchos arquitectos y distintos agentes vinculados al sector de la construcción y la investigación rescataron materiales y antiguas técnicas constructivas, en un intento de conciliar las exigencias de la edificación actual con los parámetros de la arquitectura bioclimática." (Font e Hidalgo, 2011).

En España, a mediados de los años ochenta del siglo pasado, comienza a renacer el interés por este humilde material (Font e Hidalgo, 2011). Actualmente, se ha afianzado con determinación esta decisión técnico-constructiva y en los últimos 20 años han proliferado viviendas y todo tipo de edificaciones construidas a base de tierra.

En muchos países se multiplicaron, a finales de los años setenta del siglo pasado, las experiencias de rehabilitación y restauración en edificaciones de tierra cruda; se han producido intervenciones

muy destacables en grandes conjuntos monumentales de Asia, de África o de América del Sur (Maldonado y Vela-Cossío, 2011). Algunos arquitectos innovadores han conseguido conciliar las exigencias funcionales y estéticas de los edificios de viviendas, con los parámetros de la arquitectura bioclimática, proyectando y construyendo importantes modernizaciones de la técnica de la tapia.

La técnica del tapial, en cualquiera de sus múltiples variantes para la construcción de muros monolíticos o mixtos, los diferentes sistemas de construcción basados en el adobe como material estructural de fábrica o como plemento de entramados de estructura de madera y los morteros de barro o mejorados con cal o yeso para su uso en mamposterías o para revestimientos, constituyen los principales grupos de técnicas y sistemas que emplean la tierra como principal material de construcción (Maldonado y Vela-Cossío, 2011).

El desarrollo en la última década de las normativas que regulan actualmente la construcción, en muchos casos no ha incluido las técnicas de la tierra (Bestraten et al., 2011). Algunos países han desarrollado normativas específicas, especialmente en aquellos lugares donde la tradición o la autoconstrucción ha derivado en un uso habitual de este material, no siendo el caso de España. El Código Técnico de la Edificación (CTE) es el marco normativo, en España, que establece las exigencias básicas de calidad que deben cumplir los edificios en lo relativo a seguridad y habitabilidad. Se trata de un documento de prestaciones, es decir, impone unos objetivos, pero deja libertad de medios para su consecución (Bestraten et al., 2011). Frente a la "comodidad" de justificar un sistema constructivo según una serie de documentos básicos, se permite la libertad de justificar soluciones alternativas. Esta característica del CTE permite el cumplimiento de las exigencias normativas a las muchas soluciones constructivas basadas en tierra compacta.

De todos los materiales, la tierra, al ser abundante, económica y relativamente fácil de poner en obra (en autoconstrucción) será la más utilizada. Por el contrario, tiene como inconveniente una gran sensibilidad al agua y perder en presencia de ésta todas las propiedades mecánicas (Alvarez Alonso et al., 1984). Con la industrialización de los materiales de tierra se mejoran las características naturales del material y se garantizan unas calidades óptimas para su empleo y puesta en obra, reduciendo los tiempos de ejecución. En los últimos años se ha desarrollado la prefabricación del tapial y la introducción en taller de sistemas de instalaciones dentro de los muros (Bestraten et al., 2011) asegurando la estabilización y protección frente a la humedad.

III. Antecedentes y contexto de la construcción con tapias

III.A. Definición y conocimientos del sistema constructivo

El uso de la tierra en la construcción ha sido una constante en gran parte del mundo durante milenios, bien sin añadidos o acompañada de otros materiales como la paja. Este segundo caso es el más conocido popularmente, formando bloques o ladrillos sin cocer (adobe), de los que está documentado su empleo desde, como mínimo, el milenio VII a.C. en la antigua ciudad de Çatalhöyük, en la actual Turquía. "Su utilización se remonta en la historia de la Humanidad al año 6000 a. C, aportando una tecnología a la vez popular y sabia" (Alvarez Alonso et al., 1984). Existen restos de una antigüedad equivalente de construcciones con tierra cruda prensada en asentamientos neolíticos de Mesopotamia, así como en yacimientos del valle del río Amarillo. Estos últimos casos pueden servir como base para hablar del origen de la técnica del tapial, si bien es difícil conocer cuándo se desarrolló el método que se conoce actualmente. Típicamente se denomina tapia al conjunto de materiales que forman un muro monolítico mediante su compactación en un encofrado y tapial a los encofrados utilizados en la construcción, así como a la técnica empleada, aunque ambos términos son afines y también existen variantes geográficas. Para englobar, se puede definir la técnica del tapial como la "compactación de tierra mediante su apisonado de forma manual", utilizando un "encofrado desmontable de madera" (Maldonado, L.; Vela Cossío, F.; Hoz, J., 2003).

Como es común en las técnicas vernáculas, el desarrollo de una obra de tapia presenta diferencias según su ubicación, adaptándose en cada caso a las condiciones del entorno: materiales disponibles, tipo de suelo, fuerza de los agentes atmosféricos, etc. En algunos casos, para dotar a

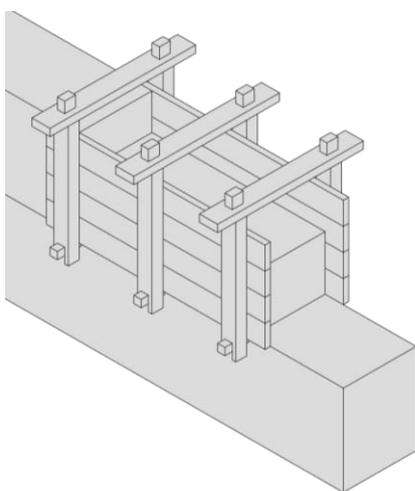


Fig. 1: Esquema de encofrado. Elaboración propia



Fig. 2: Torre Bofilla (Valencia) levantada con tapia en su parte superior - Mileto, C. y Vegas, F. (2009)

la construcción de una mayor resistencia y capacidad para soportar las inclemencias del tiempo, es habitual que los muros de tapia se levanten calicostrados, esto es, con un revestimiento de cal en una o ambas caras. Se diferencia de un encofrado común a que éste se realiza contra el encofrado, al mismo tiempo que se disponen las tongadas de tierra, resultando en una sección con una sucesión de cuñas de cal trabadas con el material principal del muro en cada una de sus hiladas. Se puede encontrar esta misma técnica utilizando yeso en lugar de cal en lugares en que este material es abundante, como es el caso de Aragón.

Algunas de las variaciones de la técnica le confieren un aspecto totalmente distinto al muro común de tierra prensada, introduciendo otros materiales que llegan a constituir una gran parte del volumen de la sección. Particularmente, la colocación de piedras y ladrillos en el tapial, en ocasiones imperceptible desde el exterior una vez el muro está finalizado, es en otros casos el aspecto destacable de la construcción.

El estudio realizado por Mileto y Vegas López-Manzanares (2014) describe la diversidad de tipologías de construcciones realizadas en tapial, en función de los materiales que componen la tapia y los revestimientos

adheridos. Este trabajo clasifica las tipologías, que se agrupan en conjuntos de características comunes notables, dando como resultado las tapias simples, tapias suplementadas en sus paramentos, tapias con suplementos en las juntas y tapias mixtas.

Se denomina tapias simples al conjunto de construcciones en tapial realizadas con una materialidad variable en su masa según el tipo, pero sin revestimientos exteriores y/o interiores adheridos. En este conjunto se encuentran los siguientes tipos:

- Tapia simple de tierra. Esta es la construcción básica, empleando solamente tierra comprimida entre los encofrados.
- Tapia real. Es similar a la tapia simple de tierra, pero añadiendo cal como aditivo mezclado con la masa de tierra.
- Tapia real con mampuestos. Tapia real rellena con mampuestos en el interior con el objetivo de mejorar su resistencia a la vez que se ahorra en cal.
- Tapia real trabada con madera. Un ejemplo de tapia real reforzado con madera en sus esquinas, arriostrando los muros. También se puede encontrar este sistema de arriostrado en tapia real con mampuestos.
- Tapia de hormigón de cal. Cuando la cantidad de cal empleada en una tapia real es mayor a $\frac{1}{4}$ de la cantidad total de material, pasa a desempeñar el papel principal aglutinante del muro, obteniendo la denominación de hormigón de cal. También puede incorporar mampuestos de relleno.
- Tapia de yeso. La sustitución de la cal por yeso en todas las tipologías mencionadas es habitual en zonas donde este material es abundante.
- Mampostería encofrada. Este tipo de construcción relega la tierra a un segundo plano, empleando mampuestos como elemento principal. Los huecos entre estos se rellenan con tierra y cal formando un mortero, aprovechando su fraguado y no apisonado.

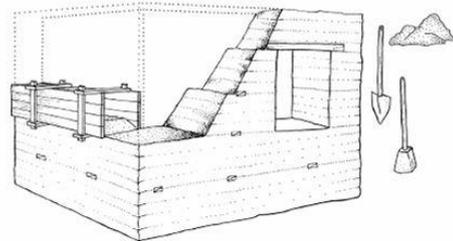


Fig. 3: Esquema de la ejecución de tapia simple de tierra - Mileto, C. y Vegas, F. (2014)

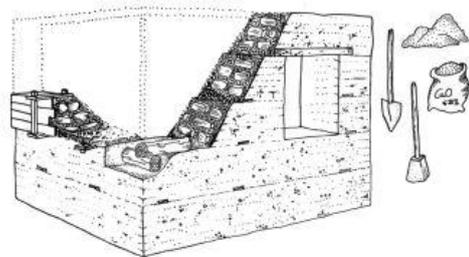


Fig. 4: Esquema de la ejecución de tapia real con mampuestos trabada con madera - Mileto, C. y Vegas, F. (2014)

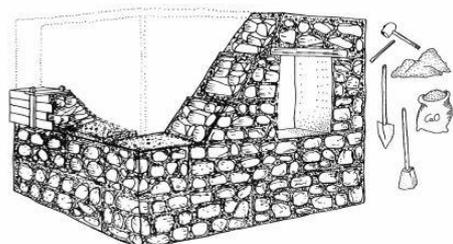


Fig. 5: Esquema de la ejecución de mampostería encofrada - Mileto, C. y Vegas, F. (2014)

El conjunto de tapias suplementadas en sus paramentos engloba los muros realizados en tapial que, al desencofrarse, ya cuentan con un revestimiento en una o ambas caras. Algunos de los tipos que recoge esta categoría son:

- Tapia calicostrada con cuñas. Se construye extendiendo en cada tongada una capa de mortero de cal contra el tapial, previo al apisonado. Esta capa se une con las que se van realizando en cada tongada, resultando en una sección con una sucesión de cuñas de cal entre la tierra. Esta misma técnica se observa también realizada con yeso. Ambas variantes pueden incluir una tongada interior de mortero completa, cuando este revestimiento se aplica a ambas caras y atraviesa toda la sección del muro.
- Tapia valenciana. Tipología consistente en tapia calicostrada a la que se le incorporan ladrillos en el interior colocados contra el encofrado. Al igual que en el caso anterior, el mortero de cal puede ir en una o ambas caras, atravesando toda la sección del muro por tongadas o limitándose al revestimiento.
- Tapia careada de piedra. Esta variación de la tapia valenciana está realizada con mampuestos en lugar de ladrillos. En muchos casos se realiza con cal en la masa del muro en lugar de calicostrada.

Cuando los suplementos al muro de tapia se realizan como una unidad dentro del encofrado, entre las hiladas de tapia, se denomina tapia con suplementos en sus juntas. Este conjunto tiene las variantes principales siguientes:

- Tapia con juntas reforzadas. Utilizando yeso o cal, esta tipología incorpora un enlucido en cada módulo o bloque de tapia realizado, resultando en un muro de tapia con llagas y tendeles del material conglomerante correspondiente.
- Tapia con brencas. Cuando este refuerzo se realiza sólo en los tendeles, se denomina tapia con brencas de yeso o cal.
- Tapia con rafas. Las esquinas y huecos de los muros se refuerzan con pequeños pilares de yeso, colocados en cada hilada. Esta técnica se



Fig. 6: Sección de muro de tapia calicostrada. *La tapia en España. Técnicas actuales y ejemplos*– Hidalgo, P. y Font, F. (2011)

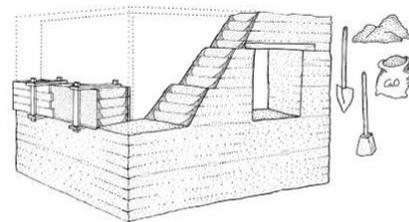


Fig. 7: Esquema de la ejecución de tapia calicostrada - Mileto, C. y Vegas, F. (2014)

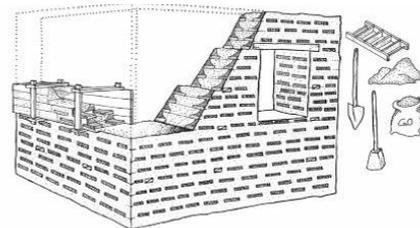


Fig. 8: Esquema de la ejecución de tapia valenciana – Mileto, C. y Vegas, F. (2014)



Fig. 9: Tapia con juntas de yeso – Mileto, C. y Vegas, F. (2014)

puede combinar con las dos anteriores, además de presentar un careado de piedra.

- Tapia con rafas acampanadas de ladrillo. Los mismos refuerzos anteriores realizados en ladrillo, disminuyendo la cantidad de ladrillos empleados conforme aumenta la altura de la hilada, dándoles un aspecto de campana en el exterior.
- Tapia con verdugadas de ladrillo. La tapia con rafas se puede acompañar de hiladas de ladrillo cosiendo todo el muro antes de cada tramo de tierra, denominadas verdugadas. Estas verdugadas pueden aparecer como único elemento de ladrillo del muro, sin la aparición de rafas. También es posible encontrar verdugadas de tablas de madera o adobe.
- Tapia con machones. El muro de tierra puede utilizar como base y refuerzo pilares de otro material, siendo común el adobe o ladrillo. Pueden encontrarse sólo en las esquinas así como en esquinas y partes intermedias del muro, acompañados de verdugadas o no.



Fig. 10: Tapia con brecas en el cementerio de Torrebaja – Mileto, C. y Vegas, F. (2005)

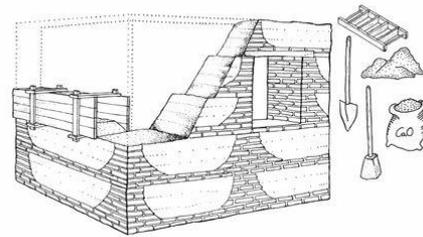


Fig. 11: Esquema de la ejecución de tapia con rafas acampanadas y verdugadas de ladrillo – Mileto, C. y Vegas, F. (2014)

En el caso de que existan partes del muro realizadas sin el empleo del encofrado o tapial, la tipología entrará en la clasificación de tapia mixta. La parte de la construcción sin encofrar se realizará primero y servirá como guía para la posterior colocación de los tablones del tapial. Al igual que en casos anteriores, el material complementario podrá ser ladrillo o piedra, y el material a colocar en el encofrado será tierra, pudiendo incorporar cal, piedra o ladrillos.

Existen diversos procedimientos a seguir en cuanto a los huecos en muro se refiere, siendo la forma tradicional más habitual el refuerzo del dintel con vigas de madera y, si el edificio cuenta con refuerzos en piedra o ladrillo, pueden colocarse estos también en las jambas de puertas y ventanas. Tradicionalmente, una vez finalizada la altura completa que habrá de tener el muro, se realiza la estructura de la cubierta en madera, rellenando los huecos resultantes del encuentro de la tapia con las vigas con bloques, que pueden ser de adobe obtenido de la misma tierra que el muro. No obstante, en muchos casos, las uniones entre bloques o con la madera se realizan con barro o mortero de cal, siendo la tierra una vez más el material principal.

De las variedades de la técnica mencionadas anteriormente, la que resulta de mayor interés para el desarrollo del trabajo es la tapia simple de tierra. En la construcción tradicional, lo habitual es comenzar preparando la superficie de suelo sobre la que se va a edificar. "Es posible mejorar las características de un suelo por simple compactación. Una gran energía de compactación disminuye la cantidad de agua y trae consigo una mayor densidad seca y una resistencia mecánica más alta; aumenta el contacto entre las partículas y disminuye la macroporosidad del material" (Alvarez Alonso et al., 1984). Una vez se tiene la superficie a edificar regularizada y horizontal, se puede preparar una base de anchura similar al muro para protegerlo de la humedad, realizada comúnmente en piedra o ladrillo, sobre la que se comenzará a levantar la tapia. Una vez preparada la base, se dispone el encofrado de madera y se vierte la tierra en su interior. Se humedece según

se va agregando material por capas, cuya altura oscila en torno a los 10 centímetros, y se compacta manualmente con un pisón, que tradicionalmente es un bloque de madera con mango. Lo más frecuente es levantar los muros por módulos, esto es, encofrados que no cubren todo el perímetro del edificio, sino que se van desplazando horizontalmente conforme se completa una sección de la tongada. "El muro se construye merced a la repetición modular en horizontal y en vertical de tapias con alturas que oscilan entre 60 y 90 cm" (Mileto et al., 2011). El módulo recién levantado irá perdiendo la humedad lentamente, aumentando su resistencia. Antes de continuar con la tongada siguiente, en algunos casos se coloca una hilada de piedra o bloques de otro material para que sirva de base, contribuyendo además a frenar la afección por erosión del agua en la cara exterior del paramento. De la retirada de los travesaños del encofrado de madera, quedarán en la construcción unos huecos que atraviesan la sección completa del muro, que habrán de ser rellenados si se quiere aislar completamente el interior. No obstante, es común ver estos huecos abiertos en tapias exteriores o en construcciones cuyo interior no está destinado a un uso permanente o no necesita de confort térmico.

Estudiando la distribución geográfica tradicional de esta técnica podemos empezar a comprender qué motivaba la utilización de este sistema constructivo frente a otros más canónicos.

Se encuentran ejemplos de construcciones de tapia en gran parte de la Península Ibérica, tanto en arquitectura popular como en monumentos. Analizando la distribución de obras de tapial en la península, se puede observar la ausencia de este tipo de construcciones en zonas de costa, así como en cordilleras del interior. No sorprende el parecido de este mapa con el negativo de las zonas de mayor humedad o cantidad de precipitación, dada la tendencia a la erosión de la tapia, si bien también puede haber zonas en que este tipo de construcciones se ven relegadas a un segundo plano en favor de otros materiales más resistentes presentes en la zona, especialmente en lugares en que la acción de los elementos climáticos es más agresiva.

Los estudios realizados sobre el comportamiento de la tapia ante los agentes climáticos demuestran la importancia de evitar la exposición al agua, además de destacar su buen comportamiento térmico. "En general,



Fig. 12: Montaje del encofrado de un módulo – Cutillas, J. L. (2003)



Fig. 13: Empleo del pisón – Monesma, E. (1993)



Fig. 14: Extracción de los travesaños tras el desencofrado de un módulo. Tapia con rafas y verdugadas de piedra – Monesma, E. (1993)



Fig. 15: Presencia de la tapia en la Península Ibérica. *La restauración de la tapia en la Península Ibérica* – Mileto, C. y Vegas, F. (2014)

las construcciones en tierra sólo trabajan bien a compresión, y se necesita una buena distribución de cargas si existen varios niveles; poseen una gran inercia térmica; su precio es reducido y, en numerosos casos, aportan un mejor aislamiento que los bloques de hormigón. Es fundamental realizar una perfecta hermeticidad de revoques, techos y cimientos por su importante sensibilidad al agua." (Alvarez Alonso et al., 1984)

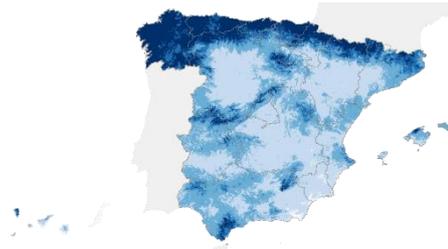


Fig. 16: Intensidad de la precipitación media anual (periodo 1980-2006) – Guallart, C. (Imagen adaptada)

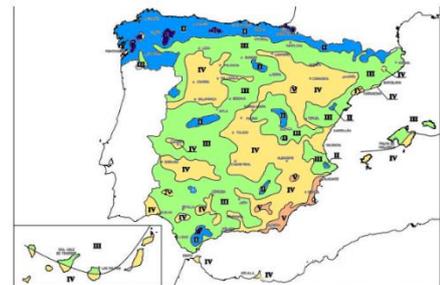


Figura 2.4 Zonas pluviométricas de promedios en función del índice pluviométrico anual
 Fig. 17: Zonas pluviométricas del CTE – CTE DB-HS 2.3.1 (Imagen adaptada)

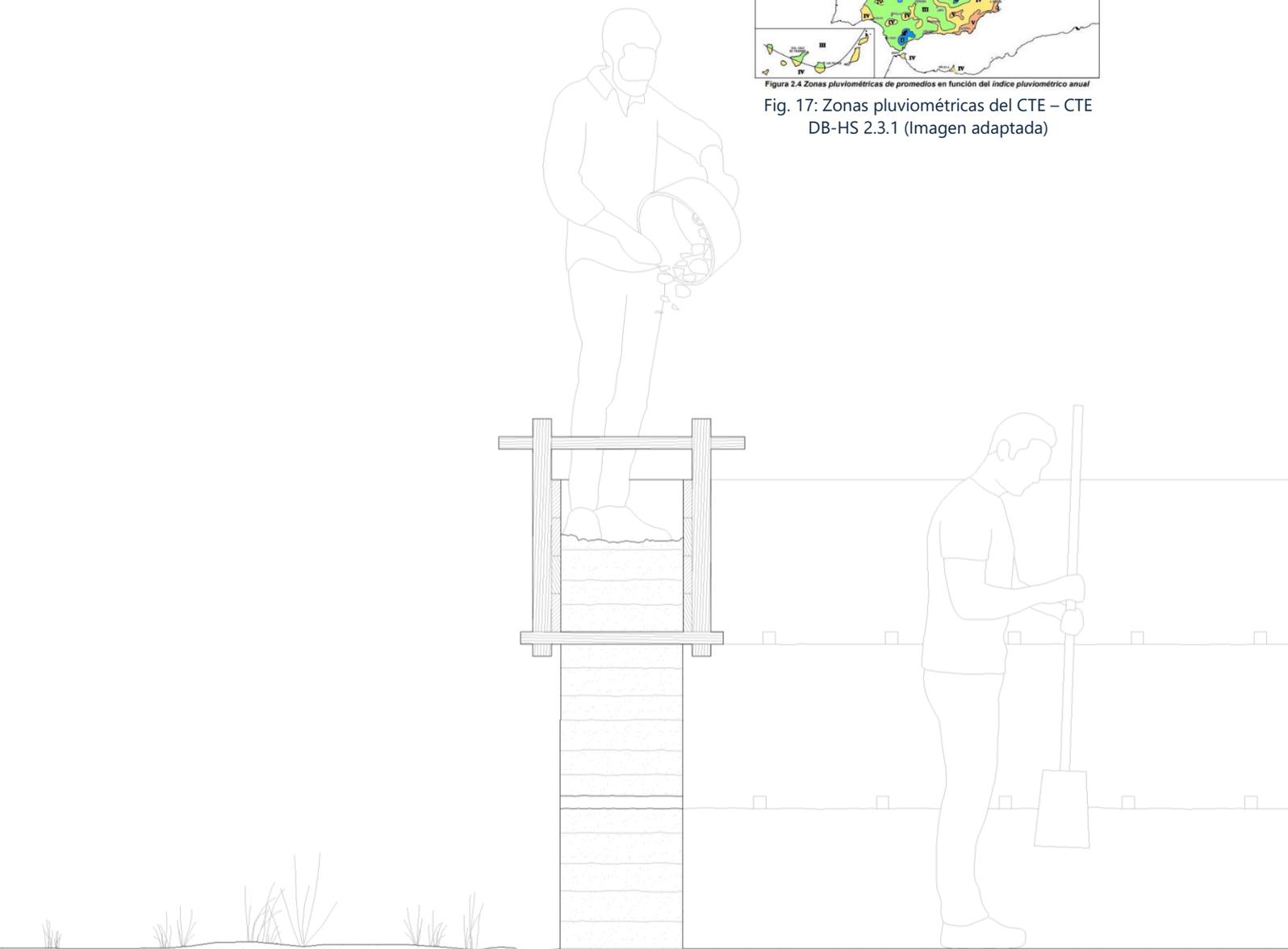


Fig. 18: Sección del proceso de construcción de un muro de tapia. Elaboración propia

III.B. Incorporación de los sistemas tradicionales a la arquitectura normativa

El interés por recuperar técnicas de construcción vernáculas, bien sea por su bajo impacto ambiental o por su integración en el entorno, se ha visto reflejado en las últimas décadas en las edificaciones realizadas con tapial. Si bien las exigencias normativas suponen un reto para este tipo de construcciones, la posibilidad de incorporar nuevos materiales y herramientas facilita la implementación de la técnica a la arquitectura contemporánea. "Los encofrados de la industria del hormigón han representado una importante mejora para la ejecución de las tapias de tierra compactada, pero estos han tenido que adaptarse ya que deben poder soportar empujes de compactación" (Bestraten et al., 2011)

Uno de los primeros esfuerzos por recuperar el método constructivo del tapial fue provocado por la crisis de la energía de finales de la década de 1970 que, si bien no fue motivado por su bajo impacto ambiental, sí se destacaba el bajo consumo energético de la ejecución de este tipo de obras. "El interés por la construcción de tierra puede renacer, pues la crisis de la energía ha impuesto una nueva crítica de nuestra construcción y consumo, debiendo recurrir a los materiales que necesiten para su elaboración la menor energía posible." (Alvarez Alonso et al., 1984)

A destacar entre este resurgimiento de interés por la tapia es el proyecto conocido como *le Domaine de la Terre*, en Villefontaine (Francia). Se trata de un programa de viviendas sociales desarrollado en diferentes técnicas de construcción con tierra, que motivó investigaciones e innovaciones en los métodos constructivos de este material, así como programas posteriores similares. "El hito histórico original del *Domaine de la Terre*, prorrogado por los *Grands Ateliers* y la *Cité de la Construction Durable*, realmente ha sido el catalizador y el marcapaso de una dinámica de investigación y experimentación constante para el futuro." (Guillaud, H., 2011)

Este primer resurgimiento del interés por las obras de tapia, que vino motivado por un ahorro económico ligado al menor consumo energético, fue derivando en un interés ligado a criterios de sostenibilidad y bajo impacto ambiental. La búsqueda en años más recientes de métodos constructivos ligados al medio ambiente y con la menor huella ecológica ha producido nuevas investigaciones y construcciones en tierra, desarrolladas esta vez en un paisaje normativo mucho más afianzado y con mayores exigencias, que ha favorecido una nueva innovación en las técnicas de construcción con tierra. "También en otros continentes arquitectos innovadores han conseguido conciliar las exigencias funcionales y estéticas de los edificios de viviendas con los parámetros de la arquitectura bioclimática, llevando a cabo encomiables modernizaciones en la milenaria técnica de la tapia." (Font, F. y Hidalgo, P., 2011)

En el panorama reciente, cabe destacar la obra de Martin Rauch, tanto por su parte artística como por su trabajo en la construcción. Es de destacar la obra de la Capilla de la Reconciliación en Berlín, en la que la elección de la tierra como material supuso un cambio radical en la concepción del proyecto. En esta obra fue vital el trabajo artístico de Rauch y su implicación en la construcción de los tapiales. "El asesoramiento del reconocido artista y constructor Martin Rauch fue vital para la ejecución del edificio. Con su



Fig. 19: Detalle de la casa Rauch – Rauch, M. y Bühler, B. (2008)

empresaespecializada y la sensibilidad plástica que lo caracterizan ha sido capaz de cambiar la concepción de la tierra. Un material asociado a la tradición e incluso a la pobreza está cambiando hacia una nueva visión moderna.” (Berstraten et al., 2011)

Las técnicas incorporadas por Rauch se ven reflejadas en su vivienda de tapia en Austria. La característica principal adoptada en cuanto a la ejecución de las tapias es la disposición de piezas cerámicas entre tongadas, con el objetivo de evacuar el agua de lluvia de cada tramo de la fachada y evitar así grandes daños por erosión en la superficie de tierra. Estas piezas actuarían de forma similar a un vierteaguas, sobresaliendo ligeramente de la superficie de la fachada y remarcando la ejecución por hiladas del muro.

Parte de la aportación de Rauch a la recuperación e innovación del tapial son sus notas sobre la industrialización de las paredes de tapial. La construcción prefabricada de muros de tierra, hecha por módulos, permite ahorrar tiempos en la construcción, así como una mayor precisión en los ensayos técnicos sobre el propio material. En opinión de Rauch, con la prefabricación en tapial “se hace posible una óptima introducción de procesos constructivos industrializados. Los métodos de trabajo pueden ser asimismo optimizados y racionalizados a través de esta construcción en módulos.” (von Mag, A. y Rauch, M., 2011)

En España, la tradición de construcción con tapia también ha visto su resurgimiento al igual que en otros países. Dentro del marco normativo del Código Técnico de la Edificación, a partir del año 2006, son varias las obras que se han ejecutado en tapia, de tipologías y usos diversos, que han tenido que justificar o cumplir una serie de exigencias que no eran consideradas anteriormente. Estas nuevas necesidades se ilustran en los informes de Font e Hidalgo, y resultan de interés para el análisis de la evolución de la técnica, ya que en las nuevas construcciones “es necesario ofrecer una caracterización del material más precisa pues se nos presentan exigencias técnicas, de acabados, del proceso de ejecución, y en un futuro próximo, nuevas normativas, a las que habrá que responder con solvencia. Nos referimos, entre otras, a las solicitaciones estructurales a las que se verá sometido un muro, compresión principalmente, su resistencia a la acción del agua y a la erosión de los paramentos, al monolitismo de la fábrica, a los requerimientos estéticos, al comportamiento térmico, etc. Es evidente que estas demandas no tenían antiguamente el mismo valor que ahora.” (Font, F. y Hidalgo, P., 2011)

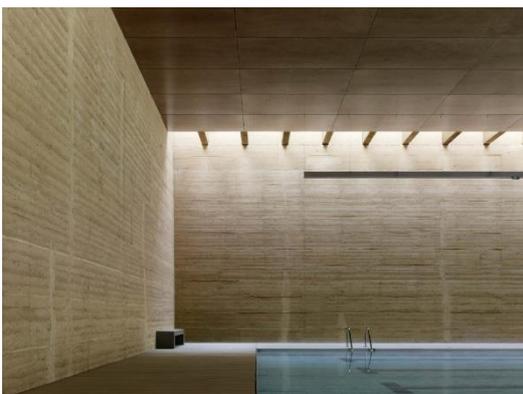


Fig. 20: Piscina municipal de Toro (Zamora) - Fernández Santos-Díez, H. (2010)

Por sus dimensiones, es destacable la obra de la piscina municipal de Toro (Zamora) del año 2010, en la que los muros de tierra apisonada cobran protagonismo. La elección de la tapia no es casual, el estudio Vier Arquitectos propone integrar el edificio en el patrimonio de la ciudad, de modo que “la piscina municipal quiere ser un edificio austero que, sin renunciar al lenguaje que le es propio a la arquitectura de nuestro tiempo, sepa dar continuidad expresiva al legado patrimonial de Toro” (Vier Arquitectos, 2015). Es de los pocos casos en España en que se realiza una obra de tapia para un espacio que necesita de un gran control higrotérmico como una piscina, motivo que motivó a los arquitectos a elegir este material puesto que, como detallan en la memoria del proyecto, entienden “que el tapial es un material

altamente aconsejable en virtud de sus características técnicas – solidez, inercia, permeabilidad, textura –, de economía de material, facilidad de puesta en obra y sostenibilidad medioambiental.” (Vier Arquitectos, 2015)

A la hora de incorporar nuevas técnicas al método constructivo del tapial, Zest architecture comparte detalles sobre la ejecución de muros de tapia sobre una base formada por perfiles de metálicos. El entorno de la vivienda, en el Matarraña turolense, llamó la atención de los proyectistas, como explican en su web: “pensamos en cómo eso debía formar parte integral del proyecto. Debíamos llevar esos colores y esas texturas al interior de la vivienda y que fueran un elemento central y distintivo. (...) Eso nos llevó a integrar la construcción de muros tapial en el proyecto” (Zest architecture, 2021). Sobre la solera de hormigón de la vivienda que se pretende construir, unos perfiles de acero IPN soldados con un relleno de hormigón forman la base de los muros. La técnica de ejecutar los muros, aunque similar a la tradicional, emplea encofrados metálicos y realiza el apisonado del material mediante una compactadora hidráulica manual.

Si bien las exigencias normativas pueden suponer un impedimento para la proliferación de nuevas obras de tapia, existe una previsión de desarrollo de nuevas consideraciones normativas del Código Técnico de la Edificación relativas al impacto ambiental de las construcciones, que podrían favorecer este tipo de técnicas y materiales.



Fig. 21: Ejecución del muro de tapia – Zest architecture

Fig. 22: Desencofrado del muro - Zest architecture

III.C. Evolución en el tiempo del CTE

Previa a la aprobación del Código Técnico de la Edificación en el año 2006, han sido varios los conjuntos de normas que regulaban el sector de la edificación en España. Desde el año 1957, las normas MV del Ministerio de la Vivienda fueron las primeras en vigor regulando aspectos técnicos de la construcción de edificios. Estas normas siguieron vigentes hasta 1977, cuando se les dio el rango de Normas Básicas de la Edificación, siendo las únicas de obligado cumplimiento. Como desarrollo de las NBE, se aprobaron las Normas Tecnológicas de la Edificación, que servían para completarlas, aunque no tenían condición de obligatoriedad. Más adelante, en 1999 se publica la Ley de Ordenación de la Edificación.

Si bien la normativa fue desarrollándose con los años siguiendo los criterios de cada época, los conceptos relativos al ahorro de energía tuvieron un mayor peso con la aprobación del Código Técnico de la Edificación. Las diversas revisiones del CTE, con la influencia de las Directivas Europeas, han ido incluyendo nuevos aspectos de la edificación en la normativa, mediante la ampliación de sus Documentos Básicos o la redacción de algunos nuevos. A fecha de septiembre de 2025, el Código Técnico se compone de los siguientes Documentos Básicos:

- Documento Básico de seguridad estructural (DB-SE).
- Documento Básico de seguridad en caso de incendio (DB-SI).
- Documento Básico de seguridad de utilización y accesibilidad (DB-SUA).
- Documento Básico de ahorro de energía (DB-HE).
- Documento Básico de protección frente al ruido (DB-HR).
- Documento Básico de salubridad (DB-HS).

Además de los documentos, el CTE incluye programas de cálculo y comprobaciones, además de un catálogo de elementos constructivos. Con el objetivo de justificar las exigencias de las obras, se aportan algunos datos de cálculo sobre la tierra comprimida que, aunque no son suficientes, permiten realizar comprobaciones del lado de la seguridad. Si bien el ahorro de energía y la eficiencia energética son pilares fundamentales de la normativa actual, es necesario recurrir a documentos o estudios externos a la hora de validar el uso de materiales menos convencionales para cumplir con las exigencias del Código Técnico, ya sea por falta de datos o para realizar unas comprobaciones más precisas que se ajusten más al material concreto a utilizar.

La previsión de incorporar un nuevo Documento Básico relativo a la sostenibilidad en un futuro próximo supone un cambio en los criterios a seguir a la hora de desarrollar un edificio. Si bien aún no se conocen detalles sobre el documento, es de esperar que resulte favorecedor para métodos constructivos como el del tapial y para la arquitectura con tierra y materiales que se consideren sostenibles en general. De igual modo, es de interés la Directiva Europea de Eficiencia Energética de la Edificación del año 2024 por la que se estudian las emisiones del ciclo de vida completo de los edificios en las que "las opciones de diseño y las elecciones de materiales influyen considerablemente", puesto que "son responsables de la emisión de gases de efecto invernadero antes, a lo largo y después de su vida útil". (DOUE, 2024)

III.D. Documentos que validan el tapial a su aplicación

Uno de los mayores impedimentos en la actualidad para la proliferación de esta técnica es la ausencia de referentes normativos para la construcción con tierra. A lo largo de las últimas décadas han aparecido documentos técnicos referentes a la técnica de la tapia y otros tipos de construcciones con tierra comprimida en todo el mundo. Muchas de estas normas tienen un carácter analítico y experimental que indican cómo se ha de desarrollar una obra de tapia mediante pruebas sencillas, aunque también existen los documentos que se extienden en datos más técnicos y aportan resultados de pruebas realizadas en laboratorio que ayudan a conocer el funcionamiento del sistema constructivo en diferentes aspectos. En España no existe una norma referente a la técnica de la tapia, sin embargo, la UNE 41410:2023 especifica los requerimientos

para la construcción con Bloques de Tierra Comprimida (BTC). Si bien el desarrollo de una obra con estos bloques es muy diferente al uso de tapial, esta norma puede ayudar a sentar las bases para un futuro documento que regule e impulse el uso de este sistema constructivo.

Dada la ausencia de norma actual en España, se han elegido una serie de documentos de entre los que existen en todo el mundo para entender mejor cómo se comporta el sistema constructivo y las limitaciones que en él existen.

| Año | Nombre | País | Descripción |
|------|----------------------|---------------|--|
| 1970 | p.i.e.t. 70 | España | Prescripciones del instituto Eduardo Torroja para obras de fábrica |
| 1998 | NZS 4297:1998 | Nueva Zelanda | Diseño de ingeniería de edificios de tierra |
| 2006 | L.R. 16/01/2006 n. 2 | Italia | Conservación de patrimonio en tierra cruda |
| 2017 | E.080 | Perú | Diseño y construcción con tierra reforzada |
| 2023 | UNE 41410:2023 | España | Bloques de Tierra Comprimida para muros y tabiques |
| 2024 | NZS 4299:2024 | Nueva Zelanda | Edificios de tierra que no requieren un diseño técnico específico |

El primer ejemplo a analizar es un documento del Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja publicado en 1971 (p.i.e.t. 70) que trata las obras de fábrica, mencionando distintas características que han de tener, y que incluye el tapial. El documento acota las proporciones de cada tipo de grano que ha de tener la tierra para un funcionamiento óptimo de la construcción, siendo los siguientes:

| | |
|----------|-----------|
| Arcilla | 10 a 40 % |
| Limo | 20 a 40 % |
| Arena | 10 a 40 % |
| Gravilla | 10 a 20 % |

El mismo documento destaca la importancia de evitar que el material a emplear contenga restos de material orgánico. Se pueden incluir no obstante fibras vegetales secas, como la paja, que aportarían consistencia al paramento.

En otro apartado, se establece el espesor mínimo para los muros hechos con tapial, debiendo superar este los 50 cm. Menciona la necesidad de disponer de un zócalo de mismo espesor que el muro y altura no menor a 25 cm, hecho en piedra, hormigón o ladrillo.

Si bien el documento aporta dimensiones y proporciones exactas, no tiene un nivel de rigurosidad en el cálculo equiparable a las normas actuales. Estas prescripciones centran sus esfuerzos en otras técnicas y materiales más extendidos en la construcción contemporánea, pero hace el esfuerzo de describir, aunque sea brevemente, el sistema constructivo de la tapia y acompaña en el proceso inicial de construcción con este método.

En el marco internacional, existen una serie de normas neozelandesas que describen el sistema constructivo de la tapia desde un punto de vista técnico. Este es el caso de la norma NZS 4297:1998 (*Engineering design of earth buildings*), siendo la primera de esta serie y asociada a la 4298 (*Materials and workmanship for earth buildings*) y 4299 (*Earth buildings not requiring specific engineering design*). Al contrario de las p.i.e.t. descritas anteriormente, esta norma se sitúa en un marco de crecimiento del interés por los sistemas constructivos de bajo impacto ambiental, motivo por el cual se desarrolló e implementó junto con otras normas relacionadas. Su objeto principal es acompañar en la etapa de diseño de la construcción en cuanto a resistencia estructural y durabilidad se refiere. Además de la tierra comprimida en tapial, el documento abarca también

lo relativo a diversos tipos de técnicas que impliquen el uso de tierra cruda, tales como el adobe y los bloques de tierra comprimida.

En cuanto a datos precisos, el estándar aporta limitaciones precisas al diseño de las edificaciones que han de cumplirse en todo caso, destacando que la altura total de cualquier muro de tierra no debe exceder los 6,50 metros, y que los forjados no tendrán una suma de cargas superior a los 1,5 kPa. También aplica limitaciones a la superficie de las construcciones que se encuentren en zonas de actividad sísmica, con valores distintos dependiendo de su configuración, aunque no contempla edificios de tierra que se desarrollen en más de dos plantas independientemente de que utilicen otro material en niveles superiores.

Lo destacable de la norma neozelandesa es su introducción de parámetros de aislamiento térmico, resistencia al fuego, deformaciones e impermeabilización en un método de construcción que en muchos casos se veía como una técnica ajena al mundo contemporáneo y con escaso pensamiento técnico.

En el año 2006 se publicó en Italia una *Legge regionale* (ley regional) relativa a las construcciones en tierra cruda. Si bien el documento se centra en patrimonio y conservación, es de interés al estandarizar la aproximación a edificaciones de tierra en contexto europeo y dar avances en la intervención en dichas construcciones. En este caso la ley se enfoca en la puesta en valor del patrimonio en tierra desde un punto de vista de la arquitectura bioclimática, enfoque que ya era de gran importancia en la fecha.

En el marco de las normas que combinan el factor técnico con el práctico se encuentra la peruana E.080 de Diseño y construcción con tierra reforzada publicada en el año 2017. Esta norma centra sus esfuerzos en describir los ensayos a realizar en el material elegido para la construcción, tanto de resistencia de morteros, de la tierra y del muro en conjunto. También muestra cómo realizar un análisis del tipo de material a emplear sin necesidad de conocimientos precisos, además de requisitos y soluciones para instalaciones, protecciones y refuerzos.

Volviendo al panorama nacional, en el año 2023 se publica la norma UNE 41410:2023, que sustituye a la anterior UNE 41410 del año 2008, que se refiere a los Bloques de Tierra Comprimida. Si bien el uso en la etapa de desarrollo de la construcción de estos bloques es muy distinto al modo de construir con tapia, su material es esencialmente el mismo, de modo que podemos entenderlo como una sección de muro realizado en tapial, pero de un tamaño menor. Según se define en la propia norma, un BTC es una "pieza para fábrica de albañilería generalmente con forma de paralelepípedo rectangular, obtenida por compresión estática o dinámica de tierra, con dosificación y grado de humedad adecuados, seguida de un desmolde inmediato." (CTN-UNE 41 Construcción, 2023, p. 8)

Esta norma UNE no obstante está destinada a la producción de los bloques de tierra comprimida en fábrica, dada su facilidad de industrialización y transporte al sitio de la obra, por lo que el documento se enfoca en dar pautas, limitaciones y ensayos a realizar sobre el material para el fabricante de los bloques, sirviendo como garantía del buen rendimiento de estos, pero sin aportar datos para el diseño y desarrollo de las edificaciones. En este ámbito es más habitual referirse a las hojas técnicas de los fabricantes de los bloques, que muestran su idónea disposición, modos de evitar humedades, de disponer refuerzos estructurales, etc. Su importancia por tanto reside en facilitar la adaptación del material a la arquitectura normativa, optando por la vía de la industrialización del proceso productivo del mismo.

El caso más reciente, de nuevo publicado en Nueva Zelanda, es el estándar NZS 4299:2024, que sustituye a una versión previa del año 2020. Al igual que el estándar neozelandés descrito anteriormente, el documento abarca tanto obras de tierra cruda realizadas en tapial como otros métodos usando el mismo material. Esta publicación desarrolla principalmente el aspecto de resistencia estructural en cuanto al suelo y su capacidad portante, la necesidad de arriostramiento de las construcciones debida a la acción del viento o a la actividad sísmica, el diseño de cimentaciones para las edificaciones de tierra y los refuerzos estructurales para soportar las cargas verticales y horizontales del edificio. Además de la resistencia estructural, en el documento se desarrolla la adecuada apertura de huecos en las construcciones de tierra, así como la protección contra la humedad del edificio en general.

Cabe destacar que, si bien el documento neozelandés de 1998 limitaba la altura de los muros de tierra cruda a 6,50 metros, en este nuevo documento se especifica que los muros de tierra no superarán los 3,60 metros en su punto más alto, siendo este valor inferior en zonas de mayor actividad sísmica.

La diversidad de fuentes de material de las construcciones con tierra, siendo localizadas frecuentemente en el entorno inmediato de la obra, hace conveniente el análisis de cada caso particular para conocer las condiciones del material empleado. Ejecutar estas obras con la certeza de estar del lado de la seguridad puede ser una dificultad añadida al proceso constructivo en algunas ocasiones, por lo que una inclusión mayor en la normativa agilizaría los procedimientos y ayudaría a estandarizar estos métodos.

IV. Análisis normativo de la tapia: Energía y estanqueidad

Para llevar a cabo los objetivos propuestos, se presenta una serie de edificaciones seleccionadas por su ubicación en zonas climáticas concretas, construidas principalmente con tapia. Antes del análisis concreto de los casos de estudio, se describe el marco teórico para el análisis de las exigencias requeridas por los documentos del CTE.

Los documentos requeridos son:

- Para el cumplimiento energético: "Documento Básico HE – Ahorro de energía"
- Para la evaluación simplificada de la capacidad térmica: "Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible", capítulo 7 (Neila, F. J.)
- Para el cumplimiento de salubridad: "Documento Básico HS – Salubridad"

Posteriormente, se describen los casos de estudio y el análisis particular de las exigencias para cada uno de ellos. Finalmente, se extraen las conclusiones evaluadas de los todos los resultados obtenidos, llegando a la consecución de una valoración fundamentada de la tapia.

IV.A. Parámetros de análisis en base a las exigencias básicas del CTE

El Código Técnico de la Edificación plantea una serie de exigencias en lo relativo a las distintas temáticas de los documentos que lo componen. En lo que concierne al desarrollo de este trabajo, hay diversos apartados de la normativa que conviene analizar más a fondo.

IV.A.a. Documento Básico de Ahorro de Energía (DB-HE)

Para el documento básico de ahorro de energía, una de las primeras consideraciones que se hacen sobre el edificio es la caracterización de exigencias para la envolvente térmica del mismo. En primer lugar, se establece un valor límite de transmitancia térmica (U) para cada uno de los elementos (muros y suelos, cubiertas...). En lo relativo a los muros de tapia, interesa conocer los valores de transmitancia de muros, tanto aquellos en contacto con el ambiente exterior como los que forman medianera con otra edificación o están en contacto con el terreno. La exigencia para estos valores varía en función de la zona climática de invierno en que se encuentre la construcción.

Tabla 3.1.1.a - HE1 Valores límite de transmitancia térmica, U_{lim} [W/m^2K]

| Elemento | Zona climática de invierno | | | | | |
|---|----------------------------|------|------|------|------|------|
| | α | A | B | C | D | E |
| Muros y suelos en contacto con el aire exterior (U_s, U_M) | 0,80 | 0,70 | 0,56 | 0,49 | 0,41 | 0,37 |
| Cubiertas en contacto con el aire exterior (U_c) | 0,55 | 0,50 | 0,44 | 0,40 | 0,35 | 0,33 |
| Muros, suelos y cubiertas en contacto con espacios no habitables o con el terreno (U_t) Medianerías o particiones interiores pertenecientes a la envolvente térmica (U_{MD}) | 0,90 | 0,80 | 0,75 | 0,70 | 0,65 | 0,59 |
| Huecos (conjunto de marco, vidrio y, en su caso, cajón de persiana) (U_{H_i})* | 3,2 | 2,7 | 2,3 | 2,1 | 1,8 | 1,80 |
| Puertas con superficie semitransparente igual o inferior al 50% | 5,7 | | | | | |

Tabla 1: Valores límite de U de la envolvente – CTE DB-HE 3.1.1

La transmitancia de los muros también afectará a la siguiente exigencia que marca el documento, dando un límite al coeficiente global de transmisión de calor de la envolvente térmica del edificio (K). Este coeficiente tiene en consideración toda la superficie de la envolvente en que se produce intercambio de calor con el exterior del edificio, dando valores límite distintos en función de la compacidad de la construcción y su zona climática de invierno. En concreto el cálculo omite toda la superficie de la envolvente que esté en contacto con otros edificios o espacios que no se incluyan en la envolvente, considerando únicamente la superficie en contacto con el terreno o ambiente exterior.

Tabla 3.1.1.b - HE1 Valor límite K_{lim} [W/m^2K] para uso residencial privado

| | Compacidad V/A [m^3/m^2] | Zona climática de invierno | | | | | |
|---------------------------------|---------------------------------|----------------------------|------|------|------|------|------|
| | | α | A | B | C | D | E |
| Edificios nuevos y ampliaciones | $V/A \leq 1$ | 0,67 | 0,60 | 0,58 | 0,53 | 0,48 | 0,43 |
| | $V/A \geq 4$ | 0,86 | 0,80 | 0,77 | 0,72 | 0,67 | 0,62 |

Tabla 3.1.1.c - HE1 Valor límite K_{lim} [W/m^2K] para uso distinto del residencial privado

| | Compacidad V/A [m^3/m^2] | Zona climática de invierno | | | | | |
|--|---------------------------------|----------------------------|------|------|------|------|------|
| | | α | A | B | C | D | E |
| Edificios nuevos. Ampliaciones. Cambios de uso. Reformas en las que se renueve más del 25% de la superficie total de la envolvente térmica final del edificio | $V/A \leq 1$ | 0,96 | 0,81 | 0,76 | 0,65 | 0,54 | 0,43 |
| | $V/A \geq 4$ | 1,12 | 0,98 | 0,92 | 0,82 | 0,70 | 0,59 |

Tabla 2: Valores límite de K – CTE DB-HE 3.1.1

Por último, en el caso de que contemos con particiones interiores realizadas con tapia, hay que tener en cuenta una última exigencia del documento de Ahorro de Energía, que especifica la transmitancia térmica límite para estas particiones.

Tabla 3.2 - HE1 Transmitancia térmica límite de particiones interiores, U_{lim} [W/m^2K]

| | Tipo de elemento | Zona climática de invierno | | | | | |
|---|---------------------------------------|----------------------------|------|------|------|------|------|
| | | α | A | B | C | D | E |
| Entre unidades del mismo uso | Particiones horizontales | 1,90 | 1,80 | 1,55 | 1,35 | 1,20 | 1,00 |
| | Particiones verticales | 1,40 | 1,40 | 1,20 | 1,20 | 1,20 | 1,00 |
| Entre unidades de distinto uso Entre unidades de uso y zonas comunes | Particiones horizontales y verticales | 1,35 | 1,25 | 1,10 | 0,95 | 0,85 | 0,70 |

Tabla 3: Valores límite de U de particiones interiores – CTE DB-HE 3.2

En algunos casos, aunque para cumplir con el valor de U límite se requiera de aislamiento térmico o espesores mucho mayores, es preferible mantener el muro de tapia sin capas añadidas en pro de un mejor comportamiento térmico de la tierra, dada su capacidad de almacenar calor. “En la orientación sur, con el espesor tradicional de aproximadamente 40 cm de los muros de tierra no sería recomendable añadir aislante térmico, ya que en esta orientación se optimiza la inercia térmica.” (Berstraten et al., 2011)

Para analizar el comportamiento higrotérmico de los muros de tapia, conviene identificar las condiciones climáticas dadas por el Código Técnico de la Edificación para cada caso. El DB-HE realiza una clasificación en zonas climáticas en función de la provincia y la altitud sobre el nivel del mar en que se encuentre el edificio a analizar, que sirve para considerar la *dureza* del invierno (letra) y la del verano (número) al mismo tiempo.

También es necesario obtener los datos de temperatura y humedad relativa de las ubicaciones a analizar antes de comenzar los cálculos. El Documento de Apoyo 2 del Documento Básico de Ahorro de Energía (DB-HE/2: *Comprobación de limitación de condensaciones superficiales e intersticiales en los cerramientos*) aporta los datos para las capitales de provincia, del que se elige el mes más frío por considerarse el caso más desfavorable.

| Provincia | Altitud sobre el nivel del mar (h) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|------------------------------------|------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|--------------|---------------|---------------|--------------|
| | ≤ 50 m | 51 - 100 m | 101 - 150 m | 151 - 200 m | 201 - 250 m | 251 - 300 m | 301 - 350 m | 351 - 400 m | 401 - 450 m | 451 - 500 m | 501 - 550 m | 551 - 600 m | 601 - 650 m | 651 - 700 m | 701 - 750 m | 751 - 800 m | 801 - 850 m | 851 - 900 m | 901 - 950 m | 951 - 1000 m | 1001 - 1050 m | 1051 - 1250 m | 1251 - 300 m |
| Albacete | C3 | | | | | | | D3 | | | | | | | E1 | | | | | | | | |
| Alicante/Alacant | B4 | | | C3 | | | | | | | D3 | | | | | | | | | | | | |
| Almería | A4 | B4 | | | B3 | | | C3 | | | D3 | | | | | | | | | | | | |
| Araba/Álava | D1 | | | | | | | E1 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Asturias | C1 | D1 | | | | | | | E1 | | | | | | | | | | | | | | |
| Ávila | D2 | | | | | | | D1 | | | E1 | | | | | | | | | | | | |
| Badajoz | C4 | | | | | C3 | | D3 | | | | | | | | | | | | | | | |
| Balears, Illes | B3 | | | C3 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Tabla 4: Extracto de la clasificación en zonas climáticas, CTE DB-HE Anejo B

Tanto la temperatura interior como la humedad relativa interior se obtienen del mismo Documento de Apoyo, en su apartado 2.2.2 (*Condiciones interiores para el cálculo de condensaciones intersticiales*). Según indica el documento, se toma como temperatura interior los 20°C y la humedad relativa interior en función de la clase de higrometría del edificio, que para uso residencial será clase 3 y, por tanto, el 55%.

Tabla C.1 Datos climáticos mensuales de capitales de provincia, T en °C y HR en %

| Localidad | | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic |
|-----------|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Albacete | T _{med} | 5,0 | 6,3 | 8,5 | 10,9 | 15,3 | 20,0 | 24,0 | 23,7 | 20,0 | 14,1 | 8,5 | 5,3 |
| | HR _{med} | 78 | 70 | 62 | 60 | 54 | 50 | 44 | 50 | 58 | 70 | 77 | 79 |
| Alicante | T _{med} | 11,6 | 12,4 | 13,8 | 15,7 | 18,6 | 22,2 | 25,0 | 25,5 | 23,2 | 19,1 | 15,0 | 12,1 |
| | HR _{med} | 67 | 65 | 63 | 65 | 65 | 65 | 64 | 68 | 69 | 70 | 69 | 68 |
| Almería | T _{med} | 12,4 | 13,0 | 14,4 | 16,1 | 18,7 | 22,3 | 25,5 | 26,0 | 24,1 | 20,1 | 16,2 | 13,3 |
| | HR _{med} | 70 | 68 | 66 | 65 | 67 | 65 | 64 | 66 | 66 | 69 | 70 | 69 |
| Ávila | T _{med} | 3,1 | 4,0 | 5,6 | 7,6 | 11,5 | 16,0 | 19,9 | 19,4 | 16,5 | 11,2 | 6,0 | 3,4 |
| | HR _{med} | 75 | 70 | 62 | 61 | 55 | 50 | 39 | 40 | 50 | 65 | 73 | 77 |
| Badajoz | T _{med} | 8,7 | 10,1 | 12,0 | 14,2 | 17,9 | 22,3 | 25,3 | 25,0 | 22,6 | 17,4 | 12,1 | 9,0 |
| | HR _{med} | 80 | 76 | 69 | 66 | 60 | 55 | 50 | 50 | 57 | 68 | 77 | 82 |
| Barcelona | T _{med} | 8,8 | 9,5 | 11,1 | 12,8 | 16,0 | 19,7 | 22,9 | 23,0 | 21,0 | 17,1 | 12,5 | 9,6 |
| | HR _{med} | 72 | 70 | 70 | 70 | 72 | 70 | 69 | 72 | 74 | 74 | 74 | 71 |

Tabla 5: Extracto de los datos climáticos mensuales - CTE DA DB-HE/2 Anejo C

Una vez recopilados los datos para el caso a analizar, se estudia la composición de la sección de muro de interés y se obtienen los datos de cada capa material en cuanto a espesor, conductividad térmica, densidad, calor específico y el factor de resistencia a la difusión de vapor. Para la mayor parte de los materiales convencionales, estos datos se obtienen directamente del prontuario de soluciones constructivas del Código Técnico, aunque será necesario recurrir a fuentes externas para algunos otros, como es el caso de la tierra comprimida. En el anexo de este documento se muestran los datos de los materiales para cada fachada a analizar, así como sus respectivos cálculos.

El primer cálculo realizado es el de la resistencia térmica (R) de cada capa, medida en m^2K/W , que se indica en el Documento de Apoyo 1 del Documento Básico de Ahorro de Energía (DB-HE/1: *Cálculo de parámetros característicos de la envolvente*) mediante la fórmula:

$$R = \frac{e}{\lambda}$$

Donde e es el espesor de la capa en cuestión medido en metros y λ la conductividad térmica del material que compone la capa.

Las resistencias térmicas de las superficies interior y exterior del cerramiento vienen dadas por la tabla 1 del mismo documento.

Tabla 1 Resistencias térmicas superficiales de cerramientos en contacto con el aire exterior [m²·K/ W]

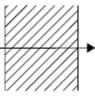
| Posición del cerramiento y sentido del flujo de calor | | R _{se} | R _{si} |
|---|---|-----------------|-----------------|
| Cerramientos verticales o con pendiente sobre la horizontal >60° y flujo horizontal |  | 0,04 | 0,13 |
| Cerramientos horizontales o con pendiente sobre la horizontal ≤60° y flujo ascendente (techo) |  | 0,04 | 0,10 |
| Cerramientos horizontales y flujo descendente (suelo) |  | 0,04 | 0,17 |

Tabla 6: Resistencias térmicas superficiales de los cerramientos - CTE DA DB-HE/1 2.1

Partiendo de la temperatura más fría en el exterior, con el objetivo de calcular la variación de temperatura tras atravesar cada una de las capas del cerramiento, la temperatura intersticial medida en grados centígrados para la superficie interior de una capa se calcula mediante la fórmula:

$$T_n = T_{n-1} + \frac{R_n \cdot \Delta T}{R_t}$$

Donde n es la capa en cuestión, $n-1$ la superficie interior de la capa anterior, ΔT es la diferencia de temperaturas entre el exterior y el interior (que se asume como 20°C en todos los casos) y R_t la suma de todas las resistencias térmicas del cerramiento. Para el caso de la temperatura superficial exterior, T_{n-1} es la temperatura del ambiente exterior.

Con los datos de temperatura se puede elaborar la gráfica de variación de temperatura que, superpuesta sobre el detalle constructivo del cerramiento, permite comprobar de forma visual el impacto de cada capa en términos de aislamiento térmico.

El Documento de Apoyo 2 permite comprobar si existe riesgo de condensaciones intersticiales en el cerramiento mediante los cálculos de presiones. En su punto 3.1 y para una temperatura mayor o igual a 0°C, indica el cálculo de presión de saturación de vapor, medida en pascales, mediante la fórmula:

$$P_{sat,n} = 610,5 \cdot e^{\frac{17,269 \cdot \theta T_n}{237,3 + T_n}}$$

Donde T_n es la temperatura intersticial correspondiente.

Para el cálculo de presiones de vapor, se necesita obtener el espesor de aire equivalente (Sd) de cada material, que se calcula:

$$Sd = \mu \cdot e$$

Donde μ es la resistencia a la difusión de vapor del material y e el espesor de la capa.

En primer lugar, la presión de vapor exterior dependerá de la humedad relativa exterior de modo que:

$$P_e = P_{sat,e} \cdot \varphi_e$$

Donde φ_e es la humedad relativa exterior, medida en tanto por ciento.

Del mismo modo, la presión de vapor interior depende de la humedad relativa interior y se calcula:

$$P_i = 2337 * \varphi_i$$

Donde φ_i es la humedad relativa interior, medida en tanto por ciento.

Para las presiones de vapor intersticiales, la fórmula es la siguiente:

$$P_n = P_{n-1} + \frac{Sd_n}{Sd_t} \cdot \Delta P$$

Donde Sd_t es el espesor del aire equivalente del cerramiento, obtenido sumando los de todas las capas, y ΔP es la diferencia de presión de vapor interior y presión de vapor exterior.

Una vez obtenidos los datos de presión de saturación y presión de vapor para todos los puntos, se comparan los valores para comprobar que en ningún punto la presión de vapor es superior a la de saturación. La elaboración de una gráfica de forma similar a la realizada para las temperaturas permite comprobar de forma más directa que no existe riesgo de condensaciones intersticiales en el cerramiento.

Para poner en relación la inercia térmica de distintas soluciones constructivas de la envolvente, nos servimos de los cálculos de masa térmica (m_t) y de masa térmica útil ($m_{t\text{ útil}}$). En primer caso, podemos obtener la masa térmica de una envolvente mediante la suma de masas térmicas de sus capas, poniendo en relación para cada una de ellas su volumen (V), su densidad (ρ) y el calor específico (c^e) del material componente de la capa:

$$m_t = V \cdot \rho \cdot c^e$$

Para simplificar el cálculo y dado que el objetivo no es conocer el valor final de masa térmica de la totalidad del edificio sino comparar valores, la masa térmica se considera para 1 metro cuadrado de fachada, por lo que el valor numérico del volumen (V) será igual al del espesor (e).

En lo relativo al cálculo de masa térmica de las distintas variaciones de soluciones constructivas, es conveniente incorporar el concepto de masa térmica útil, definido por Javier Neila (2004). Este concepto surge dada la diferencia en la forma en que distintos materiales se cargan de energía, resultando insuficiente el cálculo de masa térmica por capas independientes. Para ello, nos servimos de la resistencia térmica (R) de los materiales calculada anteriormente.

Incorporando cálculos relativos a las capas totales de la sección a analizar, la fórmula de la masa térmica útil surge de la constante térmica CTT , que relaciona la masa térmica de cada capa con la resistencia acumulada desde el exterior de la sección hasta el punto medio de la capa en cuestión. Así pues, la fórmula es la siguiente:

$$CTT = (R_{se} + 0,5R_1)m_{t1} + (R_{se} + R_1 + 0,5R_2)m_{t2} + \dots + (R_{se} + R_1 + R_2 + \dots + R_{n-1} + 0,5R_n + R_{si})m_{tn}$$

Donde R_{se} es la resistencia térmica superficial exterior, que según el Código Técnico (DB HE/1) tiene un valor de 0,04; R es la resistencia térmica, m_t la masa térmica y R_{si} la resistencia térmica superficial interior, cuyo valor de 0,13 obtenemos del mismo documento del Código Técnico. Realizando el cálculo para cada una de las capas nos servimos del valor obtenido de la constante térmica CTT para obtener la masa térmica útil de la siguiente forma:

$$m_{t\text{ útil}} = \frac{CTT}{R_{total}}$$

Una vez realizados los cálculos, podremos comparar y estimar el funcionamiento térmico de las secciones de muro de tapia según sus materiales.

IV.A.b. Documento Básico de Salubridad (DB-HS)

Para el Documento Básico de salubridad, los parámetros a tener en cuenta para la ejecución de una obra con tapia se refieren a la protección frente a la humedad, es decir, al apartado HS 1.

En primer lugar, el documento se refiere a muros en contacto con el terreno, presentando unas condiciones distintas en función del grado de impermeabilidad mínimo exigido, que varía dependiendo de la permeabilidad del terreno. Para un muro realizado con tierra comprimida, las condiciones de las soluciones constructivas se obtienen de la tabla 2.2 en la columna de *muro de gravedad*.

Tabla 2.2 Condiciones de las soluciones de muro

| Grado de impermeabilidad | Muro de gravedad | | | Muro flexorresistente | | | Muro pantalla | | |
|--------------------------|----------------------------|----------------|----------------------|-------------------------------|----------------|----------------------|---------------|---------------|----------------------|
| | Imp. interior | Imp. exterior | Parcialmente estanco | Imp. interior | Imp. exterior | Parcialmente estanco | Imp. interior | Imp. exterior | Parcialmente estanco |
| | ≤1 | I2+D1+D5 | I2+I3+D1+D5 | V1 | C1+I2+D1+D5 | I2+I3+D1+D5 | V1 | C2+I2+D1+D5 | C2+I2+D1+D5 |
| ≤2 | C3+I1+D1+D3 ⁽³⁾ | I1+I3+D1+D3 | D4+V1 | C1+C3+I1+D1+D3 | I1+I3+D1+D3 | D4+V1 | C1+C2+I1 | C2+I1 | D4+V1 |
| ≤3 | C3+I1+D1+D3 ⁽³⁾ | I1+I3+D1+D3 | D4+V1 | C1+C3+I1+D1+D3 ⁽³⁾ | I1+I3+D1+D3 | D4+V1 | C1+C2+I1 | C2+I1 | D4+V1 |
| ≤4 | | I1+I3+D1+D3 | D4+V1 | | I1+I3+D1+D3 | D4+V1 | C1+C2+I1 | C2+I1 | D4+V1 |
| ≤5 | | I1+I3+D1+D2+D3 | D4+V1 ⁽¹⁾ | | I1+I3+D1+D2+D3 | D4+V1 | C1+C2+I1 | C2+I1 | D4+V1 |

Tabla 7: Condiciones de las soluciones de muro en contacto con el terreno – CTE DB-HS 2.1.2

Estas condiciones se refieren a características de los materiales a emplear e indicaciones para resolver la impermeabilización, drenaje, evacuación y ventilación de los muros en contacto con el terreno, que vienen definidas a continuación de la tabla en el propio documento. También se especifica cómo se habrán de resolver los encuentros del muro con otros elementos constructivos en lo que a impermeabilización se refiere.

El próximo apartado de este documento que resulta de interés para la construcción con tapia es el de fachadas. En este caso, las condiciones de las soluciones constructivas se determinan en función de la zona pluviométrica y el grado de exposición al viento del edificio, sin tomar en cuenta las características del terreno. Estas condiciones se refieren a características de resistencia a las filtraciones y de higroscopicidad de los distintos componentes de la fachada. En particular, cabe destacar la condición H1 que exige un material de higroscopicidad baja para ser el componente de la hoja principal. Esta caracterización de material corresponde a ensayos de succión y de absorción realizados en documentos UNE, sobre ladrillo cerámico y piedra natural, que podrían ser de utilidad para realizar pruebas similares en la tierra comprimida.

Tabla 2.7 Condiciones de las soluciones de fachada

| Grado de impermeabilidad | Con revestimiento exterior | | | | Sin revestimiento exterior | | | |
|--------------------------|----------------------------|----------|----------------------|----------------|----------------------------|-------------|----------------|-----------------------------|
| | R1+C1 ⁽¹⁾ | | | | C1 ⁽¹⁾ +J1+N1 | | | |
| | | | | | B1+C1+J1+N1 | C2+H1+J1+N1 | C2+J2+N2 | C1 ⁽¹⁾ +H1+J2+N2 |
| ≤3 | R1+B1+C1 | | R1+C2 | B2+C1+J1+N1 | B1+C2+H1+J1+N1 | B1+C2+J2+N2 | B1+C1+H1+J2+N2 | |
| ≤4 | R1+B2+C1 | R1+B1+C2 | R2+C1 ⁽¹⁾ | B2+C2+H1+J1+N1 | | B2+C2+J2+N2 | B2+C1+H1+J2+N2 | |
| ≤5 | R3+C1 | B3+C1 | R1+B2+C2 | R2+B1+C1 | B3+C1 | | | |

⁽¹⁾ Cuando la fachada sea de una sola hoja, debe utilizarse C2.

Tabla 8: Condiciones de las soluciones de fachada – CTE DB-HS 2.3.2

El documento aporta condiciones a seguir en puntos singulares de las fachadas, del que destaca el arranque desde la cimentación, en el que habrá que evitar el ascenso de agua por capilaridad disponiendo una barrera impermeable en todo su espesor y proteger a la fachada de salpicaduras mediante un zócalo.

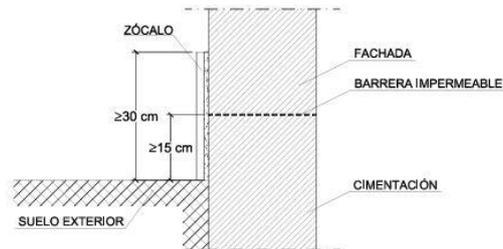


Fig. 23: Ejemplo de arranque de la fachada – CTE DB-HS 2.3.3.2

Para los encuentros con las carpinterías, las características varían según el grado de impermeabilidad exigido, prestando especial atención a los vierteaguas. Estas piezas habrán de disponerse cuando la carpintería se encuentre retranqueada con respecto al paramento exterior de la fachada, con el fin de evitar que el agua alcance la fachada. Además, se tendrá que evitar que el agua discurra por la parte inferior del dintel mediante un goterón o una solución similar.

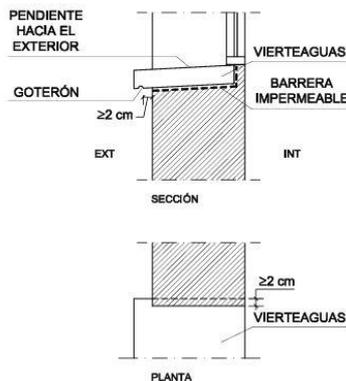


Fig. 24: Ejemplo de vierteaguas – CTE DB-HS 2.3.3.6

Para los remates superiores de las fachadas, el documento señala la necesidad de colocar albardillas que permitan evacuar el agua de su coronación. Estas piezas serán impermeables, dispondrán de goterón y tendrán la inclinación necesaria (mínimo 10°) para favorecer la evacuación del agua.

Cuando una cubierta se encuentre con un paramento vertical, deberán de colocarse elementos de protección para evitar la acumulación de agua. Si este encuentro se da en la parte inferior del faldón de la cubierta, será necesario un canalón que evacúe el agua recogida por la cubierta.

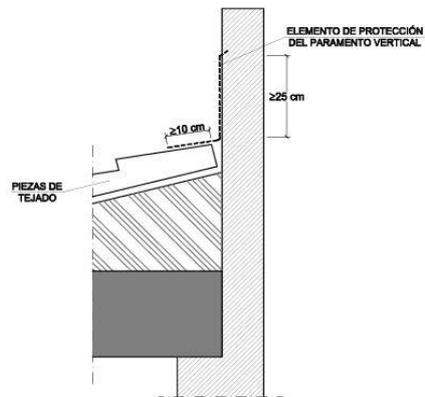


Fig. 25: Encuentro en la parte superior del faldón – CTE DB-HS 2.4.4.2.1

IV.B. Análisis cualitativo y cuantitativo

IV.B.a. Selección de los casos de estudio

Para el desarrollo del trabajo se ha realizado una búsqueda de ejemplos de edificios construidos con tierra comprimida en España tras la implementación del Código Técnico de la Edificación en el año 2006. Si bien la mayor parte de los ejemplos elegidos están construidos en tapial de tierra, hay algunos casos que muestran variaciones de la técnica o incorporan bloques de tierra comprimida. No obstante, estos casos sirven sólo como ilustración del panorama reciente de este tipo de construcción y no serán objeto de mayor análisis.

De cada uno de los ejemplos elegidos se añaden los datos de mayor relevancia para el trabajo, que servirán para cálculos posteriores. La clasificación de los mismos en las zonas climáticas, eólicas y pluviométricas del Código Técnico es el conjunto de datos de mayor relevancia para los análisis posteriores.

| Id | Autor | Uso | Año | Altura | Municipio | Provincia | Z climá | Z pluvi | Z eólic | Referencia | C higr |
|----|---------------------------|------------------------|------|----------|----------------------------------|-----------|---------|---------|---------|---|--------|
| 18 | Oreka Arkitektura | Vivienda | 2006 | B | Matauko | Álava | D1 | III | C | https://orekabi | 3 |
| 17 | Oreka Arkitektura | Vivienda | 2006 | B+1 | Aramaio | Álava | D1 | III | C | https://orekabi | 3 |
| 16 | Sandra Bestraten, Emili H | Vivienda | 2007 | 4 m | Zaragoza | Zaragoza | D3 | IV | B | https://ecoarq | 3 |
| 19 | Sandra Bestraten y Emili | Vivienda | 2007 | B | Riudarenes | Girona | C2 | III | C | https://informe | 3 |
| 13 | Auquer Prats Arquitectes | Vivienda | 2008 | B | Pais | Girona | C2 | III | C | https://informe | 3 |
| 15 | Diego Garteiz y Paul Bas | Bodega de vinos | 2008 | 5 m | Lanciego | Álava | D1 | III | C | https://www.uj | 3 |
| 21 | Universidad de Valladolid | Rehabilitación iglesia | 2008 | | Sinovas | Burgos | E1 | IV | A | https://www.5.1 | 3 |
| 14 | Vier Arquitectos | Piscina cubierta | 2010 | 7 m | Toro | Zamora | D2 | IV | A | https://www.ar | 5 |
| 20 | Gabriel Barbeta, Esteban | Escuela infantil | 2010 | 5 m | Santa Eulàlia de R | Barcelona | C2 | III | C | https://informe | 3 |
| 3 | Edra Arquitectura | Vivienda | 2014 | B+1 | Ayerbe | Huesca | D2 | III | C | https://arquitec | 3 |
| 9 | Nordest arquitectura | Vivienda | 2019 | B+1 | Rupià | Girona | C2 | III | C | https://nordest | 3 |
| 7 | Arquitectura de terra | Centro de yoga | 2019 | interior | Sant Just Desvern | Barcelona | C2 | III | C | https://www.ar | 3 |
| 22 | Toledo y Heras Arquitect | Vivienda | 2020 | | Santa Cruz de Ten uz de Tenerife | | α3 | III | C | https://tharquit | 3 |
| 2 | Edra Arquitectura | Hotel | 2020 | B+3 | Monroyo | Teruel | D2 | II | B | https://arquitec | 53 |
| 6 | Munarq | Vivienda | 2021 | 4 m | Binissalem | Baleares | B3 | III | C | https://munarq | 3 |
| 12 | ZEST Architecture | Vivienda | 2021 | B | (Matarraña) | Teruel | D2 | II | B | https://www.ze | 3 |
| 5 | Edra Arquitectura | Vivienda Pública | 2021 | B+1 | Palma de Mallorca | Baleares | B3 | III | C | https://arquitec | 3 |
| 24 | Peris+Toral Arquitectes | Vivienda Pública | 2022 | B+4 | Ibiza | Baleares | B3 | III | C | https://tectonic | 3 |
| 11 | MVRDV + GRAS Reynés | Vivienda | 2022 | B+2 | Palma de Mallorca | Baleares | B3 | III | C | https://www.fe | 3 |
| 8 | Arquitectura de terra | Vivienda | 2022 | B+1 | Sant Cugat | Barcelona | C2 | III | C | https://arquitec | 3 |
| 4 | Edra Arquitectura | Vivienda | 2024 | B+1 | Abiego | Huesca | D2 | III | C | https://arquitec | 3 |
| 1 | Edra Arquitectura | Vivienda | 2024 | B+1 | Balaguer | Lleida | D3 | IV | C | https://arquitec | 3 |
| 10 | Atheleia arquitectura | Vivienda | 2024 | 3 m | El Vallés | Barcelona | C2 | III | C | https://www.fe | 3 |

Tabla 9: Recopilación de ejemplos. Elaboración propia

Del conjunto de ejemplos recopilado se seleccionan casos representativos de cada zona climática de invierno disponible para realizar un análisis en profundidad de su comportamiento térmico e higrotérmico, entre otros aspectos. Se prioriza para este análisis aquellos realizados en tapial de tierra de los que se encuentre disponible la mayor cantidad de información para realizar los dibujos y medidas correspondientes de la composición de sus muros.

En concordancia con el mapa anteriormente mencionado de la presencia de la tapia en la Península Ibérica, se observa también una ausencia de construcciones contemporáneas en las zonas costeras y de alta montaña. Esto dificulta contar con ejemplos a analizar en ciertas zonas climáticas de invierno, por lo que los análisis se centran en las zonas B, C y D.

Caso de estudio en zona climática B



Fig. 26: Imagen representativa – Munarq architects

| | |
|---------------------|---------------------------------|
| Nombre del proyecto | Ca na pau |
| Autor(es) | Munarq architects |
| Fecha | 2021-2024 |
| Ubicación | Binissalem (Mallorca, Baleares) |
| Zona climática | B3 |
| Zona pluviométrica | III |
| Zona eólica | C |

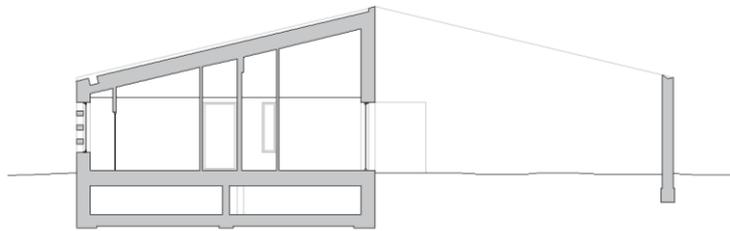


Fig. 27: Sección, E 1:300 – Elaboración propia

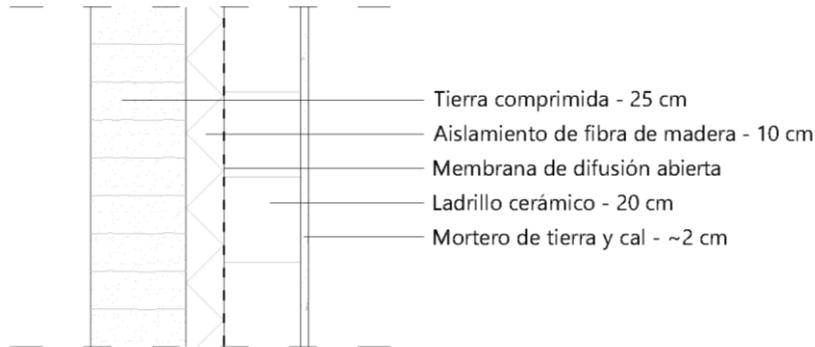


Fig. 28: Sección constructiva tipo de la fachada, E 1:20 – Elaboración propia

El caso elegido como representación de la zona climática de invierno B es una vivienda en Binissalem, en la isla de Mallorca. Además de la disponibilidad de información, resulta atractiva para el análisis la composición de sus muros de fachada, incorporando aislamiento térmico entre la tapia y un muro de ladrillo cerámico interior.

Se trata de una casa patio de planta rectangular, teniendo los espacios de vivienda y de patio superficies similares. La estructura de la cubierta se forma mediante vigas de madera entre las que se colocan bloques de paja que funcionan como aislamiento térmico. El muro perimetral del patio se realiza en todo su espesor en balasto, una variación de la técnica del tapial ejecutada con tierra mezclada con áridos de tamaños diversos, piedra y cal.

Munarq pone el énfasis del proyecto en los materiales elegidos que, como explica el estudio en su web, "se funden a la perfección con la naturaleza de los alrededores, enfatizando sostenibilidad

y armonía con el entorno. La tierra, la cal y las piedras se unen para formar la estructura, reflejando un compromiso con las técnicas de construcción tradicionales y los recursos locales.” (Munarq, 2024)

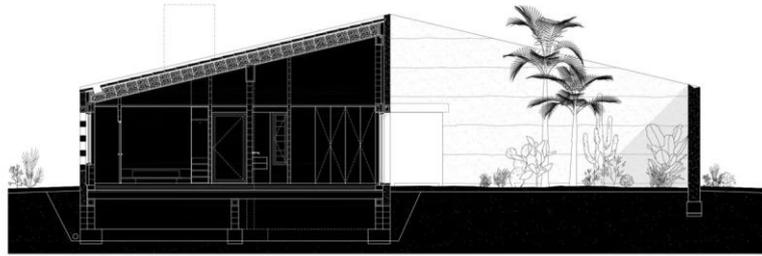


Fig. 29: Sección – Munarq architects

El patio, que ocupa toda la mitad sureste de la planta de la vivienda, actúa como espacio a medio camino entre el interior y el vasto campo exterior, un “recinto protegido” en palabras del propio estudio. En este espacio semicerrado tienen especial presencia los huecos abiertos al exterior, ofreciendo vistas del campo hacia distintas direcciones. Los frentes longitudinales mantienen la forma de un volumen completo con cubierta a dos aguas a la que le falta uno de los faldones. La dicotomía del espacio abierto y el cerrado, los acabados materiales del conjunto y el gesto de la cubierta *inacabada* genera una sensación de paso del tiempo en la casa, como si esta hubiera sido ocupada anteriormente con toda su superficie cubierta.

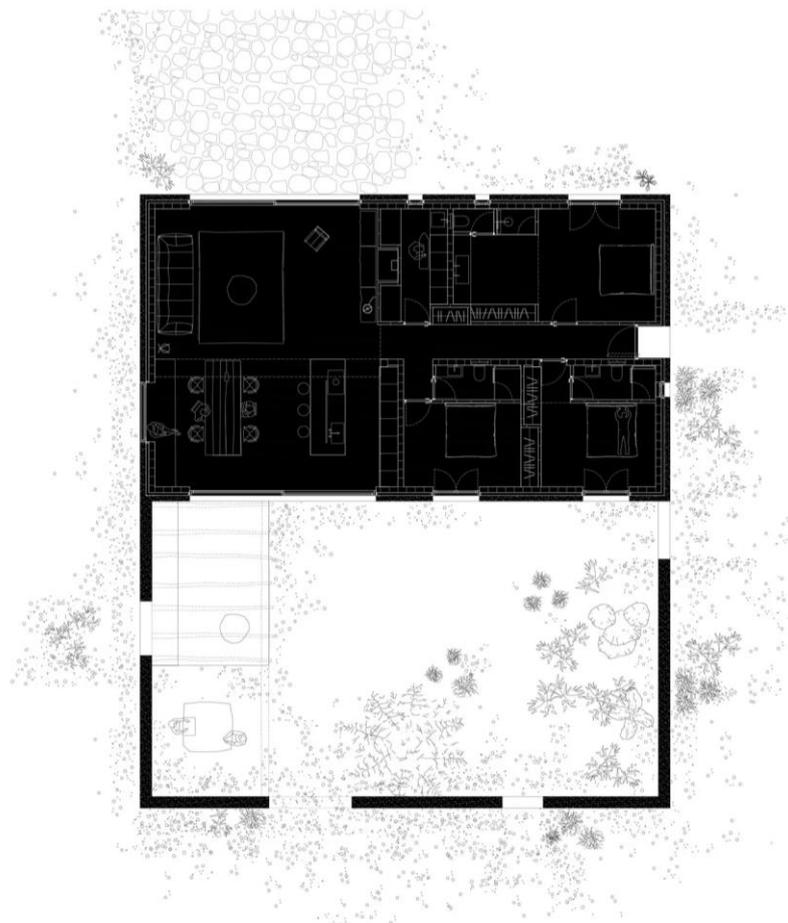


Fig. 30: Planta – Munarq architects



Para las fachadas que conforman el cerramiento de la parte cubierta, el muro de tierra constituye menos de la mitad de la sección, formando el acabado exterior de esta. Tras la tierra, un aislante térmico de fibra de madera ayuda a controlar la temperatura interior y, tras este, se levanta la pared de ladrillo interior. La impermeabilización se consigue con una membrana de difusión abierta entre la hoja de ladrillo y la de tierra, que “contribuye a la longevidad general del edificio al tiempo que mantiene un ambiente interior salubre”. Por otro lado, las particiones interiores, así como la cara interior de la hoja de ladrillo de la fachada, se cubren con un mortero de tierra y cal que da el acabado interior, contribuyendo también a mejorar el ambiente interior.



“Combinando materiales tradicionales con técnicas modernas, el sistema de muro de balasto crea un equilibrio armonioso entre funcionalidad y sostenibilidad, reflejando un profundo respeto por los principios ambientales y arquitectónicos.” (Munarq, 2024)



Fig. 31: Encofrados de madera – Munarq architects

Fig. 32: Relleno de los encofrados – Munarq architects

Fig. 33: Vista hacia el interior desde el patio – Munarq architects

Caso de estudio en zona climática C



| | |
|---------------------|-------------------------|
| Nombre del proyecto | Casa rural en L'Esparra |
| Autor(es) | BH arquitectura |
| Fecha | 2007 |
| Ubicación | L'Esparra (Girona) |
| Zona climática | C2 |
| Zona pluviométrica | III |
| Zona eólica | C |

Fig. 34: Imagen representativa – BH arquitectura

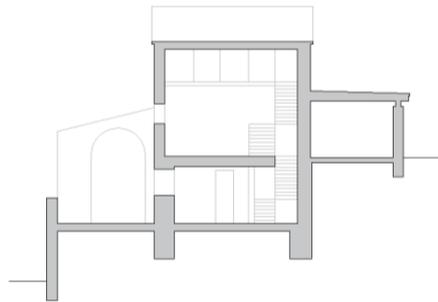


Fig. 35: Sección, E 1:300 – Elaboración propia

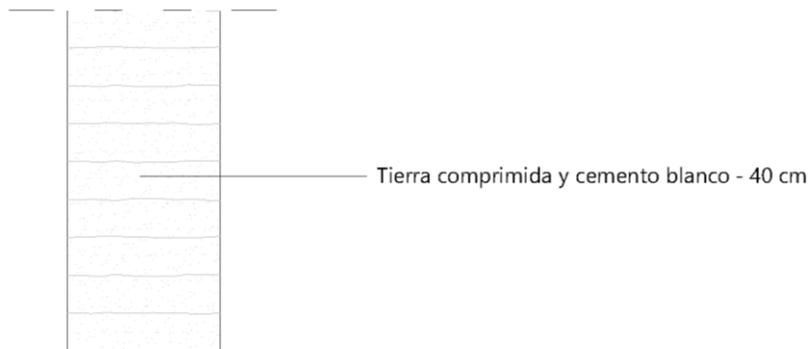


Fig. 36: Sección constructiva tipo de la fachada, E 1:20 – Elaboración propia

El ejemplo elegido para la zona climática C es la rehabilitación y ampliación de una casa tradicional en L'Esparra, en la provincia de Girona. Mientras que la antigua edificación se levanta con muros de mampostería, la ampliación se realiza en muros de tapia empleando tierra del lugar a la que se añade un 10% de cemento blanco. Sobre estos muros apoya una nueva cubierta de madera, generando un volumen nuevo de una sola planta en la cara norte del edificio.

El nuevo cuerpo que se adhiere a la casa funciona como acceso y sala de estar, con una terraza exterior cubierta. Los muros de tapia se ven interrumpidos por los huecos de ventanas, que tienen un desarrollo vertical de suelo a techo. Se evita así el problema de generar un dintel para el muro de tierra, siendo la viga longitudinal de la cubierta la que cumple esta función.



Fig. 37: Alzado norte – BH arquitectura

El desnivel en el terreno se refleja en el desarrollo de la vivienda en la sección transversal, teniendo el exterior a niveles distintos, casi tres metros más alto en su lado norte con respecto del sur. El acceso del nuevo volumen generado aporta una mayor relación entre el conjunto del edificio y su parte exterior al norte.



Fig. 38: Sección transversal – BH arquitectura

Fig. 39: Planta baja – BH arquitectura

El desarrollo longitudinal de la vivienda se corresponde en el nuevo volumen, prolongando la cubierta de madera y el suelo para generar el espacio de porche.



Fig. 40: Vista del nuevo volumen – BH arquitectura

Caso de estudio en zona climática D



| | |
|---------------------|-------------------------|
| Nombre del proyecto | Casa de tapia en Ayerbe |
| Autor(es) | Edra Cultura y Natura |
| Fecha | 2014 |
| Ubicación | Ayerbe (Huesca) |
| Zona climática | D2 |
| Zona pluviométrica | III |
| Zona eólica | C |

Fig. 41: Imagen representativa – D'Arquer, X.

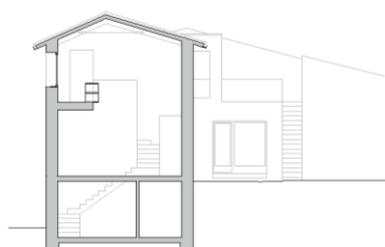


Fig. 42: Sección, E 1:300 – Elaboración propia

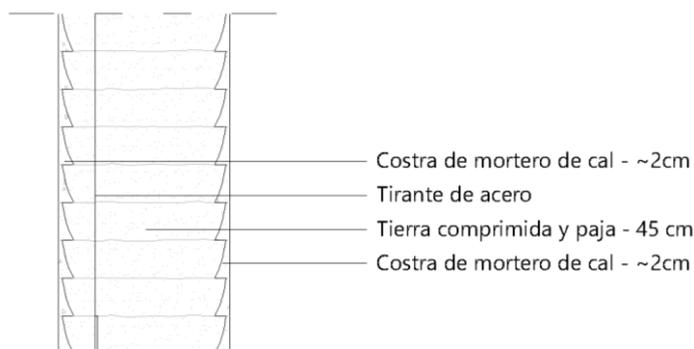


Fig. 43: Sección constructiva tipo de la fachada, E 1:20 – Elaboración propia

Por la disponibilidad de información se eligen dos obras que, por su similitud en la composición de sus muros, permiten comparar el funcionamiento de una misma fachada con distinto espesor. En este caso, ambos muros son realizados enteramente en tapia calicostrada, con algunos refuerzos metálicos puntuales y elementos de madera para la formación de huecos.

El primer caso analizado de la zona climática D es una vivienda en Ayerbe, provincia de Huesca. La construcción de tapia se levanta sobre un primer nivel semienterrado de hormigón, que alberga usos de instalaciones que requieren de una mayor protección contra el fuego, así como el garaje. La casa se abre hacia el patio al sur, con huecos de mayores dimensiones.

El énfasis del proyecto se pone en el uso de materiales locales y su desempeño energético. "El proyecto está inspirado en las construcciones locales antiguas de tierra en cuanto a orientación, morfología y materiales locales. (...) Piedra, tierra y paja representan el 80% del peso del edificio,

y todas son kilómetro 0. También se han utilizado cal hidráulica, tejas, madera y lana de oveja que proceden de un radio de 150 km.” (Edra Cultura y Natura, 2016)

De un estudio en profundidad de las técnicas de construcción tradicionales de la zona surgen las claves del proyecto, del que destacan los conocimientos en cuanto a “orientación, morfología, materiales, adaptación al medio material y climático, utilización de medios técnicos y humanos locales y gestión tradicional del usuario” (Edra Cultura y Natura, 2016). El diseño solar pasivo y bioclimático es el punto en que el estudio hace más hincapié, aprovechando la masa térmica de los muros de tierra. También destaca la importancia del uso de materiales sin aditivos e independientes de procesos industriales, siendo por tanto más salubres y con muy bajo impacto en el entorno, puesto que, tal y como explica el estudio en su web, “podrán reintroducirse directamente en la naturaleza al finalizar la vida útil del edificio siendo nuevamente materias primas.”

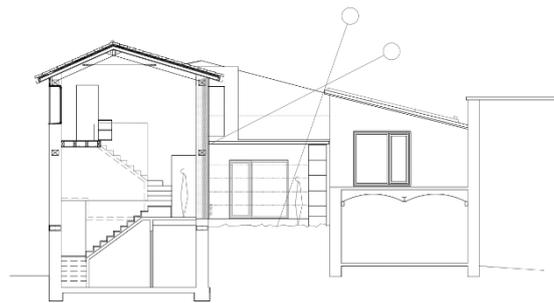


Fig. 44: Alzado Norte – Edra Cultura y Natura

Fig. 45: Sección Transversal – Edra Cultura y Natura



Fig. 46: Vista desde el patio – D’Arquer, X.

Sobre la planta semienterrada de hormigón, un forjado de viguetas y bovedillas curvas cerámicas, del que se levanta el muro de tierra. La tapia calicostrada de 45 cm de espesor se compone de tierra y paja de cebada, además del mortero de cal hidráulica de las costras que se ejecutan al tiempo que se levanta el muro. En el interior, los acabados son de revocos de arcilla y carpintería y pavimentos de madera de pino.

En la cara sur, los huecos adquieren una dimensión mayor con el fin de maximizar la captación solar en invierno. En esta ocasión, a excepción del de mayores dimensiones, los huecos necesitan de un dintel, mediante una viga de madera que se dispone en el interior de los muros de tierra y queda oculto desde el exterior.

Dos volúmenes adicionales se disponen en torno al patio, siendo el cerramiento de uno de ellos realizado en tapia igualmente.

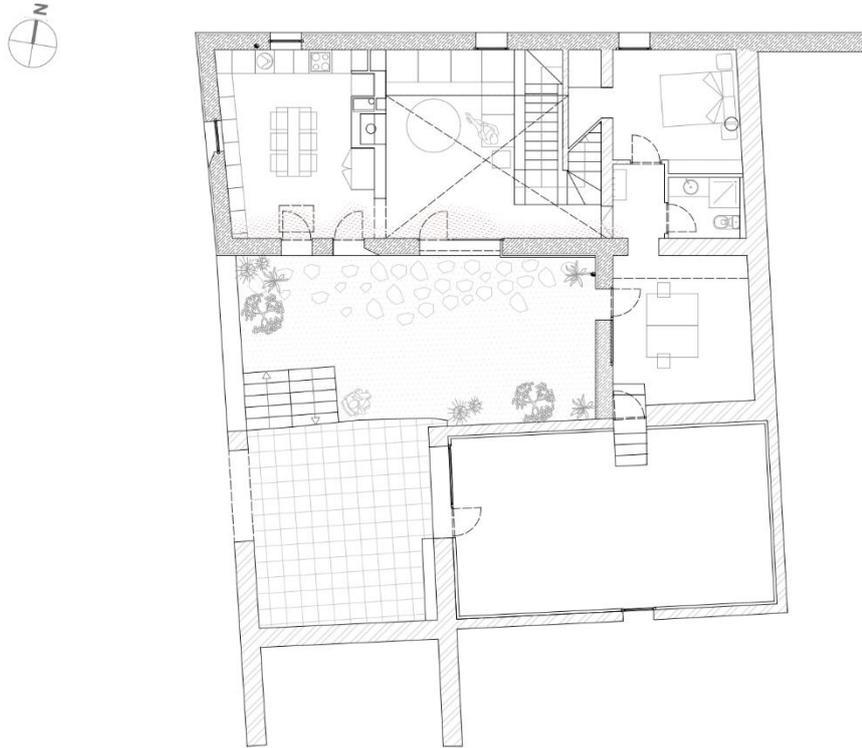


Fig. 47: Planta baja – Edra Cultura y Natura

Caso de estudio en zona climática D



| | |
|---------------------|---------------------------|
| Nombre del proyecto | Hotel "Torre del Marqués" |
| Autor(es) | Edra Cultura y Natura |
| Fecha | 2020 |
| Ubicación | Monroyo (Teruel) |
| Zona climática | D2 |
| Zona pluviométrica | III |
| Zona eólica | B |

Fig. 48: Imagen representativa – Edra Cultura y Natura

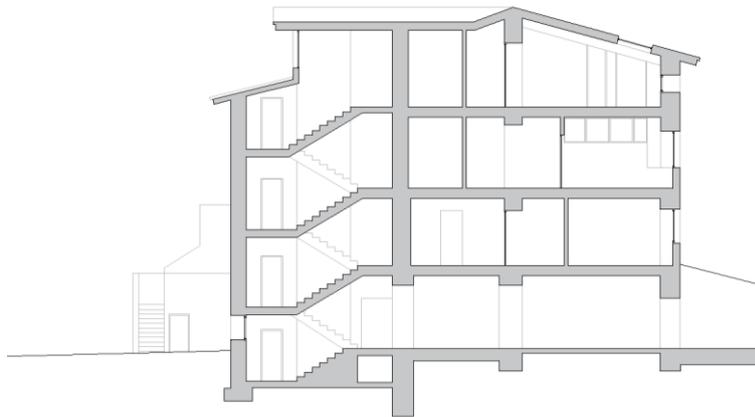


Fig. 49: Sección, E 1:300 – Elaboración propia

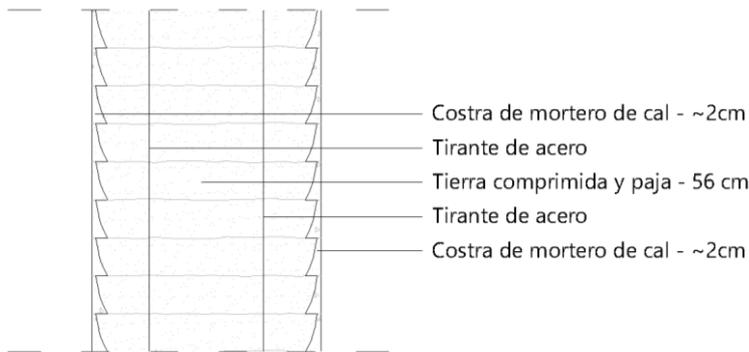


Fig. 50: Sección constructiva tipo de la fachada, E 1:20 – Elaboración propia

El segundo caso para esta zona climática es la ampliación de una antigua *masía* o *mas* del siglo XVII que actualmente se utiliza como hotel en Monroyo, provincia de Teruel. El muro de tapia presenta la misma composición que el caso de Ayerbe, aunque con un espesor mayor dada la altura del mismo, llegando a alcanzar los 9 metros y medio. En este caso, sólo algunos muros de la construcción se realizan en tapia, siendo la edificación original de piedra.

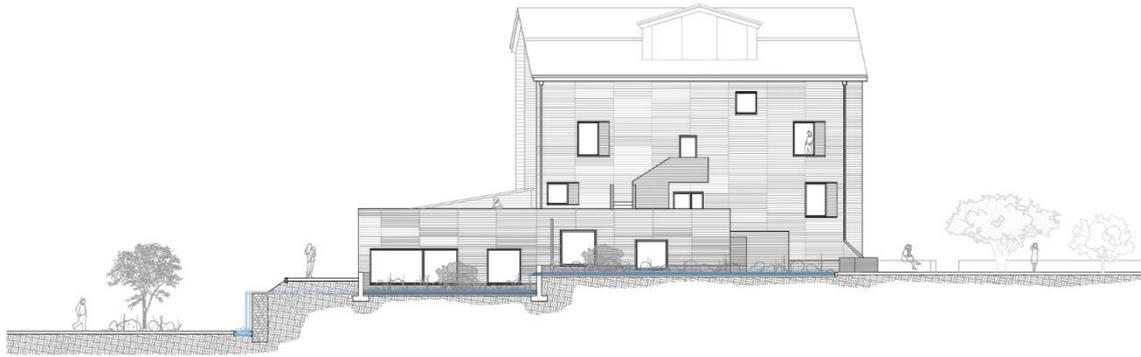


Fig. 51: Alzado Norte – Edra Cultura y Natura

El proyecto se explica haciendo referencia al uso tradicional del edificio. “La *masía* tiene carácter identitario del territorio, con funcionamiento autónomo y sostenible; integrada en el paisaje, se abastece de él sin generar impacto, de forma ecológica, equilibrada y duradera en el tiempo. (...) Como en la tradicional, la nueva *masía*, al final de su vida útil reintegrará sus materiales directamente en la naturaleza. Para conseguir este cierre del ciclo de recursos, el 90% del peso de materiales de construcción utilizados son km0.” (Edra Cultura y Natura, 2020)

La ampliación en tapia se realiza en la cara norte del edificio, extendiendo su volumen principal e incorporando otros de menor dimensión. La gestión del agua también es punto clave de la intervención, que no sólo se queda en el edificio, sino que pretende reactivar el paisaje productivo asociado a él. Así pues, se reactivan los cultivos y la gestión del entorno y, abasteciéndose del paisaje una vez más, de los huertos y la gestión forestal se produce la astilla que sirve como biomasa para ser reutilizada en la producción energética del edificio.

“Para la reducción de la demanda energética se diseña un minucioso comportamiento bioclimático que aprovecha la energía solar para calentar el edificio en invierno. Así mismo se potencia la inercia térmica mediante la técnica de los muros masivos de tapia de tierra local y paja de cebada de la propia finca en la ampliación del edificio.” (Edra Cultura y Natura, 2020)



Fig. 52: Sección constructiva de la fachada norte – Edra Cultura y Natura



Fig. 53: Tapia calicostrada en spa – Edra Cultura y Natura



Fig. 54: Masía s.XXI – Edra Cultura y Natura

De nuevo, los materiales sin aditivos y ajenos a procesos industriales son protagonistas en la construcción, con especial interés en elegir artesanos y fabricantes de proximidad. “Desarrollamos una arquitectura que permanece, que se suma a la preexistencia dando continuidad formal y material, con respeto por la cultura constructiva local pero sin prejuicio por la innovación y la reducción del impacto ambiental. La arcilla, el yeso, la piedra y la madera, la paja, el cáñamo y la luz son los materiales que modelan los espacios del edificio. Estos espacios saludables, libres de aditivos y toxicidad permiten al usuario reconectarse y percibir la arquitectura a través de todos los sentidos.” (Edra Cultura y Natura, 2020)

En este caso, la ampliación de tapia es un complemento más del paisaje natural, hablando de la conexión del edificio con su entorno y su huella en la historia de la zona.

IV.B.b. Análisis de los casos en base al DB-HE

Para comparar el comportamiento higrotérmico de las soluciones constructivas seleccionadas, analizamos el caso concreto de cada una en base a las exigencias descritas en el apartado III.A *Parámetros de análisis en base a las exigencias básicas del CTE.*

La fachada propuesta para el caso de la zona climática B está constituida, de exterior a interior, por una primera capa de 25 cm de tierra comprimida, seguida de 10 cm de aislamiento de fibra de madera, una membrana de difusión que sirve como barrera de vapor, un ladrillo cerámico de 20 cm y un mortero de tierra y cal por el interior que supondremos tendrá un espesor en torno a los 2 cm.

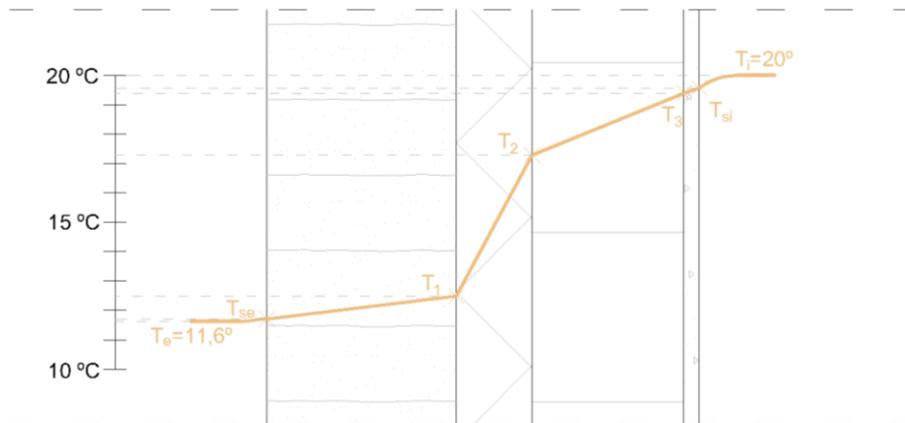


Fig. 55: Gráfica de temperaturas intersticiales. Ca na pau. Elaboración propia

Según las características de cada material de conductividad, densidad, calor específico y resistencia a la difusión de vapor recogidas en la tabla 1 del anexo, es posible realizar los cálculos correspondientes para estimar su comportamiento higrotérmico. Realizando el cálculo de temperaturas intersticiales se observa que, como era de esperar, el mayor aumento de temperatura se produce entre la superficie exterior y la interior del aislamiento térmico. Con esto se obtiene la gráfica de variación de temperatura a lo largo de la sección de la fachada, partiendo de la temperatura para el mes más frío que recoge el Código Técnico en su anexo B (*DB-HE Anejo B Zonas climáticas*) para esta ubicación, Mallorca, 11,6 °C en enero, hasta alcanzar los 20 °C considerados como temperatura interior.

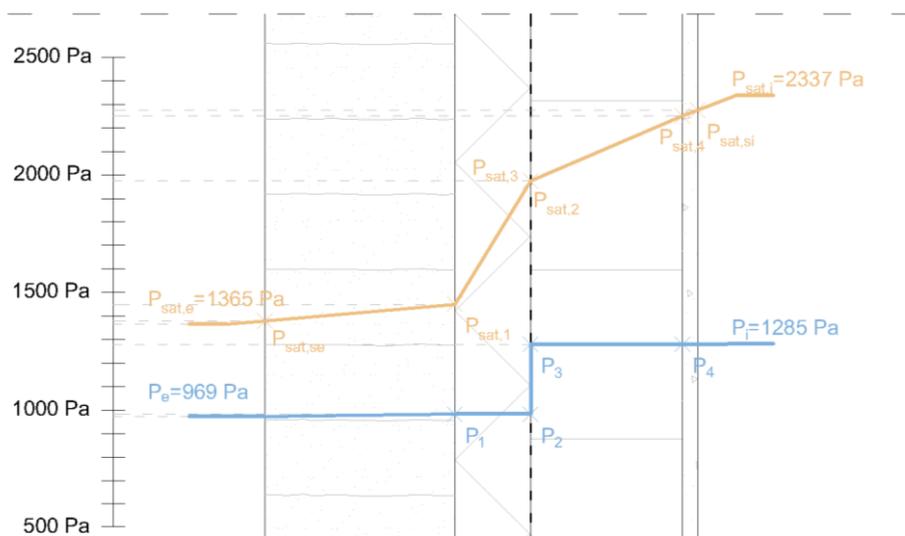


Fig. 56: Gráfica de presiones intersticiales. Ca na pau. Elaboración propia

Siguiendo las indicaciones del segundo documento de apoyo al DB HE (DB-HE/2 *Comprobación de limitación de condensaciones superficiales e intersticiales en los cerramientos*), se realiza el cálculo de las presiones de vapor y de saturación intersticiales para comprobar que no existe riesgo de condensaciones intersticiales en el muro. El valor de la cantidad de presión de saturación posible tiene que ser superior al valor de la presión de vapor para evitar posibles condensaciones intersticiales y en consecuencia el deterioro de los materiales.

Superponiendo los valores de presiones sobre la sección, se observa cómo la membrana de difusión afecta a las presiones de vapor, actuando como barrera. Los valores de presión de vapor en ningún punto superan a los de saturación, por lo que podemos decir que el diseño de la sección contribuye a evitar condensaciones intersticiales.

Respecto a la evaluación del comportamiento de la sección en cuanto a su inercia térmica, se calcula su masa térmica (2754 J/K) y masa térmica útil (1561 J/K), para comparar los dos valores y evaluar cuánta cantidad de la masa térmica total del muro es efectiva en el espacio interior para almacenar energía (57%). La tabla 1 del anexo muestra los valores característicos de los materiales de la sección necesarios para los cálculos. Como la capa tierra comprimida está ubicada entre el ambiente exterior y la capa de aislamiento térmico, en este caso el tapial no almacena calor del espacio interior de forma efectiva, pasando a ser el ladrillo cerámico la capa que contribuye principalmente a la inercia térmica.

Para el caso de la zona climática C se da una situación contraria a la anterior, donde la fachada está compuesta únicamente por la capa de tierra comprimida de 40 centímetros. Al componerse la fachada de un único material, la temperatura variará de forma constante a través todo su espesor.

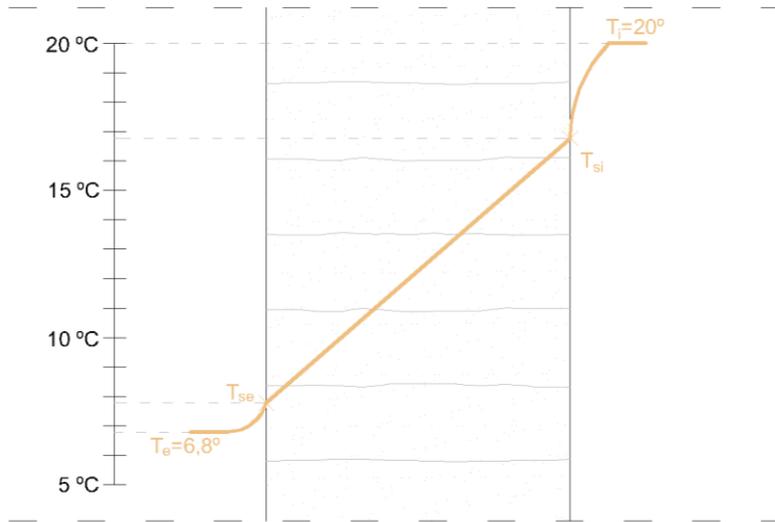


Fig. 57: Gráfica de temperaturas intersticiales. Casa rural en L'Esparra. Elaboración propia

Con las características de conductividad, densidad, calor específico y resistencia a la difusión de vapor de la tapia recogidas en la tabla 2 del anexo, se realizan los cálculos necesarios para analizar el comportamiento higrotérmico de la fachada. Para este caso sólo son necesarios los cálculos de temperaturas superficiales exterior e interior, con los que se elabora la gráfica de variación de temperatura partiendo del valor del mes más frío dado por el Código Técnico en su anexo B (*DB-HE Anejo B Zonas climáticas*) para Girona, 6,8 °C en enero, aumentando a través de la sección hasta los 20 °C interiores.

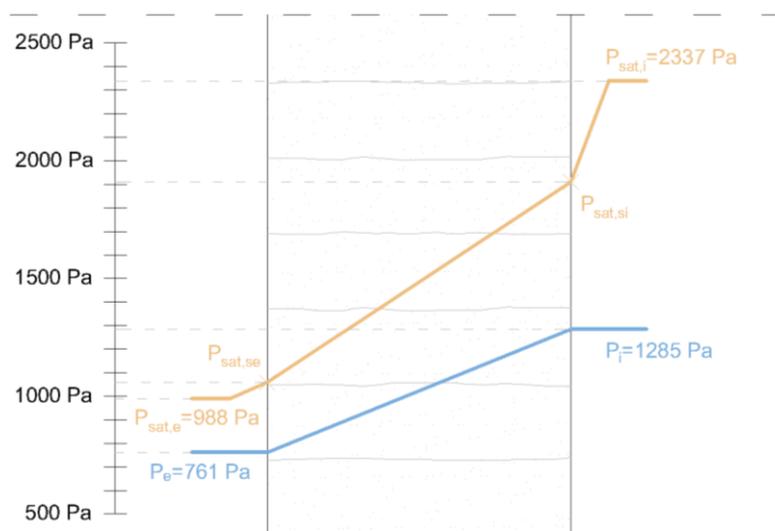


Fig. 58: Gráfica de presiones intersticiales. Casa rural en L'Esparra. Elaboración propia

Continuando con el segundo documento de apoyo al DB HE (*DB-HE/2 Comprobación de limitación de condensaciones superficiales e intersticiales en los cerramientos*) se realizan las comprobaciones relativas a las condensaciones intersticiales. Al componerse la fachada de una

única capa, basta con obtener los valores de presiones exteriores e interiores, así como la presión de saturación de ambas superficies, para elaborar la gráfica. Los valores de presión de saturación son superiores a los de presión de vapor en todo el recorrido de la sección, por lo que se comprueba que no existen condensaciones en el interior del muro.

La evaluación del comportamiento de la sección de este caso en lo relativo a inercia térmica se realiza calculando la masa térmica del muro (835 J/K) y la masa térmica útil (550 J/K). Comparando ambos valores se obtiene cuánta cantidad de la masa térmica de la fachada almacena energía aprovechable para el espacio interior (66%). Los valores del material necesarios para estos cálculos se muestran en la tabla 2 del anexo.

En la zona climática D, los dos edificios a analizar son de una composición similar, pero con variación en el espesor de sus fachadas. En la vivienda de Ayerbe, el muro de tapia calicostrada alcanza los 45 centímetros de espesor, de los que se estima que la costra de mortero de cal supondrá una media de 2 centímetros a cada lado. Por lo tanto, la composición queda con 2 cm de mortero de cal, 41 cm de tierra comprimida y otros 2 cm de mortero de cal.

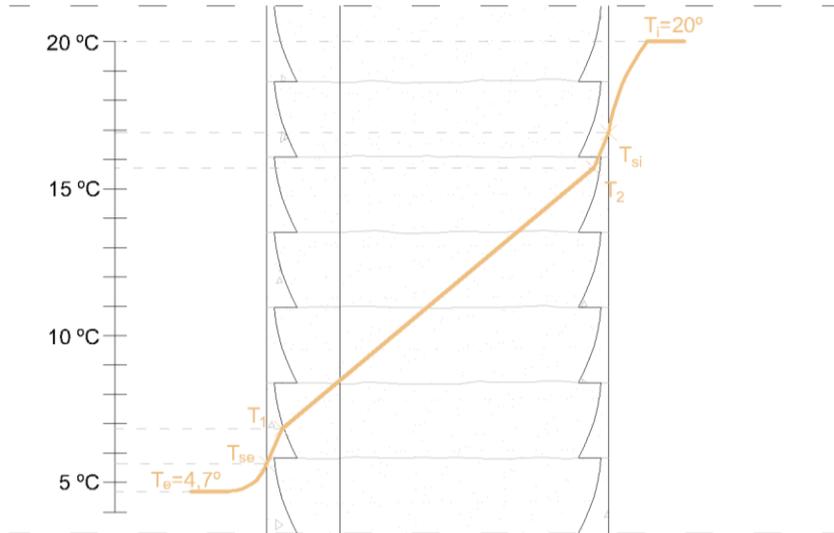


Fig. 59: Gráfica de temperaturas intersticiales. Casa de tapia en Ayerbe. Elaboración propia

Con las características de los materiales recogidas en la tabla 3 del anexo, es posible realizar los cálculos correspondientes para estimar el comportamiento higrotérmico de la fachada. Se calculan las temperaturas intersticiales y se toma el valor de temperatura para el mes más frío recogido por el Código Técnico en su anexo B (*DB-HE Anejo B Zonas climáticas*), que para Huesca es de 4,7 °C en enero. Partiendo de este dato, se elabora la gráfica de variación de temperatura hasta alcanzar los 20 °C interiores, con la que se observa que la temperatura experimenta una variación mayor al atravesar la costra de mortero. Esto se debe a que el valor considerado de la

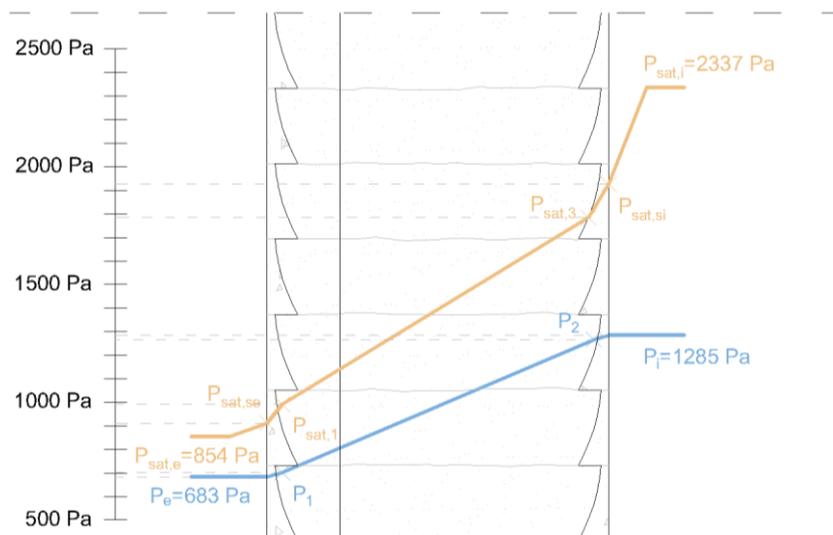


Fig. 60: Gráfica de presiones intersticiales. Casa de tapia en Ayerbe. Elaboración propia

conductividad de la tierra es en torno a tres veces superior al del mortero de cal, aunque esto no supone una diferencia tan notable como la de materiales de aislamiento térmico.

En lo relativo al segundo documento de apoyo al DB HE (DB-HE/2 *Comprobación de limitación de condensaciones superficiales e intersticiales en los cerramientos*), se realizan los cálculos de presiones intersticiales para comprobar que no existe riesgo de condensaciones en el interior del muro de fachada. Se obtienen los valores de presión de vapor y de saturación para las superficies interior y exterior de la fachada y para los puntos en que cambia el material del muro. Se comprueba elaborando la gráfica que en ningún punto la presión de vapor es mayor que la de saturación y, por tanto, no existe riesgo de que se produzcan condensaciones intersticiales.

Para evaluar la inercia térmica de la sección, se calcula la masa térmica de la fachada (896 J/K) y la masa térmica útil (389 J/K). Comparando los dos valores, se obtiene que el 43% de la masa térmica del muro es útil, por lo que más de la mitad de la energía acumulada se vierte al exterior.

El caso del hotel en Monroyo es de igual composición al de Ayerbe, pero con una sección total de 60 centímetros. De igual modo al caso anterior, se considera un espesor estimado de 2 centímetros para la costra de cal a cada lado del muro, resultando la composición de la sección en 2 cm de mortero de cal, 56 cm de tierra comprimida y otros 2 cm de mortero de cal.

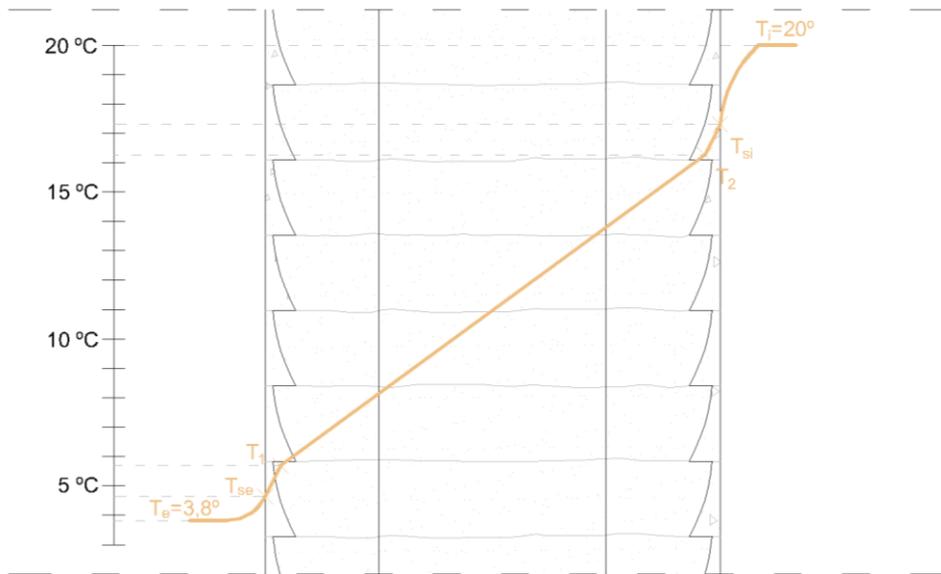


Fig. 61: Gráfica de temperaturas intersticiales. Hotel "Torre del Marqués". Elaboración propia

Con los valores recogidos en la tabla 4 del anexo para las características de los materiales, se realizan los cálculos necesarios para obtener las temperaturas intersticiales. En el anexo B (*DB-HE Anejo B Zonas climáticas*) del Código Técnico, se obtiene el valor de temperatura mínima para Teruel, en este caso 3,8°C en enero. Pese a ubicarse el proyecto a una distancia considerable de la capital de provincia, la altitud sobre el nivel del mar es muy similar, por lo que se considera que el valor de temperatura para Teruel es válido para Monroyo. Se elabora la gráfica de variación de temperatura hasta alcanzar los 20 °C interiores. De igual modo al caso anterior, dado que los valores de conductividad tomados son los mismos, la variación de temperatura es mayor para el mortero de cal. No se toma en cuenta el impacto de los refuerzos metálicos dado que estos no suponen una capa en la sección del muro, sino que se colocan de forma puntual.

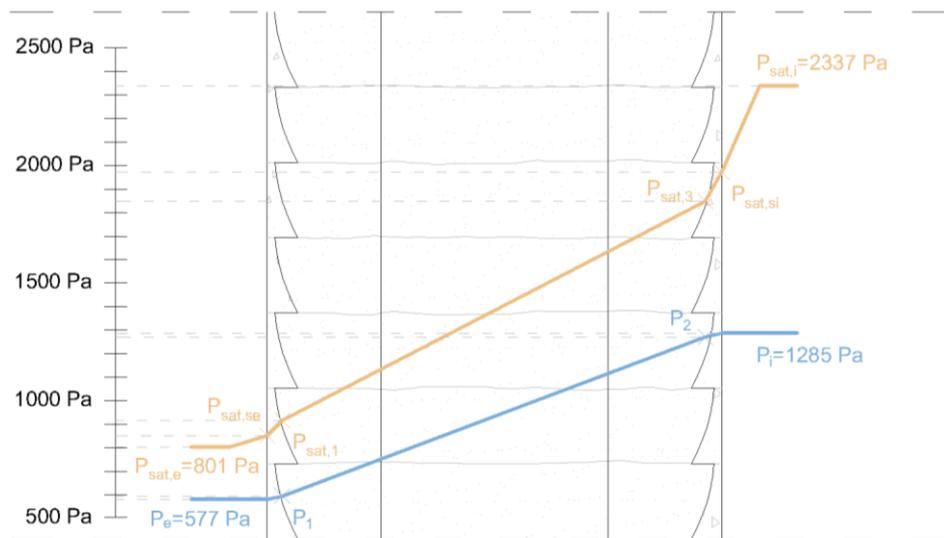


Fig. 62: Gráfica de presiones intersticiales. Hotel "Torre del Marqués". Elaboración propia

Para la comprobación de riesgo de condensaciones intersticiales indicada en el documento de apoyo al DB HE (DB-HE/2 *Comprobación de limitación de condensaciones superficiales e intersticiales en los cerramientos*), se calculan de nuevo los valores de presión de saturación y presión de vapor necesarios para elaborar las gráficas. El valor de la presión de vapor varía de forma casi uniforme a lo largo de la sección de la fachada, manteniéndose siempre por debajo de la presión de saturación, por lo que se puede afirmar que no existe riesgo de condensaciones intersticiales en el muro.

De nuevo se evalúa el comportamiento de la fachada en lo relativo a inercia térmica calculando la masa térmica de la misma (1209 J/K) y su masa térmica útil (538 J/K). Mediante la comparación de ambos valores se obtiene que el 45% de la masa térmica es útil y efectiva en el espacio interior para almacenar energía.

IV.B.c. Análisis de los casos en base al DB-HS

Para comenzar a analizar el edificio según las exigencias del Documento Básico de Salubridad, necesitamos conocer las zonas pluviométrica y eólica del mismo. En el caso de la vivienda situada en Mallorca, su ubicación corresponde con la zona pluviométrica III y la zona eólica C según la información reflejada en el apartado 2.3.1 del Documento Básico de Salubridad (DB-HS). El edificio se encuentra rodeado por una explotación agraria, por lo que, pese a la presencia de algunos árboles, se considera el tipo de terreno II (terreno rural llano sin obstáculos ni arbolado de importancia). Como consecuencia, la clase de entorno será E0, el grado de exposición al viento V2 y el grado de impermeabilidad mínimo que se exige a las fachadas es 3. Con este último valor ya podemos conocer las condiciones de las soluciones constructivas de la fachada dadas según la tabla 2.7 *Condiciones de las soluciones de fachada* (DB-HS 2.3.2).

Se considera que la hoja principal de la fachada es la hoja de ladrillo cerámico perforado y que la capa de tierra, tapia, actúa como revestimiento exterior. Se plantean dos combinaciones de condiciones constructivas alternativas en el cumplimiento normativo, con el fin de "limitar el riesgo previsible de presencia inadecuada de agua o humedad en el interior del edificio y en su cerramiento" (fachada), "como consecuencia del agua procedente de precipitaciones atmosféricas, de escorrentías, o de condensaciones, disponiendo medios que impidan su penetración o, en su caso permitan su evacuación sin producción de daños" (CTE DB-HS, p. 3).

Dado que la posición del aislamiento térmico es en la cara exterior de la hoja principal, de las dos combinaciones normativas propuestas como condiciones constructivas se analiza la constituida por R1+C2.

Para el cumplimiento de la condición constructiva R1, el revestimiento exterior, en este caso analizado la capa de tierra comprimida tapia, debe tener resistencia media a la filtración. Al tratarse por su ejecución de un "revestimiento (capa material) continuo", la resistencia media a la filtración se consigue cumpliendo los siguientes requisitos según el CTE DB HS (2.3.2.2):

- Espesor comprendido entre 10 y 15 mm. La capa de tierra comprimida, tapia cuenta con un espesor de 250 mm
- Adherencia al soporte suficiente para garantizar su estabilidad. En este caso la tapia es estable por sí misma dado que cuenta con un espesor suficiente en relación con la altura máxima que alcanza para considerarse autoportante.
- Permeabilidad al vapor suficiente para evitar su deterioro como consecuencia de una acumulación de vapor entre él y la hoja principal. Tal y como se ha demostrado en la comprobación de comportamiento higrotérmico, la sección no presenta problemas de aparición de condensaciones intersticiales.
- Adaptación a los movimientos del soporte y comportamiento aceptable frente a la fisuración. Por sus características constructivas y la técnica empleada, se considera que no se verá afectada por pequeñas deformaciones y movimientos de la hoja principal.
- Cuando se dispone en fachada el aislante por el exterior de la hoja principal, debe existir compatibilidad química con el aislante y disposición de una armadura constituida por una malla de fibra de vidrio o de poliéster. El aislante de fibra de madera que separa la tapia de la hoja principal no presenta problemas de compatibilidad con la tierra compactada. No es necesaria la incorporación de armadura en la tapia por la estabilidad ya mencionada de la capa.

Para la condición constructiva C2, relativa a la composición de la hoja principal, se exige un espesor alto, es decir, 1 pie de ladrillo o 24 cm de bloque o piedra. Si se considera como hoja

principal el ladrillo de 20 cm no alcanzaría a cumplir esta condición, aunque se puede estimar que es suficiente dado el espesor de la tierra y la presencia de membrana de difusión.

Para los encuentros y soluciones, la primera exigencia indicada que interesa para este caso es la del arranque de la fachada desde la cimentación. En este punto se indica que se habrá de disponer una barrera impermeable para impedir el ascenso de la humedad del suelo por capilaridad. Dicha barrera deberá cubrir todo el espesor del muro de fachada a un mínimo de 15 cm por encima del suelo exterior. Dado que la información disponible no llega al nivel de detalle necesario, se supone que existirá esta barrera en la altura indicada o se habrá adoptado una solución similar.

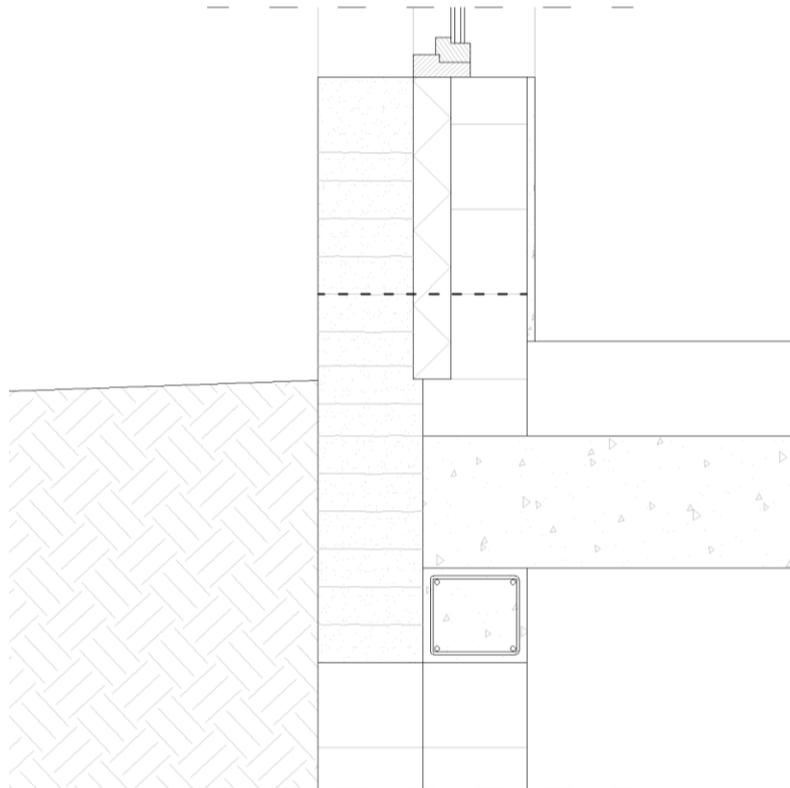


Fig. 63: Altura de la supuesta barrera impermeable, E 1:20 – Elaboración propia

La próxima exigencia que resulta de interés para este caso es la del alféizar. Si bien la solución habitual es la de disponer un vierteaguas, la diferencia en el material que forma los huecos y la composición de los mismos, reduciendo considerablemente las aberturas al exterior como una celosía, indica que se ha optado por una solución distinta con el fin de dotar de un carácter propio a estos elementos al tiempo que se mantienen aislados de humedad. De este modo, los únicos huecos de grandes dimensiones que aparecen en las fachadas son los de las puertas y las aberturas realizadas en el patio.



Fig. 64: Vista exterior – Munarq architects

Para cumplir con la exigencia relativa a la evacuación de agua de la cubierta con objeto de evitar que alcance la fachada, el agua de lluvia se recoge por un conducto hecho en el propio faldón de la cubierta paralelo a la cornisa y a unos 50 cm de esta. Este conducto evacúa por las fachadas laterales en una abertura generada con piezas cerámicas.

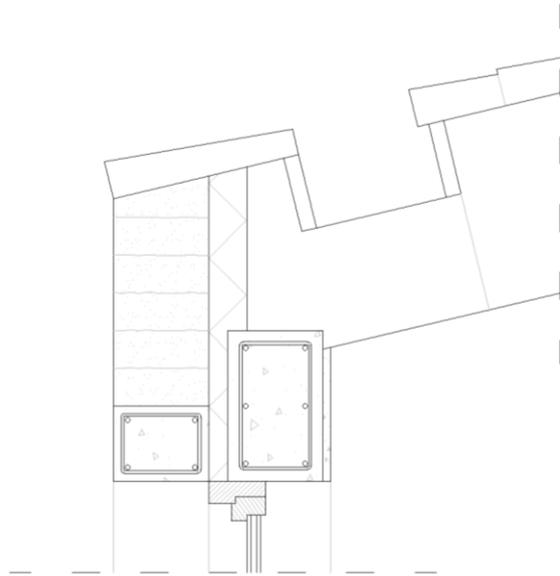


Fig. 65: Detalle de la cornisa, E 1:20 – Elaboración propia



Fig. 66: En la esquina de la fachada, abertura de evacuación del conducto de cubierta – Munarq architects (Imagen adaptada)

La casa de L'Esparra, por su ubicación, pertenece a la zona pluviométrica III y zona eólica C, según se indica en el apartado 2.3.1 del Documento Básico de Salubridad (DB-HS). Dada la densidad de árboles en el entorno inmediato del edificio, se considera que su emplazamiento es un terreno de tipo IV (forestal), por lo que la clase de entorno será E1 y su grado de exposición al viento V3. Finalmente se obtiene que el grado de impermeabilidad mínimo exigido para las fachadas es 3, por lo que se pueden obtener las condiciones de las soluciones constructivas de la tabla 2.7 *Condiciones de las soluciones de fachada* (DB-HS 2.3.2).

Para el grado de impermeabilidad mínimo exigido 3 y dado que la fachada no cuenta con revestimiento exterior, la norma plantea cuatro combinaciones de condiciones constructivas, de las que se analiza la que se constituye por B1+C2+J2+N2, dado el espesor más que suficiente de la hoja principal.

La condición B1 indica que debe disponerse barrera de resistencia media a la filtración, considerando como tal una cámara de aire sin ventilar o un aislante no hidrófilo que se dispone en la superficie interior de la hoja principal.

La condición C2 que garantiza la estabilidad de la hoja principal expone que esta deberá tener un espesor alto. Dado que no indica el espesor necesario en una fachada de tierra, nos referimos al espesor mínimo que indica para bloque cerámico, bloque de hormigón o piedra natural. Frente a los 24 cm exigidos para estos materiales, los 40 cm de espesor de la tapia se consideran suficientes para cumplir con esta condición.

Las siguientes condiciones J2 y N2 se refieren a la resistencia a la filtración de las juntas de las piezas y del revestimiento intermedio respectivamente. Dado que la fachada es monolítica y no está compuesta por piezas, no se tienen en cuenta las exigencias de estas condiciones constructivas.

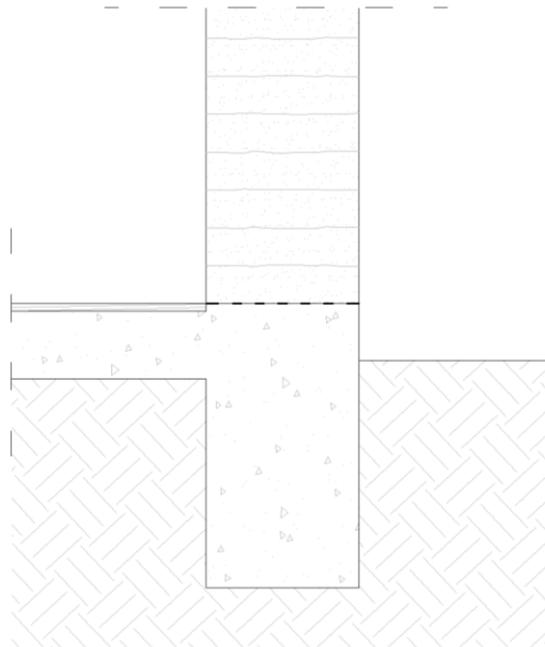


Fig. 67: Posición de la barrera impermeable, E 1:20 – Elaboración propia

En lo relativo a encuentros y soluciones en detalle, la barrera impermeable del arranque de la fachada se dispondrá en el cambio de material entre la solera de hormigón y el muro de tapia, para evitar el ascenso de la humedad por capilaridad.

Para los huecos de las ventanas, el vierteaguas no forma parte del muro de fachada, ya que estos huecos tienen un recorrido vertical completo desde la solera hasta la estructura de la cubierta.

Para evitar que el agua de la cubierta discurra por la fachada, se dispone a lo largo de toda la cornisa de un canal de evacuación, por lo que queda satisfecha la última exigencia del documento relativa a las fachadas.

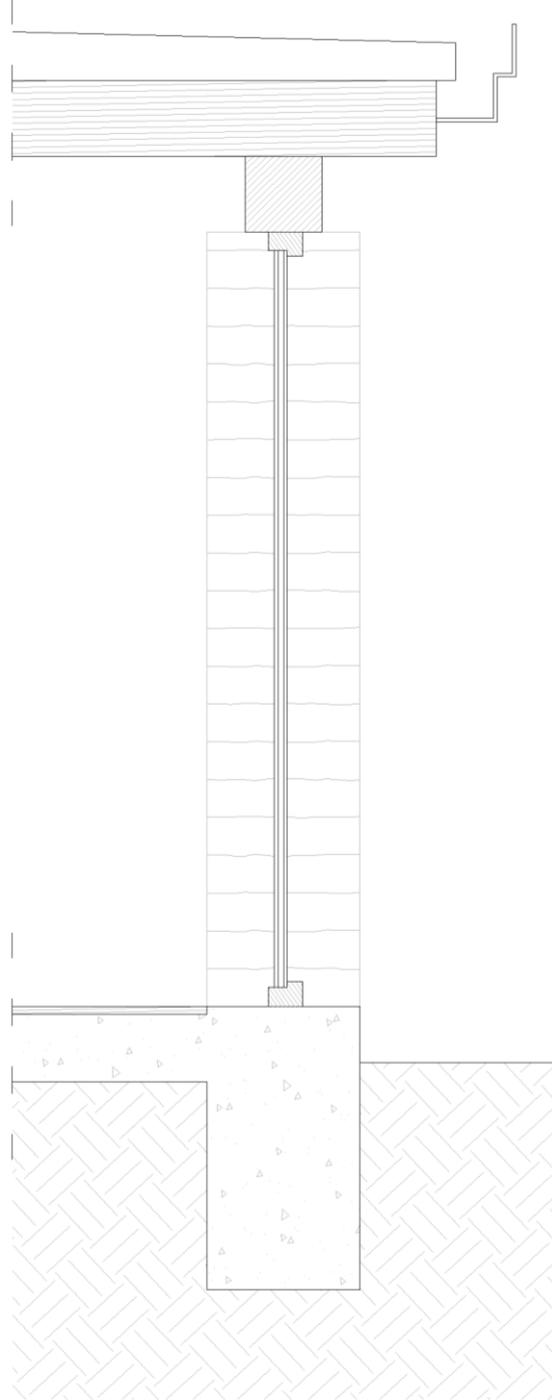


Fig. 68: Sección por la carpintería, E 1:20 – Elaboración propia

Los dos casos de la zona climática D se encuentran en zonas eólicas y pluviométricas distintas, y tienen entornos muy diferentes. En primer lugar, Ayerbe se encuentra en la zona pluviométrica III y eólica C, según el apartado 2.3.1 del Documento Básico de Salubridad (DB-HS). La vivienda se edifica en una parcela del casco urbano de la localidad, por lo que el terreno del entorno inmediato es de tipo IV (zona urbana) y, por tanto, la clase del entorno es E1. Siguiendo con la clasificación dada por el Documento Básico, el grado de exposición al viento es V3 y, finalmente, el grado de impermeabilidad mínimo exigible a las fachadas el 3.

Dado que el muro que compone la fachada es de tapia calicostrada, hay que referirse a las condiciones de las soluciones para fachadas con revestimiento exterior en la tabla 2.7 *Condiciones de las soluciones de fachada* (DB-HS 2.3.2). De las dos combinaciones de soluciones constructivas se elige la R1+C2 dado el espesor de la hoja principal de tierra.

Para cumplir con la condición R1, el revestimiento exterior, en este caso la costra de mortero de cal, deberá tener una resistencia media a la filtración como mínimo. Se considera que el revestimiento es continuo por la técnica empleada para su ejecución, por lo que deberá cumplir las características siguientes:

- Espesor comprendido entre 10 y 15 mm. La costra de mortero tiene espesores variables entre los 10 y los 40 mm.
- Adherencia al soporte suficiente para garantizar su estabilidad. Al ser ejecutado al mismo tiempo que la hoja principal y por su forma de trabar las capas, se considera que está adherido de forma estable al soporte.
- Permeabilidad al vapor suficiente para evitar su deterioro como consecuencia de una acumulación de vapor entre él y la hoja principal. Como se ha comprobado en el análisis del comportamiento higrotérmico de la fachada, no existe riesgo de condensaciones interiores.
- Adaptación a los movimientos del soporte y comportamiento aceptable frente a la fisuración. De nuevo, el mortero y el soporte se ejecutan de forma simultánea, por lo que se considera que funciona en solidaridad con este.
- Cuando se dispone en fachada el aislante por el exterior de la hoja principal, debe existir compatibilidad química con el aislante y disposición de una armadura constituida por una malla de fibra de vidrio o de poliéster. No se cuenta con aislante en la fachada, por lo que no es necesario el refuerzo del revestimiento.

La condición C2 que garantiza la estabilidad de la hoja principal indica que esta deberá tener un espesor alto. De nuevo, la hoja de tierra comprimida tiene un espesor medio de 41 cm, que se considera más que suficiente para cumplir con esta exigencia.

Para las soluciones en detalle que nos exige el Código Técnico, es importante señalar que el edificio de tapia se construye sobre un primer volumen de hormigón en semisótano. Por tanto, la

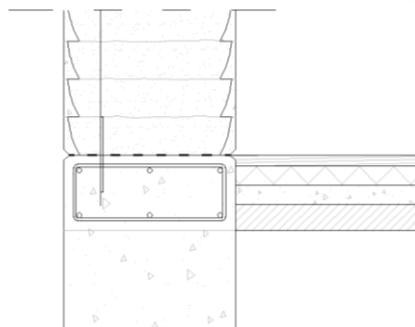


Fig. 69: Posición de la barrera impermeable, E 1:20 – Elaboración propia

disposición de barrera impermeable para evitar el ascenso de la humedad se colocará en este cambio de material.

En esta ocasión sí que existen forjados en el interior del edificio de tapia, que se forman mediante una estructura de madera que apoya en una viga confinada en el interior del muro, por lo que hay que prestar atención a la exigencia de encuentros de fachada y forjado. Al encontrarse el revestimiento trabado con la masa de tierra que forma el muro y contar además con refuerzos de acero, no se considera necesario un mayor esfuerzo por asegurar su permanencia.

En lo relativo a los huecos, se coloca una chapa que funciona como vierteaguas, cumpliendo con lo indicado en el documento.

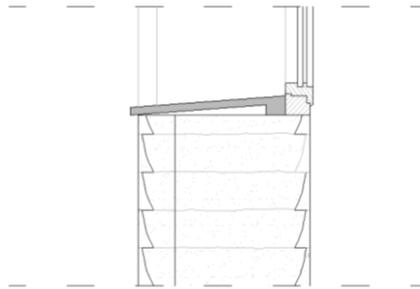


Fig. 70: Detalle del vierteaguas, E 1:20 – Elaboración propia

En el testero oeste del edificio, el muro de tapia alcanza una altura superior a la de la cubierta, por lo que es rematado con una albardilla que permite evacuar el agua de la parte superior.



Fig. 71: Remate superior del muro de tapia – D'Arquer, X. (Imagen adaptada)

Para evitar que el agua evacuada por la cubierta discorra por la fachada, se dispone en la cornisa un canal de acero galvanizado de forma longitudinal a esta.

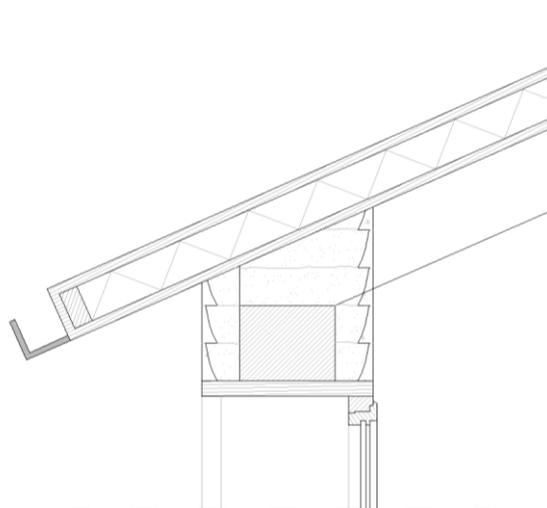


Fig. 72: Detalle del encuentro con la cubierta, E 1:20 – Elaboración propia

El hotel de Monroyo se encuentra en la zona pluviométrica III y eólica B según se refiere el apartado 2.3.1 del Documento Básico de Salubridad (DB-HS). Su ubicación en medio del bosque se corresponde con un terreno de tipo IV (forestal), por lo que la clase de entorno es E1. Para su zona eólica, el grado de exposición se corresponde con V3 y, por tanto, el grado de impermeabilidad mínimo para las fachadas será el 3.

De nuevo se da una situación similar al caso de Ayerbe en las condiciones de las soluciones constructivas. Contando con revestimiento exterior similar y un espesor de muro de tapia mayor, se puede elegir la combinación de condiciones R1+C2 de la tabla 2.7 *Condiciones de las soluciones de fachada* (DB-HS 2.3.2).

La costra de mortero de cal que constituye el revestimiento exterior de la fachada deberá cumplir las condiciones del punto R1, que exige mínimo una resistencia media a la filtración. Se considera como tal si cumple las siguientes condiciones:

- Espesor comprendido entre 10 y 15 mm. De forma aproximada, la costra de mortero de cal tiene un espesor que oscila entre los 10 y los 40 cm.
- Adherencia al soporte suficiente para garantizar su estabilidad. Igual que en el caso anterior, se considera que está adherido de forma estable al soporte dada la técnica empleada en su ejecución.
- Permeabilidad al vapor suficiente para evitar su deterioro como consecuencia de una acumulación de vapor entre él y la hoja principal. No existe riesgo de condensaciones interiores según se ha comprobado en el apartado de análisis higrotérmico.
- Adaptación a los movimientos del soporte y comportamiento aceptable frente a la fisuración. Como se ejecutan de forma simultánea se considera que cumple esta condición.
- Cuando se dispone en fachada el aislante por el exterior de la hoja principal, debe existir compatibilidad química con el aislante y disposición de una armadura constituida por una malla de fibra de vidrio o de poliéster. El muro de la fachada no cuenta con aislante, por lo que no se tiene en consideración este punto.

La condición C2 que garantiza la estabilidad de la hoja principal indica que esta habrá de tener un espesor alto. Los 56 cm de tierra comprimida que forman la hoja principal se consideran más que suficientes para el cumplimiento de esta exigencia.

En el caso de los encuentros y detalles es importante tener en cuenta que, como ocurre en el caso anterior, los muros de tapia arrancan de un primer nivel de semisótano con muros de hormigón. Por lo tanto, la barrera impermeable que exige el Código Técnico para el arranque de las fachadas se supone dispuesta en el cambio de material entre el hormigón y la primera tongada de tierra.



Fig. 73: Vista del arranque de las tapias, fachada norte – Edra Cultura y Natura

Con el objeto de cumplir con la evacuación de agua de los huecos evitando que esta escurra por la fachada, se colocan en esta ocasión vierteaguas cerámicos, tanto en los huecos sobre el volumen de hormigón como en los presentes en los muros de tierra.

Existen forjados en el interior del edificio que tienen su encuentro con las tapias. La estructura de madera que los forma apoya en los muros de tierra mediante una viga de madera de 20x25 cm que, en este caso, no está confinada en el interior de la fachada, sino que se enrasa con su cara interior. El espesor restante de 40 cm entre la viga y la superficie exterior de la fachada hacen innecesaria la incorporación de un refuerzo para el revestimiento que, por su modo de ejecución, está además perfectamente trabado con el muro.

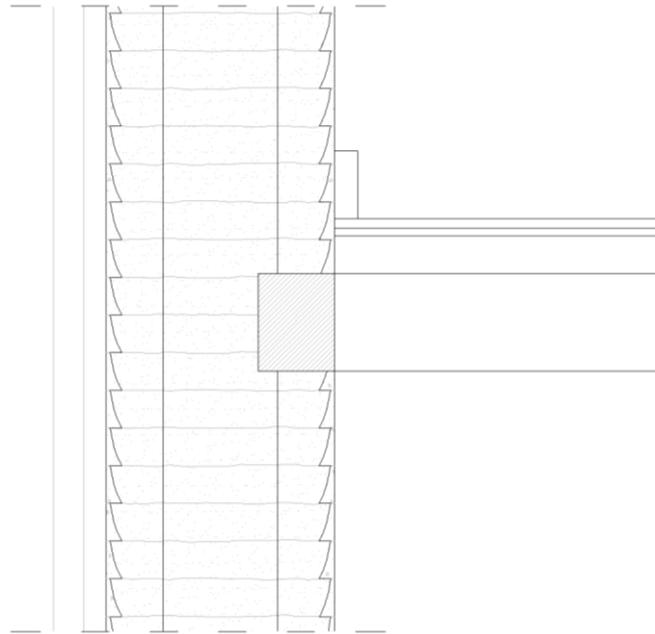


Fig. 74: Detalle del encuentro de la fachada con un forjado, E 1:20 – Elaboración propia

Para evacuar el agua de la cubierta y evitar que discurra por la fachada, esta se recoge mediante un conducto colocado en la cornisa. El enfoque del proyecto en la gestión de los recursos se demuestra una vez más recirculando el agua de lluvia para ser reutilizada en el riego.

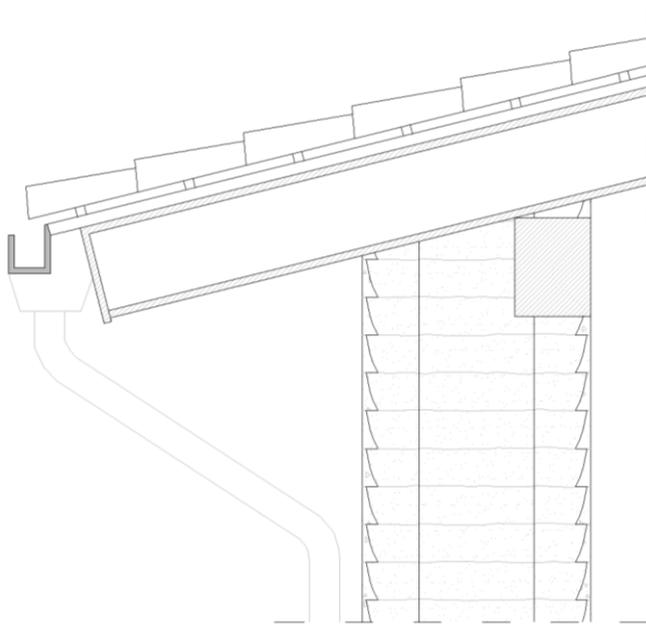


Fig. 75: Detalle del encuentro de la fachada con la cubierta. E 1:20 –
Elaboración propia



Fig. 76: Canal de evacuación de la
cubierta – Comarca del Matarranya
(Imagen adaptada)

V. Conclusiones

Tras el desarrollo del trabajo, se extraen una serie de conclusiones sobre el estado actual de la construcción con tapial y su deriva.

En primer lugar, destaca el interés creciente por la técnica que, si bien en España ha llegado de forma más tardía a otros países, tiene su repercusión en el panorama edificatorio actual. Aunque se ha constatado la falta de apoyo normativo en estos momentos, es previsible que este apoyo aumente en los próximos años dadas las recientes directivas europeas relativas a la construcción de bajo impacto ambiental y el análisis de ciclo de vida de los edificios. Si el método constructivo del tapial se verá beneficiado o no aún está por ver, pero sin duda habrá más aspectos a tener en cuenta a la hora de elegir los materiales de un proyecto.

A pesar del aumento de interés por la tapia, la todavía poca presencia de referentes actuales dificulta la proliferación de estas construcciones, que se ve aún más mermada por la falta de obreros que conozcan la técnica, ya que durante décadas ha sido escaso el relevo generacional en este tipo de trabajos. Sin embargo, está siendo demostrado que estas soluciones son propicias para conseguir el funcionamiento sostenible que se espera de una obra contemporánea, gracias a las propiedades de la tierra apisonada.

En los casos analizados se ha podido observar la variedad de soluciones constructivas adoptadas para acometer los encuentros de la tapia con huecos y otros paramentos, permitiendo la ejecución de obras con una técnica milenaria sin dejar de lado el lenguaje arquitectónico de nuestro tiempo. Las distintas variaciones de muro que se han analizado demuestran cómo se consigue cumplir con las exigencias normativas desde varios enfoques, y cómo la tierra funciona tanto sola como acompañada de otras capas, sin perder su protagonismo.

Gracias a los conceptos de Javier Neila se consigue conocer con mayor exactitud cómo se comportan estos muros, demostrando la importancia de la masa térmica y su posición en las secciones de los cerramientos para resultar más efectivo el intercambio de calor con el interior de las construcciones. Un mayor enfoque en la masa térmica en la normativa resultaría beneficioso para la construcción con muros de este tipo, privando sobre el aislamiento en determinadas ocasiones.

Pese a la sensibilidad de los muros de tierra ante la acción del agua, un muro de tapia bien ejecutado tiene un funcionamiento correcto en espacios de producción de humedad elevada, como ha quedado demostrado: varias de las obras ejecutadas recientemente incorporan muros de tapia en espacios de piscinas o bodegas. No obstante, es de vital importancia para asegurar que la tierra mantenga sus propiedades la adopción de soluciones que permitan mantener el material alejado de la humedad, como se ha visto en los distintos casos prácticos.

La respuesta ante aspectos ecológicos y económicos de la tapia sin duda es de interés en el contexto actual, ante la creciente demanda de *descarbonizar* el sector de la construcción. Si se consiguen adaptar las exigencias normativas a la variedad de métodos constructivos considerados poco convencionales, se abrirá la puerta a que la construcción con tierra pueda ser una opción competitiva en el abanico de técnicas constructivas. Hasta entonces, la investigación y el interés de los profesionales permiten arrojar luz sobre un aspecto de la construcción olvidado durante décadas, facilitando el proceso para proyectos futuros.

VI. Bibliografía

AENOR Comité técnico CTN-UNE 41 Construcción. *Bloques de Tierra Comprimida (BTC) para muros y Tabiques. Definiciones, especificaciones y métodos de ensayo*. UNE 41410. Madrid: AENOR, 2023.

ALVAREZ ALONSO, Marina; GUINEA M.^a Jesús; DÍAZ-ROMERAL, Juan. Construcciones a base de tierra. *Informes de la construcción*. 1984, Vol. 36, nº 365, p. 47-52. ISSN 0020-0883.

BESTRATEN CASTELLS, Sandra Cinta; HORMIAS LAPERAL, Emilio; ALTEMIR MONTANER, Anna. Construcción con tierra en el siglo XXI. *Informes de la construcción*. 2011, Vol. 63, nº 523, p. 5-20. ISSN 0020-0883.

CID FALCETO, Jaime; RUIZ MAZARRÓN, Fernando; CAÑAS GUERRERO, Ignacio. Las normativas de construcción con tierra en el mundo. *Informes de la construcción*. 2011, Vol. 63, nº 523, p. 159-169. ISSN 0020-0883.

Consejo Superior de Investigaciones Científicas. *Prescripciones del Instituto Eduardo Torroja 70: obras de fábrica*. Madrid: Instituto Eduardo Torroja, 1971.

Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja. *Código Técnico de la Edificación*. Madrid, 2022.

Código Técnico de la Edificación, ¿Qué es el CTE?, Historia [en línea] [consulta: 4 de septiembre de 2025]. Disponible en: <https://www.codigotecnico.org/QueEsCTE/Historia.html>

DE HOZ ONRUBIA, Jaime; MALDONADO RAMOS, Luis; VELA COSSÍO, Fernando. *Diccionario de construcción tradicional: tierra*. San Sebastián: Nerea, 2003. ISBN 8489569800

Edra Cultura y Natura, Arquitectura, Casa de tapia en Ayerbe [en línea] [consulta: 19 de abril de 2025]. Disponible en: <https://arquitectura.edraculturaynatura.com/portfolio-item/casa-de-tapia-en-ayerbe/>

Edra Cultura y Natura, Arquitectura, Hotel 5 'Torre del Marqués'* [en línea] [consulta: 19 de abril de 2025]. Disponible en: <https://arquitectura.edraculturaynatura.com/portfolio-item/hotel-5-torre-del-marques/>

FONT MEZQUITA, Fermín; HIDALGO CHULIO, Pere. La tapia en España. Técnicas actuales y ejemplos. *Informes de la construcción*. 2011, Vol. 63, nº 523, p. 21-34. ISSN 0020-0883.

Green Building Council España. El Gobierno de España se compromete a incluir un documento dedicado a la sostenibilidad en la revisión del Código Técnico de la Edificación de 2026. En: *Green Building Council España, Comunicación, Noticias, Actualidad GBCE* [consulta 4 de septiembre de 2025]. Disponible en: <https://gbce.es/el-gobierno-de-espana-se-compromete-a-incluir-un-documento-dedicado-a-la-sostenibilidad-en-la-revision-del-codigo-tecnico-de-la-edificacion-de-2026/>

GUILLAUD, Hubert. *Domaine de la Terre* en Villafontaine (Isère, France): balance de una experiencia ejemplar. *Informes de la construcción*. 2011, Vol. 63, nº 523, p. 171-174. ISSN 0020-0883.

Italia. Legge regionale 16 gennaio 2006, n. 2 Norme per la valorizzazione delle costruzioni in terra cruda. *Bollettino Ufficiale della Regione Piemonte*, 16 de enero de 2006, nº2.

MALDONADO RAMOS, Luis; VELA COSSÍO, Fernando. El patrimonio arquitectónico construido con tierra. Las aportaciones historiográficas y el reconocimiento de sus valores en el contexto de la arquitectura popular española. *Informes de la construcción*. 2011, Vol. 63, nº523, p. 71-80. ISSN 0020-0883.

MARTÍN ROMERO, José Justo. *Definición de un Esquema para la Anotación Semántica de Documentos Normativos Técnicos* [en línea]. Proyecto fin de carrera, Universidad de Sevilla, 2008 [consulta: 4 de septiembre de 2025]. Disponible en: <https://biblus.us.es/bibing/proyectos/abreproy/4519/direccion/>

MILETO, Camila; VEGAS LÓPEZ-MANZANARES, Fernando. *La restauración de la tapia en la Península Ibérica. Criterios, técnicas, resultados y perspectivas*. Valencia: TC Cuadernos, 2014. ISBN 9788494223334.

MILETO, Camila; VEGAS LÓPEZ-MANZANARES, Fernando; GARCÍA-SORIANO, Lidia. La restauración de la tapia monumental: pasado, presente y futuro. *Informes de la construcción*. 2018, Vol. 69, nº 548. ISSN 0020-0883.

MONESMA MOLINER, Eugenio. *El tapial. Construcción de muro con tierra*. [Documental]. Huesca: Pyrene PV, 1993.

Munarq architects, Projects, Ca na pau [en línea] [consulta: 20 de abril de 2025]. Disponible en: <https://munarq.es/project/ca-na-pau>

NARLOCH, Piotr; PIĄTKIEWICZ, Wojciech; PIETRUSZKA, Barbara. The Effect of Cement Addition on Water Vapour Resistance Factor of Rammed Earth. *Materials*. 2021, Vol. 14, nº 9. ISSN 1996-1944.

NEILA GONZÁLEZ, F. Javier. *Arquitectura bioclimática en un entorno sostenible*. Madrid: Munilla-Lería, 2004. ISBN 9788489150645.

Perú. Norma E.080 Diseño y construcción con tierra reforzada. *El Peruano*, 7 de abril de 2017, nº 121, p. 3-24.

RAUCH, Martin; VON MAG, A. Paredes de tapial y su industrialización (encofrados y sistemas de compactación). *Informes de la construcción*. 2011, Vol. 63, nº 523, p. 35-40. ISSN 0020-0883.

RIVAS RODRÍGUEZ, Lucía. *Análisis del comportamiento higrotérmico de un muro de tapia mediante monitorización y simulación energética. Caso de estudio: vivienda unifamiliar en Monforte de Lemos* [en línea]. Trabajo Fin de Máster, Universidade da Coruña, 2015 [consulta: 10 de abril de 2025]. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/61915983.pdf>

STANDARDS NEW ZEALAND. *Engineering Design of Earth Buildings*. NZS 4297:1998. Nueva Zelanda: Standards New Zealand, 1998.

STANDARDS NEW ZEALAND. *Earth buildings not requiring specific engineering design*. NZS 4299:2024. Nueva Zelanda: Standards New Zealand, 2024.

Unión Europea. Directiva (UE) 2024/1275 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 24 de abril de 2024, relativa a la eficiencia energética de los edificios. *Diario Oficial de la Unión Europea*, 8 de mayo de 2024, nº 1275, p. 1-68.

Vier Arquitectos, Proyectos, Piscina municipal de Toro, Ficha técnica [en línea] [consulta: 14 de mayo de 2025]. Disponible en: <https://vier.es/piscina-toro-ficha/>

Zest architecture, Blog, Aprendiendo a diseñar y construir un muro de tapial [en línea] [consulta: 14 de mayo de 2025]. Disponible en: <https://www.zestarchitecture.com/es/aprendiendo-a-disenar-y-construir-un-muro-de-tapial/>

VII. Referencias de las figuras

- Fig. 1: Elaboración propia
- Fig. 2: https://resarquitectura.blogs.upv.es/?page_id=199
- Fig. 3-5: MILETO, Camila; VEGAS LÓPEZ-MANZANARES, Fernando. *La restauración de la tapia en la Península Ibérica. Criterios, técnicas, resultados y perspectivas*. Valencia: TC Cuadernos, 2014. ISBN 9788494223334.
- Fig. 6: FONT MEZQUITA, Fermín; HIDALGO CHULIO, Pere. La tapia en España. Técnicas actuales y ejemplos. *Informes de la construcción*. 2011, Vol. 63, nº 523, p. 21-34. ISSN 0020-0883.
- Fig. 7-9: MILETO, Camila; VEGAS LÓPEZ-MANZANARES, Fernando. *La restauración de la tapia en la Península Ibérica. Criterios, técnicas, resultados y perspectivas*. Valencia: TC Cuadernos, 2014. ISBN 9788494223334.
- Fig. 10: https://resarquitectura.blogs.upv.es/?page_id=6569
- Fig. 11: MILETO, Camila; VEGAS LÓPEZ-MANZANARES, Fernando. *La restauración de la tapia en la Península Ibérica. Criterios, técnicas, resultados y perspectivas*. Valencia: TC Cuadernos, 2014. ISBN 9788494223334.
- Fig. 12: <https://www.youtube.com/watch?v=4NylAUeFiao>
- Fig. 13 y 14: MONESMA MOLINER, Eugenio. *El tapial. Construcción de muro con tierra*. [Documental]. Huesca: Pyrene PV, 1993.
- Fig. 15: MILETO, Camila; VEGAS LÓPEZ-MANZANARES, Fernando. *La restauración de la tapia en la Península Ibérica. Criterios, técnicas, resultados y perspectivas*. Valencia: TC Cuadernos, 2014. ISBN 9788494223334.
- Fig. 16: <https://appangea.com/2024/09/03/comentario-del-mapa-precipitacion-anual-en-espana/>
- Fig. 17: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HS/DccHS.pdf>
- Fig. 18: Elaboración propia
- Fig. 19: <https://tectonica.archi/projects/casa-rauch/>
- Fig. 20: <https://vier.es/portfolio/piscina-toro/>
- Fig. 21 y 22: <https://www.zestarchitecture.com/es/aprendiendo-a-disenar-y-construir-un-muro-de-tapial/>
- Tablas 1-4: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DccHE.pdf>
- Tabla 5: https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DA-DB-HE-2_-_Condensaciones.pdf
- Tabla 6: https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HE/DA_DB-HE-1_Calculo_de_parametros_caracteristicos_de_la_envolvente.pdf
- Tablas 7 y 8: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HS/DccHS.pdf>

- Fig. 23-25: <https://www.codigotecnico.org/pdf/Documentos/HS/DccHS.pdf>
- Tabla 9: Elaboración propia
- Fig. 26: <https://munarq.es/project/ca-na-pau>
- Fig. 27 y 28: Elaboración propia
- Fig. 29-33: <https://munarq.es/project/ca-na-pau>
- Fig. 34: <https://www.bharquitectura.com/BHARQUITECTURA/>
- Fig. 35 y 36: Elaboración propia
- Fig. 37-40: <https://www.bharquitectura.com/BHARQUITECTURA/>
- Fig. 41: <https://arquitectura.edraculturaynaturaynatura.com/portfolio-item/casa-de-tapia-en-ayerbe/>
- Fig. 42 y 43: Elaboración propia
- Fig. 44-47: <https://arquitectura.edraculturaynaturaynatura.com/portfolio-item/casa-de-tapia-en-ayerbe/>
- Fig. 48: <https://arquitectura.edraculturaynaturaynatura.com/portfolio-item/hotel-5-torre-del-marques/>
- Fig. 49 y 50: Elaboración propia
- Fig. 51-54: <https://arquitectura.edraculturaynaturaynatura.com/portfolio-item/hotel-5-torre-del-marques/>
- Fig. 55-63: Elaboración propia
- Fig. 64: <https://munarq.es/project/ca-na-pau>
- Fig. 65: Elaboración propia
- Fig. 66: <https://munarq.es/project/ca-na-pau>
- Fig. 67-70: Elaboración propia
- Fig. 71: <https://arquitectura.edraculturaynaturaynatura.com/portfolio-item/casa-de-tapia-en-ayerbe/>
- Fig. 72: Elaboración propia
- Fig. 73: <https://arquitectura.edraculturaynaturaynatura.com/portfolio-item/hotel-5-torre-del-marques/>
- Fig. 74 y 75: Elaboración propia
- Fig. 76: <https://matarranyaturismo.es/servicio/hotel-la-torre-del-marques/>

Anexo: Datos de los materiales y cálculos

A continuación, se incluyen las tablas con las propiedades de las capas que componen las fachadas de cada uno de los casos de estudio. Para simplificar el proceso de cálculo, se ha empleado el mismo modelo de tabla con capacidad para 5 capas de material. En los casos en los que el número de capas sea menor, simplemente se introducen datos neutros en las capas sobrantes y se descartan los respectivos resultados.

Las celdas en que se introducen datos de forma manual están indicadas con un color rosa y las que devuelven los resultados empleados en el análisis quedan indicadas con color azul.

Los cálculos de temperaturas y presiones se realizan en los puntos intersticiales, representados en las columnas entre capas, así como en el ambiente exterior e interior y la superficie exterior e interior.

Las propiedades de los materiales se han obtenido de las siguientes fuentes:

Tierra comprimida:

Prontuario de soluciones constructivas del Código Técnico de la Edificación (Pétreos y suelos: tierra apisonada)

The Effect of Cement Addition on Water Vapour Resistance Factor of Rammed Earth, P. Narloch, W Piątkiewicz, B. Pietruszka, 2021

Fibra de madera:

Prontuario de soluciones constructivas del Código Técnico de la Edificación (Paneles de madera: tableros de fibras)

Membrana de difusión abierta:

Prontuario de soluciones constructivas del Código Técnico de la Edificación (Plásticos: polietileno de baja densidad)

Ladrillo cerámico:

Prontuario de soluciones constructivas del Código Técnico de la Edificación (Cerámicos)

Mortero de cal:

Prontuario de soluciones constructivas del Código Técnico de la Edificación (Morteros: mortero de cemento o cal)

Ca na pau

| DATOS | Provincia | Temp. Min. | Humedad rel. | Temp. Interior | Humedad int. | Δ temp | | | | Número e | | | | |
|--------------------------------------|--------------------------|---------------------------|-------------------|--------------------------|-----------------|--------------------------|------------------------------|--------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------|
| | Baleares | 11,6 | 71% | 20 | 55% | 8,4 | | | | 2,71828183 | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | Sumas |
| FACHADA | Exterior | Superficie exterior | Tierra comprimida | | Fibra de madera | | Membrana de difusión abierta | | Ladrillo cerámico | | Mortero de tierra y cal | Superficie interior | Interior | |
| Espesor (m) | | | 0,25 | | 0,1 | | 0,001 | | 0,2 | | 0,02 | | | |
| Conductividad λ (W/mK) | | | 1,1 | | 0,07 | | 0,33 | | 0,32 | | 0,4 | | | |
| Resistencia | | 0,04 | 0,22727273 | | 1,42857143 | | 0,0030303 | | 0,625 | | 0,05 | 0,13 | | Rt 2,50387446 |
| Densidad ρ (kg/m ³) | | | 1875 | | 200 | | 920 | | 770 | | 1000 | | | |
| Calor específico (kJ/kgK) | | | 1,113 | | 1,7 | | 2200 | | 1 | | 1 | | | |
| Masa térmica (J/K) | | | 521,71875 | | 34 | | 2024 | | 154 | | 20 | | | mt total 2753,71875 |
| Res. Difusión vapor μ | | | 15 | | 2 | | 100000 | | 10 | | 10 | | | mt útil 1560,90587 |
| CTT | | | 80,1549716 | | 33,372987 | | 3435,45524 | | 309,751667 | | 49,5774892 | | | CTT 3908,31235 |
| Espesor aire equiv. Sd | | | 3,75 | | 0,2 | | 100 | | 2 | | 0,2 | | | Sd 106,15 |
| | Te | Tse | | T1 | | T2 | | T3 | | T4 | | Tsi | Ti | |
| Temperaturas intersticiales | 11,6 | 11,734192 | | 12,4966468 | | 17,2892193 | | 17,2993854 | | 19,3961359 | | 19,5638759 | 20 | %mt util 57% |
| | P_{sat,e} | P_{sat,se} | | P_{sat,1} | | P_{sat,2} | | P_{sat,3} | | P_{sat,4} | | P_{sat,si} | P_{sat,i} | |
| Presión de saturación | 1365,26129 | 1377,4274 | | 1448,37771 | | 1972,42794 | | 1973,69607 | | 2251,01333 | | 2274,60307 | 2336,95114 | |
| | Pe | Pse | | P1 | | P2 | | P3 | | P4 | | Psi | Pi | |
| Presión de vapor | 969,335519 | 969,335519 | | 980,499479 | | 981,09489 | | 1278,80048 | | 1284,75459 | | 1285,35 | 1285,35 | |

Casa rural en L'Esparra

| DATOS | Provincia | Temp. Min. | Humedad rel. | Temp. Interior | Humedad int. | Δ temp | | | Número e | | | | | |
|--------------------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------|----------------|--------------|---------------|------------|------------|-------------------|---------------------------|--------------------------|----------|------------|--------------|
| | Girona | 6,8 | 77% | 20 | 55% | 13,2 | | | 2,71828183 | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | Sumas |
| FACHADA | Exterior | Superficie exterior | | | | | | | Tierra comprimida | Superficie interior | Interior | | | |
| Espesor (m) | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,4 | | | | | | |
| Conductividad λ (W/mK) | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1,1 | | | | | | | |
| Resistencia | | 0,04 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,36363636 | 0,13 | | | | Rt | 0,53363636 | |
| Densidad ρ (kg/m ³) | | | | | | | | 1875 | | | | | | |
| Calor específico (kJ/kgK) | | | | | | | | 1,113 | | | | | | |
| Masa térmica (J/K) | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 834,75 | | | | | mt total | 834,75 | |
| Res. Difusión vapor μ | | | | | | | | 15 | | | | mt útil | 550,337734 | |
| CTT | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 293,680227 | | | | | CTT | 293,680227 | |
| Espesor aire equiv. Sd | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 6 | | | | | Sd | 6 | |
| | | Tse | | | | | | | | Tsi | Ti | | | |
| Temperaturas intersticiales | 6,8 | 7,78943782 | | 7,78943782 | | 7,78943782 | 7,78943782 | 7,78943782 | 7,78943782 | 16,7843271 | 20 | %mt util | 66% | |
| | P_{sat,e} | P_{sat,se} | | | | | | | | P_{sat,si} | P_{sat,i} | | | |
| Presión de saturación | 987,669716 | 1056,92817 | | 1056,92817 | | 1056,92817 | 1056,92817 | 1056,92817 | 1056,92817 | 1910,33819 | 2336,95114 | | | |
| | Pe | Pse | | | | | | | | Psi | Pi | | | |
| Presión de vapor | 760,505682 | 760,505682 | | 760,505682 | | 760,505682 | 760,505682 | 760,505682 | 760,505682 | 1285,35 | 1285,35 | | | |

Casa de tapia en Ayerbe

| DATOS | Provincia | Temp. Min. | Humedad rel. | Temp. Interior | Humedad int. | $\Delta temp$ | | | Número e | | | | |
|--------------------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------|----------------|--------------|---------------|--------------------------|-------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------|----------|--------------|
| | Huesca | 4,7 | 80% | 20 | 55% | 15,3 | | | 2,71828183 | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | Sumas |
| FACHADA | Exterior | Superficie exterior | | | | | Mortero de cal | Tierra comprimida | Mortero de cal | Superficie interior | Interior | | |
| Espesor (m) | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,02 | 0,41 | 0,02 | | | | |
| Conductividad λ | | | 1 | 1 | 1 | 0,4 | | 1,1 | 0,4 | | | | |
| Resistencia | | 0,04 | 0 | 0 | 0 | 0,05 | | 0,37272727 | 0,05 | 0,13 | | Rt | 0,64272727 |
| Densidad ρ (kg/m ³) | | | | | | 1000 | | 1875 | 1000 | | | | |
| Calor específico (kJ/kgK) | | | | | | 1 | | 1,113 | 1 | | | | |
| Masa térmica (J/K) | | | 0 | 0 | 0 | 20 | | 855,61875 | 20 | | | mt total | 895,61875 |
| Res. Difusión vapor μ | | | | | | 10 | | 15 | 10 | | | mt útil | 389,148656 |
| CTT | | | 0 | 0 | 0 | 1,3 | | 236,461909 | 12,3545455 | | | CTT | 250,116455 |
| Espesor aire equiv. Sd | | | 0 | 0 | 0 | 0,2 | | 6,15 | 0,2 | | | Sd | 6,55 |
| | | Tse | | | | | T1 | | T2 | Tsi | Ti | | |
| Temperaturas intersticiales | 4,7 | 5,65219236 | | 5,65219236 | | 5,65219236 | 6,84243281 | | 15,7151344 | 16,9053748 | 20 | %mt util | 43% |
| | P_{sat,e} | P_{sat,se} | | | | | P_{sat,1} | | P_{sat,2} | P_{sat,si} | P_{sat,i} | | |
| Presión de saturación | 853,77523 | 912,36046 | | 912,36046 | | 912,36046 | 990,555749 | | 1784,47718 | 1925,06599 | 2336,95114 | | |
| | Pe | Pse | | | | | P1 | | P2 | Psi | Pi | | |
| Presión de vapor | 683,020184 | 683,020184 | | 683,020184 | | 683,020184 | 701,411934 | | 1266,95825 | 1285,35 | 1285,35 | | |

Hotel "Torre del Marqués"

| DATOS | Provincia | Temp. Min. | Humedad rel. | Temp. Interior | Humedad int. | Δtemp | | | Número e | | | | | |
|-----------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------|----------------|--------------|-------|--------------------------|--------------------------|------------|---------------------------|--------------------------|----------|--------------|------------|
| | Teruel | 3,8 | 72% | 20 | 55% | 16,2 | | | 2,71828183 | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | Sumas | |
| FACHADA | Exterior | Superficie exterior | | | | | Mortero de cal | Tierra comprimida | | Mortero de cal | Superficie interior | Interior | | |
| Espesor (m) | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,02 | 0,56 | | 0,02 | | | | |
| Conductividad λ (W/mK) | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 0,4 | 1,1 | | 0,4 | | | | |
| Resistencia | | 0,04 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,05 | 0,50909091 | | 0,05 | 0,13 | | Rt | 0,77909091 |
| Densidad ρ (kg/m³) | | | | | | | 1000 | 1875 | | 1000 | | | | |
| Calor específico (kJ/kgK) | | | | | | | 1 | 1,113 | | 1 | | | | |
| Masa térmica (J/K) | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 20 | 1168,65 | | 20 | | | mt total | 1208,65 |
| Res. Difusión vapor μ | | | | | | | 10 | 15 | | 10 | | | mt útil | 537,85105 |
| CTT | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 1,3 | 402,653045 | | 15,0818182 | | | CTT | 419,034864 |
| Espesor aire equiv. Sd | | | 0 | 0 | 0 | 0 | 0,2 | 8,4 | | 0,2 | | | Sd | 8,8 |
| | Te | Tse | | | | | T1 | T2 | | Tsi | Ti | | | |
| Temperaturas intersticiales | 3,8 | 4,63173862 | | 4,63173862 | | | 5,6714119 | 16,2571762 | | 17,2968495 | 20 | | %mt útil | 45% |
| | P_{sat,e} | P_{sat,se} | | | | | P_{sat,1} | P_{sat,2} | | P_{sat,si} | P_{sat,i} | | | |
| Presión de saturación | 801,477294 | 849,705757 | | 849,705757 | | | 913,578575 | 1847,34472 | | 1973,37967 | 2336,95114 | | | |
| | Pe | Pse | | | | | P1 | P2 | | Psi | Pi | | | |
| Presión de vapor | 577,063652 | 577,063652 | | 577,063652 | | | 593,161069 | 1269,25258 | | 1285,35 | 1285,35 | | | |