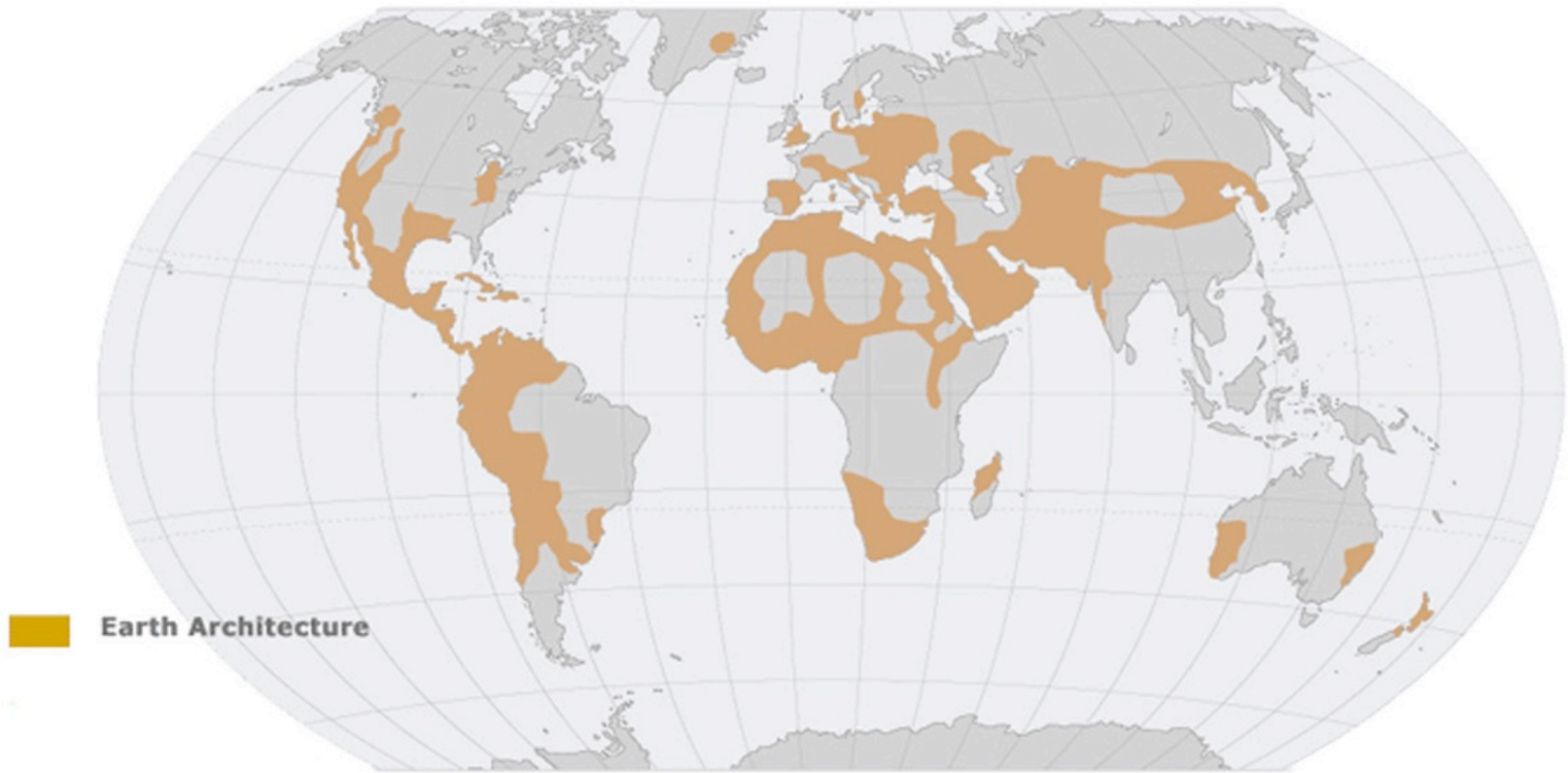




# **Tapial en suelo-cemento post tensado**

Una innovación tecnológica  
que apunta a la seguridad sísmica

Expositores: Pablo Barros  
Felipe Imhoff



*Distribución Mundial de Arquitectura en tierra (De Sensi, 2003)*

**Conceptos...**

**ADOBE**



***Técnica constructiva***



**≠**

**CONSTRUCCIÓN  
CON TIERRA**



***Material***



**≠**

# **SISTEMAS CONSTRUCTIVOS**

- **Adobe**
- **Quincha**
- **Tapial**
- **Balloon frame**



# ADOBE

## Proceso constructivo:

- Extraer la tierra del lugar
- Remojar la tierra
- Pisar y mezclar con paja
- Moldear los adobes
- Secado de los adobes
- Apilamiento
- Traslado a la obra para la fabricación del muro.



## Construcción en adobe



**ADOBE**

## Tierra con entramado - quincha

### Proceso constructivo:

- Realización de una estructura de pies derechos
- Empotrar a la cimentación o al suelo natural
- Fijar travesaños de menor sección
- Incorporar el tejido de varas, cañas, o bambúes
- Entramar el tejido longitudinalmente
- Revestir la estructura por ambas caras con barro



## Tierra con entramado - quincha





## Tierra apisonada - tapial

La técnica de la tapia consiste en rellenar un moldaje con capas de tierra húmeda de 10 a 15cm compactando cada una de ellas con un pisón, e ir de este modo formando las paredes de la construcción.

### Proceso constructivo:

- Extraer el suelo o la tierra del lugar
- Humedecerla con muy poca agua
- Fijar los moldajes
- Compactar con pisones manuales o neumáticos
- Desmontar moldajes





## Tierra apisonada - tapial



## Balloon frame (relleno)

### Proceso constructivo:

- Realización de una estructura de pies derechos (madera)
- Empotrar a la cimentación
- Clavar listones horizontales, generando un entramado
- Incorporar barro o adobe entre las maderas (relleno)
- Espera de secado
- Revestir la estructura por ambas caras



## Balloon frame (relleno)



**BALLOON - FRAME**

## *Técnicas constructivas con tierra cruda...*

**Adobe**



**Quincha**



**Tapial**



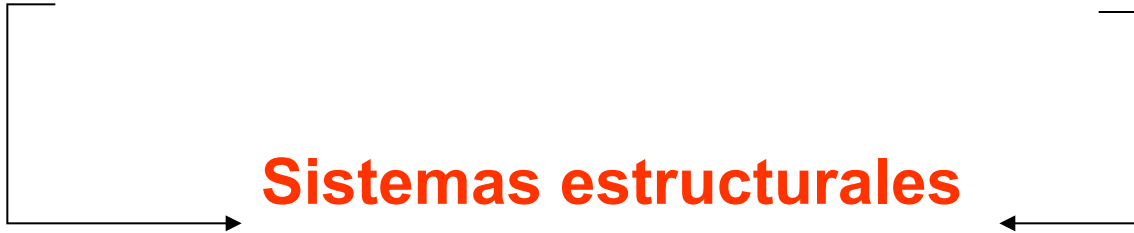
**Balloon frame**



**Adobe**

**Tapial**

**Sistemas estructurales**





## ***Adobe***

***v/s***

## ***Tapial***

- Resistencia a la compresión

Adobe: 20kg/cm<sup>2</sup>

- Mayor retracción → grietas

- Poca resistencia a la tracción

- Resistencia a la compresión

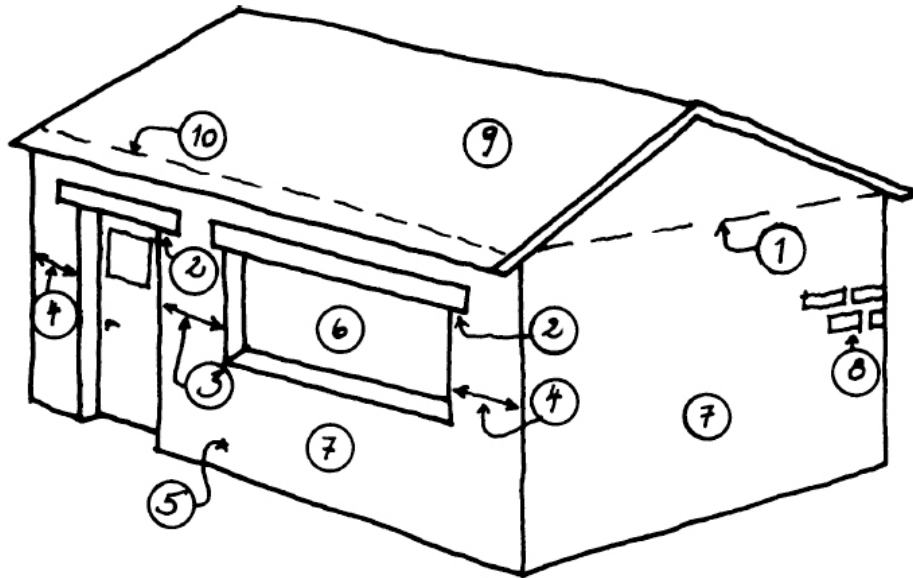
Adobe: 25 - 30kg/cm<sup>2</sup>

- Retracción es mucho más baja.

- Muros monolíticos → mayor estabilidad

Las construcciones de ***adobe***, a nivel de componentes, presentan mayores ***problemas estructurales y de estabilidad*** a consecuencia de la fragilidad en la unión de los bloques y la poca resistencia a los esfuerzos de flexión en el plano del muro

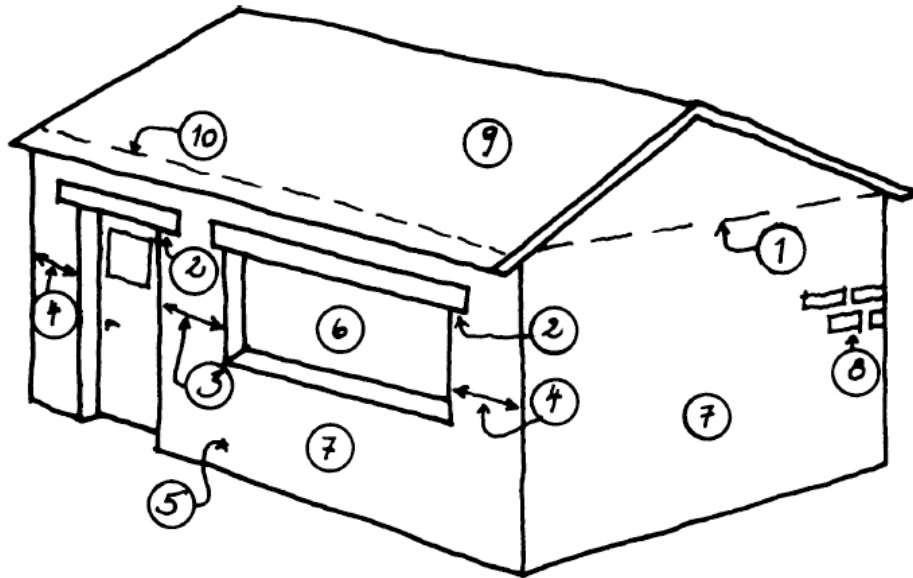
## ***Errores estructurales típicos que provocan riesgos de derrumbe durante un sismo***



1. Ausencia de un refuerzo horizontal (encadenado, collarín o viga cadena).
2. Los dinteles no penetran suficientemente en la mampostería.
3. El ancho de muro entre los vanos de ventana y puerta es demasiado angosto.
4. El ancho entre los vanos de ventana y puerta en relación a las esquinas es demasiado angosto.
5. Ausencia de un sobrecimiento (zócalo).



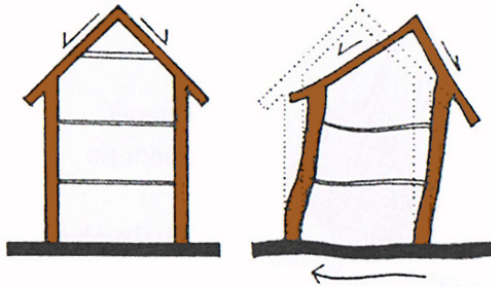
## **Errores estructurales típicos** que provocan riesgos de derrumbe durante un sismo



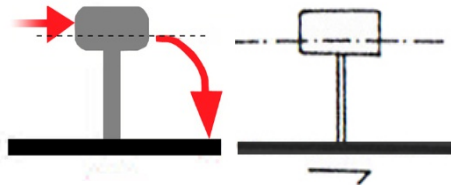
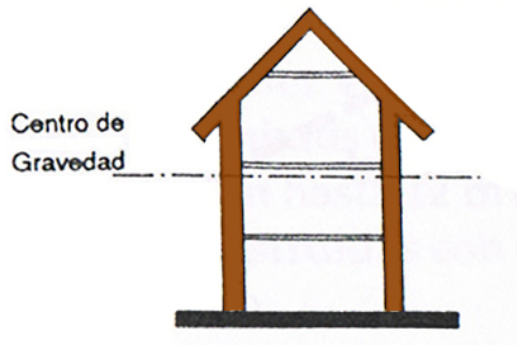
6. El vano (ventana) es demasiado ancho.
7. El muro es muy largo y delgado sin tener elementos de estabilización
8. La calidad de la mezcla del mortero es pobre, las uniones verticales no están completamente rellenas y las uniones horizontales son demasiado gruesas (más de 1,5 cm).
9. La cubierta es demasiado pesada
10. La cubierta tiene un arriostramiento débil con el muro.

## Estructura pesada

(mayor deformación)

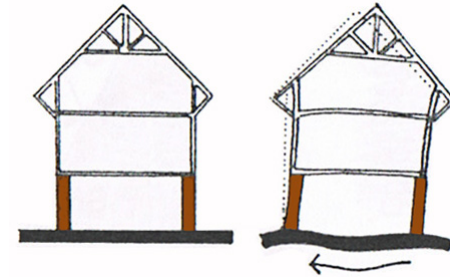


(menor equilibrio)

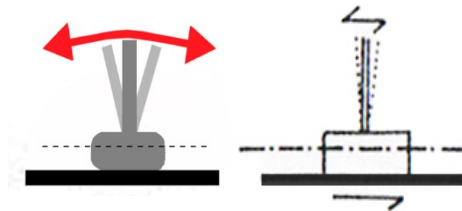
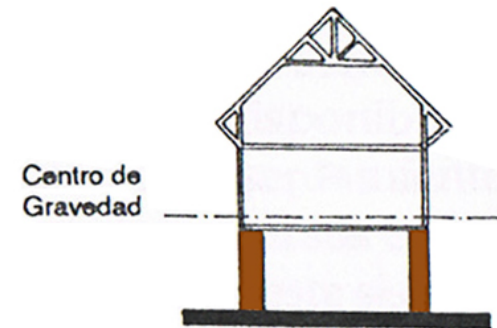


## Estructura liviana

(menor deformación)



(mayor equilibrio)



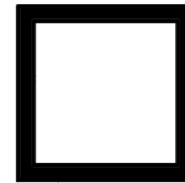
**CENTRO DE GRAVEDAD**

## Recomendaciones

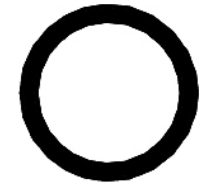
### - Forma en planta



malo



mejor



óptimo

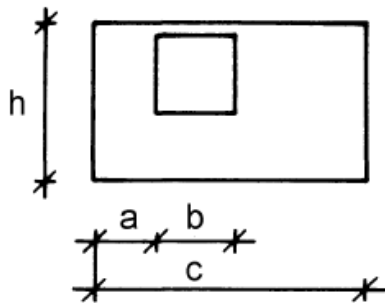
### - Estabilización por forma

Elementos autoportantes L, T, U, X, Y o Z



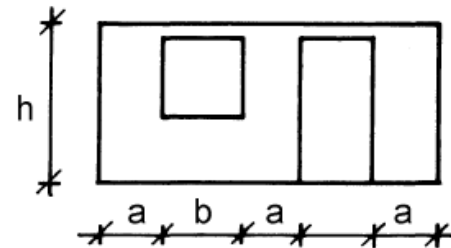
## Recomendaciones

### - Vanos



$$a \geq h/3 \geq 100\text{cm}$$
$$b \leq c/3 \leq 120\text{cm}$$

Los vanos para ventanas no deben tener una longitud mayor a 1.20 m, ni más de 1/3 de la longitud de la fachada.

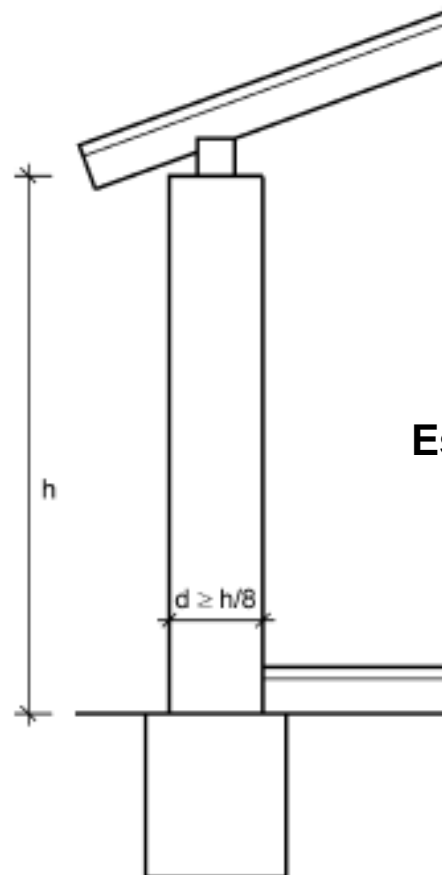


$$a \geq h/3 \geq 100\text{cm}$$
$$b \leq h/2 \leq 120\text{cm}$$

La longitud del muro entre los vanos y el borde de los muros debe ser de mínimo 1/3 de la altura del muro, pero no menor a 1 m.

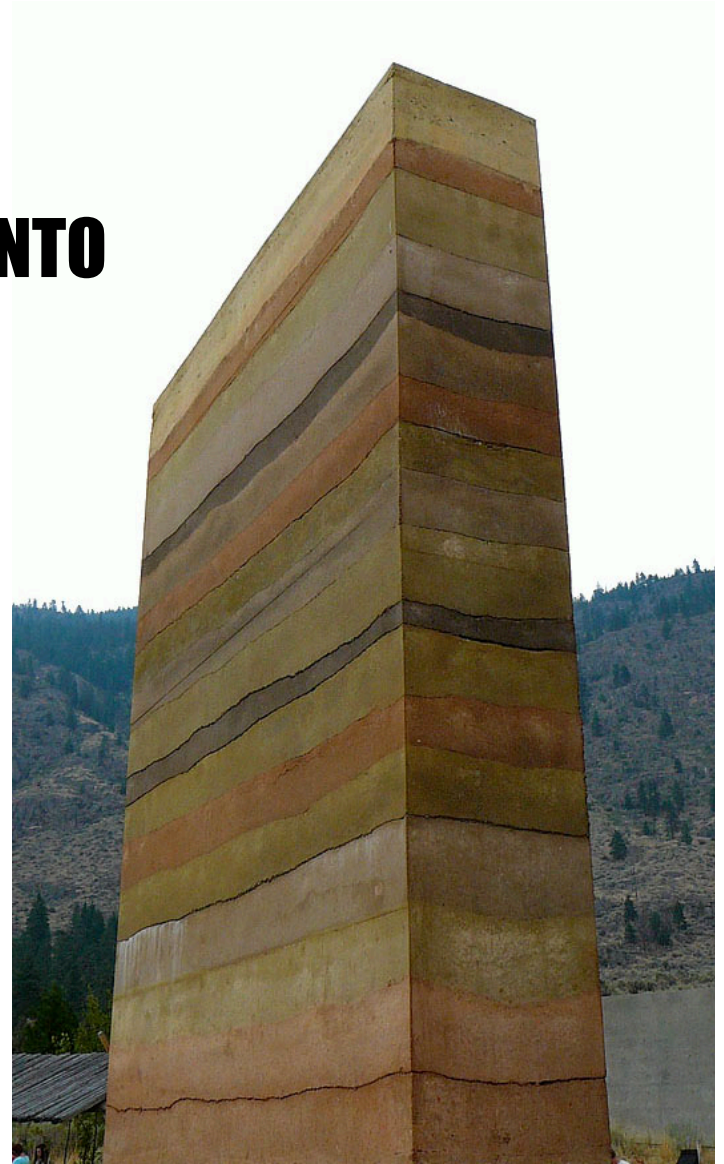
## ***Recomendaciones***

### **-Relación aconsejable para muros de tapial**



**Espesor de muro  $\geq h/8$**

# SUELO-CEMENTO





## **Suelo-cemento**

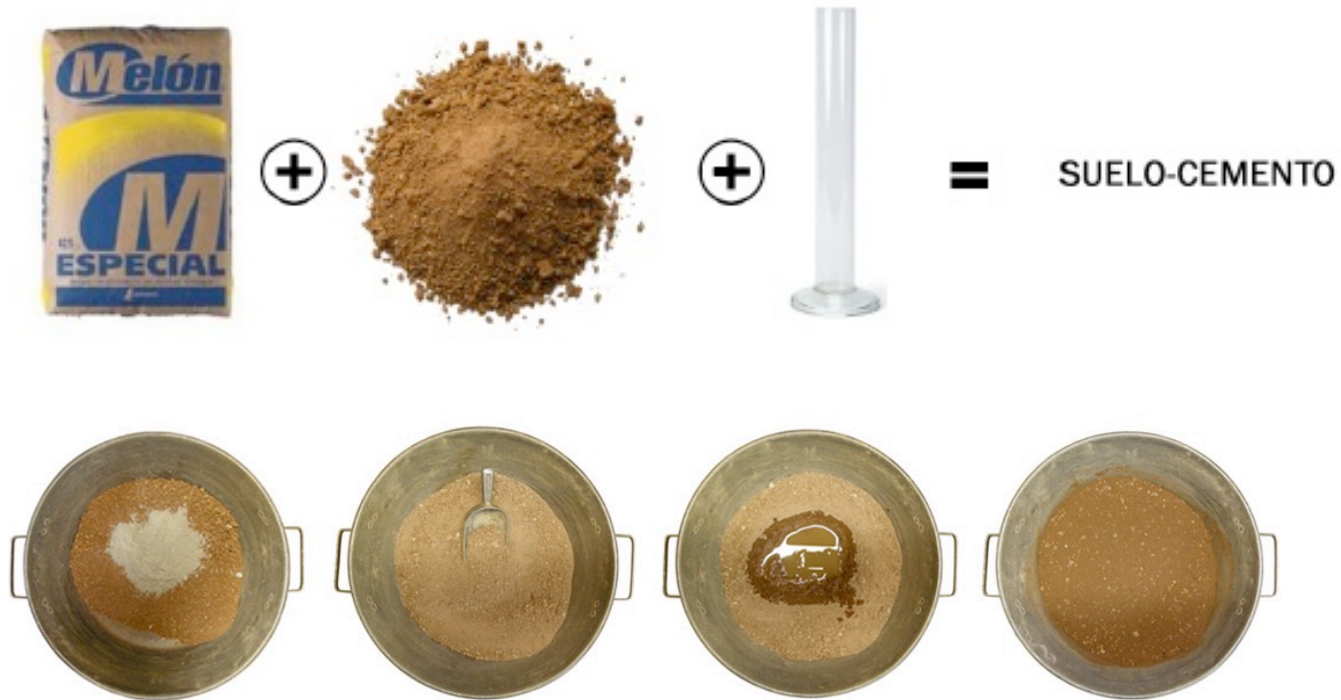
La tierra a pesar de sus buenas características aislantes y resistentes, presenta limitaciones en su aplicación, ya que su **resistencia mecánica es reducida**, es **vulnerable a la humedad** y se **erosiona** por acción de los agentes externos.

Sin embargo puede ser sometido al tratamiento denominado “**estabilización**”. La adición de un agente estabilizante, como es el cemento portland, a la vez que permite aprovechar sus **mejores cualidades**, le da otras propiedades que por sí solo no posee.

El material **soportara cargas de trabajo muy superiores** a las que podría soportar el suelo sin cemento, obteniéndose además, una **buena durabilidad ante la acción de los agentes atmosféricos**.

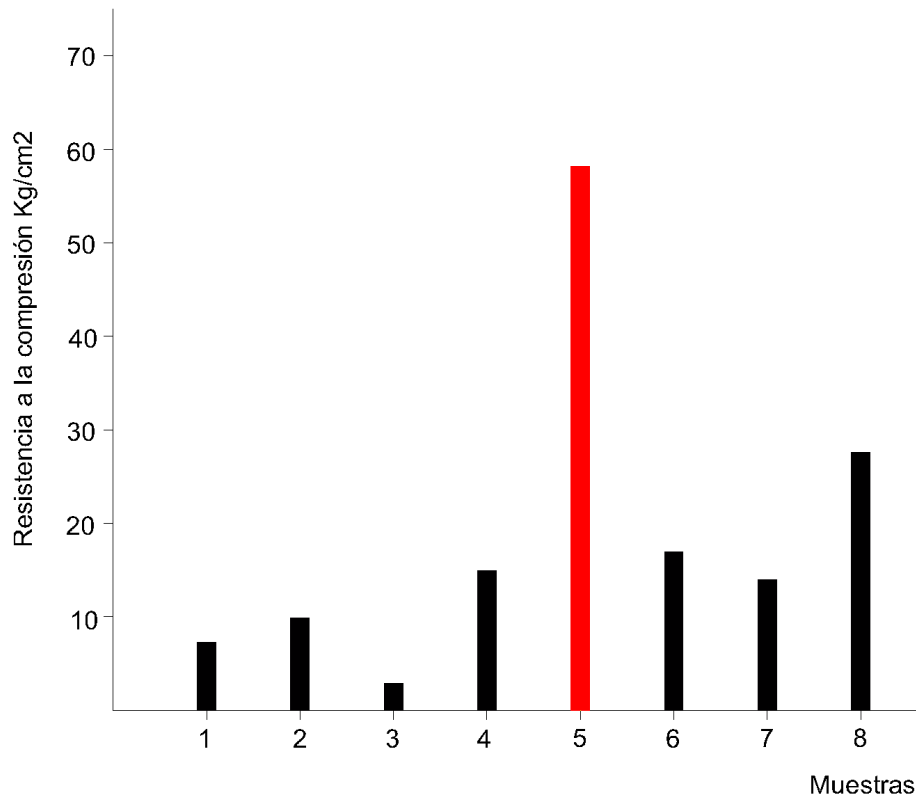
***...“es el conjunto de suelo o tierra, cemento y agua, debidamente dosificados y compactados”.***

El **efecto del cemento** sobre el suelo produce reacciones físico-químicas, que modifican el comportamiento de sus partículas y **mejoran su estabilidad**, transformando la masa resultante en una estructura difícil de alterar, y de mayor resistencia.





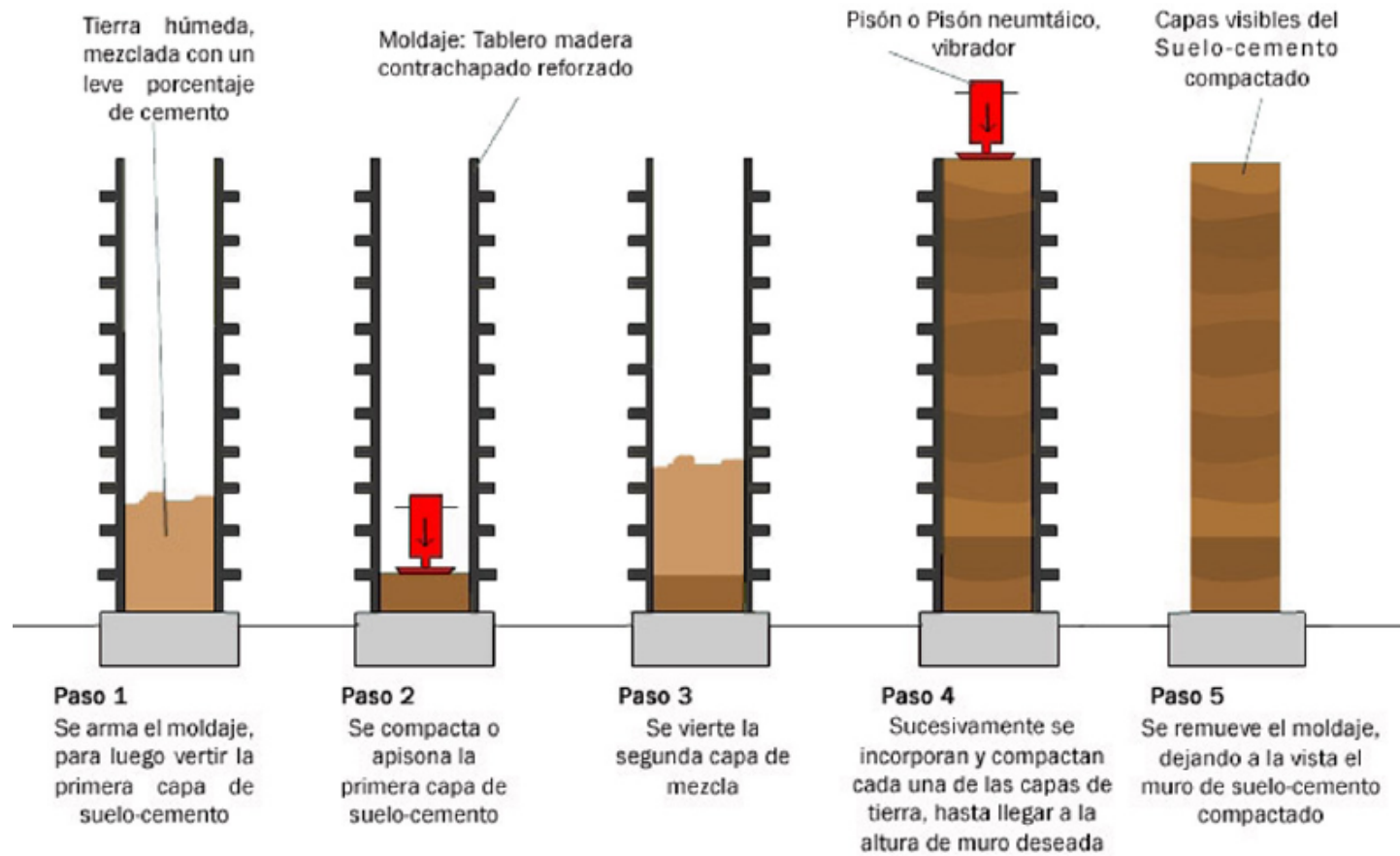
## Pruebas de compresión



| Materiales                       | Resistencia a la compresión [Kg/cm <sup>2</sup> ] |
|----------------------------------|---|
| Suelo - paja (adobe-tradic.)     | 12.25   |
| Suelo - cal (4% cámara húmeda)   | 9.85  |
| Suelo - cal (4% expuesto al sol) | 2.9   |
| Suelo - asfalto                  | 14.92   |
| Suelo - cemento                  | 60  |
| Suelo - yeso                     | 16.9  |
| Proctor (4% de agua)             | 13.5  |
| Proctor (8% de agua)             | 29.6  |

**SUELO - CEMENTO**

## Proceso constructivo



## Ejemplo







## Innovaciones tecnológicas actuales

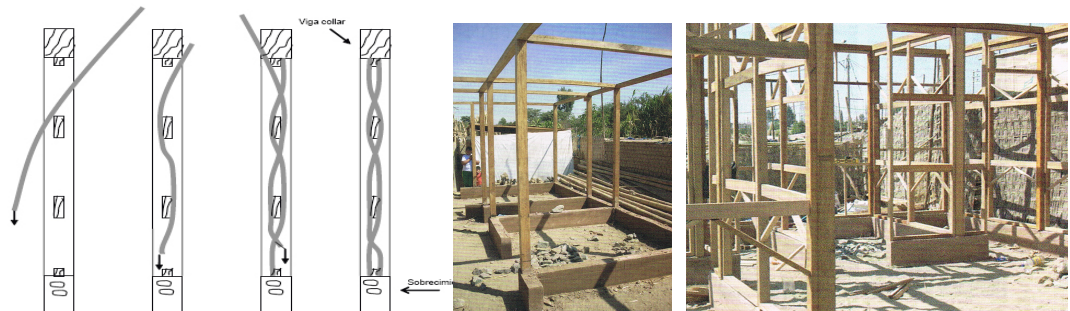
### Adobe reforzado con geomallas

Ref. Julio Vargas Neumann



### Quincha mejorada

Ref. M.E. Lacarra Córdova



### Tekno – Barro

### Quincha metálica

Ref. Marcelo Cortés

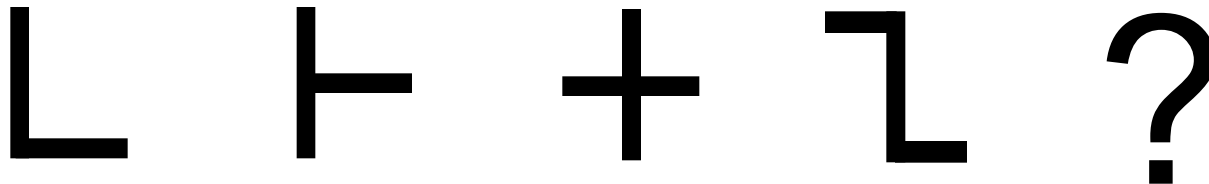


# Investigación



## ***¿Qué es?***

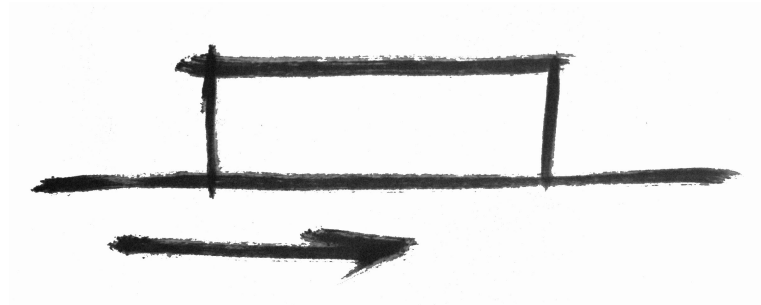
*Es un sistema o unidad constructiva estructural a base de suelo-cemento compactado (armado), que resiste sismo, o que ofrezca seguridad sísmica dentro de un rango aceptable ( 08g).*





## *¿Para que?*

*Para la vivienda económica (horizontal - 1 piso) que debe resolver su diseño particular para tener un comportamiento aceptable frente al **sismo**. Esta **unidad constructiva alternativa** pretende ser una opción real para la construcción de elementos portantes y de cerramientos de una vivienda del **mundo rural**.*



## *¿Por que?*

*...por qué la tierra sigue siendo el material de construcción con **menor huella ecológica** y puede manipularse sin una capacitación sofisticada de la mano de obra, lo que implica una vasta aplicación para la solución de viviendas económicas en nuestro país.*





## Metodología de Trabajo

### Investigación Marco Teórico

---

El suelo o la tierra como material de construcción

Sistemas constructivos:  
Tierra apisonada  
Tierra con entramado  
Albañilería

Elaboración del Suelo-cemento

### Investigación Práctica

---

#### **Análisis de Suelos**

Reconocimiento de los suelos y obtención de muestras

Ensayos:

LAB. Mecánica de Suelos

- Análisis Granulométrico
- Límites de Consistencia
- Gravedad Específica
- Proctor Normal

Dosificación (% de cemento en peso)

**E  
T  
A  
P  
A  
  
1**



## Metodología de Trabajo

### Investigación Marco Teórico

---

El suelo o la tierra como material de construcción

Sistemas constructivos:  
Tierra apisonada  
Tierra con entramado  
Albañilería

Elaboración del Suelo-cemento

### Investigación Práctica

---

#### **Análisis de Suelos**

Reconocimiento de los suelos y obtención de muestras

Ensayos:

LAB. Mecánica de Suelos

- Análisis Granulométrico
- Límites de Consistencia
- Gravedad Específica
- Proctor Normal

Dosificación (% de cemento en peso)

**E  
T  
A  
P  
A  
1**

Casos de estudio de construcción con tierra antisísmicas

Investigación de patrones o soluciones geométricos en planta, que sean resistentes al sismo.

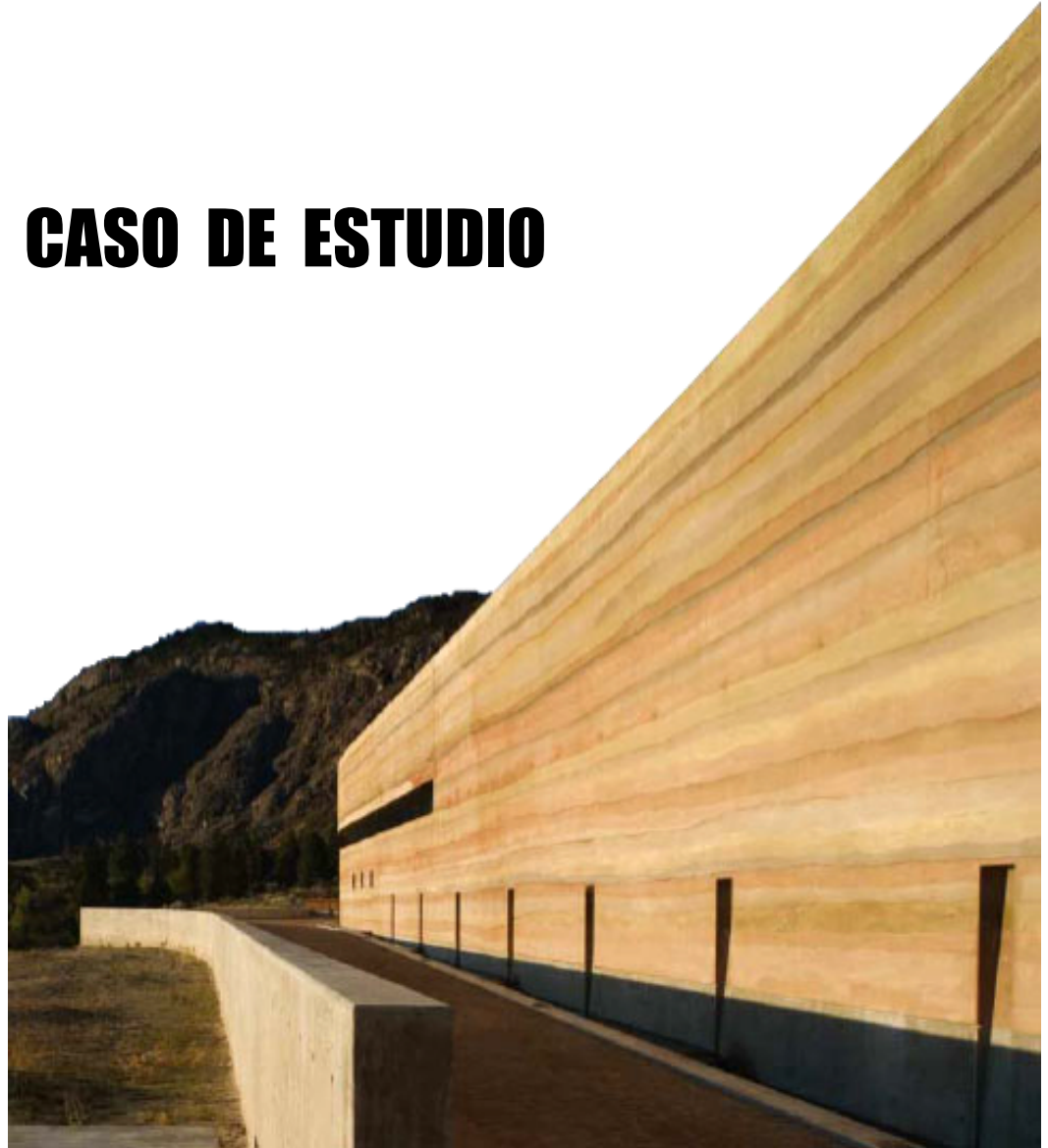
#### **Análisis Sísmico**

Modelación de maquetas a escala reducida de suelo-cemento compactado, para ser sometidas a ensayos sísmicos en la mesa de simulación de terremotos

**E  
T  
A  
P  
A  
2**

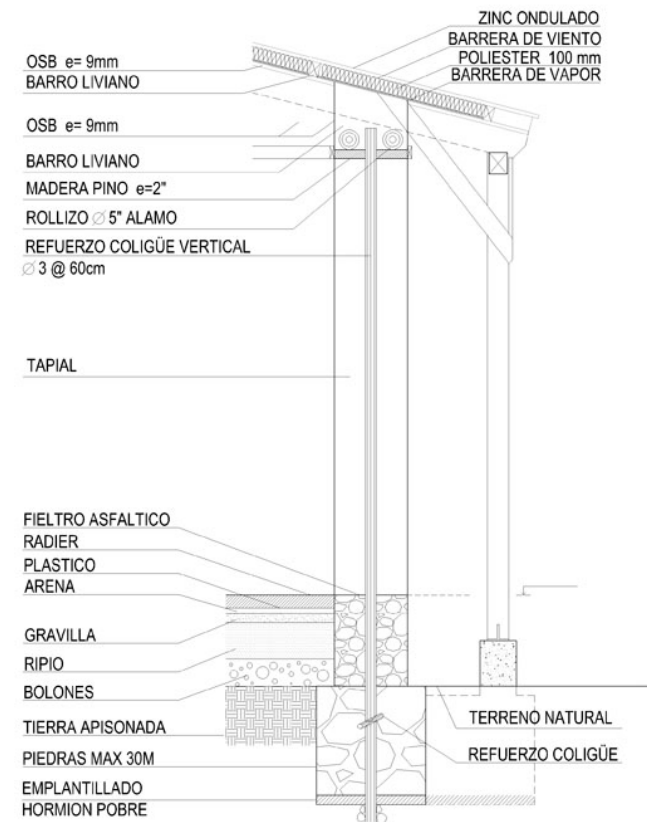
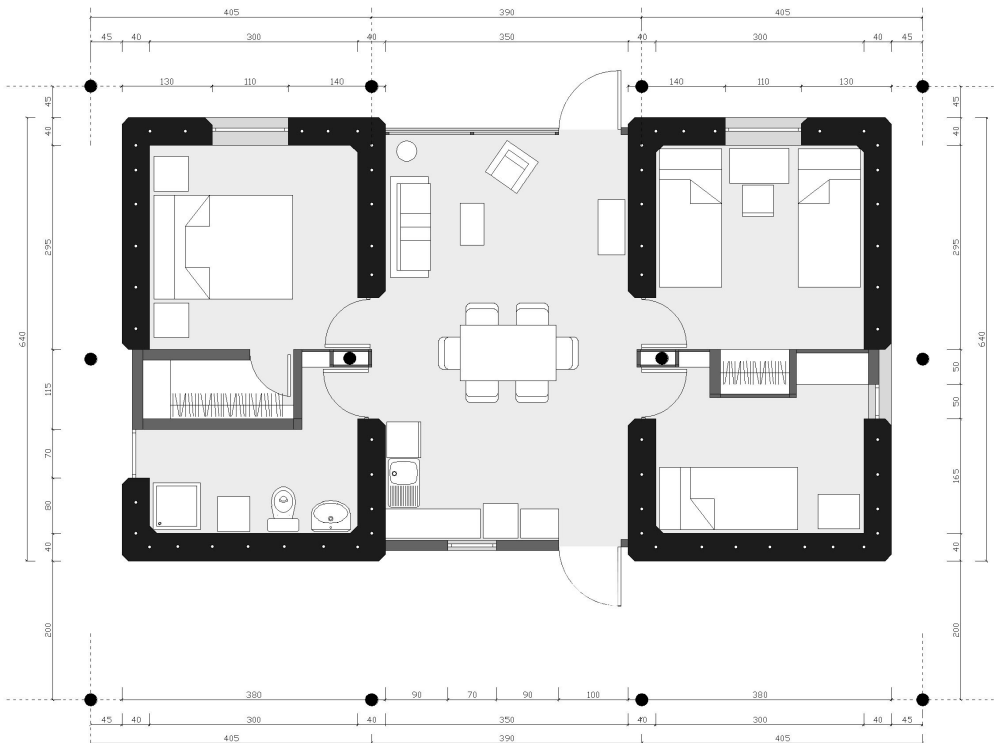


# CASO DE ESTUDIO



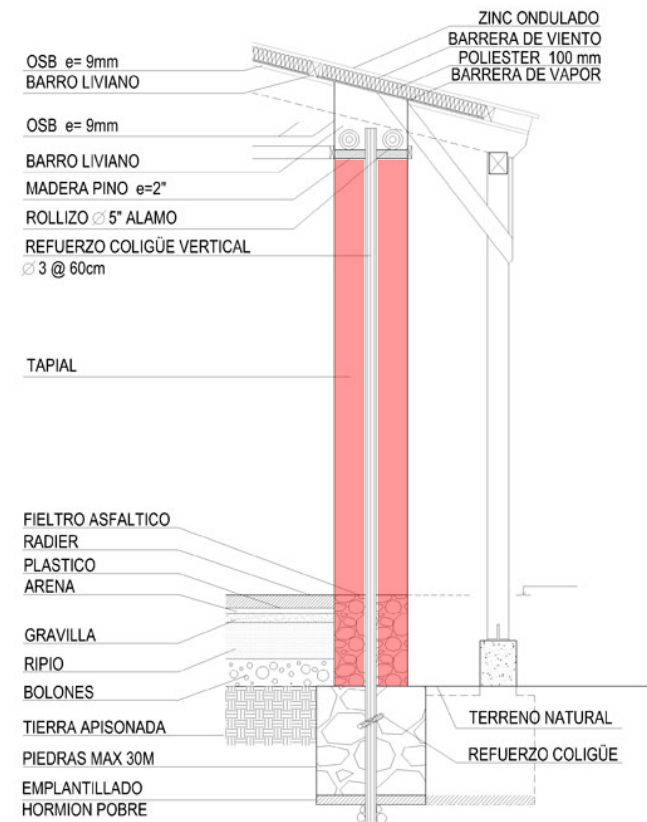
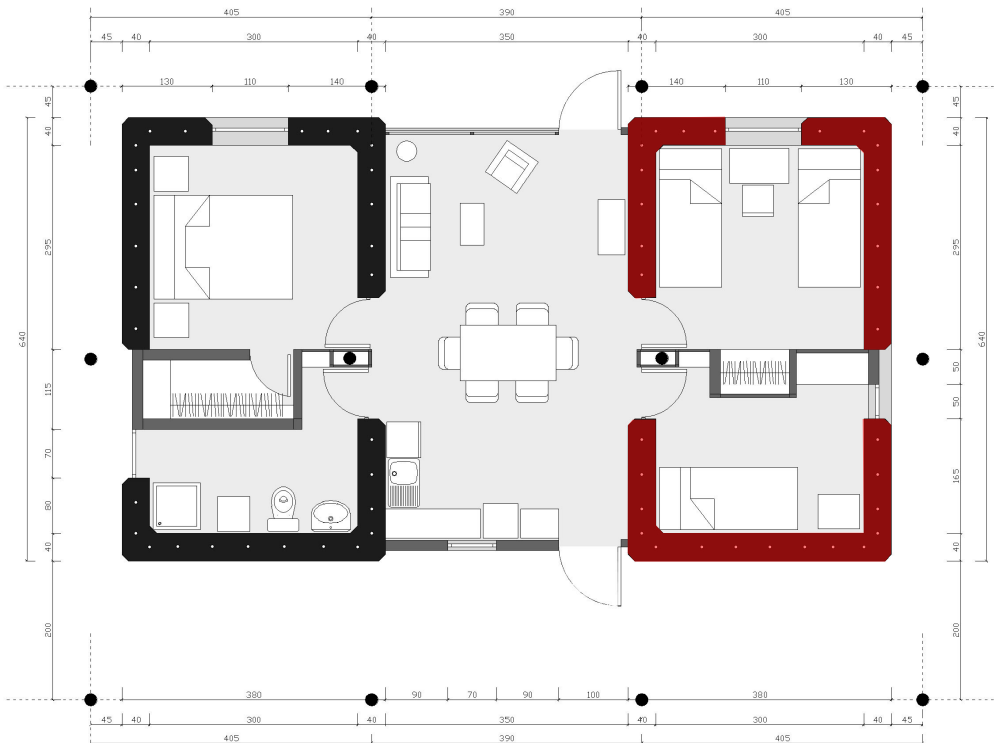
## Vivienda prototipo, Alhué, Chile

- Estabilización por la forma (muros L y U)
- Refuerzos verticales de coligüe
- Idea de separar la estructura de la cubierta de la de los muros.



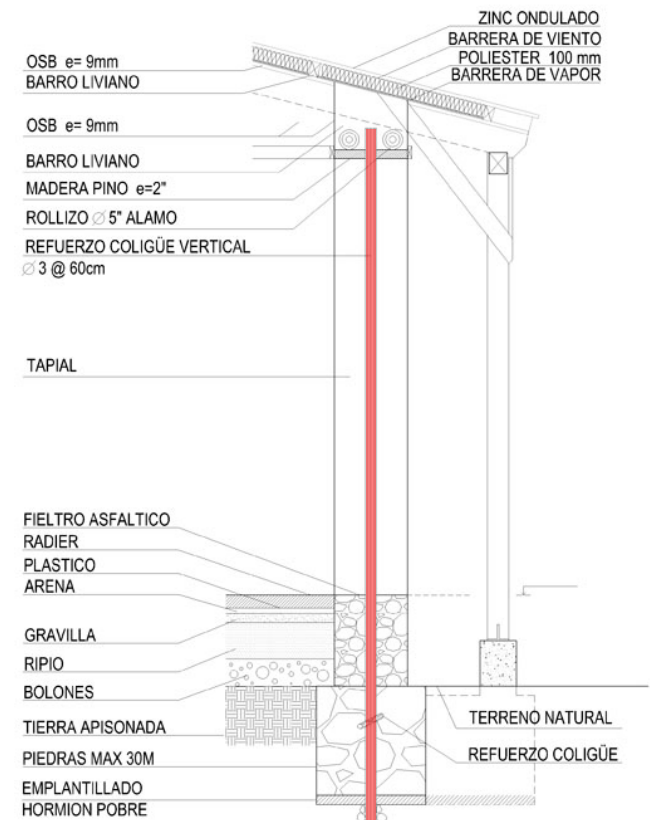
## Vivienda prototipo, Alhué, Chile

- Estabilización por la forma (muros L y U)
- Refuerzos verticales de coligüe
- Idea de separar la estructura de la cubierta de la de los muros.



## Vivienda prototipo, Alhué, Chile

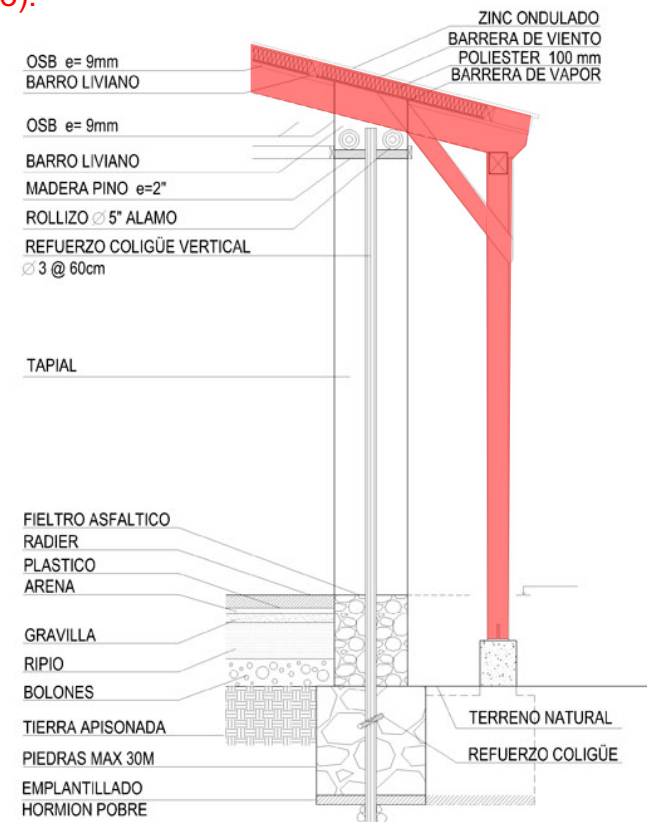
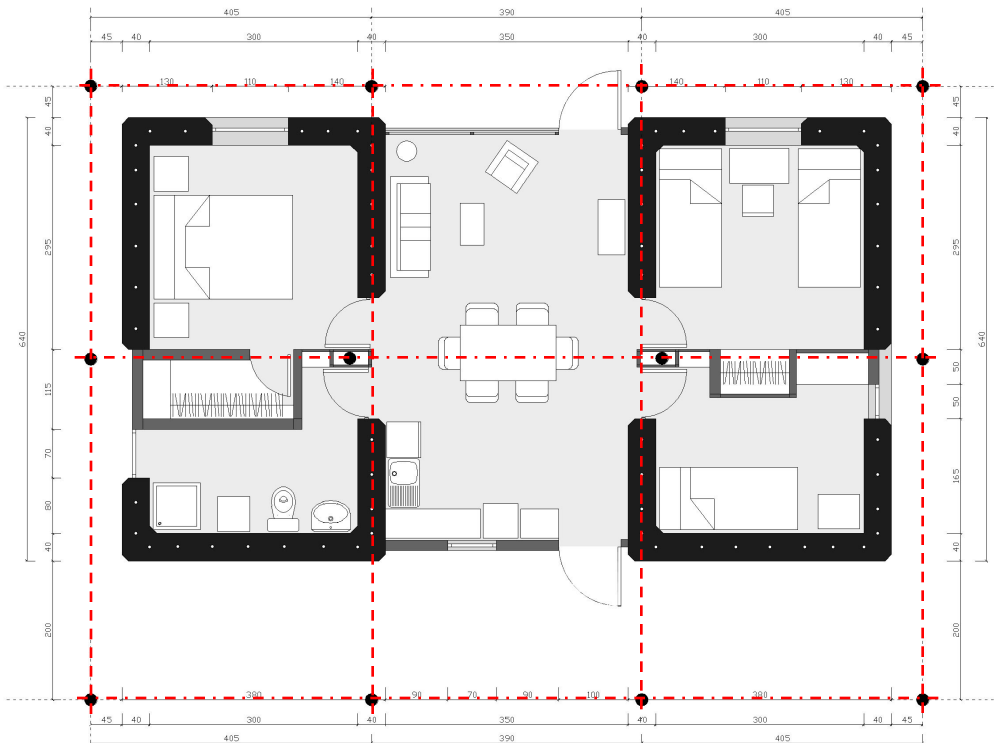
- Estabilización por la forma (muros L y U)
- Refuerzos verticales de coligüe
- Idea de separar la estructura de la cubierta de la de los muros.





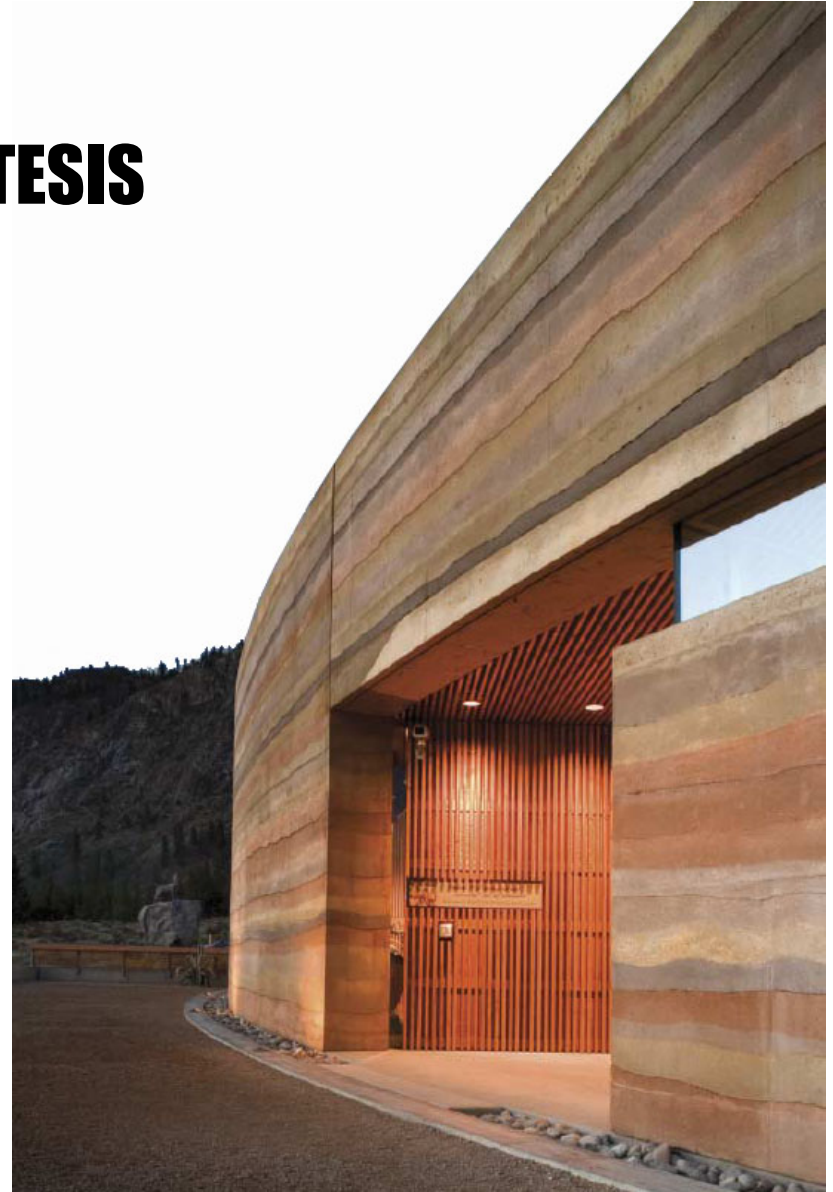
## Vivienda prototipo, Alhué, Chile

- Estabilización por la forma (muros L y U)
- Refuerzos verticales de coligüe
- Idea de separar la estructura de la cubierta de la de los muros.  
(ambos elementos se muevan de acuerdo a su propia frec. en caso de sismo).



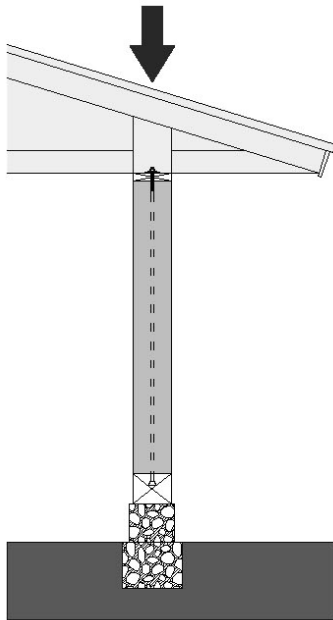


# HIPÓTESIS



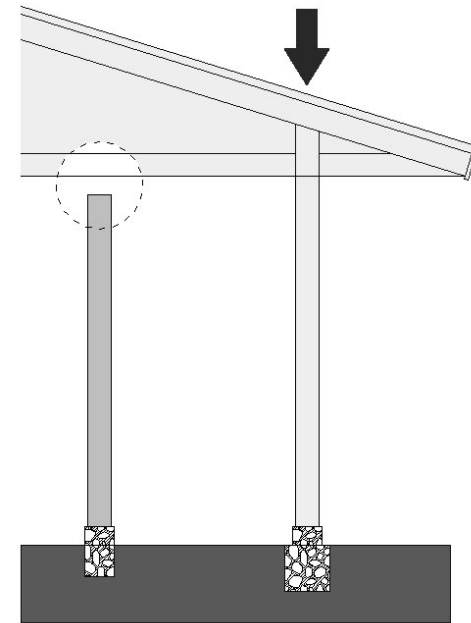
## IN SITU

- Estructura portante y cerramiento
- Post tensado
- Sobrecimiento + cadena

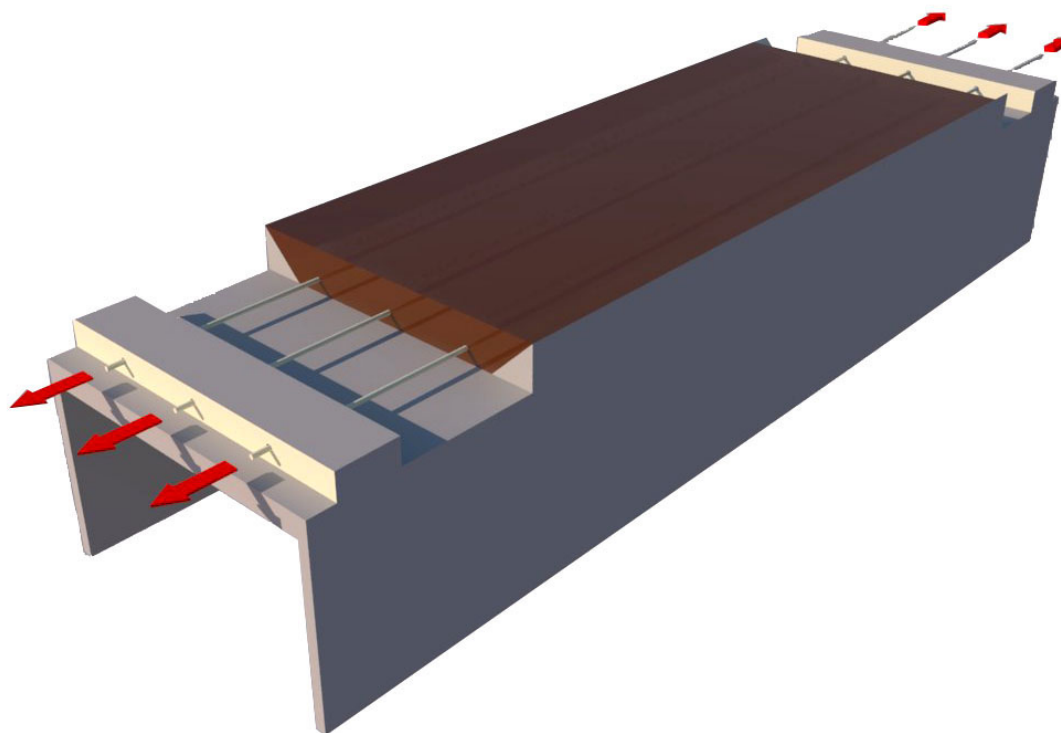
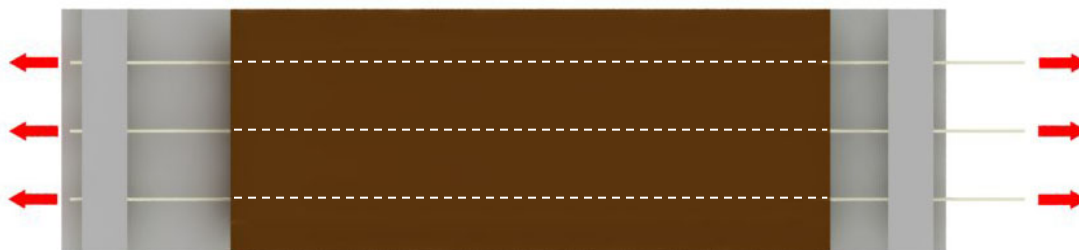


## PRE - FABRICADO

- Separación: Estructura - cerramiento
- Panel con armadura vegetal
- Esbeltez



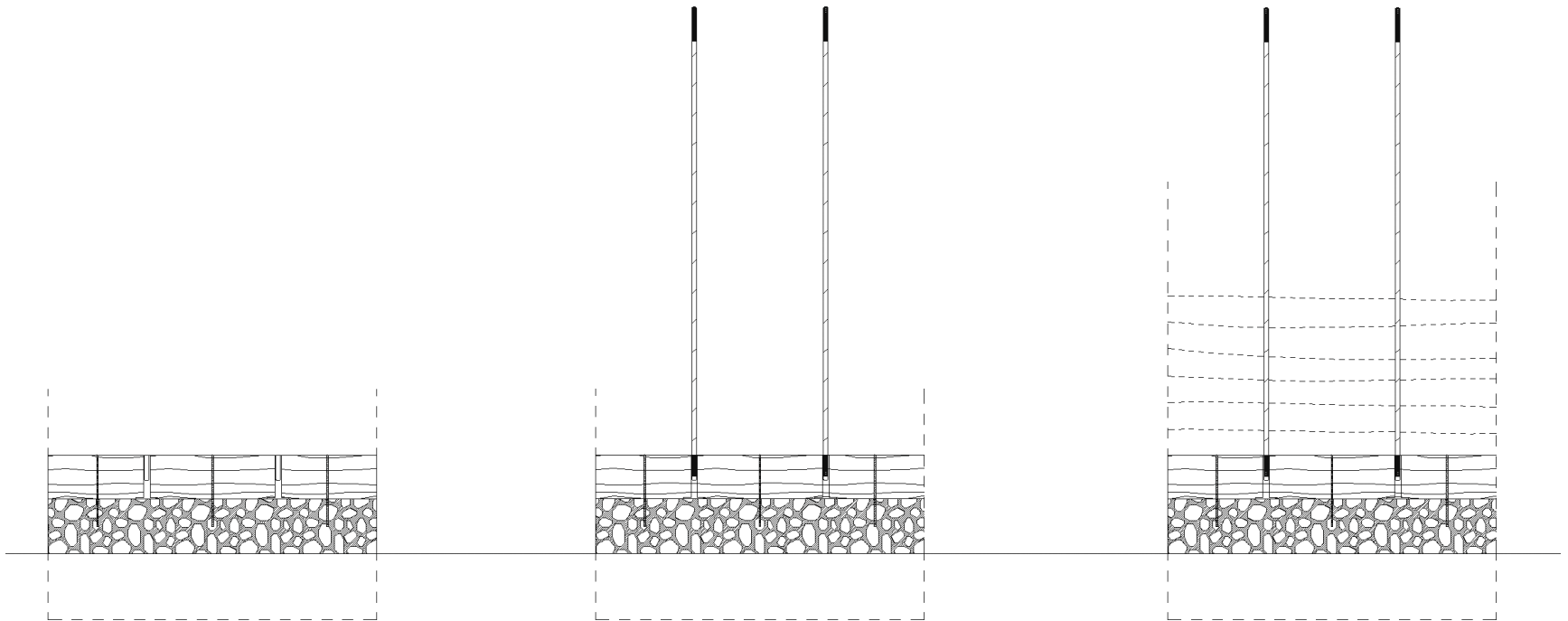
## Opción Pre - tensado , Pre - fabricado



## Propuesta



## Secuencia constructiva



Sobrecimiento

Mampostería en piedra

Durmiente + anclaje inferior

Tensor vertical  $\frac{1}{2}$  -  $\frac{3}{4}$ "

Durmiente

Anclajes

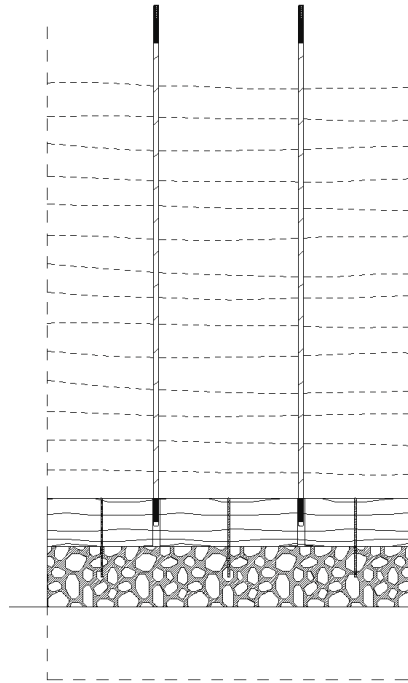
Moldaje inferior

Suelo-cemento compactado

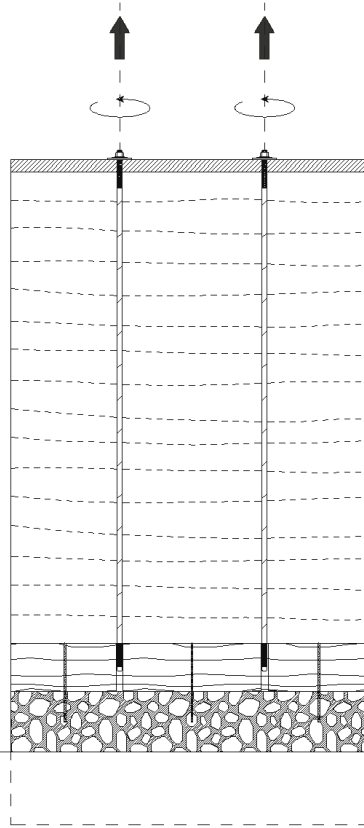
por capas c/ 10-15 cm

**SECUENCIA**

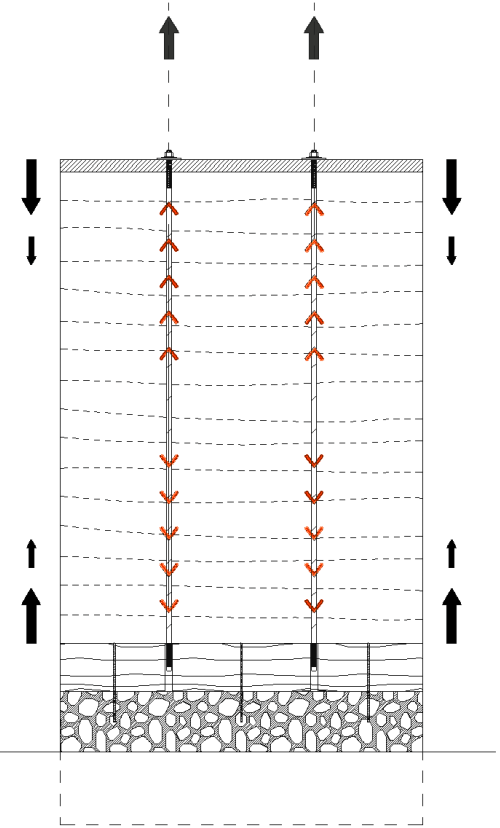
## Secuencia constructiva



Moldaje superior  
Suelo-cemento compactado  
hasta altura de muro deseada



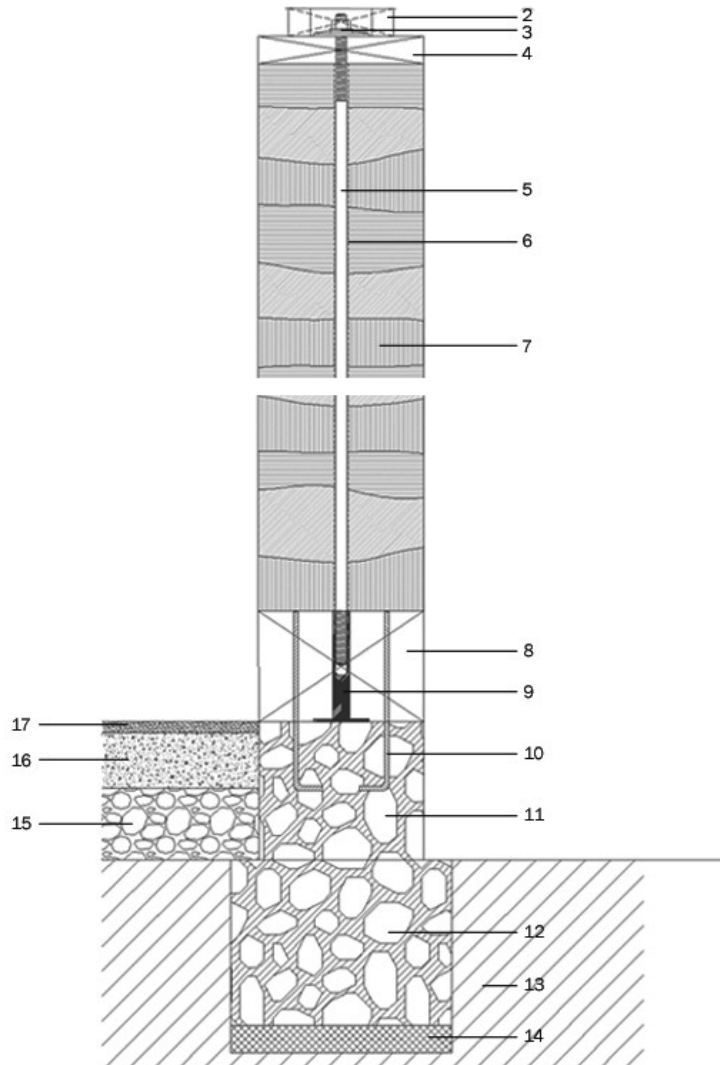
Solera superior madera en  
bruto 2x12\"/>  
Anclaje post-tensado, flanche,  
golilla y tuerca



Barras a tracción  
Muro masa comprimido

**SECUENCIA**

## Escantillón

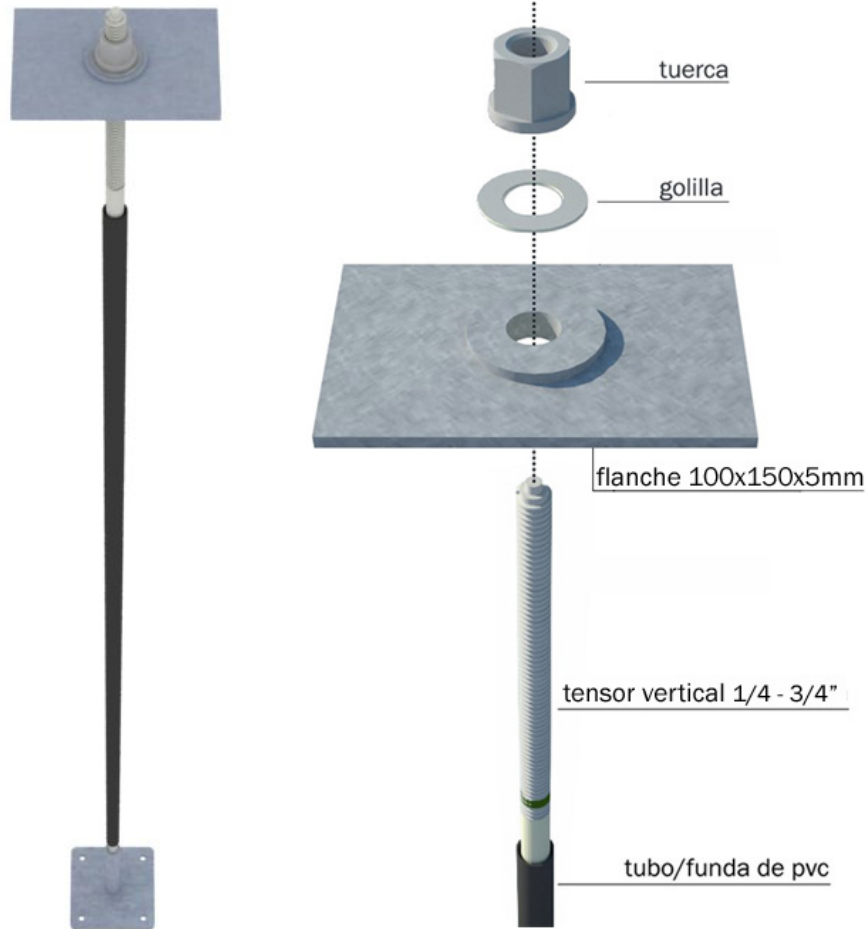


- 2 viga de madera 2x8"
- 3 anclaje post-tensado  
flancho 100x150x5mm  
golilla y tuerca
- 4 solera superior  
pieza de madera en brutc  
2x12"
- 5 tensor vertical 15-20mm
- 6 funda pvc
- 7 muro de tapial suelo-  
cemetno compactado
- 8 durmiente 30x20cm
- 9 sistema de anclaje  
inferior con hilo interior
- 10 anclaje durmientes
- 11 sobrecimiento  
mampostería de piedra
- 12 fundación  
mampostería de piedra
- 13 tierra compactada
- 14 emplantillado  
hormigón pobre e: 5cm
- 15 capa de grava e: 13cm
- 16 radier + malla e: 10cm
- 17 afinado e: 20mm

**ESCANTILLÓN**

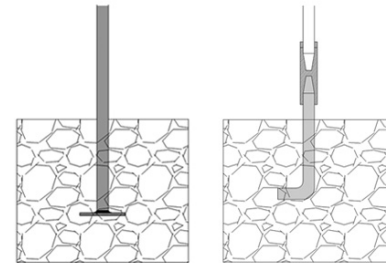


## Detalle sistema post-tensado

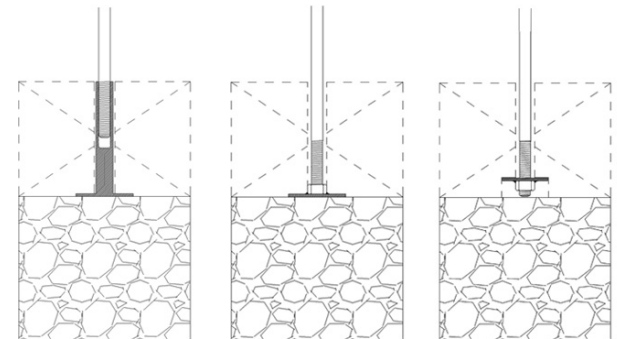


### Variante de anclajes inferiores

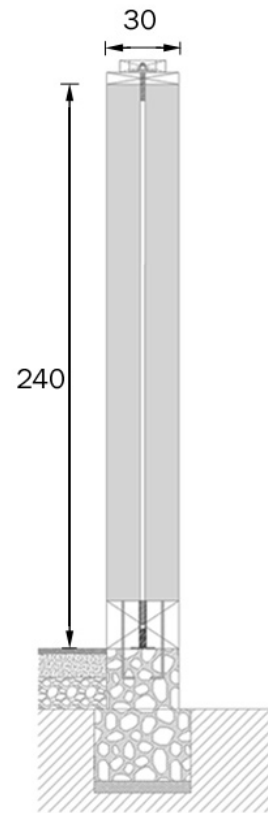
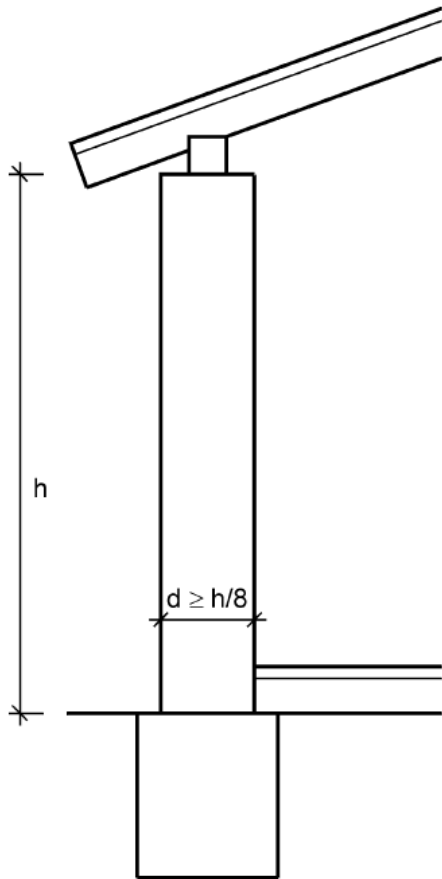
Variante: sobrecimiento



### Variante: durmiente



Relación aconsejable  
para muros de tapial  
(h: altura de tierra compactada)

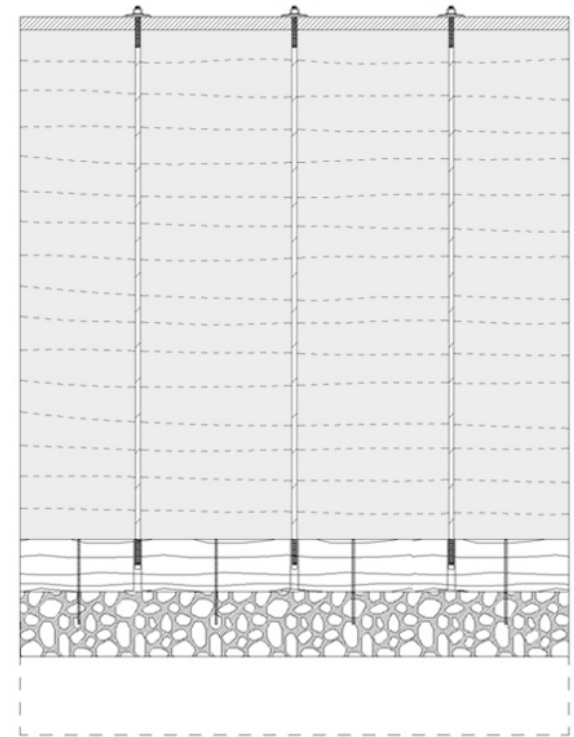


$$d \geq h/8$$

$$h = 240 \text{ cm}$$

$$h/8 = 30 \text{ cm}$$

$$30 \geq 30$$



**DIMENSIONES**

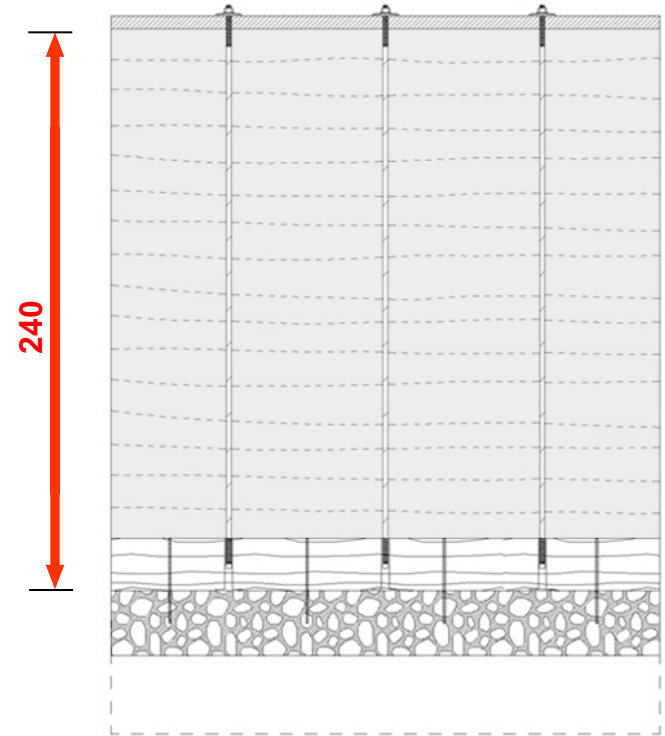
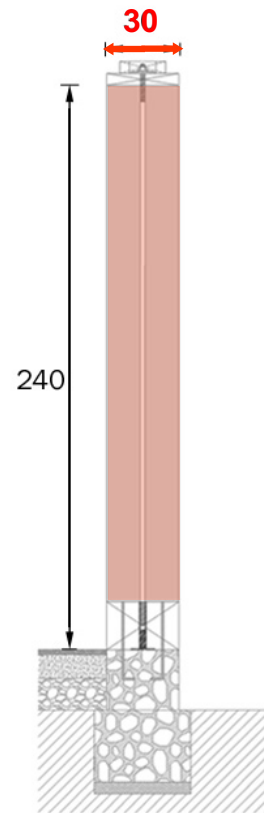
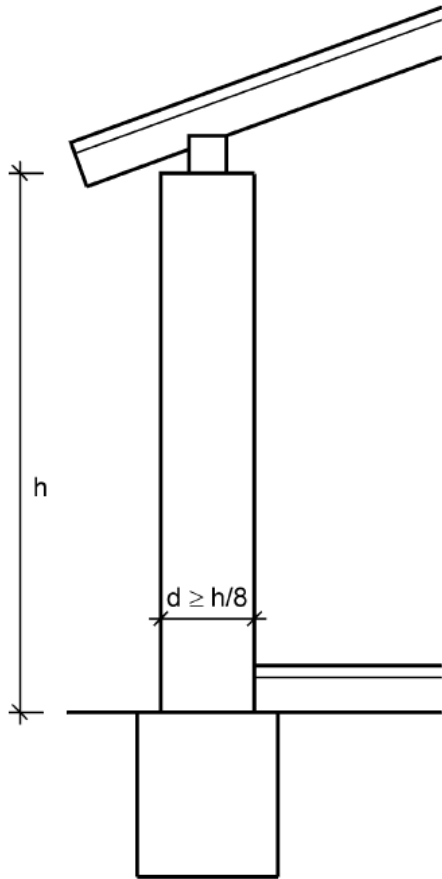
Relación aconsejable  
para muros de tapial  
(h: altura de tierra compactada)

$$d \geq h/8$$

$$h = 240 \text{ cm}$$

$$h/8 = 30 \text{ cm}$$

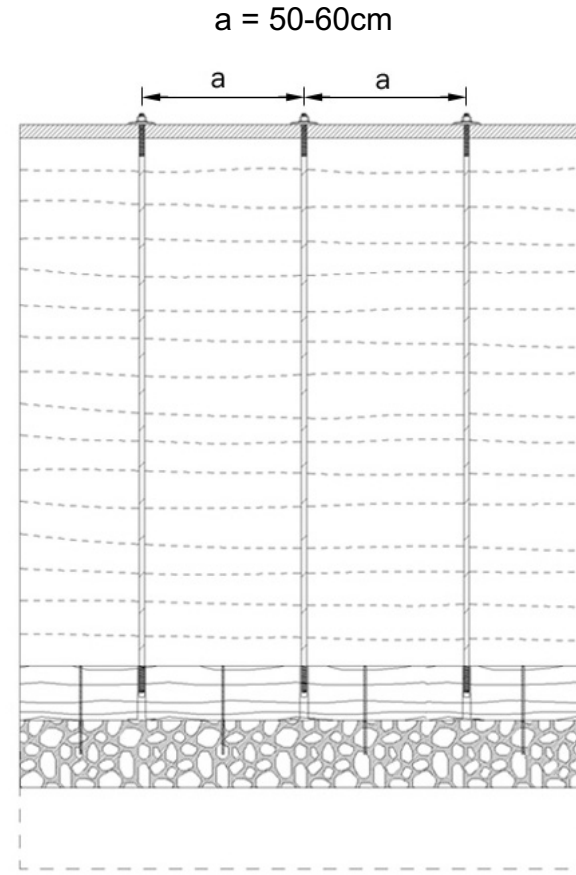
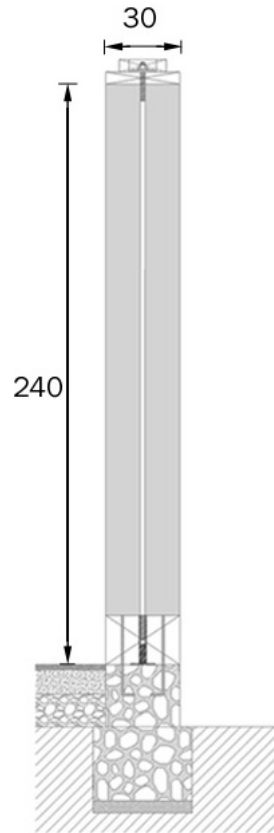
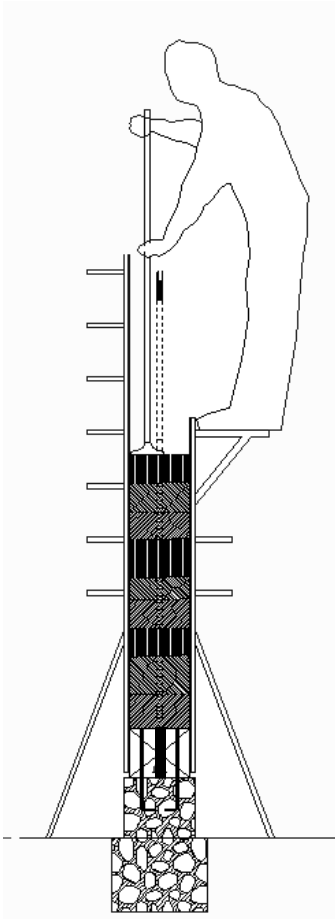
$$30 \geq 30$$



**DIMENSIONES**

## Distancia entre tensores

Con respecto al distanciamiento entre tensores, no existe un cálculo estructural específico. Se tomo como referencia el prototipo de vivienda en Alhué, Chile, que fue construida con muros de tapial reforzado con coligües. La distancia entre coligües varia de 45 a 55cm.



## Costo metro lineal

| Cubicación Muro de Albañilería - 1 metro lineal |            |           |                  |
|---|------------|-----------|------------------|
| Fundación                                       | m3         | m3 en 1ML | Costo ML         |
| Excavación cimientos                            | \$ 9.000   | 0,3       | \$ 2.700         |
| Emplantillado                                   | \$ 43.000  | 0,025     | \$ 1.075         |
| Cimiento  | \$ 70.000  | 0,2       | \$ 14.000        |
| Sobrecimiento                                   | \$ 200.000 | 0,06      | \$ 12.000        |
|   |            |           | <b>\$ 29.775</b> |

|                          |            |       |                  |
|--------------------------|------------|-------|------------------|
| Muro Albañilería         | \$ 77.000  | 0,36  | \$ 27.720        |
| Cadena H.A.              | \$ 200.000 | 0,045 | \$ 9.000         |
| Pilar                    | \$ 336.000 | 0,054 | \$ 18.144        |
| Mano obra (15 000 x día) |            |       | \$ 15.000        |
|                          |            |       | <b>\$ 69.864</b> |

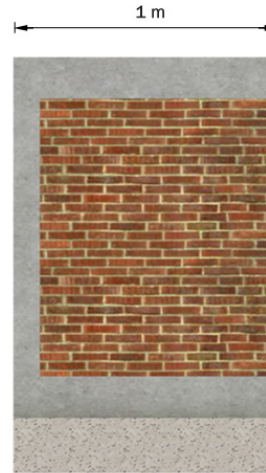
| Terminaciones           | m2       | m2 en 1ML |                  |
|-------------------------|----------|-----------|------------------|
| Estuco muro int. - ext. | \$ 6.200 | 2,4       | \$ 14.880        |
| Pintura latex int.-ext. | \$ 2.600 | 2,4       | \$ 6.240         |
|                         |          |           | <b>\$ 21.120</b> |

Costo total 1 ML : 5.5 UF

| Cubicación Muro de Suelo-cemento - 1 metro lineal |            |           |                  |
|---|------------|-----------|------------------|
| Fundación   | m3         | m3 en 1ML | Costo ML         |
| Excavación cimientos                              | \$ 9.000   | 0,3       | \$ 2.700         |
| Emplantillado                                     | \$ 43.000  | 0,025     | \$ 1.075         |
| Cimiento  | \$ 70.000  | 0,2       | \$ 14.000        |
| Sobrecimiento                                     | \$ 200.000 | 0,06      | \$ 12.000        |
|   |            |           | <b>\$ 29.775</b> |

|                                   | Precio U. |  | Costo ML         |
|-----------------------------------|-----------|--|------------------|
| Anclaje inferior                  | 1         |  | \$ 3.000         |
| Barra redonda lisa 19mm (6m)      | \$ 14.972 |  | \$ 6.238         |
| Hilo para barra (costo)           | \$ 1      |  | \$ 5.000         |
| Madera de bruto 2x12" referencial | \$ 9.000  |  | \$ 2.813         |
| Flanche 100x150x5mm (perforado)   | \$ 2.500  |  | \$ 2.500         |
| Golilla 3/4"                      | \$ 250    |  | \$ 250           |
| Tuerca hexagonal zincada 3/4"     | \$ 500    |  | \$ 500           |
| Madera 2x8"                       | \$ 5.900  |  | \$ 1.843         |
| Mano de obra, apisonado manual    |           |  | \$ 23.000        |
| cemento (1,4 sacos x ML)          | \$ 4.350  |  | \$ 6.090         |
| Moldaje                           | \$ 35.200 |  | \$ 11.700        |
|                                   |           |  | <b>\$ 62.934</b> |

Costo total 1 ML : 4.2 UF



5.5 Uf

Sobrecimientos  
Cadenas y Muro:

1m3 : 7 sacos cemento

v/s



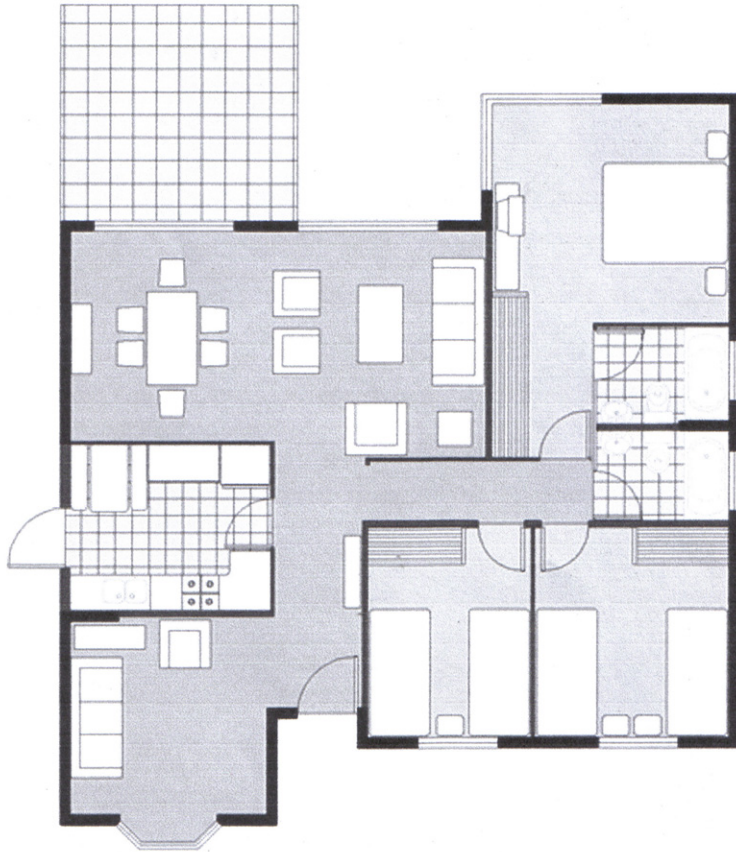
4.2 Uf

Muro S.C.:

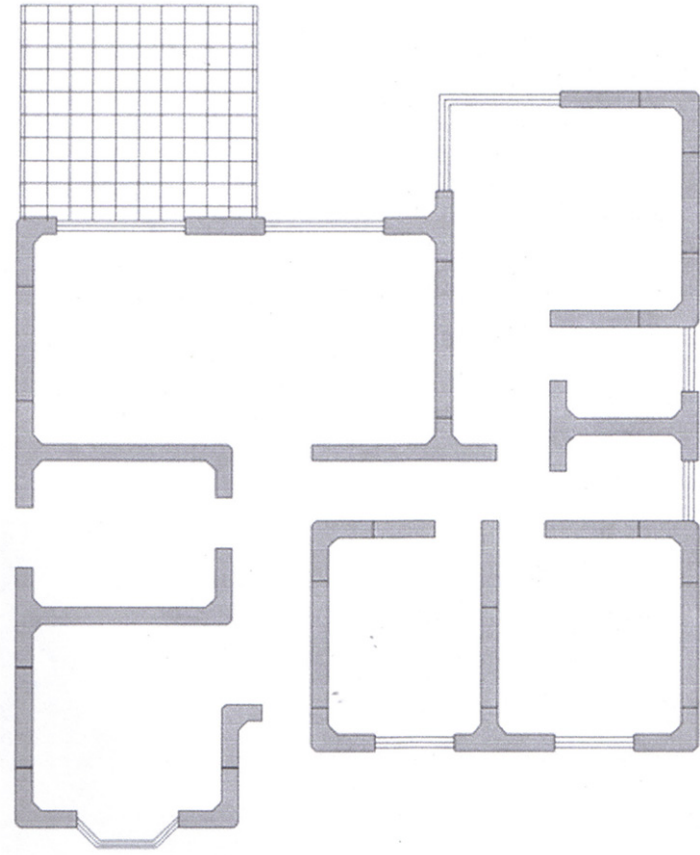
1m3 : 2.35 sacos cemento

## Ejercicio de simulación – Organización de distintos espacios

Vivienda albañilería armada



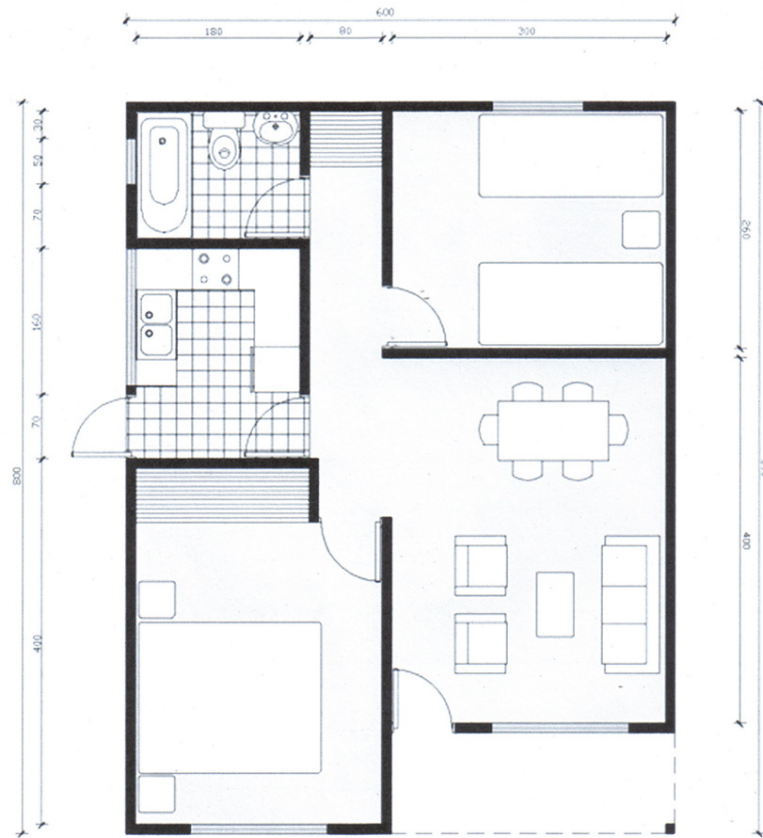
Vivienda muros de suelo-cemento



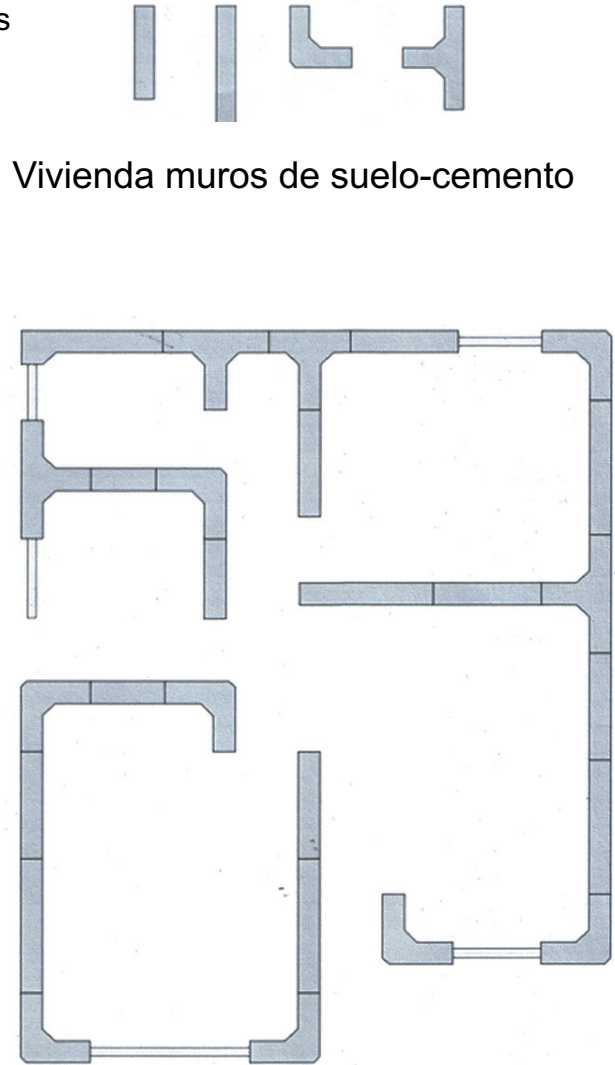
**SIMULACIÓN**

## Ejercicio de simulación – Organización de distintos espacios

### Vivienda de madera



### Vivienda muros de suelo-cemento



**SIMULACIÓN**

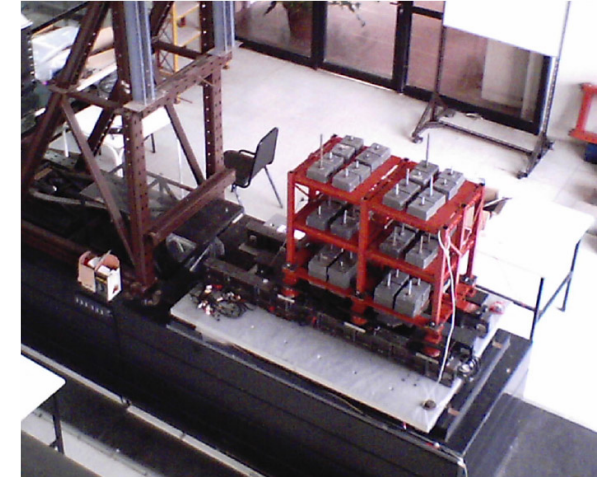
## Modelación a escala reducida de viviendas de adobe sometidas a sismo

Memoria de Titulación UTFSM  
Construcción Civil 2007

Carlos Berríos

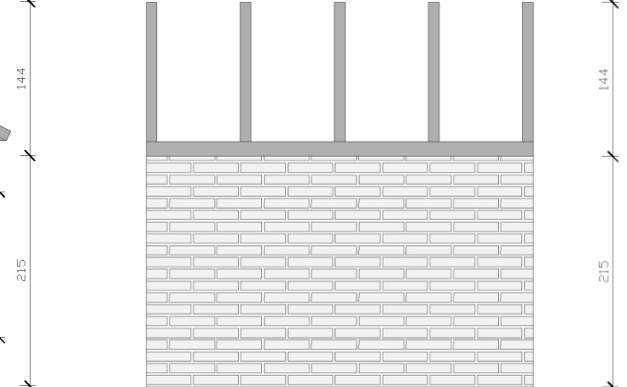
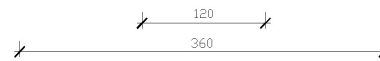
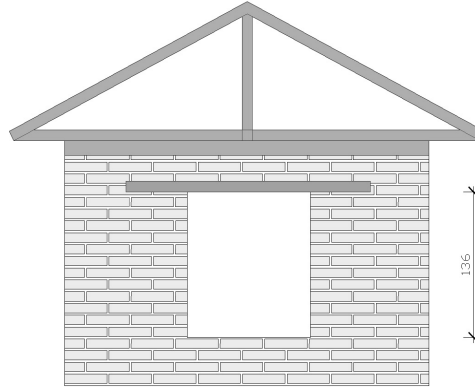
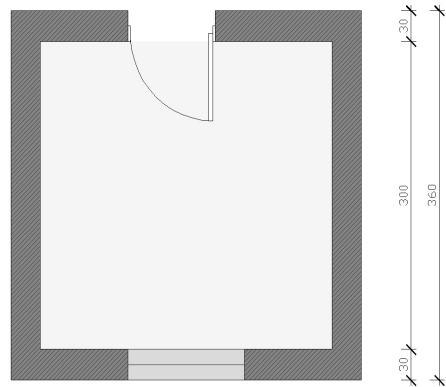
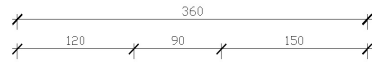
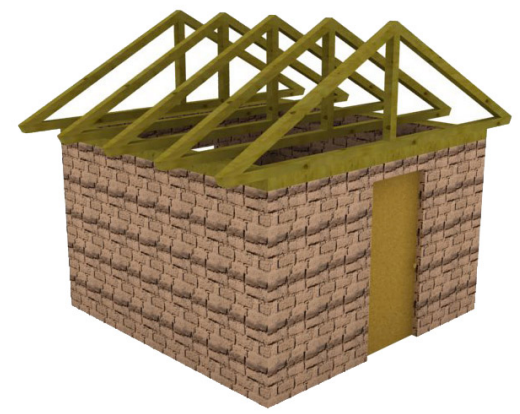
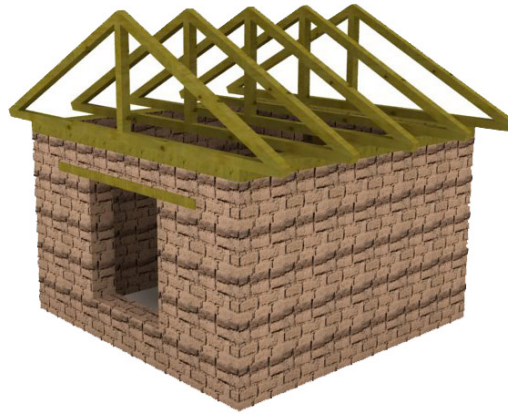
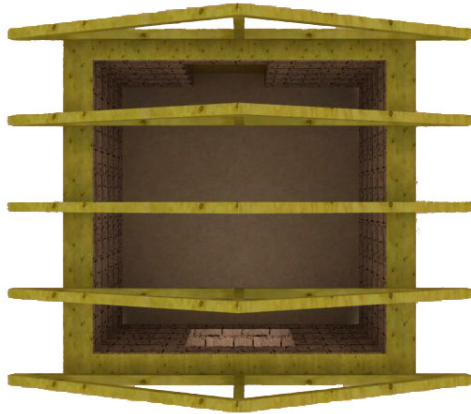


- Fabricación de adobes
- Ensayo de los adobes (compresión)
- Construcción de los modelos (escala 1:7)
- Ensayo de los modelos de adobe en la mesa sísmica





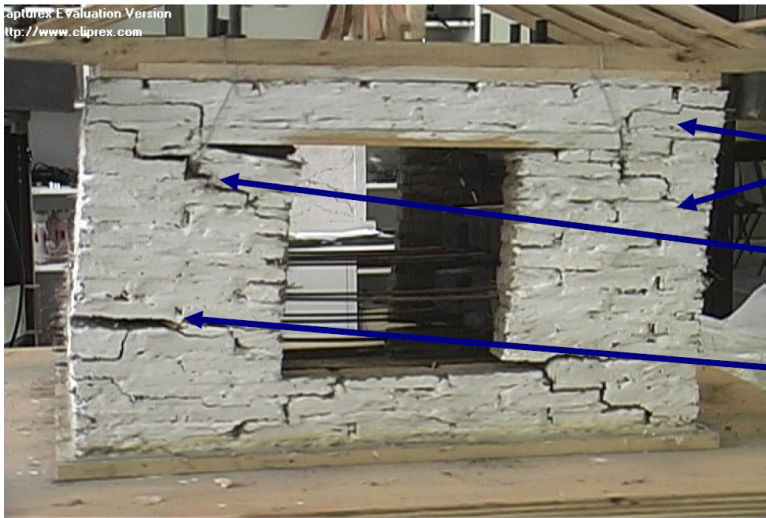
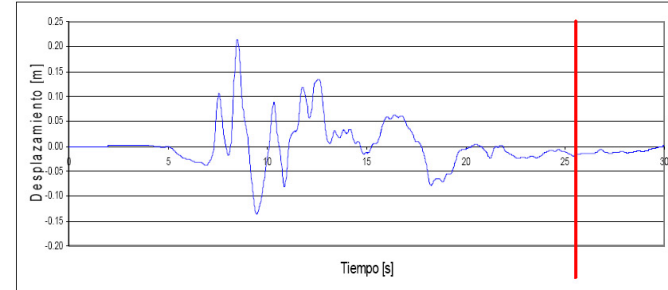
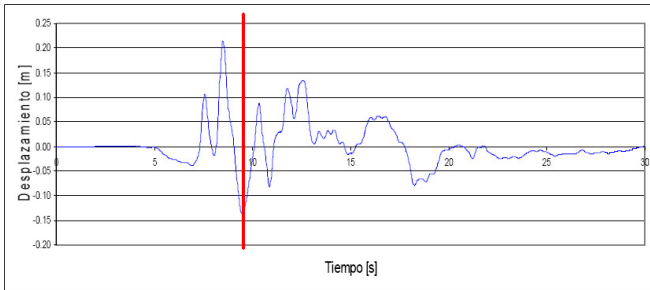
## Modelación a escala reducida de viviendas de adobe sometidas a sismo



**MODELOS DE ADOBE**

## Modelación a escala reducida de viviendas de adobe sometidas a sismo

### Ensayo de los modelos de adobe a escala



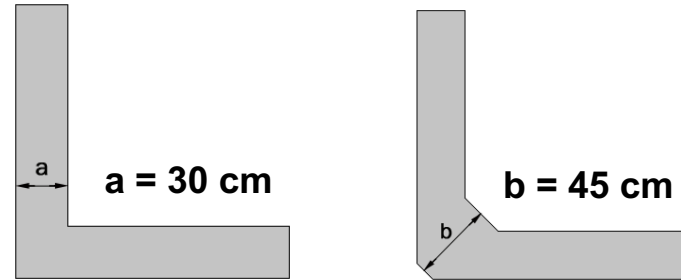
Grietas 45°



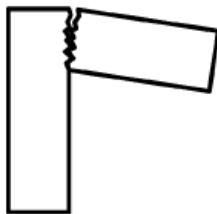
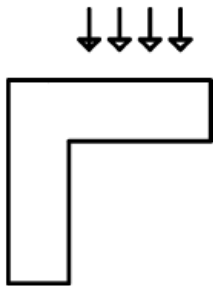
Muros salen de su plano vertical

## Propuesta A :Solución Esquina

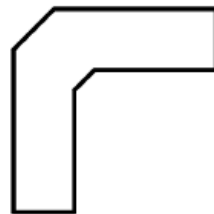
Debido a que las fuerzas **perpendiculares** se concentran en la esquina del ángulo, éste tiende a abrirse, por ello es recomendable diseñarlas con un **espesor mayor** a la del resto del elemento evitando el ángulo recto.



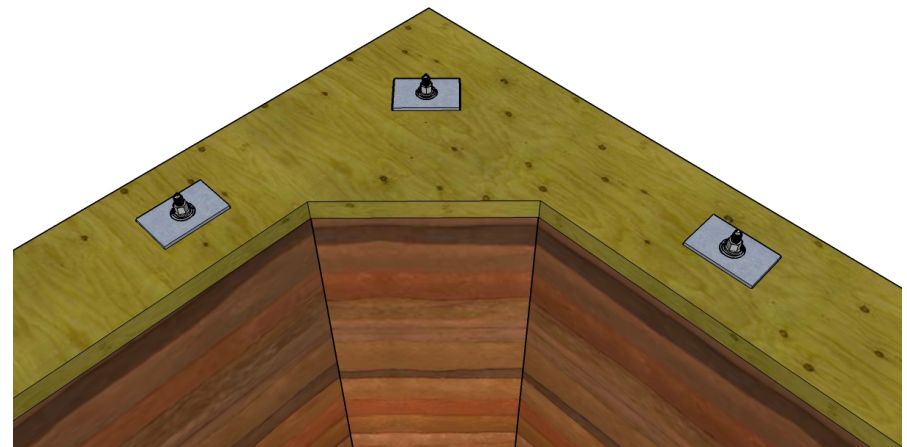
$$a < b$$



incorrecto



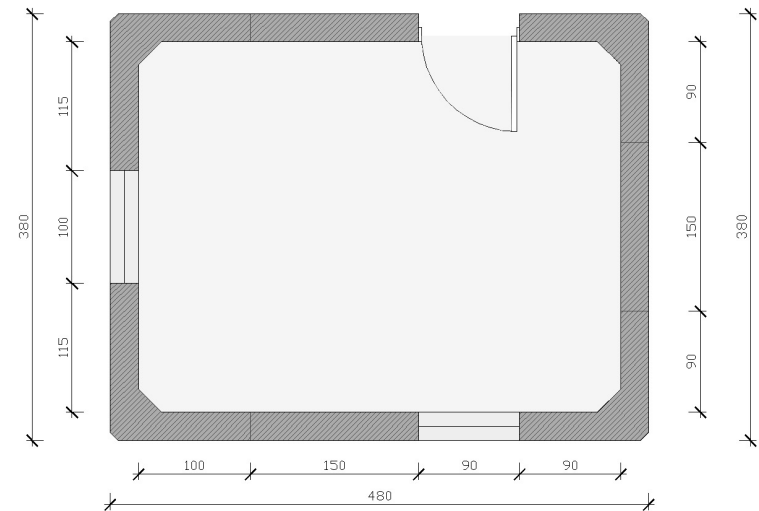
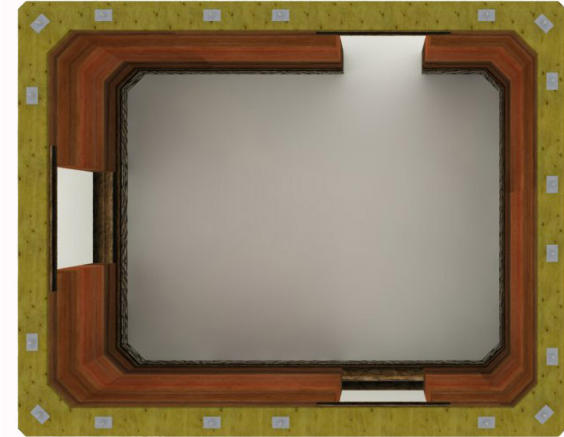
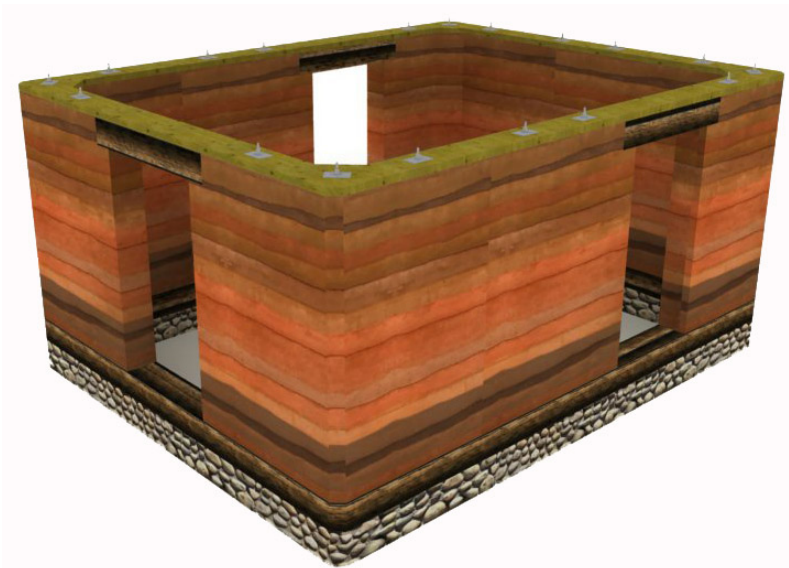
correcto



## Modelación a escala reducida de suelo-cemento compactado

### Propuesta A:

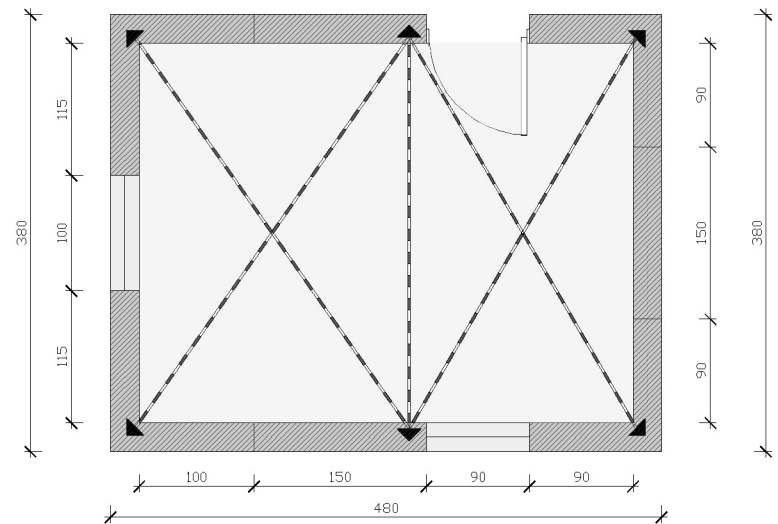
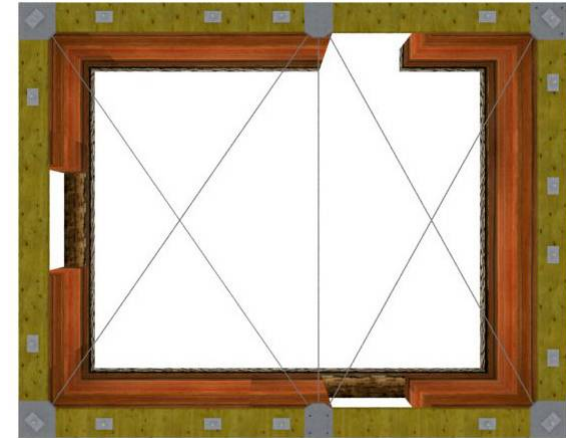
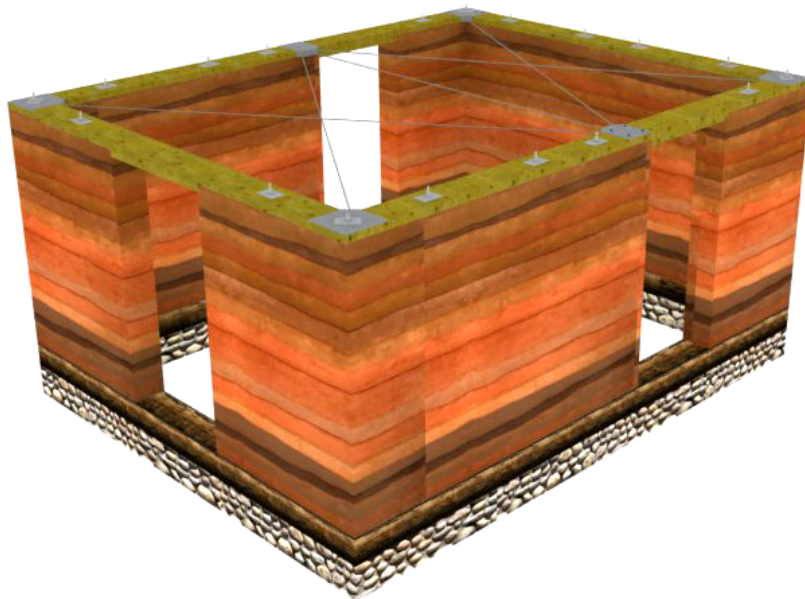
Aumento del espesor de las esquinas, evitando el ángulo recto, para mejorar estabilidad y rigidez.



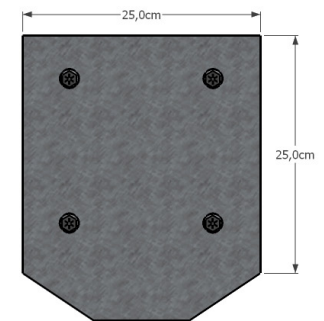
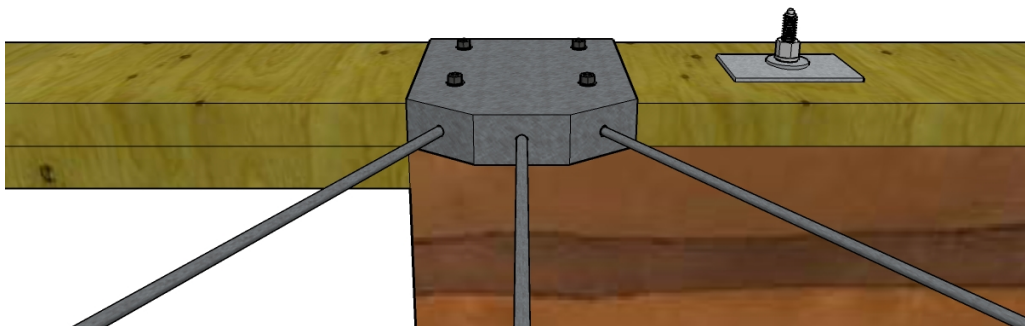
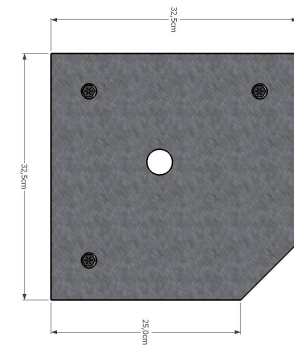
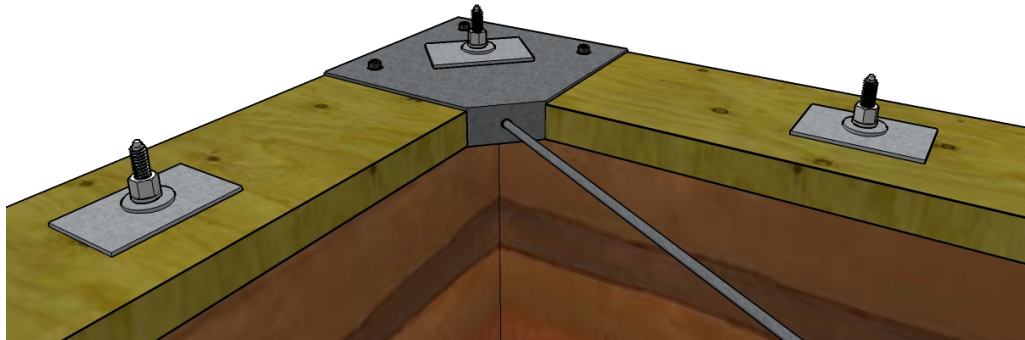
## Modelación a escala reducida de suelo-cemento compactado

### Propuesta B:

Diafragma rígido, mediante tensores en el plano superior del modelo.



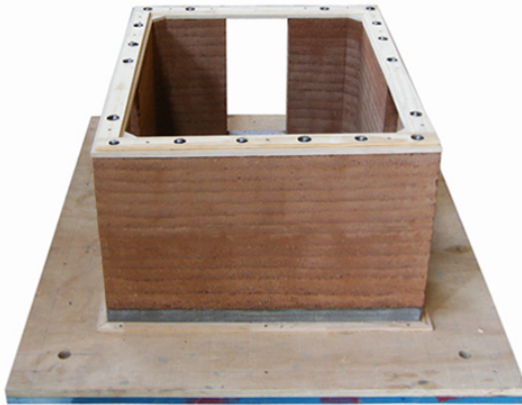
## Modelación a escala reducida de viviendas de adobe sometidas a sismo



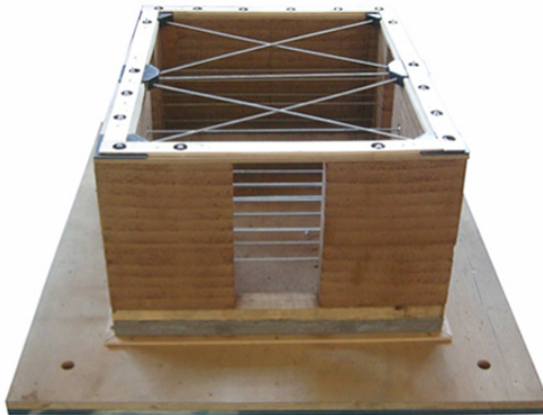
# Ensayos de simulación sísmica



**Maqueta A**



**Maqueta B**



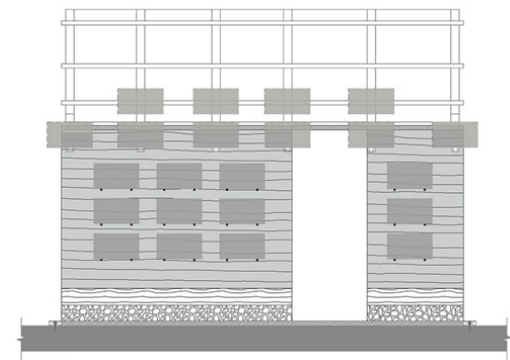
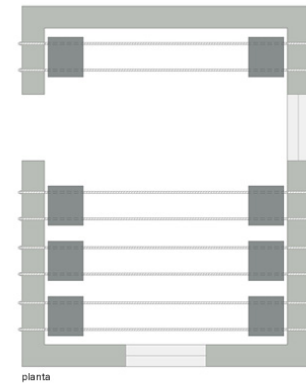
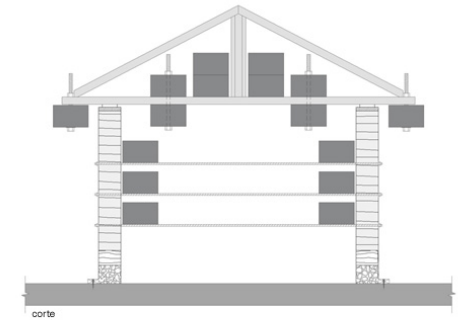
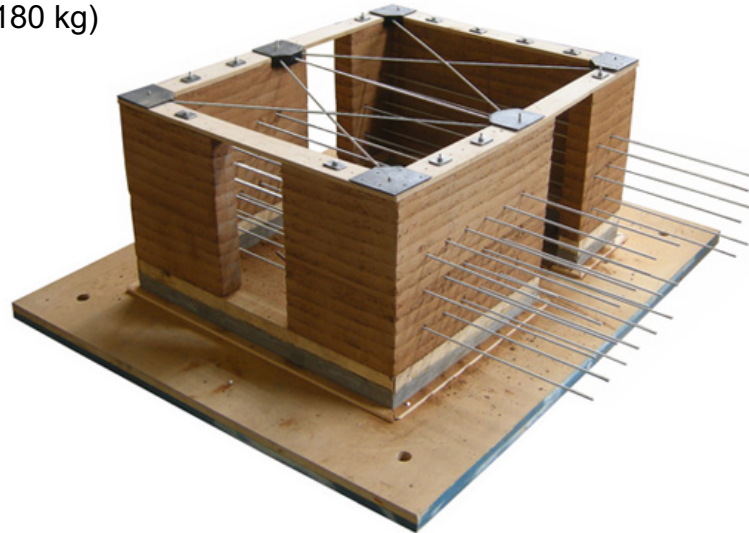


## Plomo

Muros: 24 plomos (108kg)

Techumbre: 40 plomos (180 kg)

**Total: 288Kg**

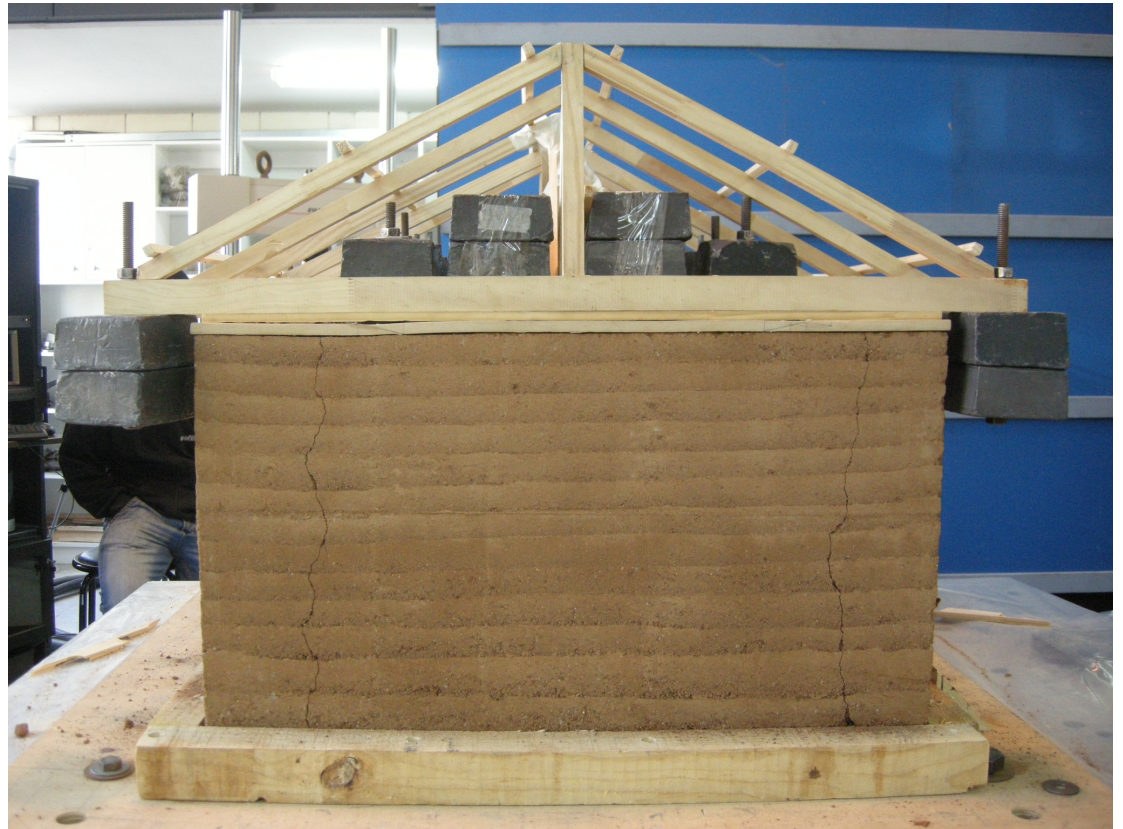




# VIDEOS

## Catastro de grietas

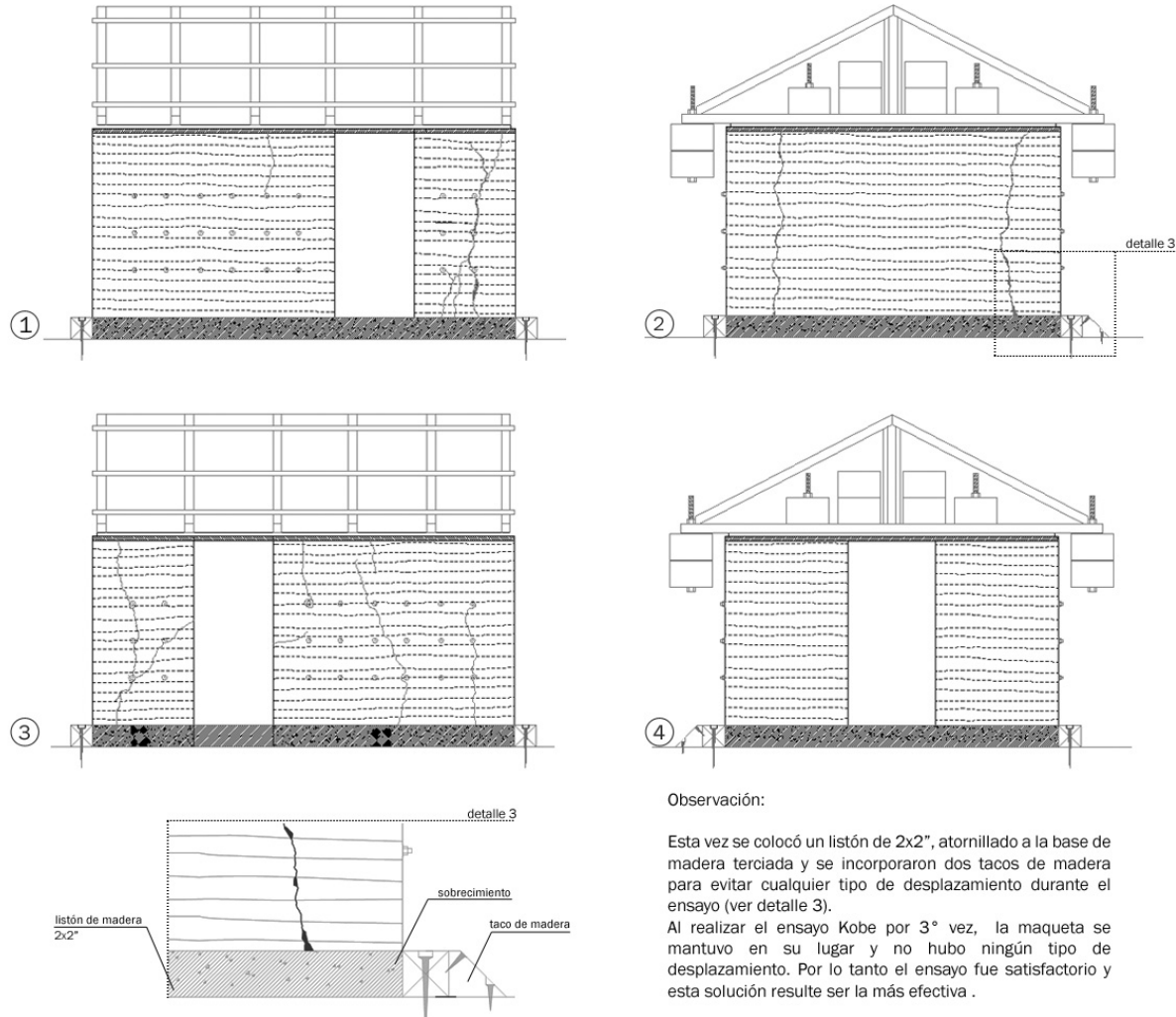
Maqueta 1 (refuerzo esquinas)



**GRIETAS**

## Catastro de grietas

### Maqueta 1 (refuerzo esquinas)



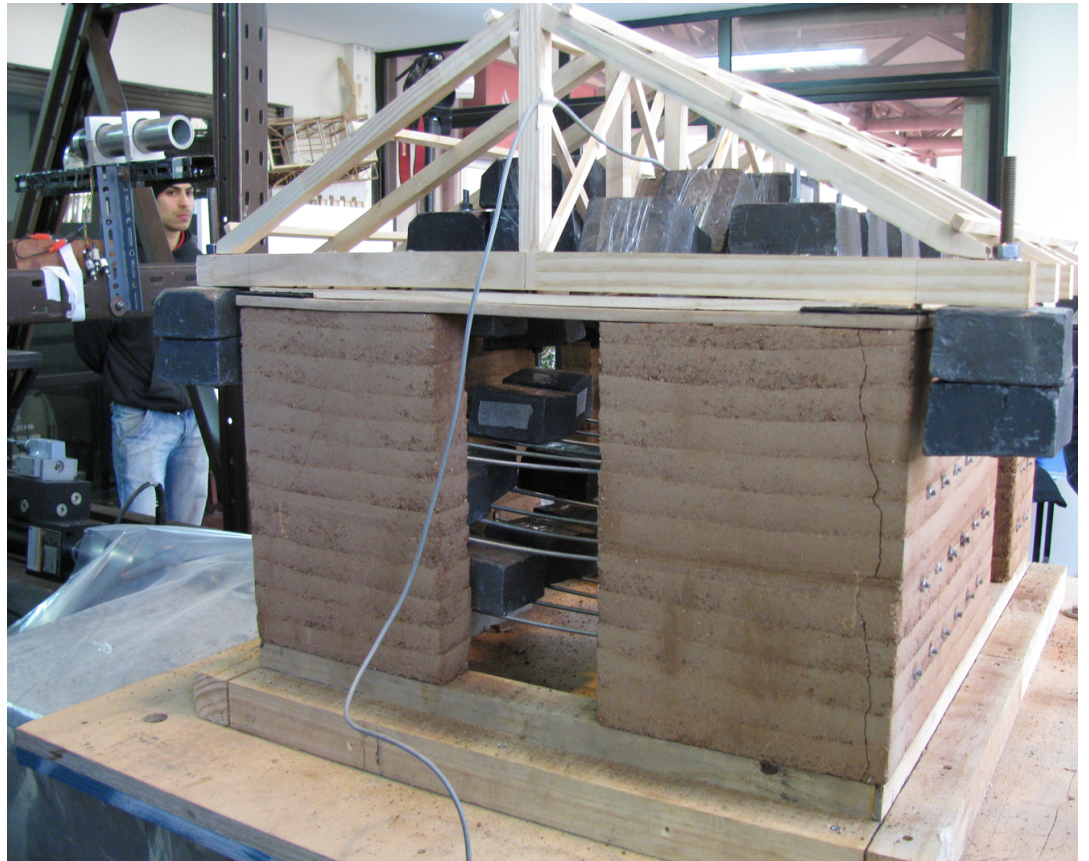
#### Observación:

Esta vez se colocó un listón de 2x2", atornillado a la base de madera terciada y se incorporaron dos tacos de madera para evitar cualquier tipo de desplazamiento durante el ensayo (ver detalle 3).

Al realizar el ensayo Kobe por 3° vez, la maqueta se mantuvo en su lugar y no hubo ningún tipo de desplazamiento. Por lo tanto el ensayo fue satisfactorio y esta solución resulte ser la más efectiva .

## Catastro de grietas

Maqueta 2 (diafragma rígido)



**GRIETAS**

## Catastro de grietas

Maqueta 2 (diafragma rígido)



**GRIETAS**

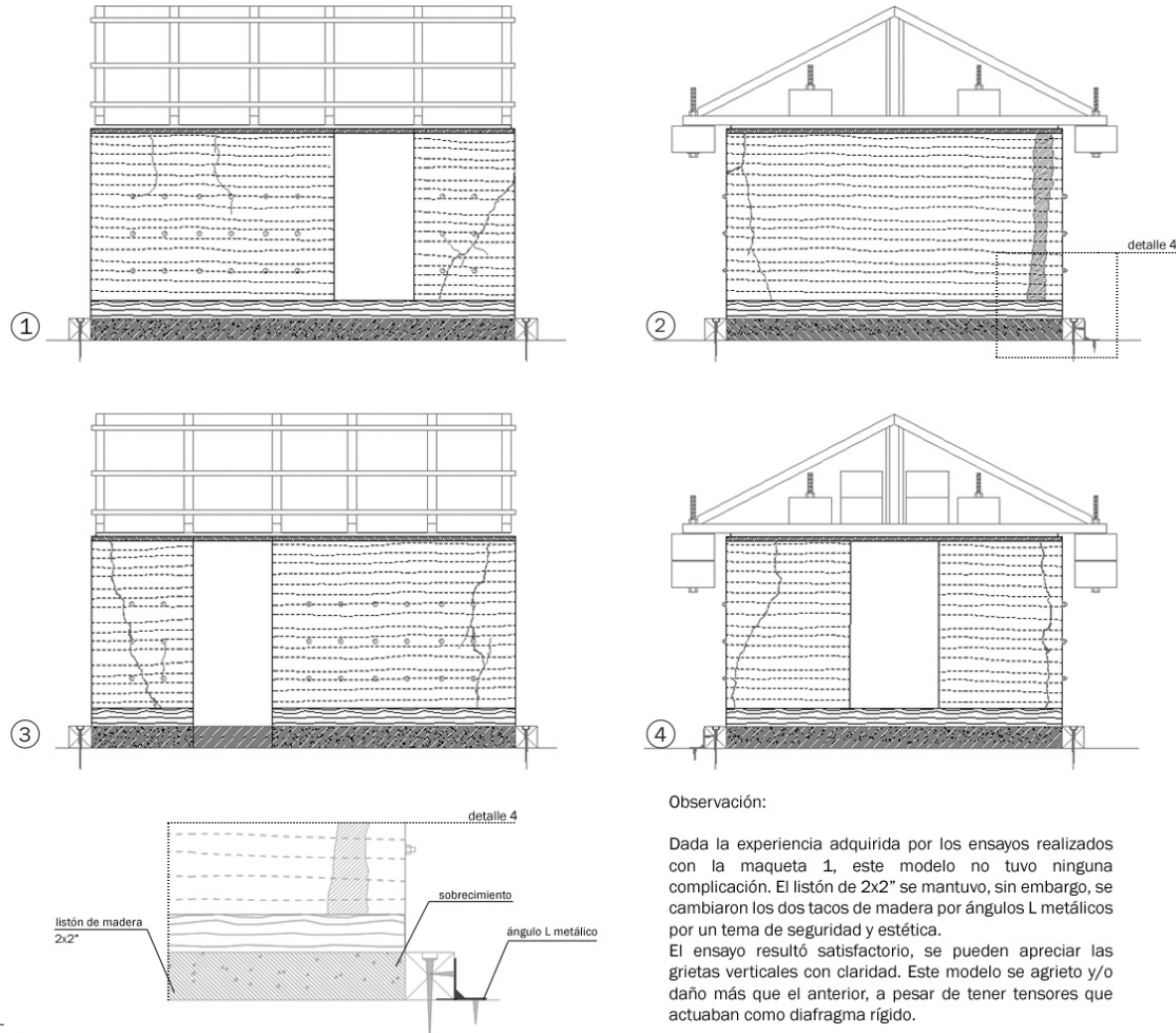
## Catastro de grietas

Maqueta 2 (diafragma rígido)



## Catastro de grietas

### Maqueta 2 (diafragma rígido)



#### Observación:

Dada la experiencia adquirida por los ensayos realizados con la maqueta 1, este modelo no tuvo ninguna complicación. El listón de 2x2" se mantuvo, sin embargo, se cambiaron los dos tacos de madera por ángulos L metálicos por un tema de seguridad y estética.

El ensayo resultó satisfactorio, se pueden apreciar las grietas verticales con claridad. Este modelo se agrietó y/o dañó más que el anterior, a pesar de tener tensores que actuaban como diafragma rígido.



## Conclusiones

Se apostó por diseñar un sistema constructivo en base de suelo-cemento compactado con un sistema post-tensado. La hipótesis de trabajo plantea dos posibles soluciones para resolver el tema del sismo.

Desde el punto de vista del comportamiento antisísmico, se cumple en gran medida el objetivo principal de la tesis, puesto que ambos modelos ensayados **no colapsaron**.

Con respecto al costo del sistema constructivo, se concluye que éste no es de tan bajo costo como el adobe, debido a los tensores verticales y al herraje, pero sí más económico que un muro de albañilería. Cabe destacar que un muro de suelo-cemento **no** requiere de una **aislación adicional**. Es un **sistema que queda terminado** sin necesidad de estuco, y tiene un **mejor índice térmico** si se compara con un muro de albañilería.

Su campo de aplicación se orienta a dos grandes oportunidades. En primer lugar, la construcción de viviendas económicas (de geometrías simples y un solo nivel) y en segundo lugar la restauración de edificios con valor patrimonial.

**Finalmente, se comprobó que es posible construir viviendas con geometrías simples o recintos de poca complejidad programática con el sistema propuesto dentro de un rango de seguridad antisísmica.**



## **Recomendaciones de investigación a futuro...**

- Construcción de un prototipo 1:1 o una parcialidad del mismo y ensayarlo.**
- Desarrollar un sistema de moldajes (económico, reutilizable y de fácil instalación).**
- Explorar alternativas de materialidad para el tensor de acero.**
- Investigar la “distancia” entre tensores.**
- Pre-fabricación del sistema.**
- Evaluación de desempeño bajo otros parámetros:**
  - resistencia a la humedad
  - capacidad de soportar un 2° piso en estructuras livianas
  - Investigación en capacidades morfológicas del sistema