



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Grado

La técnica de la tierra pisada:  
pasado, presente y futuro  
Rammed earth technique:  
past, present and future

Autora

Àngela Escolà Oliva

Directora

Belinda López Mesa

Escuela de Ingeniería y Arquitectura de Zaragoza (EINA) / Universidad de Zaragoza  
2019

Autora:

**Àngela Escolà Oliva**

Realizado bajo la tutela de la profesora:

**Belinda López Mesa**

[Departamento de Construcciones Arquitectónicas]

**Trabajo final de Grado**

Curso 2018/2019

**Universidad Zaragoza, Agosto 2019**

## **INDICE**

|   |    |
|---|----|
| INTRODUCCIÓN.....   | 1  |
| ORIGEN.....   | 1  |
| METODOLOGÍA.....  | 2  |
| OBJETIVOS.....  | 3  |
| LA TÉCNICA CONSTRUCTIVA DE LA TIERRA PISADA.....                                | 4  |
| EVOLUCIÓN.....  | 4  |
| MARCO NORMATIVO.....  | 6  |
| TAPIA, TAPIAL Y TAPIERÍA. DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN.....                       | 7  |
| PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS.....  | 11 |
| PROYECTO DE REHABILITACIÓN Y AMPLIACIÓN DE LA TORRE DEL MARQUÉS EN MONROYO..... | 16 |
| PROYECTO.....   | 17 |
| SEGUIMIENTO DE OBRA.....  | 20 |
| INDUSTRIALIZACIÓN DE MUROS DE TIERRA PISADA.....                                | 36 |
| PROYECTOS EN TAPIAL PREFABRICADO.....   | 38 |
| SIREWALL.....   | 44 |
| FETDETERRA.....   | 45 |
| CONCLUSIONES.....   | 48 |
| PLANOS.....   | 51 |



## INTRODUCCIÓN

### ORIGEN

Actualmente estamos sometidos a un constante cambio en el que la sostenibilidad asume un papel fundamental. En el marco de la arquitectura, se ha llegado a considerar como la nueva filosofía que nos lleva a reflexionar sobre hacia dónde debería evolucionar nuestro mundo en los tiempos que vienen. Se define *“el desarrollo sostenible como la satisfacción de las necesidades de la generación presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades”* (1987, Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo)

Tomando como referencia que los primeros refugios se construían únicamente con los únicos recursos que el lugar ofrecía, la naturaleza, el clima y estudiando el entorno, el proyecto nace a partir de la necesidad de mostrar cómo la construcción con tierra, una técnica que ha sido viable y sostenible a lo largo de la historia, y que en los últimos años ha sido injustamente prejuzgada por las sociedades occidentales, puede asumir las necesidades sostenibles y convertirse en una referencia constructiva en un futuro. Este Trabajo Fin de Grado (TFG) estudia la técnica de la tapia pisada para favorecer el impulso y fomento de su uso, mostrando cómo el avance tecnológico actual no debe implicar dejar de lado la tradición y que esta técnica tiene su cabida en las actuales claves de la arquitectura ecológica.

## **METODOLOGÍA**

La redacción del presente Trabajo de Fin de Grado (TFG) se basa en primer lugar en un estudio teórico sobre la técnica de la tierra pisada, más concretamente en la técnica del tapial. Se estudia su marco normativo, sus propiedades, usos y desarrollo técnico a lo largo de la historia.

Seguidamente, se presenta la situación de este tipo de construcción en el marco actual de nuestro país. Para obtener unas conclusiones más pragmáticas se analiza un proyecto real y ejecutado durante el desarrollo del presente TFG de ampliación y rehabilitación con tapial insitu. El análisis de la obra se realiza gracias a la participación de la empresa Elecnor (en la que la autora de este TFG realiza unas prácticas durante 11 meses), que asume el papel de constructora. Se lleva a cabo un seguimiento de la obra que permite hacer un análisis reflexivo sobre la situación actual y plantear perspectivas de mejora.

Finalmente, se analizan sistemas, proyectos y métodos más industrializados de tierra pisada que han surgido en estos últimos años en España y en otros países que suponen un avance respecto de la técnica insitu.

## **OBJETIVOS**

Profundizar en el conocimiento de la técnica de construcción de muros de tierra pisada con tapial desarrollando sus características.

Estudiar la viabilidad y sostenibilidad que significa la construcción con tierra.

Explorar las dificultades y oportunidades que ofrece un proyecto de construcción con tapial en la actualidad.

Documentar el seguimiento de una obra con documentación gráfica y detalles constructivos de encuentros singulares.

Examinar las tecnologías existentes de la construcción con tierra pisada en España y fuera de España evaluando el potencial de implementación de nuevas tecnologías tanto en el diseño como en la fase de construcción.

Con la presentación de algunas obras se pretende dar una prueba existencial de que este tipo de arquitectura con tierra pisada de forma más industrializada es factible y puede inspirar a proyectistas a promover y estudiar el uso de este material de una forma más mecanizada y controlada.

## LA TÉCNICA CONSTRUCTIVA DE LA TIERRA PISADA.

### EVOLUCIÓN



Fig 1 Ruinas de la ciudad de Paquimé, en México. Fuente: El Diario

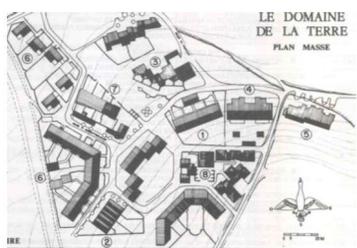


Fig 2 Domaine de la Terre (Grupo Cratere), 1976. Fuente: Gatti, 2012



Fig 3 Muros de tapial y estructura de madera en la Capilla de la Reconciliación, Berlín, Alemania. Fuente: Construcción con tierra en el siglo XXI. (S.Bestraten, E.Hormías, A. Altemir, 2011)

Técnicas de construcción con tierra, usadas por distintas comunidades a lo largo de la historia, constituyen un extenso patrimonio cultural que ha sobrevivido con edificios centenares de años (Fig 1). La técnica de la tierra pisada ha sido muy empleada en la Península Ibérica desde siempre dejando una gran suma de vestigios.

A pesar de su viabilidad técnica y el hecho de que se trata de un material muy accesible en todos sitios, desde la revolución industrial su construcción se ha visto minorada y juzgada injustamente.

En las sociedades occidentales, la construcción con tierra pasó a relacionarse con bajas clases sociales, asumiendo todo el protagonismo las construcciones de hormigón y metálicas.

La construcción con tierra fue abandonada en el mundo industrializado. Por suerte, más de una tercera parte de la población humana aún reside en casas de tierra (Minke, 2006).

A raíz de la crisis energética de los años setenta en Europa, dentro del mundo arquitectónico se empezó a tomar conciencia de la necesidad de que esta disciplina utilizara materiales que podían ser más respetuosos con el planeta y los que lo habitamos y se exploraron nuevas vías de construcción sostenible.

Sin duda también contribuyó a este despertar la celebración de la Conferencia HABITAT 76 para los asentamientos urbanos, auspiciada por la ONU y celebrada en Vancouver en 1976, donde se reunieron 132 países y algunas de las conclusiones finales incidían claramente en la necesidad de revalorizar las técnicas y materiales autóctonos como vía para paliar la carencia de viviendas en el Tercer Mundo (Hidalgo & Font, 2011).

Cabe destacar los trabajos realizados en Europa en los años ochenta por el grupo CATerre en Francia (Fig 2), las obras que ha realizado en Austria y Alemania el innovador constructor Martin Rauch (Fig 3) o las iniciativas de Gernot Minke.

En España, en el año 1983 el ingeniero Julián Salas Serrano funda en el instituto Eduardo Torroja el equipo de investigación de "Tecnologías de viviendas de Muy Bajo Coste". Un año después se crea el Centro de Investigación de Técnicas y Materiales Autóctonos de Navapalos (Soria), donde, desde el año 1985 se han impartido numerosos cursos de formación en construcción con tierra (Hidalgo & Font, 2011).

En nuestro país, la técnica de la construcción con tierra pisada se ha ido imponiendo gradualmente estos últimos años y poco a poco se va introduciendo otra vez el material en distintas tipologías de edificaciones (Fig 1).

Aún hoy en día la ausencia de industrialización en nuestro país significa un impedimento hacia un desarrollo más optimizado de la tierra pisada. En un futuro próximo, con la aparición de nueva normativa y procesos industrializados con los que racionalizar costes y procesos, se espera que la construcción con tierra se vuelva a incorporar como un sistema de construcción habitual reafirmando en un esperanzador futuro.



*Fig 1 Piscinas de Toro. (2010) Fuente: <http://vier.es/piscina-toro-ficha/>*

## **MARCO NORMATIVO**

La arquitectura con tierra poco a poco va ganando valor como material de construcción. Dado el creciente interés por este antiguo material, y ante la falta de un marco legal muchos países intentan normalizar su uso para resolver los problemas actuales derivados de la ausencia de una normativa que permita el uso de las técnicas de construcción con tierra húmeda (Mazarrón & Cañas, 2011).

En nuestro país existe una norma vigente, desde 2008, la UNE 41410, la primera existente en España. Se trata de la primera norma europea actual no experimental para bloques de tierra comprimida, emitida por el subcomité AEN/CTN 41 SC 10 “Edificación con tierra cruda” de AENOR (Mazarrón & Cañas, 2011).

## TAPIA, TAPIAL Y TAPIERÍA. DEFINICIÓN Y CLASIFICACIÓN

Resulta necesario definir el material, la técnica, las herramientas y la fábrica para que en el intercambio de ideas se pueda tener unos conceptos claros.

### TAPIERÍA

“Tapiería” es un muro elaborada in situ, conformada por uno o varios materiales adecuados que se vierten y compactan ordenadamente en el interior de un encofrado denominado tapial (Martínez).

### TAPIA

“Tapia” sirve para nombrar a un muro, una parte de muro, a un módulo o unidad constructiva. Además se ha utilizado como unidad de longitud (especialmente en lo referente a la altura), superficie, o volumen. (Martínez)

A continuación se definen algunos tipos de tapia (Martínez):

1. Tapia simple: Tapias formadas por un único material (Fig 2).

1.1. Tapia de tierra: Tapia compuesta básicamente de este mismo material.

1.1.1. Tapia ordinaria: Tapia formada únicamente de tierra.

1.1.2. Tapia real: Tapia de tierra estabilizada o enriquecida con cal.

1.2. Tapia de hormigón: Tapia con un conglomerado de áridos gruesos.

1.2.1. Tapia de hormigón común: Tapia donde el tamaño máximo del árido llega hasta las gravas gruesas, Villanueva lo expresa diciendo “nada mayor de lo que cabe en un puño”.

1.2.2. Tapia de hormigón ciclópeo o de mampuesto: Tapias en las que se utiliza hormigón común y mampuestos.

1.3. Tapias de yeso: Tapia confeccionada con este material, bien en forma de pasta, o de mortero.

2. Tapia compuesta: Tapias en las que existen partes diferenciadas dentro de una misma tapia.

2.1. Con refuerzos vistos o aparentes (Fig 3, Fig 4, Fig 5)

2.1.1. Tapia calicestrada: Tapia compuesta protegida por un mortero o costra en sus paramentos, esta corteza se ejecuta dentro del tapial formando un solo cuerpo con la tierra apisonada o el material de que se trate (Fig 6).

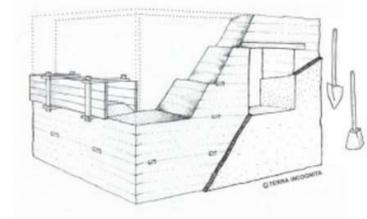


Fig 2 Tapia. Fuente: [www.restapia.es](http://www.restapia.es)

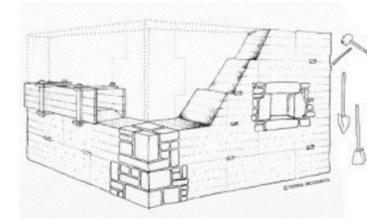


Fig 3 Tapia con refuerzos en extremos con machones de piedra. Fuente: [www.restapia.es](http://www.restapia.es)

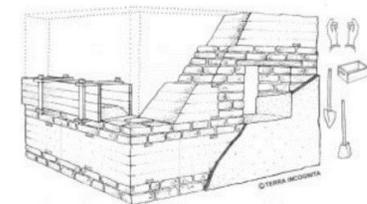


Fig 4 Tapia con refuerzos visto en lechos con verdugadas de ladrillo. Fuente: [www.restapia.es](http://www.restapia.es)

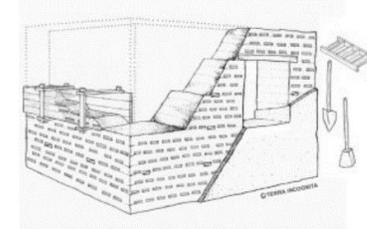


Fig 5 Tapia con refuerzos vistos de tierra y ladrillo. Fuente: [www.restapia.es](http://www.restapia.es)

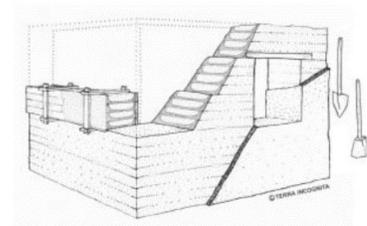


Fig 6. Tapia calicestrado. Fuente: [www.restapia.es](http://www.restapia.es)



Fig 80 Tapia con refuerzos en lechos con verdugadas de piedra. Fuente: [www.restapia.es](http://www.restapia.es)



Fig 11 Sección tapia compuesta calicastrada. Fuente: <http://ferminfont.blogspot.com>



Fig 7 Tapia de Tierra y Machones. Fuente: *Arquitectura de tierra, Caracterización de los tipos edificatorios* (Beatriz Yuste, 2010)



Fig 13 Tapia de tierra. Fuente: *Arquitectura de tierra, Caracterización de los tipos edificatorios* (Beatriz Yuste, 2010)

La siguiente tabla muestra la clasificación de las tapias:

|  |                           |                          |                               |
|--|---------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| 1. SIMPLES                                   | 1.1. Tierra               | 1.1.1. Ordinaria         |                               |
|  |                           | 1.2. Real                |                               |
|  | 1.2. Hormigón             | 1.2.1. Común             | Amasado                       |
|  |                           |                          | Con árido añadido             |
|  | 1.2.2. Ciclópeo           | Mampuestos amontonados   |                               |
|  |                           |                          | Mampuestos en hiladas         |
|  | 1.3. Yeso                 |                          |                               |
| 2. COMPUESTAS O MIXTAS                       | 2.1. Con refuerzos vistos | 2.1.1. En paramentos     | Calicastrada (Fig 11)         |
|  |                           |                          | De argamasa y ladrillos       |
|  |                           |                          | De tierra y ladrillo          |
|  |                           |                          | De argamasa y piedra (Fig 12) |
|  |                           |                          | De tierra y piedra            |
|  | 2.1.2. En extremos        | Con machones de ladrillo |                               |
|  |                           | Con machones de piedra   |                               |
|  |                           | Con machones de adobe    |                               |
|  | 2.1.3. En lechos          | Con brencas              |                               |
|  |                           | De mortero               |                               |
| Con verdugadas de ladrillo o piedra (Fig 10) |                           |                          |                               |
| 2.1.4. Intermedios                           | De mortero o argamasa     |                          |                               |
|  | Otras (Fig 13)            |                          |                               |
|  |                           |                          |                               |
| 2.2. Con refuerzos ocultos                   | 2.2.2. En extremos        | Con machones de hormigón |                               |
|  |                           | Otras                    |                               |
|  | 2.2.3. En lechos          | Con lechos de hormigón   |                               |
|  |                           | Otras                    |                               |
| 2.2.4. Intermedios                           |                           |                          |                               |

Tabla 1 Clasificación de las tapias. Fuente: (Martínez)

## TAPIAL

“Tapial” es el encofrado propio de la tapiería. (Martínez)

La “técnica del tapial” se define como tierra amasada y apisonada en un encofrado para formar muros monolíticos (Maldonado, Vela Cossío, & Hoz, 2003)) (Fig 9, Fig 11, Fig 10).

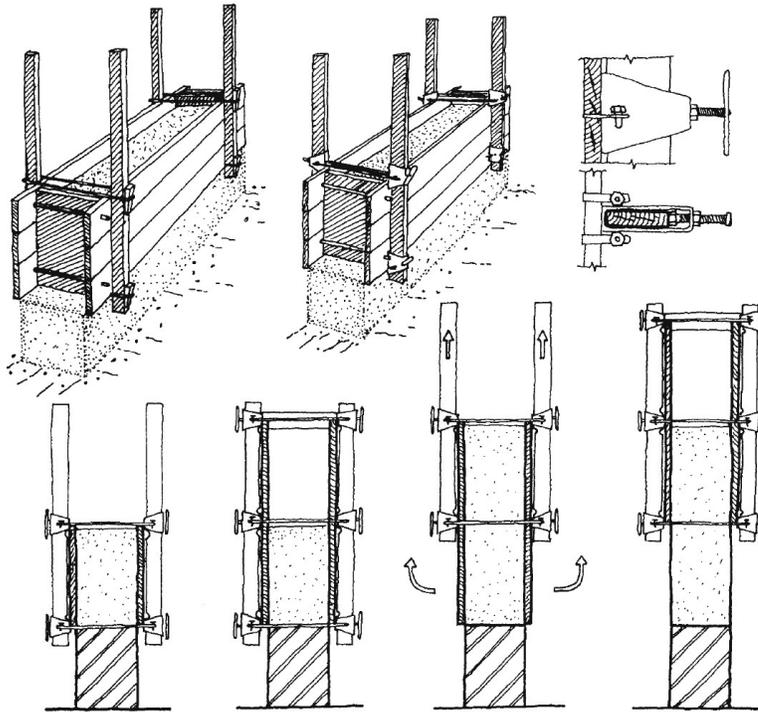


Fig 12 Dibujo de los cambios del encofrado de tapial durante el proceso de ejecución del muro. Fuente: *Building with earth* (Minke, 2006)

El tapial tiene las particularidades de ser reutilizable, manejable por uno, dos o tres personas, deslizante, ajustable a distintos tamaños de muro y firme, capaz de soportar, sin variación de su forma, las presiones que provoca el apisonado del material, incluso cierta capacidad drenante capaz de eliminar un posible exceso de agua (Martínez).

De forma histórica los tapias han sido de madera, constando de las siguientes partes o elementos: tapias, cabeceros, agujas, costales, codales, además de cuñas, clavijas y cuerdas (Martínez).

En Europa se ha ido experimentado en estos últimos años con diferentes tipos de encofrados provenientes del hormigón, que significan un avance respecto los originales que exigían repetidas operaciones y un mayor tiempo de ejecución.

Con el uso de maquinaria de elevación y este tipo de nuevos encofrados se ha podido construir obras de mayor escala.

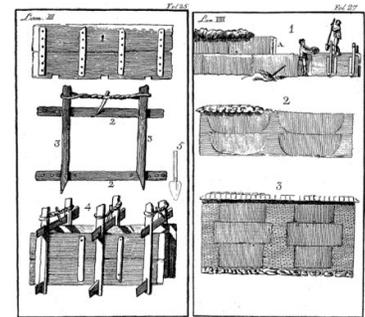


Fig 9 Ejecución de un muro de tapial. Fuente: *El arte de la albañilería* por Juan de Villanueva (1.866)



Fig 11 Apisonado entre encofrados de tapial. Fuente: <http://terra-award.org>

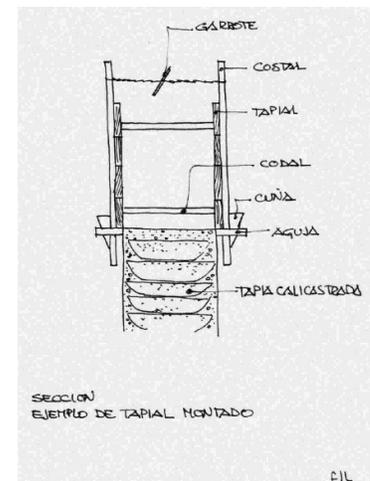


Fig 10 Sección de un tapial montado sobre una tapia calicostrada. Fuente: *Tapial, Tapia y tapiería: Propuesta de definición y clasificación*. Martínez, F.



Fig 13 Puesta en obra muro de tapial.  
Fuente:  
<http://arquitectura.edraculturaynat.ura.com/portfolio-item/casa-de-tapial/>

En España se utilizan dos tipos de encofrados. Un modelo muy común es el que se emplean tableros de madera tricapa con un conjunto de correas horizontales y verticales conectadas mediante varillas y tuercas, atirantándose el conjunto con varillas roscadas tipo diwidag (espadas) con tuercas y aceros lisos de 8mm tensados y sujetos con ranas. Los paneles se van montando verticalmente al ritmo que se apisonan las tierras, pudiendo ir desmontándose los situados en las hiladas inferiores ya compactadas. Una vez desmontado el encofrado habrá que cortar los tirantes de acero (Hidalgo & Font, 2011)(Fig 13).

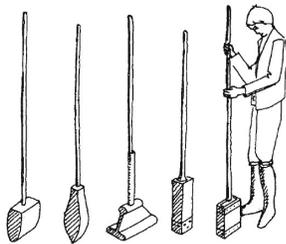


Fig 15 Encofrado en proyecto con sistema SIREWALL. Fuente:  
[www.terrafirmabuilders.ca](http://www.terrafirmabuilders.ca)

Otro modelo se confecciona con tableros fenólicos con marco metálico sujetos con varillas envainadas en tubos de PVC y con tuercas. Puede montarse una estructura para ir colocando los tableros tal como se va apisonando la tierra. Sin duda es una solución cara, resultando más económico ir montando los paneles corridos en cada hilada. Extraídas las varillas o diwidag quedarán en el interior del muro las vainas con los característicos orificios de los muros de hormigón. Para el desplazamiento de los tableros requeriremos de maquinaria de elevación (Hidalgo & Font, 2011)(Fig 15).

### COMPACTACIÓN

La “compactación” es un recurso para obtener una fábrica lo más resistente y durable posible mediante el aumento de la densidad y la disminución de los huecos. Implica condiciones en el material y en la puesta en obra, pero no se trata de un término específico para estos muros, se puede compactar muchas cosas, muchos materiales. (Martínez)



La aparición de los sistemas mecánicos de apisonado han supuesto un avance de gran calado en esta técnica constructiva (Fig 14). Con ellos se logra, con menor esfuerzo, un aumento notable de los rendimientos, al tiempo que un mayor grado de compactación, con las consecuentes mejoras de las prestaciones mecánicas y de respuesta a la erosión hídrica, lo que podrá comprobarse mediante los correspondientes ensayos. (Hidalgo & Font, 2011)

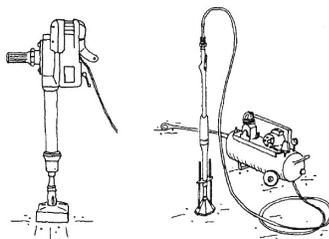


Fig 14 Pisones de compactación.  
Fuente: Building with earth (Minke, 2006)

## PROPIEDADES Y CARACTERÍSTICAS

### INERCIA – AISLANTE TÉRMICO

En el acondicionamiento climático pasivo tiene un papel esencial la inercia térmica. Los muros de tierra constituyen almacenes de calor. Esta propiedad que depende de la densidad, de la capacidad calorífica y del coeficiente de conductividad, se llama inercia térmica. La inercia térmica tiene que ver con el aislamiento pero se diferencian en el hecho que el aislamiento amortigua las ganancias o las pérdidas de calor y proporciona confort rápido y la inercia expresa el tiempo que tarda en acumularse o eliminarse este calor y procura un confort demorado (Fig 16).

Con un muro de tierra se consiguen retrasos en la transmisión de la oscilación de la temperatura exterior de entre 10 a 12 horas con los gruesos tradicionales, así como una amortiguación de esa oscilación considerable (Cuchí, 2001).

Respecto al coeficiente de conductividad térmica, para muros de tierra, varía según la densidad seca del material, entre 0,46 W/mk y 1,60 W/mk por lo que los espesores de muro necesarios para cumplir con transmitancia térmica inferior a 0,66 W/m<sup>2</sup>k (Transmitancia límite de muros de fachada y en las distintas zonas de Aragón) sin necesidad de aislante añadido serían de entre 0,70 y 1,10 metros de espesor. No obstante, 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 (Bestraten, Hormías & Altemir, 2011).



Fig 16 Curva térmica TapialblockLc. (Tierra pisada con e=0,4m) Fuente: Fetdeterra

|                                 |                               |               |
|---------------------------------|-------------------------------|---------------|
| Tapial                          | 1.400-2.000 Kg/m <sup>3</sup> | 0,6 /1,6 W/mk |
| Btc                             | 1.700 Kg/m <sup>3</sup>       | 0,81 W/mk     |
| Adobe                           | 1.200 Kg/m <sup>3</sup>       | 0,46 W/mk     |
| Hormigón armado                 | 2.300-2.500 Kg/m <sup>3</sup> | 2,3 W/mk      |
| Hormigón en masa in situ        | 2.000-2.300 Kg/m <sup>3</sup> | 1,65 W/mk     |
| Bloque de hormigón convencional | 860 Kg/m <sup>3</sup>         | 0,91 W/mk     |
| Pared de ladrillo macizo        | 2.170 Kg/m <sup>3</sup>       | 1,04 W/mk     |
| Pared de ladrillo hueco         | 670 Kg/m <sup>3</sup>         | 0,22 W/mk     |

Tabla 2 Conductividad de los materiales.

Fuente: Construcción con tierra en el siglo XXI. S.Bestraten, E.Hormías, A.Altemir

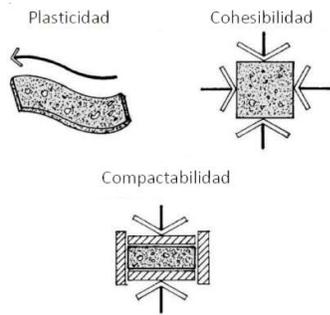


Fig 17 Propiedades de la tierra.  
Fuente: Gatti, 2012

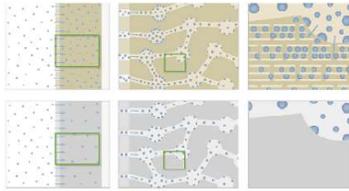


Fig 18 Esquema comparativo de la absorción de agua de la tierra y el hormigón. Fuente: Gatti, 2012

## SOLUBILIDAD

Los muros de tierra se consideran totalmente reciclables las veces que sea necesaria sin que el material pierda la calidad, ya que se trata de un tipo de construcción que de forma generalizada es soluble al agua. Si las piezas se humedecen con suficiente agua, la tierra pierde la compacidad y el material se convierte en moldeable y plástico (Fig 17, Fig 18).

A medida que absorbe agua la tierra (de 20 a 30% según los tipos de tierra), tendrá un cambio de estado. Existen 4 estados fundamentales: SECO - HUMEDO - PLÁSTICO - LÍQUIDO.

Se realizan estudios para poder reducir mediante aditivos la solubilidad, con el fin de que sean construcciones más resistentes, a pesar de que esto signifique por contra una reducción de las características sostenibles del material que hacen que se pueda reintegrar a la naturaleza.

Las fases de absorción de agua se representan en el siguiente esquema:

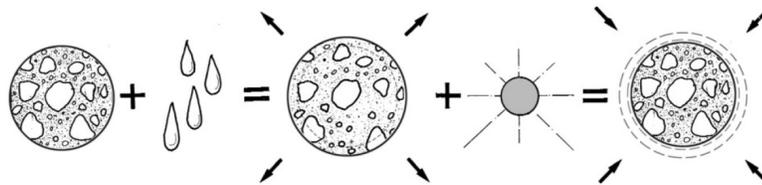


Fig 19 Fases absorción del agua. Fuente: Gatti, 2012

Fase 1: La tierra absorbe el agua, las arcillas comienzan a hincharse, es un proceso lento que necesita de tiempo. (Gatti, 2012)

Fase2: La tierra se seca, las arcillas disminuyen de volumen atrayendo hacia ellas los otros componentes que se encuentran en estado totalmente seco y ligados. (Gatti, 2012)

## DIFUSIVIDAD

Las construcciones con tierra consiguen crear espacios higiénicos y saludables gracias al control de la humedad. Los muros de tapia intercambian humedad de forma eficiente con el ambiente cediéndola y absorbiéndola.

## RESISTENCIA AL FUEGO

La tierra tiene una buena resistencia al fuego. La tierra pisada actúa como inhibidor del fuego, y posee una gran capacidad estática y estabilidad a temperaturas altas. El material se considera prácticamente incombustible, no propaga el fuego y no emite gases tóxicos. La resistencia al fuego de los muros de tierra se debe considerar de REI 90 para espesores iguales o mayores a 150mm,

con lo que es equivalente a la resistencia de otros materiales convencionales. (Bestraten, Hormías, & Altemir, 2011)

| MATERIAL                             | ESPESOR     | REI (min) |
|--------------------------------------|-------------|-----------|
| Muros de tierra                      | 0,15        | 90        |
| Hormigón armado                      | 0,16        | 90        |
| Pared de ladrillo macizo o perforado | 0,11 / 0,20 | 120       |

Tabla 3 Comportamiento frente al fuego.

Fuente: Construcción con tierra en el siglo XXI. S.Bestraten, E.Hormías, A.Altemir

### AISLANTE SONORO

Con la porosidad y la superficie irregular que tienen los muros realizados con tierra pisada, se consigue la absorción del sonido y se propicia un interior más silencioso y agradable.

Para una pared de tierra de entre 150 y 1200 mm de espesor, Ra varía generalmente, como resultado de las diferentes densidades logradas, entre 49 y 70 dB, cumpliendo con las normativas actuales de aislamiento acústico.

Para muros de 30 cm, el nivel de aislamiento es equivalente a otros materiales convencionales.

| MATERIAL                 | DENSIDAD                | ESPESOR (m) | Ra (Db) |
|--------------------------|-------------------------|-------------|---------|
| Tapial                   | 2.000 kg/m <sup>3</sup> | 0,3         | 57,85   |
| Btc                      | 1.700 kg/m <sup>3</sup> | 0,3         | 56,32   |
| Adobe                    | 1.200 kg/m <sup>3</sup> | 0,3         | 53,04   |
| Hormigón armado          | 2.300 kg/m <sup>3</sup> | 0,3         | 59,16   |
| Pared de ladrillo macizo | 2.170 kg/m <sup>3</sup> | 0,3         | 58,61   |
| Pared de ladrillo hueco  | 670 kg/m <sup>3</sup>   | 0,3         | 47,56   |

Tabla 4 Comportamiento acústico de los materiales.

Fuente: Construcción con tierra en el siglo XXI. S.Bestraten, E.Hormías, A.Altemir

### RESISTENCIA A LAS INCLEMENCIAS DEL TIEMPO

Debido a las propiedades de solubilidad y difusividad, se convierte en una premisa muy importante la protección contra el agua y la humedad. Los puntos más críticos donde hay que proteger los muros de tierra se concentran en el suelo, con el fin de evitar la absorción de agua por capilaridad y en el encuentro con la cubierta, que es donde el agua de lluvia podría afectar de forma perjudicial al muro. En el exterior hay que tener siempre en cuenta un coeficiente de erosión natural previamente calculado.

### RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Las estructuras portantes de tierra trabajan prácticamente en su totalidad sometidas a esfuerzos de compresión. Su resistencia característica varía según la tecnología, densidad y estabilizantes

añadidos. En referencia a los niveles de resistencia característica de la tierra, las fuentes son muy variables y no se tiene un conocimiento riguroso de los métodos de ensayo. Motivo por el cual es necesario establecer un protocolo de ensayos que ofrezca garantías y que permita reducir los coeficientes de seguridad en los cálculos, del mismo modo que se efectuados con otros materiales. (Bestraten, Hormías, & Altemir, 2011)

| MATERIAL                        | DENSIDAD                      | RESISTENCIA A COMPRESIÓN    |
|---------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|
| Adobe                           | 1.200-1.500 kg/m <sup>3</sup> | 0,53-1,72 N/mm <sup>2</sup> |
| Cob                             | 1.615 kg/m <sup>3</sup>       | 1 N/mm <sup>2</sup>         |
| Btc bloque de tierra comprimida | 1.700-2.000 kg/m <sup>3</sup> | 1-5 N/mm <sup>2</sup>       |
| Tapial                          | 1.900-2.200 kg/m <sup>3</sup> | 3-4 N/mm <sup>2</sup>       |

Tabla 5 Resistencia a compresión simple

Fuente: Construcción con tierra en el siglo XXI. S.Bestraten, E.Hormías, A.Altemir

Las resistencias a compresión, aunque bajas, son suficientes para un sector amplio del patrimonio construido, siempre que se tenga en cuenta el grosor de los muros constructiva y que las cargas se transmiten de forma repartida. Los valores característicos para esfuerzos de tracción, flexión y cortante son mínimos para estas tecnologías (entre 0,02 y 011 N/mm<sup>2</sup>), por lo que sería necesario confinar y armar la tierra para dar capacidad de trabajo a tracción en caso de considerarlos a nivel estructural. (Bestraten, Hormías, & Altemir, 2011)



Fig 20 Esquema ciclo de la tierra. Fuente: Gatti, 2012

## CONSUMO ENERGÉTICO

Si se compara el consumo energético que significa la construcción con tierra con otros materiales, se observa cómo éste es muy bajo. Igual que en otros materiales, existe un aporte energético durante la puesta en obra y el transporte. La tierra contribuye a reducir el impacto ambiental de la edificación (Fig 20).

La fuente del material es ilimitada. Se pueden incluso utilizar tierras de las propias excavaciones, favoreciendo la reducción de residuos y gastos de transporte.

En los procesos de producción no hay necesidad de combustiones que significaría un alto consumo energético. Aparte, no se producen emisiones tóxicas durante el proceso de transformación ni durante su vida útil.

A continuación se exponen algunas cifras sobre emisiones de CO<sub>2</sub> asociadas a la construcción convencional con hormigón u obra de fábrica, y de construcción con tierra, procedentes de estudios realizados en diferentes universidades. La comparativa muestra claramente cómo la tierra emite una cantidad muy reducida de CO<sub>2</sub>

en comparación con los materiales convencionales. (Bestraten, Hormías, & Altemir, 2011)

| MATERIAL                           | DENSIDAD                | EMISIONES POR KG             | EMISIONES POR M <sup>3</sup>           |
|------------------------------------|-------------------------|------------------------------|--|
| Tapial (sin estabilizar)           | 2.200 kg/m <sup>3</sup> | 0,004 kg CO <sub>2</sub> /Kg | 9,7 kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> |
| Adobe                              | 1.200 kg/m <sup>3</sup> | 0,06 kg CO <sub>2</sub> /Kg  | 74 kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>  |
| Hormigón en masa in situ           | 2.360 kg/m <sup>3</sup> | 0,14 kg CO <sub>2</sub> /Kg  | 320 kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> |
| Hormigón prefabricado, 2% de acero | 2.500 kg/m <sup>3</sup> | 0,18 kg CO <sub>2</sub> /Kg  | 455 kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> |
| Pared de ladrillo macizo           | 1.600 kg/m <sup>3</sup> | 0,19 kg CO <sub>2</sub> /Kg  | 301 kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> |
| Pared de ladrillo hueco            | 670 kg/m <sup>3</sup>   | 0,14 kg CO <sub>2</sub> /Kg  | 95 kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>  |

Tabla 6 Emisiones CO<sub>2</sub> de los distintos materiales.

Fuente: Construcción con tierra en el siglo XXI. S.Bestraten, E.Hormías, A.Altemir

## ESTÉTICA

El tapial tiene uno de los mejores envejecimientos tanto funcionales como estéticos. Debido a su comportamiento ante la humedad, resulta muy difícil para los microorganismos, la posibilidad de anidar, con lo que el color de la tierra pisada se mantiene durante mucho tiempo. La belleza del cromatismo y la plástica que le confiere la horizontalidad de las distintas tongadas de tierra pisada le dan a este tipo de construcción un gran atractivo con una fuerza expresiva única (Fig 21).

El color de la tierra viene determinado por los minerales que la componen. Normalmente la tierra toma una gama de colores que va desde los ocres hasta tonos más rojizos, aunque hay otras variedades (Minke, 2006). Normalmente son los minerales de hierro los que proporcionan un mayor abanico de colores rojos, amarillos, marrones... Concretamente los óxidos de hierro son los que dan ese color bermejo característico a algunos terrenos arcillosos. El hierro al oxidarse genera una herrumbre rojiza que es la que tiñe de este color la tierra. Otros óxidos como los de calcio y magnesio aportan colores blanquecinos mientras que los de manganeso aportan una variada gama de marrones (U.S.Dept of Agriculture, 2000).



Fig 21 Muro de tapia de la Capilla de la clínica en Suhl. Woeschen Architekten Alemania. Fuente: Arquitectura de tierra, Caracterización de los tipos edificatorios (Beatriz Yuste, 2010)

## **PROYECTO DE REHABILITACIÓN Y AMPLIACIÓN DE LA TORRE DEL MARQUÉS EN MONROYO**

En el presente trabajo se analiza el proyecto de rehabilitación de la Torre del Marqués para su adaptación a un uso de Hotel y de Restaurante. El trabajo se centrará en el proceso de ejecución de los muros principales estructurales realizados con la técnica del tapial.

Con la redacción del presente TFG se pretende transmitir la experiencia arquitectónica obtenida con la construcción con tierra.

En primer lugar, nombrar que el proyecto ha sido redactado por el despacho de arquitectura Edra Arquitectura dirigido por Àngels Castellarnau y la ejecución del proyecto se ha llevado a cabo por la empresa constructora ELECNOR.

El análisis del proyecto se ha realizado durante la fase de ejecución del muro de tapial del proyecto trabajando como oficina técnica de apoyo al jefe de obra, por lo que se puede analizar desde un enfoque más técnico, objetivo y observando la razón lógica de los distintos problemas que han ido surgiendo.

En base al seguimiento realizado durante toda la obra se redacta una memoria exponiendo el desarrollo en la construcción del muro y describiendo las soluciones adoptadas para afrontar los distintos problemas y oportunidades que han aparecido durante la puesta en obra.

El seguimiento de la obra se realiza durante 11 meses, tiempo durante el cual se ha planteado el proceso, se ha ejecutado el muro, se ha desencofrado y se ha puesto en carga.

Se han relacionado las distintas decisiones tomadas durante la ejecución del muro con los documentos asociados con el libro de seguimiento, donde se encuentran las órdenes de la Dirección Facultativa.

## PROYECTO

### DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

#### *Emplazamiento*

La Masía Torre del Marqués está ubicada en el medio rural, en el municipio de Monroyo en la provincia de Teruel, en la Comarca del Matarraña.

#### *Proyecto*

El proyecto se basa en la rehabilitación de la *Torre del Marqués* para su adaptación a un uso de Hotel (de 18 habitaciones y de categoría de cinco estrellas) y de Restaurante. El hotel mantendrá, a nivel arquitectónico, las características tipológicas externas tradicionales de la construcción original.

El establecimiento hotelero nace con una clara vocación de volver a ligar el nuevo uso con su entorno inmediato, reavivar la gestión global de la finca (agropecuaria y forestal), haciendo partícipe al visitante de esos procesos recuperando así parte de la esencia original de la masía que un día fue.



*Fig 24 Vista general del conjunto de edificaciones desde el sur este. . Fuente: Documentación gràfica de la empresa Elecnor.*



*Fig 23 Edificio principal. Fuente: Documentación gràfica de la empresa Elecnor.*



*Fig 22 Edificaciones anexas en la fachada sur. . Fuente: Documentación gràfica de la empresa Elecnor.*

#### *Estado inicial*

La edificación principal cuenta con un volumen principal de planta rectangular construido en mampostería de piedra y una sencilla cubierta a dos aguas con cobertura de teja cerámica árabe que remata en la fachada con un alero de madera (Fig 23, Fig 24).



Fig 25 Detalle de la fachada orientada a poniente. Fuente: Documentación gràfica de la empresa Elecnor.



Fig 26 Vista fachada principal de la Torre del Marqués. Fuente: Documentación gràfica de la empresa Elecnor.

### Descripción del proyecto

La intervención, se realiza en el edificio principal y en las ruinas anexas, en un edificio aislado ubicado al norte de la Torre (Fig 25, Fig 26) y en diversas casetas de instalaciones dispersas por la finca, así como en todo el entorno inmediato de la edificación donde se encuentran tanto una zona de piscina como terrazas de cultivo.

El edificio contará con un total de 18 habitaciones, los espacios comunes propios del hotel, una zona de wellness, gimnasio y sala de yoga, así como el restaurante, con su zona de recepción, sus distintos comedores, una bodega, una sala de reuniones una sala polivalente, baños, la cocina y sus espacios contiguos de servicios.

La intervención se realiza con el foco puesto en la sostenibilidad en todos los aspectos y con la utilización de materiales y sistemas ecológicos y de bajo impacto ambiental.

Así pues a modo de pinceladas, se relacionan a continuación las líneas de intervención previstas en la nueva Torre del Marqués:

- Actitud conservacionista desde la modernidad: La nueva edificación debe parecer que siempre ha estado ahí y debe mantener la esencia de la edificación existente e integrarse de forma natural. La huella de nuestros tiempos será visible en la edificación puesto que se va a intervenir en ella, pero su peso será el mismo que el de las previas intervenciones y dejará margen a que la edificación siga evolucionando a lo largo de su vida.

- Sistemas constructivos compatibles y ecológicos: Los materiales y los sistemas constructivos a utilizar en la intervención serán compatibles con los existentes, evitando generar patologías que degraden la edificación original. Para ello se utilizarán materiales locales como la piedra, la madera y la cal, combinados con materiales compatibles como la cerámica y el yeso.

Los materiales de aislamiento e impermeabilización serán ecológicos bien de lana de oveja, bien de corcho o celulosa. Los revestimientos serán cerámicos o de madera locales.

La ampliación que alberga parte del programa y núcleo de accesos en la fachada norte se construirá en tapia calicostrada, un sistema constructivo en tierra tradicional en la zona que utiliza la tierra local como material de construcción natural y poco manufacturado, reduciendo el impacto ambiental asociado a la construcción y confiriendo a las estancias un estado de confort óptimo y saludable.

Con esta selección consciente de materiales se consigue minimizar el impacto ambiental de la edificación, reduciendo la energía incorporada de los materiales y las emisiones de CO2 derivadas de la edificación, uso y demolición del edificio, es decir, a lo largo de toda la vida útil del mismo.

*Memoria constructiva relativa a la edificación con tapia:*

**Cimentación:**

Se construyen zapatas corridas de HA bajo los recalces de los muros preexistentes, así como un muro de contención en el nuevo muro de carga de tapial.

**Estructura:**

Los nuevos muros se construyen de tapial de 60 cm.

Los nuevos forjados de piso y cubierta se construyen con escuadrías de madera aserrada del país. Los forjados serán de tabla de madera. Los forjados de escalera se resolverán con vigas de madera.

**Sistema envolvente**

El revestimiento existente de los muros de mampostería se mantiene reparando las jambas y dinteles que se modifican en la apertura de los nuevos huecos mediante mortero de cal en el interior se construye un trasdosado de estructura de madera, aislante de lana de oveja de 8 cm y placas de arcilla de 2 cm revocadas con mortero de arcilla local. Los nuevos muros de tapial tendrán un mortero de cal calicostrado en su cara interior y exterior.

*Memoria sostenible relativa a la edificación con tapia:*

Con este proyecto se pretende dar respuesta a la nueva edificación con una concepción del uso que tenga en cuenta aspectos de la preexistencia, entorno, clima y luz, orientación, confort, eficiencia y economía de recursos y respeto medioambiental.

La construcción tradicional de la zona consiste en muros de carga de mampostería ya sea de piedra local o de tierra (tapia).

Con la intervención se pretende recoger este legado, potenciarlo y complementarlo con el fin de darle continuidad en el tiempo sin perjudicar su esencia e identidad.

La ampliación a noroeste, donde se sitúa la construcción con tapial se realiza a modo de mochila térmica, protegiendo los espacios intermedios. Ésta alberga el núcleo de accesos y parte del programa de habitaciones, así como en planta baja las zonas de aguas, baños wellness y gimnasio.

*Planos y detalles constructivos*

Los planos de plantas, alzados y secciones se encuentran en el Anexo 1.

## SEGUIMIENTO DE OBRA

### CONOCIMIENTOS DE LA TÉCNICA POR LA EMPRESA CONSTRUCTORA

Hoy en día, en Aragón y en España existe un desconocimiento general de la técnica del tapial, de su historia y de su proceso de ejecución por parte de proyectistas y constructoras. Pocos son los arquitectos que muestran interés por este tipo de construcción y todas las posibilidades que nos puede ofrecer. Después de haber participado en este proyecto, puedo afirmar que de forma habitual se tenía la creencia de que la construcción con tierra se relacionaba solo con técnicas locales y pobres, incluso limitadas a la autoconstrucción en entornos rurales. Cuando la empresa constructora Elecnor realizó la oferta para el proyecto de rehabilitación y ampliación del hotel de Monroyo, no se tenía ningún tipo de experiencia en construcciones de este tipo. Se desconocía completamente tanto el tipo de técnica de ejecución como el coste que esta podría tener.

La experiencia de la arquitecta y de constructores que habían trabajado con ella, habiendo realizado varios trabajos con tapial, aunque de una escala menor, fueron la primera referencia a la que se acogieron los constructores. Se presentaron muestras y vídeos que permitieron comenzar a planificar cómo se ejecutarían dichos trabajos.

## SELECCIÓN DEL MATERIAL Y ESTUDIO DE LA TIERRA

La masía de la Torre del Marqués se emplaza en una finca de 1.288.976 m<sup>2</sup> (Fig 27).

Para construir con la premisa de utilizar materiales de proximidad y a su vez conseguir una integración paisajística total, las tierras para realizar el muro se extrajeron de la misma finca (Fig 28, Fig 29). Se realizaron varias tomas de muestra del material en distintos puntos del emplazamiento. A partir de aquí, se ensayaron los componentes de la tierra en un laboratorio de Alcañiz que concluyó cuáles eran los puntos de extracción más óptimos.

Finalmente, se extrajo de dos lugares concretos, de uno de ellos salían las gravas y del otro la arcilla.



Fig 29 Zonas de extracción de tierras en la finca. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor



Fig 27 Finca de la Torre del Marqués. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor



Fig 28 Tierra de extracción. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor

## TIPOLOGÍA DE TAPIA. TAPIA CALICOSTRADO



Fig 30 Costra de mortero de cal y cáñamo en interior de tapial. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor



Fig 31 Ejecución de la costra de mortero de cal y cáñamo. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.



Fig 32 Ejecución de la costra de mortero de cal y cáñamo. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.

Si existe un tipo de revestimiento característico en la península es el denominado “calicastrado” (o costra de cal), muy habitual en la construcción militar de la época almohade y difundido especialmente en la construcción popular de la Submeseta Sur y Levante. Esta técnica consiste en proporcionar el revestimiento durante el mismo proceso de apisonado del tapial, obteniendo así una tapia reforzada en las caras o acerada, donde estos materiales de refuerzo se disponen junto a las caras del tapial antes del apisonado de cada tongada, quedando así íntimamente ligado el revoco a la masa del muro. Este careado suele hacerse con mezcla de cal y arena que recibe el nombre de “malhecho” (según testimonios orales de albañiles de la provincia de Albacete) y una vez endurecido se le denomina “costra”, refiriéndose al muro como “tapia con costra” o “calicostrada”. La mezcla (una parte de cal por tres de arena normalmente) se pone “en el mismo estado de humedad que la tierra; esta mezcla se extiende a lo largo de los tableros y arrimada a ellos” (Castilla, 2011).

En la obra de Monroyo se realizó una tapia calicostrada. En este caso, la costra se realizó con mortero de cal y cáñamo, con una densidad de aproximadamente 350kg/m<sup>3</sup> de mortero de cal. La relación es de 2:6 (cáñamo:cal) (Fig. 30, Fig. 31, Fig. 32). Las dimensiones de la calicostra son de un espesor en el exterior del muro de 7cm y un espesor en el interior de 3cm (Fig 33). Se realiza en forma de cuña.



Fig 33 Sección tipo costra. Fuente: Elaboración propia

El cáñamo posee muy buenas cualidades en cuanto a aislamiento térmico, con una conductividad muy baja. Es además libre de nutrientes para parásitos, lo que ahorra tratamientos previos de ningún tipo y se trata de una planta de crecimiento rápido. (Brümmer, 2015)

## TÉCNICA

### Preparación de la tierra:

El proceso de construcción consistía en llevar primero las tierras de los puntos de extracción hacia una zona intermedia donde estas eran mezcladas con la misma retroexcavadora (Fig 34, Fig 35, Fig 36). La relación de la mezcla era de 70% de arcilla y 30% de grava. Se realizaban 3 viajes con arcilla, 1 viaje de grava y se mezclaba.

Posteriormente esta mezcla de tierras se llevaba próxima a la obra y era allí cuando se humedecía, se mezclaba con paja y con una grúa telescópica y un cazo amasador se elevaba la mezcla hasta el propio muro (Fig 37, Fig 38, Fig 39).



Fig 37 Grúa telescópica elevando las tierras para la ejecución del muro. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.



Fig 38 Cazo amasador del mortero de cal y cáñamo. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.



Fig 34 Extracción de tierras. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.



Fig 35 Zona intermedia de mezcla de tierras. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.



Fig 36 Zona de mezcla. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.

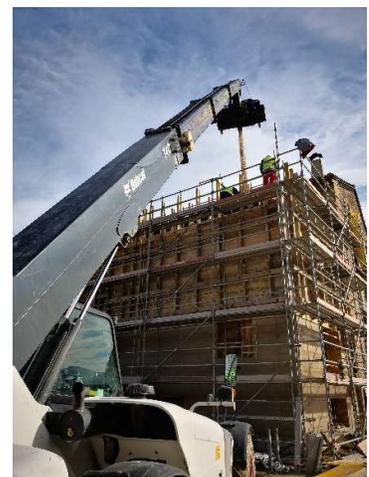


Fig 37 Grúa telescópica elevando las tierras para la ejecución del muro. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.

### **Puesta en obra:**

En primer lugar se realizaban las costras de cal y cáñamo. Una vez estas estaban ejecutadas, se vertían las tierras mezcladas con paja y los operarios con un pisón vibrante de placa cuadrada compactaban las tierras en tongadas de 10-15cm de altura para formar una capa firme de tierras (Fig 40, Fig 41).

El proceso de humectación en esta obra se realizaba de forma manual. Dependiendo de las condiciones climatológicas y de la humedad relativa de la obra, se variaba en pequeña cantidad la relación de agua y tierra y la cantidad de gravas y arcilla.



*Fig 39 Ejecución del muro de tapial. Ejecución de la costra y seguidamente pisonando de la tierra. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.*



*Fig 40 Ejecución del muro de tapial. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.*

## TAPIAL (ENCOFRADO UTILIZADO)

Al principio de la obra surgieron varias dudas importantes sobre el tipo de encofrado que se podría utilizar, ya que este tenía que permitir su movimiento en vertical y a su vez posibilitar el trabajo de apisonado en su interior.

En este caso se optó por un conjunto de correas horizontales y verticales. Las verticales ("velas") de 5x180 (Fig 41). Estas correas se encontraban conectadas mediante tuercas y varillas con las horizontales y se atirantaban mediante unas varillas roscadas ("latiguillos") tensadas y sujetadas por ranas (Fig 42). Los tableros eran de 1,97m x 0,5m y de 0,97m x 0,5m. Los paneles se montaban a medida que el muro se ejecutaba y los situados en hiladas inferiores se desmontaban (Fig 43, Fig 45). Se desencofraba cuando se tenía una altura de 2,5m y siempre que hubieran pasado 3 días desde la última capa ejecutada. Una vez se desencofró hubo que cortar los tirantes de acero (Fig 44).



Fig 43 Puesta en obra del muro con tapial. Tapiales desmontados en parte inferior. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.



Fig 45 Puesta en obra del muro con tapial. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.

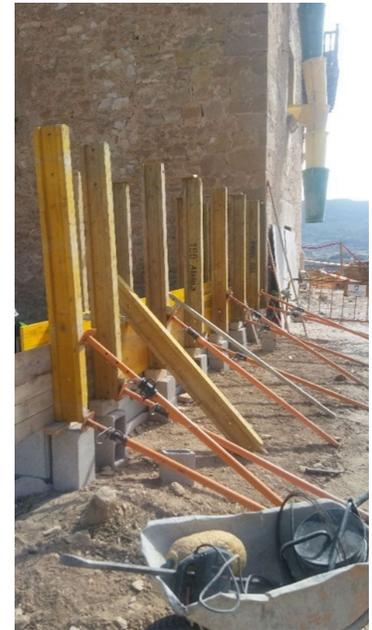


Fig 41 Velas del tapial. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.



Fig 42 Latiguillos del tapial. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.

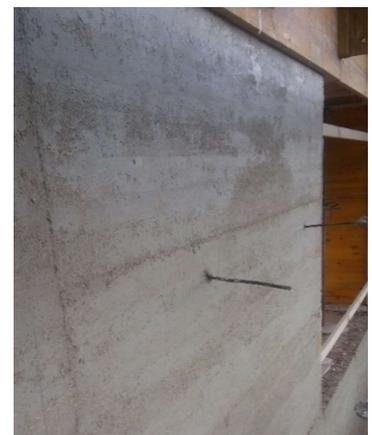


Fig 44 "Latiguillos" que se tienen que cortar a posteriori. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.



Fig 46 Ejecución de prototipo de tapia. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.



Fig 47 Desencofrado del prototipo de tapia. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.



Fig 48 Prototipo de tapia con distintas cales. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.

## PROTOTIPOS REALIZADOS

Con el objetivo de controlar el proyecto, asegurar un buen resultado y experimentar con la técnica de ejecución, se realizaron varios prototipos de muros a priori.

Bajo la dirección facultativa del proyecto que dirigió el protocolo de construcción, se realizaron 3 prototipos con distintas cales. De esta forma, se tenía un primer contacto con el proceso de ejecución, observando los puntos conflictivos y experimentando su ejecución con el calicostrado (Fig 46, Fig 47, Fig 48, Fig 49). Estos módulos sirvieron para la observación del aspecto final, las texturas y gamas cromáticas tendrían los muros.

La ejecución del prototipo sirvió también para analizar el tiempo necesario para el desencofrado, ya que en un primer momento se desencofró pasado un día y se llegó a la conclusión que había que esperar varios días, hasta una semana mínimo.

Se realizaron los prototipos examinando distintas cales y al final se optó por un mortero de cal "El tigre - NHL-3,5", una cal hidráulica de Cervera.



Fig 49 Ejecución de prototipo de tapia. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.

## CONTROL DE CALIDAD

Para el control de calidad se sacaban muestras cada semana.

En un principio se realizaban probetas de 15x15x15cm. Según aseguran los propios constructores estos valores no eran significativos y no correspondían a la realidad, ya que la compactación y el proceso de ejecución de estos módulos de tamaño más reducido son muy distintos a los del muro de carga que se estaba ejecutando.

Posteriormente, la dirección de obra indicó que el protocolo a seguir con los ensayos del muro de tapial era realizar las probetas de 30x30x30cm y se efectuarían roturas a los 2 días, a los 15 días y a los 60 días (Fig 51) (2 probetas de cada serie).

Un muro de planta baja se desvió y se tuvo que volver a ejecutar. Este módulo se apartó de la obra y se aprovechó para realizar controles sobre él a los 2 días, a la semana y a los 60 días, dando resultados positivos (Fig 50).

Se realizaron también probetas estadísticas cilíndricas de cáñamo y cal para resultados de compresión y de tracción en la calicostra.

Los resultados de las probetas en cuanto a resistencia de compresión simple han resultado ser muy variables a lo largo de la obra, desde 0,63 N/mm<sup>2</sup> siendo éste un valor muy bajo, hasta 5 N/mm<sup>2</sup> siendo éste un valor alto en las últimas probetas realizadas y en el muro que se apartó.



Fig 50 Probetas de 30 x 30 x 30cm.  
Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.



Fig 51 Muro que se tuvo que reconstruir y que se utilizó como probeta para los controles de calidad.  
Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.



Fig 52 Muros de cimentación de hormigón armado. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.

## ESTRUCTURA

### Muros de cimentación de hormigón armado

La cimentación del proyecto se realizó con muros de hormigón armado (Fig 52). Los muros de tierra no trabajan correctamente con los esfuerzos de presión lateral a los que estos están sometidos ni en contacto con el agua, por lo que la solución más razonable es el hormigón armado. Las uniones entre la cimentación y el muro de tapial se realizan mediante esperas de 0,5 m de longitud y de 12 y 16 mm de diámetro (Fig 53).

### Muro de tapial

EL muro de tapial se proyectó como muro de carga estructural de 60cm de espesor.

### Dinteles de madera

Los dinteles que aparecen encima de los distintos huecos se realizaron con madera aserrada de pino (Fig 54, Fig 55). Éstos consistían en 2 vigas de 0,3m x 0,14m si eran inferiores a 0,75m de longitud y de 0,36 x 0,16m si eran superiores a 0,75m de longitud.



Fig 53 Esperas de unión del muro de cimentación con el tapial. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.



Fig 55 Dinteles de madera. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.



Fig 54 Dinteles de madera. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.

### Zunchos de madera

Los zunchos perimetrales se realizaban con madera aserrada de pino C24 con tratamiento autoclave fungicida y anti xilófagos, acabados con barniz de base acuosa incoloro (Fig 56, Fig 57). Las dimensiones de estos zunchos variaban según su posición.

Estos zunchos se embebían en el muro de tapial.

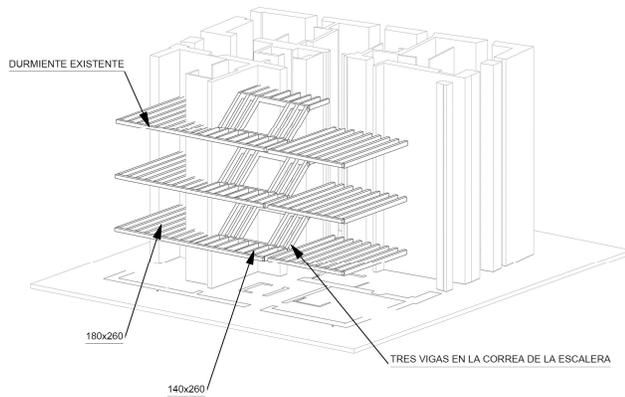


Fig 57 Estructura de madera. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.

La unión con las vigas de madera se realizaba de forma mecanizada con unas uniones ocultas (Fig 58, Fig 59, Fig 60, Fig 61).



Fig 59 Uniones mecanizadas con las vigas de madera (rotoplast). Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.



Fig 56 Zuncho de madera. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.

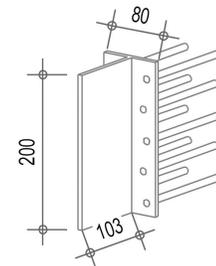


Fig 58 Unión oculta Rotoplast. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.



Fig 61 Uniones de vigas con zuncho perimetral ocultas. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.



Fig 60 Unión oculta Rotoplast. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.

### Refuerzos en esquinas

En las esquinas se colocaban unas escuadras de madera que reforzaban la unión perpendicular (Fig 62).



Fig 62 Refuerzo en esquina. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.

## RENDIMIENTOS



*Fig 63 Protección del muro de tapia durante su ejecución por lluvias. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.*

Una de las grandes dificultades del proyecto fueron las inclemencias meteorológicas. El muro se construyó durante los meses de otoño y durante este tiempo se presentaron lluvias abundantes y se tuvo que parar y cubrir todo durante los días de lluvia (Fig 63, Fig 64). Esto significó un sobrecoste importante, ya que las fechas del planning inicial variaron notablemente y se retrasó su construcción a casi el doble. Se tardó un total de 51 días en ejecutar el muro exterior de tapia.

Los rendimientos finales salieron bajos en comparación con los estudiados en un primer momento en su oferta. El rendimiento medio por día fue de 4,8m<sup>3</sup>.



*Fig 64 Protección del muro de tapia durante su ejecución por lluvias. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.*

## ACABADO SUPERFICIAL

Referente a los revestimientos, en el momento presente de redacción del TFG, aún no se ha aplicado ningún tipo de acabado superficial. Se prevé la aplicación de una impregnación superficial de silicato potásico en todo el muro, con un componente más agresivo en el exterior y con la finalidad de evitar el desprendimiento de partículas ocasionado por la erosión mecánica (producida por el uso cotidiano de los espacios habitables) en el interior (Fig 65, Fig 65).

En el aspecto final del muro de tapia de la obra de Monroyo se observan pequeñas variaciones entre tongadas que levantan la curiosidad (Fig 67). El constructor de la obra asegura que esto se debe a dos razones. Por un lado, las distintas circunstancias ambientales que se han encontrado durante su ejecución, ya que la presencia de mayor o menor humedad afecta a las condiciones iniciales de la tierra y a su secado, generando aspectos finales distintos. Por otro lado, durante la obra se tuvo que pedir distintos lotes de cáñamo, y esto supuso un cambio en el tamaño de las fibras que lo componen y una textura final distinta. En algunos puntos se observa la aparición del cáñamo en el mortero, cosa que difería de los ensayos ejecutados, y por lo tanto se rechazaron los lotes donde se consideró que el tamaño del material resultaba excesivo.



*Fig 67 Acabado superficial con diferentes texturas. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.*



*Fig 65 Acabado superficial interior. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.*



*Fig 66 Acabado superficial interior. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.*

## ADVERSIDADES DURANTE LA OBRA

### Cantidad de cáñamo

La teoría del calicostrado y la práctica resultaron diferir mucho en cuanto a material. Durante la fase de estudio del proyecto por la constructora, el cálculo de cáñamo necesario para la obra resultó no ser suficiente. La cantidad de cáñamo que se tuvo que pedir aumentó a una relación de 3, ya que no se tuvo en cuenta su densidad en la compactación, una vez prensado con el compactador el material se comprimía mucho más de lo previsto. La cantidad de este material tiene una alta repercusión económica en la ejecución del muro.

### Estructura

Uno de los mayores dilemas y dudas sobre este muro de tapia recae en el hecho de tratarse de un muro de carga.

Debido a la ausencia de normativa sobre la construcción con tierra pisada, el proyecto entregado a la constructora carecía de cálculos que justificasen la capacidad portante del muro. Este tema fue uno de los desencadenantes de que el jefe de obra encargado en un primer momento del proyecto se negara a asumir la responsabilidad de la construcción de este muro y abandonara el proyecto.

Las acciones a las que puede estar sometido un muro de tapia son las permanentes (peso propio), las variables (uso o acciones climáticas) y las accidentales (sismo, incendio o impacto).

Frente a estas acciones el muro debe responder con resistencia y estabilidad, además, debe garantizar un buen comportamiento estructural sobre sí mismo y sobre la cimentación y el terreno.

Las patologías estructurales en la tapia pueden venir dadas por una resistencia a tracción inferior a la tensión debido a la acción de las vigas a través del peso propio del forjado y de las cargas de uso o por el empuje lateral por inestabilidad o sismo; y por una resistencia a compresión inferior a la tensión debido a la acción en la base del muro del peso propio del forjado y de las cargas de uso.

Además, pueden aparecer patologías debido a una resistencia a tracción inferior a la tensión sobre la cimentación y el terreno, ya sea porque el terreno cede ante el peso propio del muro de tapia o por los asentamientos diferenciales del terreno. Esta problemática afecta directamente en la estabilidad del muro, provocando un movimiento descendente en alguna parte de la construcción y un vuelco que produce una separación entre muros(Ortiz, 2014)



Fig 68 Separación del muro de tapial del muro existente. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.



Fig 69 Grietas en las partes inferiores del muro. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.

Seis meses después del desencofrado del muro y de su puesta ya en carga, aparecen grietas significativas en distintas partes del proyecto, en varias secciones del muro se cree que pueden comprometer la estabilidad del muro y se vuelve a apuntalar toda la ampliación realizada con tapia y estructura de madera (Fig 68, Fig 69, Fig 70). En la parte superior, se llega a separar 5cm de la cubierta (Fig 71). El propio peso del muro supone una compresión excesiva, no prevista en su estudio, con una resistencia a compresión inferior a la tensión. Distintos técnicos que estudian la obra aseguran que una subestructura interior hubiera sido la mejor opción en un muro de estas dimensiones y composición.



*Fig 71 Separación del muro y la estructura de cubierta. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.*

Se plantea por parte de la empresa constructora el refuerzo con una estructura alternativa metálica en las partes más afectadas del muro y por parte de la proyectista una estructura de madera más acorde con la idea sostenible del proyecto. Este tema se encuentra pendiente de ser reestudiado en el momento de la redacción del presente TFG.

A raíz de estas tensiones aparecen problemas adyacentes al movimiento del muro, ya que se redistribuyen las fuerzas y a todo lo que se encuentra en contacto con la tapia se le suman unas nuevas tensiones que llevan a la rotura de alguno de los pre marcos y encofrados.



*Fig 70 Grietas en las partes inferiores del muro. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor.*

## RESULTADO FINAL

Con el seguimiento de esta obra, se observa la situación en la que se encuentra la construcción con tierra en nuestro país y la necesidad de plantear unas perspectivas de mejora.

Se percibe la importancia que tendría la aprobación de una normativa que permitiera dar mejores garantías a nivel estructural y un conocimiento más técnico. Hasta ahora la técnica del tapial se basa en recomendaciones de la tradición popular.

Por otro lado, es indudable el valor bioclimático y sostenible que tiene la construcción con tierra. El uso de materiales ecológicos de km 0 de buen comportamiento higrotérmico es una de las premisas en este proyecto. El muro de tapia en este caso actúa como un regulador higrotérmico; aportando inercia y control de la humedad. En este proyecto la arquitecta afirma que en cuanto a emisiones de CO2 se ha hecho una selección consciente de materiales que junto con el muro de tapial puede ascender a una reducción tanto del impacto ambiental como de los Kg de emisiones de CO2 equivalente a cerca de un 40% respecto métodos más convencionales.

Destacar también el valor estético y de integración paisajística que tiene la ampliación de la Torre del Marqués. El muro de tierra pisada posee una fuerza expresiva única gracias a sus tonos terrosos y la naturalidad del material que nace de ese paisaje y que pasa a formar parte de él. Se encuentran perfectamente legibles las diferentes capas del material acabado y la energía que se ha usado para su construcción (Fig 72, Fig 73, Fig 74).



*Fig 72 Ampliación de tapia una vez desencofrado todo el muro. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor*



*Fig 73 Ampliación de tapia una vez desencofrado todo el muro. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor*



*Fig 74 Muro de tapia desde interior. Fuente: Documentación gráfica de la empresa Elecnor*

## INDUSTRIALIZACIÓN DE MUROS DE TIERRA PISADA



Fig 75 Puesta en obra de tapial prefabricado. Fuente: Paredes de tapial y su industrialización (M. Rauch, 2011)



Fig 76 Construcción prefabricada con tapial. Fuente: Paredes de tapial y su industrialización (M. Rauch, 2011)



Fig 77 Construcción prefabricada con tapial. Fuente: Paredes de tapial y su industrialización (M. Rauch, 2011)

Con la vocación de dar un paso hacia adelante, buscando modernizar el mercado de la construcción con tierra, la industrialización de la técnica del tapial significaría un gran avance (Fig 75).

El tapial se ha vinculado hasta estos últimos años en España con la ejecución insitu. Sus consecuentes limitaciones han hecho que sea una técnica muy olvidada, que ha resurgido por la necesidad de movernos hacia la sostenibilidad. Como se ha observado en el ejemplo de la obra de Monroyo presentada en este trabajo, este tipo de construcción in situ implica una alta cantidad de trabajo en forma de labor humana y poco conocimiento especializado sobre esta técnica en nuestro país. Como alternativa a la construcción tradicional, se puede plantear una externalización de los procesos constructivos en centros de producción (Fig 76).

En una construcción prefabricada, los procesos en la obra son esencialmente de montaje y no de elaboración. Con el objetivo de progresar dentro del mundo de la construcción con tierra, la industrialización del tapial permitiría una serie de ventajas respecto la construcción hasta estos últimos años.

Se posibilitaría una racionalización de los tiempos y los costes de mano de obra. Asimismo se podría llevar un control más exhaustivo de la dosificación tierra/agua, del grado de compactación y del acabado final. Se podría llevar un mejor control de calidad dentro del proceso de construcción, e incluso se podrían llegar a integrar instalaciones eléctricas y de clima sin afectar el aspecto exterior de los muros.

Las grandes ventajas que se han mencionado anteriormente, junto con el hecho de que se ejecutan las distintas partes del trabajo en el taller sin estar expuestos a las inclemencias del tiempo y con un montaje ágil convierten a la prefabricación en un gran avance (Fig 77, Fig 78, Fig 79).

Tomando como referencia los avances que implicaron la prefabricación del hormigón armado en los años 60 se podría hacer un símil al progreso que representaría aplicar la prefabricación a la construcción con tierra.

Como virtudes que ya se han mencionado anteriormente, la industrialización significa la optimización desde una concepción industrial: construyendo por módulos y siguiendo procesos de trabajo estandarizados con mayor producción tecnológica.

Con el prefabricado se consigue una mayor calidad de los materiales y los acabados, ya que éstos están sometidos a mayores

controles de calidad. Se reduce el espacio necesario para acopio y producción de piezas en obras, así como los equipos de trabajo.

Una de las ventajas más significativas es la reducción en los tiempos de ejecución que conllevaría a que los costes globales de la obra también se reduzcan en esta fase.

Como desventajas principales, el coste de la producción de prefabricados, por norma general, puede llegar a ser más caro, sumando el sobre coste que implicaría el transporte de los elementos.

El transporte es una de las dificultades y dudas ecológicas que presenta el tapial. Por un lado, carece de ductilidad y así exige un traslado mucho más cuidadoso que el que podría requerir otros materiales de construcción o prefabricados. Por otro lado, el impacto ambiental que significa el transporte entra en consideración.

Asimismo, teniendo en cuenta que el transporte se trata de una práctica habitual con otros materiales de construcción, en este caso supone un balance mucho más bajo en todo su ciclo que el que podría resultar del hormigón o de la cerámica. Igualmente, esto quedaría resuelto si se produjera un aumento considerable de la demanda que supusiera una aproximación a los emplazamientos de las obras. En países en vías de desarrollo se plantea la opción de incorporar talleres temporales cerca de la obra, con transferencia de tecnología de fabricación móvil.

Las distintas fases de construcción de los muros de tapial se pueden definir como las siguientes:

#### 1. Producción industrial de los módulos

- Prefabricación
- Secado
- Empaquetado

#### 2. Puesta en obra:

- Montaje de las piezas: Partiendo de la cimentación, se coloca una capa fina de arcilla que trabaje como fijación entre los primeros módulos y la cimentación. Los módulos sucesivos se colocan mojando con agua la pieza precedentemente posicionada.
- Sellado de las juntas: Se realiza rociando agua en las juntas y rellenándolas con la misma tierra utilizada. Por la ductilidad del material y la ejecución de estas juntas, el sistema de construcción prefabricado también puede producir grandes muros contiguos de aspecto monolítico.



Fig 78 Módulos de tierra pisada.  
Fuente: [www.lehmtonerde.at](http://www.lehmtonerde.at)



Fig 79 Manipulación módulos de tapial en obra. Fuente: [www.lehmtonerde.at](http://www.lehmtonerde.at)

## PROYECTOS EN TAPIAL PREFABRICADO

Para ilustrar el estado de la prefabricación, se ha creído conveniente adjuntar distintos ejemplos representativos en el ámbito de la construcción industrializada con elementos de tierra pisada que muestren las distintas posibilidades de trabajo que existen actualmente.

### IMPRENTA GUGLER, MELK, AUSTRIA, 1999

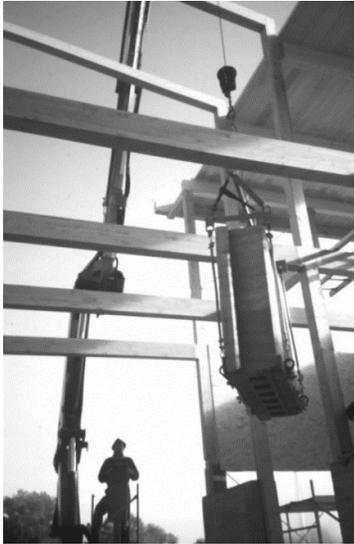


Fig 80 Proceso de construcción Oficinas Gugler. Fuente: <http://www.lehmtonerde.at/en/projects/project.php?pid=37>

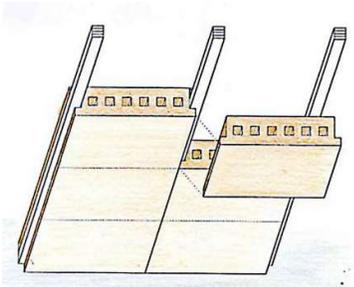


Fig 82 Sistema de prefabricado para las Oficinas Gugler. Fuente: <http://www.lehmtonerde.at/en/projects/project.php?pid=37>



Fig 81 Oficinas imprenta Gugler  
Fuente: <http://www.lehmtonerde.at/uploads/pict>

Este primer ejemplo proyectado por los arquitectos Ablinger y Vedral & Partner se trata de una imprenta para 60 empleados (Fig 81).

El edificio se caracteriza por la zona del pasillo central y de oficinas dónde la carpintería de madera, los muros de tapial y un techo continuo de vidrio le dotan de esta atmósfera tan característica y de gran calidad ambiental. La construcción de este ala administrativa se realizó con 160 elementos de tapial prefabricado,

en el formato de 1,70 x 1,30 X 0,40m. Los muros fabricados con la técnica *Pise* (Tapial en francés), fueron planeados por Martin Rauch y suponen un arriostramiento general de la estructura (Fig 80).

En esta obra, se lleva el criterio energético más allá, ya que se absorbe energía a través de canales de aire en el suelo desde una zona verde, la cual fluye más allá de los muros hacia las oficinas. En lugar de los radiadores y los sistemas de climatización convencionales. Se trata de un sistema de muros activos mediante los cuales el cuerpo regula la temperatura disipando la energía. Las piezas tienen unas aberturas por las que se permite una renovación del aire y refrigeración (Fig 82, Fig 83, Fig 84).

Todas las piezas se prefabricaron en taller durante 3 meses. La colocación en obra fue mucho más rápida y se realizó en un período de 2 semanas, el mismo que se empleó para los trabajos de carpintería (Fig 85). Se proyectaron las piezas para que coincidieran con la madera, facilitando el montaje y dejando a la carpintería la función de absorber las diferencias entre ambos sistemas constructivos.

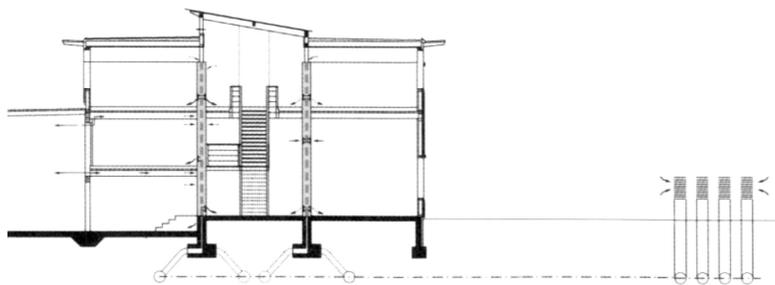


Fig 84. Sección con representación de sistema energético. Fuente: "Estudio Comparativo de las Técnicas Contemporáneas en Tierra" Gatti, 2012



Fig 83 Módulo prefabricado imprenta Gugler. Fuente: "Estudio Comparativo de las Técnicas Contemporáneas en Tierra" Gatti, 2012



Fig 85 Módulos prefabricados imprenta Gugler. Fuente: "Estudio Comparativo de las Técnicas Contemporáneas en Tierra" Gatti, 2012

## CENTRO DE RICOLA, LAUFEN, SUIZA, 2014



Fig 86 Ejecución de los módulos prefabricados.  
Fuente: [www.lehmtonerde.at](http://www.lehmtonerde.at)



Fig 88 Módulos prefabricados en taller. Fuente: [www.lehmtonerde.at](http://www.lehmtonerde.at)



Fig 89 Desplazamiento de los paneles en taller.  
Fuente: [www.lehmtonerde.at](http://www.lehmtonerde.at)



Fig 90. Desplazamiento y sujeción en obra. Fuente: [www.lehmtonerde.at](http://www.lehmtonerde.at)



Fig 91 Puesta en obra.  
Fuente: [www.lehmtonerde.at](http://www.lehmtonerde.at)



Fig 87 Arquitectura viva 168. MASS IS MORE

Dentro de un entorno agrario e industrial se encuentra el centro para Ricola, un edificio monolítico destinado a la preparación de la planta para los dulces Ricola (Fig 87). Con la premisa de un diseño sostenible, tradicional pero innovador, Herzog and de Meuron junto con la constructora de Martin Rauch, Lehm Ton Erde, consiguieron crear una envolvente de 45 centímetros de espesor y de aproximadamente 3.000 m<sup>2</sup> de fachada autoportante. Se utilizaron recursos obtenidos en un radio de 10 km como máximo, procedentes básicamente de barro y de áridos de la excavación.

Pierre de Meuron señala que *“Como arquitecto se debe tener en cuenta el lugar donde el edificio se levantará. El material usado para construir la envolvente del Centro de Hierbas procede de un radio de entre 8 y 10km del solar. El edificio se construye a partir de la tradición local sobre la que se levanta”*.

Con el tapial, se vincula el edificio con el lugar y a su vez se consiguen satisfacer las condiciones óptimas de temperatura y humedad que se exigían para su uso en el interior.

Los módulos se fabricaron en un taller cerca del emplazamiento del proyecto y se montaron posteriormente en obra. Los paneles se colocan en fachada con la ayuda de grúas y las juntas se eliminaron posteriormente para dar ese acabado monolítico que buscaban (Fig 86, Fig 87, Fig 89, Fig 90, Fig 91, Fig 92).

Con el fin de disminuir la erosión del material se dispone de un mortero mezclando toba volcánica y cal cada ocho tongadas de tierra aportando plasticidad al muro al enfatizar la horizontalidad de las capas de tierra pisada.

El proyecto consigue plasmar todo aquello que la compañía Ricola defiende: Una empresa preocupada por el medio ambiente, innovadora, y arraigada a su tierra (Ricola, 2014).

El proyecto recibió el primer premio especial en innovación técnica otorgado por “Premio Terra” ya que este enfoque industrial innovador que se planteó abría nuevos horizontes para la prefabricación del tapial.



*Fig 92 Proceso de montaje de fachada. Almacén de Ricola. Fuente: Iwan Baan*

## ALNATURA CAMPUS DARMSTADT, GERMANY, 2017

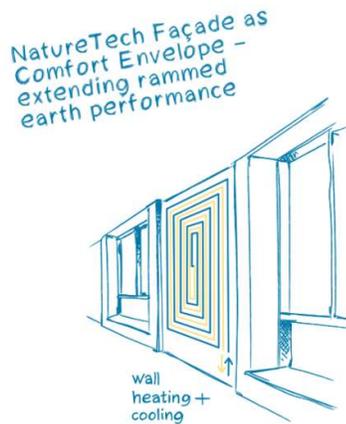


Fig 93 Esquema fachada Alnatura.  
Fuente:  
<https://transsolar.com/projects/alnatura-campus>



Fig 94 Muros prefabricados para Alnatura.  
Fuente:  
<http://www.lehmtonerde.at/de/projekte/projekt.php?pid=97>



Fig 96 Muros activos Alnatura.  
Fuente:  
<https://transsolar.com/projects/alnatura-campus>



Fig 95 Alnatura Campus. Fuente: <https://transsolar.com/projects/alnatura-campus>

La cadena de alimentos orgánicos Alnatura ha seleccionado en Darmstadt el lugar para la nueva sede de la empresa, el campus de Alnatura (Fig 95). El edificio diseñado por haascookzemmrich STUDIO 2050 junto con Martin Rauch y Transsolar, se caracteriza por el uso de una innovadora fachada de tapia y por ser pionera en la instalación de un sistema de climatización geotérmica en los muros (Fig 93).

La fachada se compone por bloques de tierra pisada de 3,5 x 1 metro, a lo largo de las fachadas norte y sur para formar 16 paños de pared de 12 metros de altura (Fig 94). Aquí por primera vez, se realiza un sistema de muro geotérmico integrado en una pared seca.

Los muros contienen un núcleo aislado de 17 cm de aislamiento que consiste en espuma de vidrio y gravilla, un producto procedente del reciclaje (Fig 96, Fig 97). Se colocaron juntas horizontales cada 30 a 60 cm para prevenir la erosión de la superficie de la tierra apisonada, reduciendo así el flujo de agua que provocaría esta erosión.

Otro punto que caracteriza notablemente este edificio es que la producción de los módulos se hizo en un espacio adyacente al lugar de la obra (Fig 98).

Durante la fase de planificación, se tuvieron que garantizar las premisas pasivas (Fig 99). La energía gris del nuevo edificio también se ha evaluado científicamente: se estudió la cantidad de energía que, en total, es necesaria para la producción, transporte,

almacenamiento, venta y eliminación de materiales de construcción, lo que llevó a soluciones de ahorro de recursos para los componentes de la construcción. El resultado es de un alto rendimiento.

Se trata de un edificio energéticamente eficiente con un confort interior optimizado, hecho de materiales reciclables o naturales, como la estructura del techo a dos aguas de madera y las fachadas de tierra (Fig 100).

El proyecto se galardonó en 2019 con 'Best Architects 20': edificios de oficinas de categoría

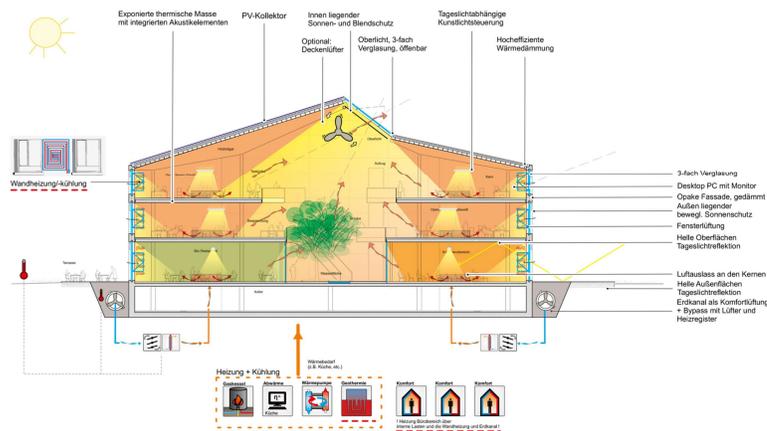


Fig 99 Esquema sistema energéticos Alnatura. Fuente: <https://transsolar.com/projects/alnatura-campus>

Como sistemas pasivos se puede mencionar que los huecos en las fachadas de tapia se encuentran protegidos con sombras en el exterior. Las fachadas este y oeste se encuentran acristaladas y, junto con el atrio, y los tragaluces orientados al norte, proporcionan la luz óptima durante el día. El trazado del sol se tuvo en cuenta en la distribución de la habitación para proporcionar una luz natural óptima en todo el edificio. El edificio cuenta con ventilación natural, un canal de tierra que acondiciona el aire frío y que circula hacia el interior. El proyecto se climatiza mediante un sistema geotérmico.



Fig 97 Proceso de compactación. Fuente: <http://www.lehmtonerde.at/de/projekte/projekt.php?PID=97>



Fig 98 Desplazamiento de los módulos en obra. Fuente: <http://www.lehmtonerde.at/de/projekte/projekt.php?PID=97>



Fig 100 Puesta en obra Alnatura. Fuente: <https://zrs-berlin.de/project/rammed-earth-facade-alnatura-welt-darmstadt/>



Fig 101 Sistema SIREWALL. Fuente: <https://sirewall.com/>



Fig 102 Puesta en obra con aislamiento y armaduras. Fuente: "Estudio Comparativo de las Técnicas Contemporáneas en Tierra" (Gatti, 2012)



Fig 103 Armaduras y aislamiento sistema SIREWALL. Fuente: "Estudio Comparativo de las Técnicas Contemporáneas en Tierra" (Gatti, 2012)

## SIREWALL

Como complemento al desarrollo tecnológico que representa la construcción prefabricada de los tapias, a continuación se presenta un sistema ESTRUCTURAL que significó un gran avance en la tierra pisada desde 1992.

SIREWALL es un sistema estructural de muros en sándwich patente de Terra Firma Builders.

Paramentos estabilizados de tierra compactada que envuelven un aislamiento con barras de refuerzo de acero corrugado ocultas en el centro de la pared (Fig 101).

La mezcla de tierra utilizada está formada por una selección de tierras con una buena granulometría.

La tierra se compacta mediante pisones neumáticos con una cabeza de 10cm de diámetro.

El sistema tiene cuatro patentes sobre esta tecnología específica que lidera el camino en la excelencia térmica y estructural de esta industria emergente.

Las principales características que definen este sistema son el aislamiento y su alta resistencia a compresión requerida para ser utilizada como material de construcción estructural (Fig 102, Fig 103, Fig 104, Fig 105).



Fig 104 Puesta en obra de los muros SIREWALL. Fuente: <https://sirewall.com>



Fig 105 Sede central de Telenor, Islamabad Fuente: <https://sirewall.com>

## NARBO VIA HISTORY MUSEUM, Narbona, 2019



Fig 108 Interior Narbo Via Museum. Fuente: <https://sirewall.com/project/narbo-via-history-museum-france/>

Narbona tuvo una gran relevancia en la Galia romana ya que allí se encontraba el puerto romano más importante del sur de Francia. Esta ciudad tiene un impresionante legado de edificios, reliquias y espacios arqueológicos.

El proyecto de Foster + Partners en colaboración con Studio Adrien Gradere, se centra en una exposición de más de 1000 piedras funerarias romanas de murallas medievales del siglo XIX.

Se trata de un proyecto de planta baja con un forjado superior de hormigón prefabricado soportado por muros de tapial estructurales prefabricado del sistema SIREWALL (Fig 106, Fig 107, Fig 108, Fig 109, Fig 110).



Fig 106 Textura muros de tapial. Fuente: <https://www.fosterandpartners.com/projects/narbo-via/#construction>



Fig 107 Muros SIREWALL. Fuente: <https://sirewall.com/project/narbo-via-history-museum-france/>



Fig 109 Imagen aérea muros Sirewall. Fuente: <https://sirewall.com/project/narbo-via-history-museum-france/>



Fig 110 Muros Sirewall. Fuente: <https://sirewall.com/project/narbo-via-history-museum-france/>

## FETDETERRA

Fetdeterra es una empresa catalana que ha investigado sobre la prefabricación de tapia y ha obtenido varios premios, entre ellos el premio Construmat 2017 en la categoría de producto o material innovador, por aunar tradición y responsabilidad sostenible.

La empresa nació por dos motivos. El primero por la necesidad de construir de forma más natural y sostenible y el segundo porque están ubicados en una zona (Lleida) donde hay muchas construcciones con tierra.



Fig 111 Muros de TapialBlock. Fuente: Catálogo Fetdeterra



Fig 113 Muros de TapialBlock. Fuente: Catálogo Fetdeterra



Fig 112 Muro de TapialBlock. Fuente: Catálogo Fetdeterra



Fig 115 Muro exterior límite de parcela con TapialBlock. Fuente: Fetdeterra



Fig 114 Análisis del ciclo de vida útil construcción con TapialBlock. Fuente: Catálogo Fetdeterra

El 50% de su trabajo se desarrolla en investigación, eco-innovar en construcciones de tierra pisada (Fig 114). A raíz de un desconocimiento del material, de la no existencia de existencias de normativas y de no conocer acerca de las dosificaciones ni de los estabilizantes A Maite Sanz y Macari de Torres, fundadores de Fetdeterra, les surgió esta necesidad de innovar. Por otro lado, también destacaba el problema de la puesta en obra, ya que se necesitan equipos especializados y hay poca gente que se dedique a este tipo de obras en España actualmente, con lo que se trata de una construcción poco competitiva y una ejecución muy lenta y costosa.

A partir de aquí desarrollan el TapialBlock (Fig 111, Fig 112, Fig 113, Fig 115).

La propuesta consiste en la industrialización de los muros de tierra pisada. TapialBlock consiste en bloques prefabricados de tierra donde el material ya está controlado. Se tiene un control sobre la tierra, el curado y se garantizan dimensiones y acabados concretos. Se reduce el tiempo de ejecución y no se requiere especialización en mano de obra.

La tierra utilizada es el resultado de muchos años de investigación, llegando a establecer su propia curva granulométrica, que define el material utilizado, así como la proporción de agua usada. Esta, por tanto, tiene alta resistencia y es apta para la construcción. Los bloques se construyen mediante el encofrado y prensado de tierra cruda, y no van cocidos, sino secados al aire. (Sainz de la Maza & De Torres)

Inicialmente se desarrolló con un tamaño de 40cm de ancho (mínimo para la construcción con tierra) y una altura de 15 cm. Esto recordaba a las tongadas de tierra de manera tradicional (Fig 116).

El mortero que utilizan consiste en la misma tierra pero de una granulometría mucho más fina, por lo que una vez esté seco conservará la misma textura.

Un gran reto era el de conseguir que se tratara de un material industrializado pero sin una forma homogénea, ya que querían recordar a antiguas tapias donde la segregación aparecía de forma espontánea. Controlando granulometrías consiguieron segregaciones de forma aleatoria.

Por otro lado, este material se puede dejar sin revestimiento tanto en interior como en exterior, ya que la tierra está estabilizada con cemento y por tanto protegida de la erosión de lluvia.

Los bloques de TapialBlock son muy fáciles de cortar, con una radial se pueden cortar y son muy resistentes para secciones pequeñas. Su manipulación, en caso de grandes bloques, se realizará mediante pinzas elevadores que garantizan el contacto sobre toda la superficie, para evitar tensiones diferenciales (Fig 117).

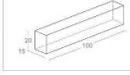
|   |                 |                  |
|---|-----------------|------------------|
|  | PRODUCTO        | Tapialblock L    |
|   | DIMENSIONES     | 100 x 40 x 15 cm |
|   | PESO            | 125 kg           |
|   | ESPESOR DE MURO | 40 cm            |
|  | PRODUCTO        | Tapialblock M    |
|   | DIMENSIONES     | 100 x 15 x 20 cm |
|   | PESO            | 60 kg            |
|   | ESPESOR DE MURO | 20 cm y/o 15cm   |
|  | PRODUCTO        | Tapialblock S    |
|   | DIMENSIONES     | 20 x 10 x 12 cm  |
|   | PESO            | 4,5 kg           |
|   | ESPESOR DE MURO | 12 cm y/o 10 cm  |

Fig 116 Productos TapialBlock.  
Fuente: Catálogo Fetdeterra



Fig 117 Manipulación de los bloques en obra. Fuente: Fetdeterra

## CONCLUSIONES

Actualmente nos encontramos en un momento en el que la perspectiva de la construcción con tierra ha mejorado. Poco a poco, y gracias a la presentación de nuevos referentes arquitectónicos ésta se va reintroduciendo en el mundo de la construcción.

A pesar de no tener un gran progreso técnico comparado con otras técnicas de construcción y con una significativa oposición social desde la revolución industrial, los valores bioclimáticos y sostenibles de la construcción con tierra convierten a este material en una gran alternativa para una arquitectura sostenible y eficiente.

Con la aparición de nuevos métodos de construcción prefabricada y con procesos de mecanización, se abre poco a poco un gran abanico de posibilidades que hacen frente a las dificultades que se presentan actualmente en la construcción con tierra como se ha visto reflejado en la obra de Monroyo. Se obtienen resultados con una mayor optimización sin estar condicionados por la meteorología.

Después de realizar el seguimiento de la construcción del muro de tapia de la Torre del Marqués de Monroyo, las conclusiones que se pueden obtener y que se deben mejorar desde una óptica objetiva se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Poco conocimiento técnico especializado de la construcción con tierra de tipo estructural.
- Los rendimientos de la construcción con tierra pisada in situ son muy bajos, con una gran carga de trabajo manual y un alto coste de mano de obra.
- La obra se encuentra sujeta a las inclemencias meteorológicas que se puedan presentar, por lo que se tendrían que evitar los meses más lluviosos del año.
- Con la ejecución in situ se tiene un control muy poco riguroso sobre los resultados.

El punto más importante recaería en la necesidad de un cuerpo de normativas específicas y ordenadas. La no aparición de normativa sobre tierra pisada en el CTE obstaculiza el trabajo de los arquitectos y constructores que opten por este tipo de construcción, teniendo que trabajar bajo la responsabilidad de cada uno.

## TRABAJOS CITADOS

- Bestraten, S., Hormías, E., & Altemir, A. (2011). Construcción con tierra en el siglo XXI. *Informes de la construcción*. Vol. 63, 523, 5-20.
- Brümmer, M. (2015). *EL CÁÑAMO EN LA CONSTRUCCIÓN: ANTECEDENTES, MATERIALES Y TÉCNICAS. ECOCONSTRUCCIÓN*.
- Castilla, F.J. (2011). *Revestimientos y acabados superficiales en construcciones con tierra contemporáneas*. Informes de la construcción. Vol.63, 523, 143-152.
- Gatti, F. (2012). *Arquitectura y construcción en tierra. Estudio Comparativo de las Técnicas Contemporáneas en Tierra*. Universidad Politécnica de Catalunya. Departamento de Construcción Arquitectónica I.
- Hidalgo, P., & Font, F. (2011). La tapia en España. Técnicas actuales y ejemplos. *Informes de la construcción*. Vol.63, 523, 21-34.
- Maldonado, L., Vela Cossío, F., & Hoz, J. (2003). *Diccionario de construcción tradicional. Tierra*. San Sebastián: Nerea.
- López Martínez, F. J. (s.f.). *Tapial, tapia y tapiería: propuesta de definición y clasificación*. Murcia. <http://www.restapia.es/files/14796>
- Minke, G. (2006). *Building with earth. Design and technology of a Sustainable Architecture*. Basel: Birkhäuser.
- Ortiz, M. (2014). *CATapia. LA ARQUITECTURA DE LA TAPIA EN CATALUÑA. CONOCIMIENTO, REIVINDICACIÓN Y RESTAURACIÓN*. Valencia: Universitat Politècnica de València.
- Sainz de la Maza, M., & De Torres, M. (s.f.). *Fetdeterra. Proyectos y productos innovadores de tierra*.

## OTRA BIBLIOGRAFIA DE INTERÉS NO CITADA

- Castellarnau Visús, Àngels (2012) "Construcción de una vivienda con muros de tapial en Ayerbe, Huesca. Fase 1: estructura y cerramientos", IX Congreso de Tierra en Cuenca de Campos, Valladolid, 2012.
- Cid, J., Mazarrón, F.R., Cañas, I. (2011) Las normativas de construcción con tierra en el mundo. Vol.63, 523, 159-169.
- Fabio Gatti, Arch. (2012) "Estudio comparativo de las Técnicas Contemporáneas en Tierra" Universidad Politécnica de Catalunya

Sainz de la Maza, M., (2017-2018) Videochat del Master de Gestión de Proyectos de Bioconstrucción. Módulo 4. Recuperado de: [https://www.youtube.com/watch?v=u\\_FVgE0UbxQ](https://www.youtube.com/watch?v=u_FVgE0UbxQ)

Salas, J. "De los sistemas de prefabricación cerrada a la industrialización sutil de la edificación: algunas claves del cambio tecnológico". Informes de la construcción, Vol. 60, 512, 19-34. Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja (CSIC). Madrid, Octubre-Noviembre 2008.

Von Mag, A. & Rauch, M. (2011). Paredes de tapial y su industrialización (encofrados y sistemas de compactación). Vol.63, 523, 35-40.

Yuste, Beatriz (2010). Arquitectura de tierra. Caracterización de los tipos edificatorios. Trabajo final de Máster Arquitectura Energía y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Cataluña.

### ENLACES DE INTERNET

<http://www.lehmtonerde.at>

<http://terra-award.org/project/special-prize-technical-innovation/>

<https://www.fosterandpartners.com/projects/narbovia/#construction>

<https://sirewall.com>

<https://www.haascookzemrich.com/en/projekte/alnatura-campus-en/>

<https://www.plataformaarquitectura.cl/cl/768016/ricola-krauterzentrum-herzog-and-de-meuron>

<http://vier.es/piscina-toro-ficha/>

<http://www.restapia.es>

<https://www.terrafirmabuilders.ca/what-is-sirewall/>

<http://ferminfont.blogspot.com>

[https://www.youtube.com/watch?v=u\\_FVgE0UbxQ](https://www.youtube.com/watch?v=u_FVgE0UbxQ)

### AGRADECIMIENTOS

Y por supuesto, no ha habido mejor bibliografía que todos los que me han ayudado a desarrollar este trabajo. En primer lugar, a la empresa ELECNOR, jefes de obra, encargado de obra y oficina técnica que me han facilitado toda la documentación del proyecto y me han permitido realizar visitas explicativas durante todo el proceso y en segundo lugar, quiero agradecer a mi tutora por la dedicación y apoyo que ha brindado a este trabajo.

## PLANOS

patio almendros



zona piscinas  
s.u.:51.15m<sup>2</sup>

oficina dirección  
s.u.:8.60m<sup>2</sup>

sauna  
s.u.:6.41m<sup>2</sup>

duchas  
s.u.:5.53m<sup>2</sup>

distribuidor  
wellness 2  
s.u.:7.95m<sup>2</sup>

baño vapor  
s.u.:9.48m<sup>2</sup>

relax  
s.u.:11.71m<sup>2</sup>

distribuidor wellness 1  
s.u.:9.72m<sup>2</sup>

vestuario  
s.u.:7.52m<sup>2</sup>

sala masajes  
s.u.:13.00m<sup>2</sup>

aseo 1  
s.u.:2.14m<sup>2</sup>

10 peñales

distr.servicios  
s.u.:5.40m<sup>2</sup>

maletas  
s.u.:4.13m<sup>2</sup>

armario teleco  
s.u.:4.35m<sup>2</sup>

escalera  
s.u.:11.13m<sup>2</sup>

escalera évat.  
s.u.:3.30m<sup>2</sup>

armario auxiliar  
s.u.:1.11m<sup>2</sup>

distribuidor 1  
s.u.:12.04m<sup>2</sup>

8 souppied

ALTAR

recepción  
s.u.:28.51m<sup>2</sup>

baño público 3  
s.u.:4.57m<sup>2</sup>

baño público 2  
s.u.:9.41m<sup>2</sup>

baño público 1  
s.u.:8.86m<sup>2</sup>

bar/ cafeteria  
s.u.:27.94m<sup>2</sup>

Torre del Marqués, Monroyo  
Ampliación de tapia  
Planta baja E\_1:100









dorm. 13  
s.u.:22.45m<sup>2</sup>

baño 13  
s.u.:6.17m<sup>2</sup>

distribuidor  
s.u.:9.58m<sup>2</sup>

dorm. 14  
s.u.:22.23m<sup>2</sup>

baño 14  
s.u.:6.61m<sup>2</sup>

salón  
s.u.:15.46m<sup>2</sup>

office  
s.u.:2.47m<sup>2</sup>

distribuidor  
s.u.:13.03m<sup>2</sup>

dorm. 18  
s.u.:17.96m<sup>2</sup>

dorm. 17  
s.u.:18.90m<sup>2</sup>

dorm. 16  
s.u.:24.48m<sup>2</sup>

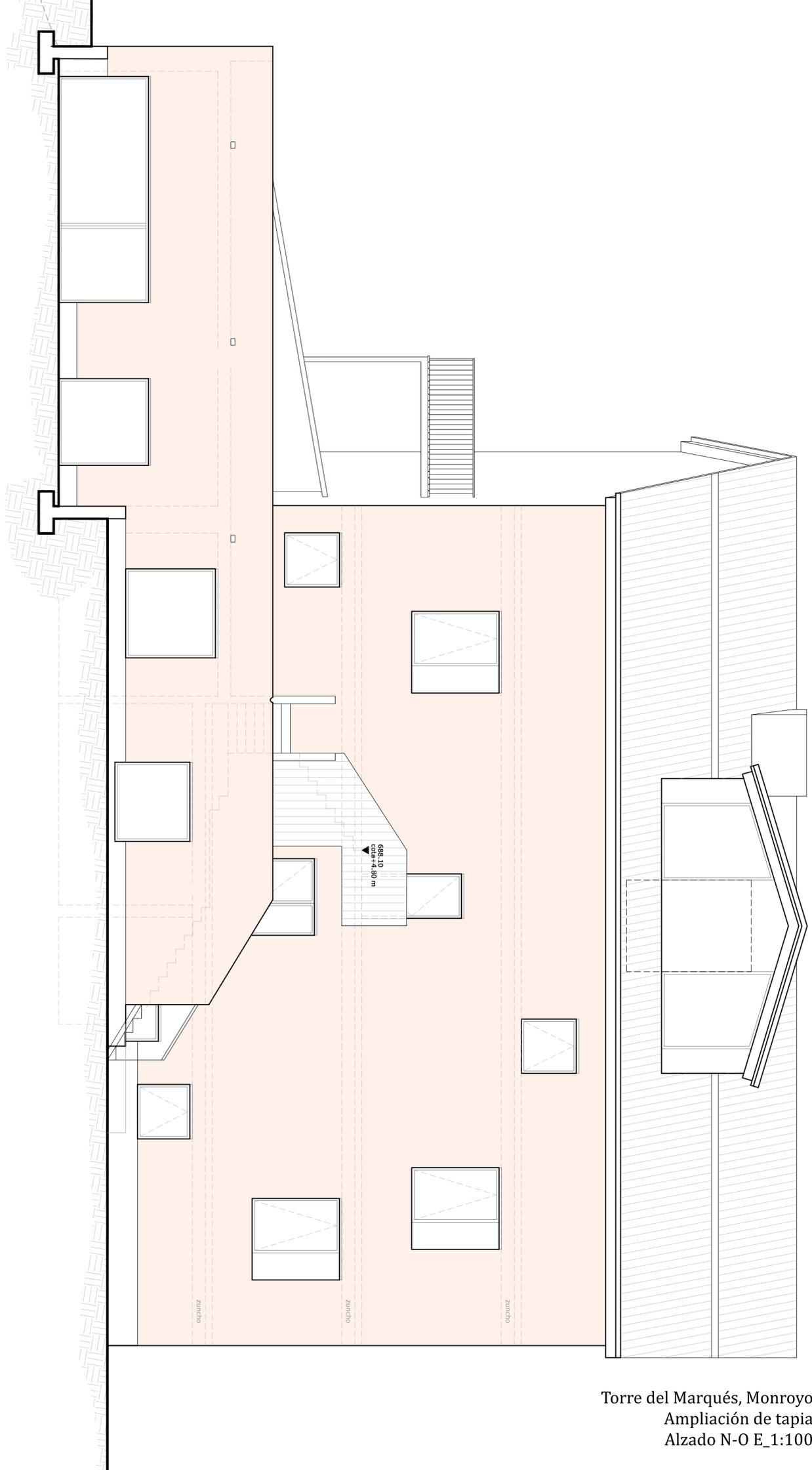
dorm. 15  
s.u.:18.94m<sup>2</sup>

baño 15  
s.u.:6.22m<sup>2</sup>

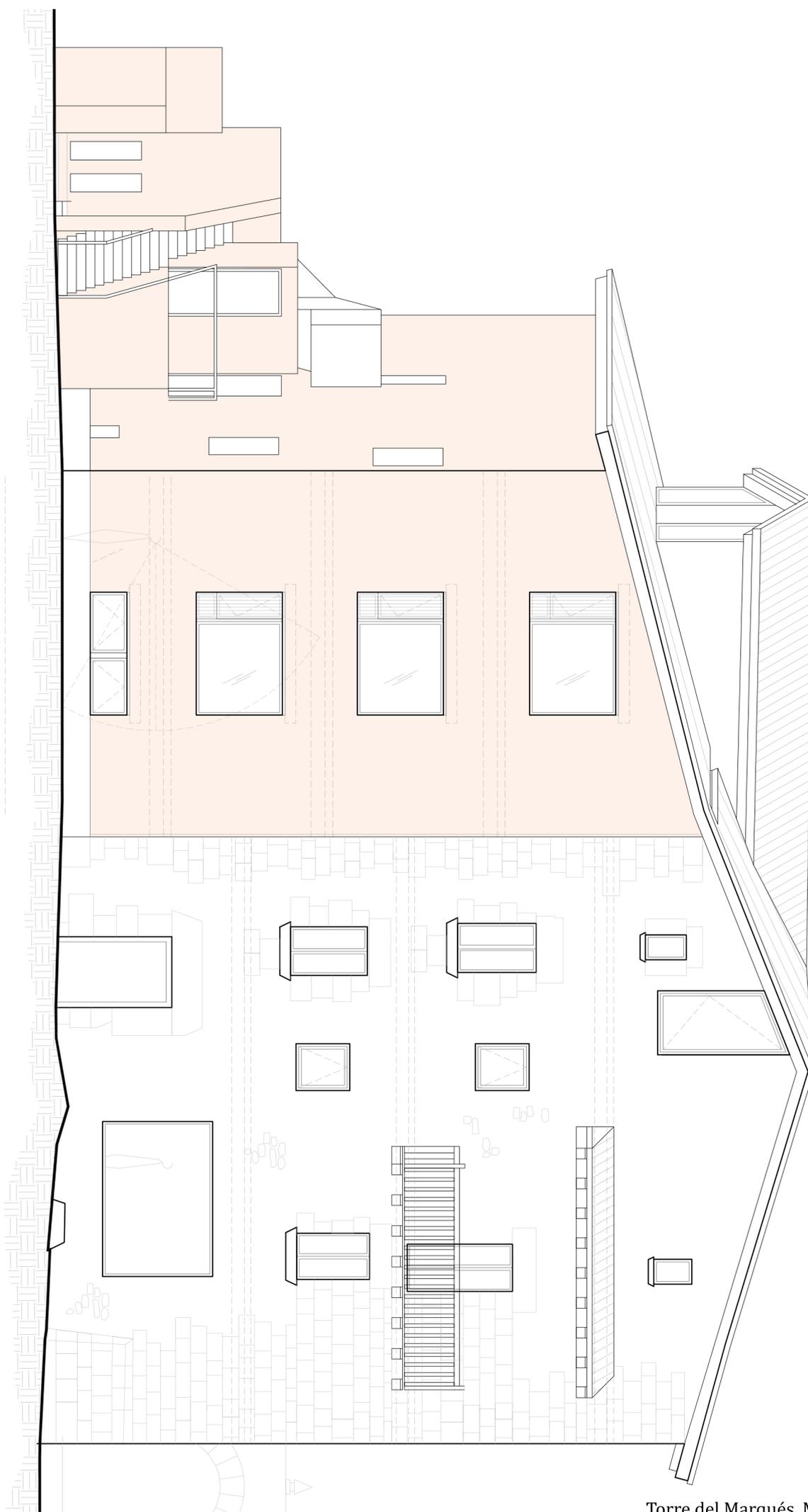
BIE 80x60x25

Torre del Marqués, Monroyo  
Ampliación de tapia  
Planta bajocubierta E\_1:100





Torre del Marqués, Monroyo  
Ampliación de tapia  
Alzado N-O E\_1:100



Torre del Marqués, Monroyo  
Ampliación de tapia  
Alzado S-O E\_1:100