

USO DEL TAPIAL EN LA CONSTRUCCIÓN

Urbano Tejada Schmidt
Alan Mendoza García

Daniel Torrealva Dávila

SENCICO
Servicio Nacional de Capacitación
Para la industria de la Construcción

Gerencia de Investigación
y Normalización

USO DEL TAPIAL EN LA CONSTRUCCIÓN
Urbano Tejada Schmidt
Alan Mendoza García
Daniel Torrealva Dávila

©SENCICO
Av. De la Poesía N° 351
San Borja. Lima 41, Perú
Teléfono (01) 2116300

ISBN
Depósito legal

Se puede reproducir y traducir total y parcialmente el texto publicado siempre que se indique la fuente.

El autor es el responsable de la selección y presentación de los hechos contenidos en esta publicación, así como de las opiniones expresadas en ella, las que no son, necesariamente, las de SENCICO o del Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento y no comprometen a la institución.

Publicado por la Gerencia de Investigación y Normalización de SENCICO en el marco del Plan Operativo Institucional en aras de Desarrollar estudios en la línea de Investigación y la difusión de dichos trabajos.

CONSEJO DIRECTIVO NACIONAL

Dr. Daniel Juan Arteaga Contreras
Presidente del Consejo Directivo Nacional

Ing. Adolfo Gálvez Villacorta
Representante de las Empresas Aportantes designado por CAPECO

Ing. Dina Carrillo Parodi
Representante de las Empresas Aportantes designado por CAPECO

Dra. Ana K. Rozas Valverde
Representante del Ministerio de Educación

Abog. Wigberto Nicanor Boluarte Zegarra
Representante de las Universidades

Arq. Sofía Rodríguez Larraín de Grange
Representante de las Universidades

Sr. Félix M. Rosales Gutiérrez
Representante de la Federación de Trabajadores de Construcción Civil del Perú (FTCCP)

Sr. Porfirio Fidel Buitrón Espinoza
Representante de la Federación de Trabajadores del Perú (CTP)

PRÓLOGO

El Servicio Nacional de Capacitación para la Industria de la Construcción (SENCICO), es una entidad de tratamiento especial del Sector de Vivienda, Construcción y Saneamiento, que tiene como finalidad la formación y capacitación de los trabajadores de la construcción mediante la educación superior no universitaria; tanto para el desarrollo de investigaciones vinculadas a la problemática de la vivienda, edificación y saneamiento, como para la presentación de propuestas de normas técnicas de aplicación nacional.

Institucionalmente se creó el 26 de Octubre de 1976, iniciando sus operaciones al año siguiente. Cuenta con sedes en Piura, Chiclayo, Trujillo, Lima, Arequipa y Cusco, donde se ofrecen las carreras de formación técnica y profesional-técnica. Se tiene sedes para impartir cursos y capacitación ocupacional en Huancayo, Ica, Iquitos, Puno y Tacna. También contamos con Unidades Operativas en Ayacucho, Cajamarca, Moyobamba y Pucallpa y CENTRO DE Formación en Apurímac, Huancavelica, Moquegua, Madre de Dios y en los distritos de Chorrillos y Los Olivos en la ciudad de Lima, mantenemos convenios con universidades e instituciones públicas y privadas del sector vivienda, construcción y saneamiento.

Cuenta con una Gerencia de Investigación y Normalización, en donde existe información especializada relacionada con la construcción y se encuentra a disposición de los profesionales y técnicos del sector construcción y personas interesadas.

Cumplimos con difundir esos conocimientos, poniendo a disposición de la comunidad ésta publicación que motivará a los estudiantes y profesionales del sector a desarrollar investigaciones que debidamente difundidas podrán ser enriquecidas con nuevos aportes gracias a la contribución de especialistas, con el objetivo de innovar en el campo de la vivienda, construcción y saneamiento.

La misión institucional de SENCICO es proporcionar capacitación de excelencia, investigando, evaluando sistemas constructivos innovadores y proponiendo normas para el desarrollo de la industria de la construcción; contribuyendo así al incremento de la productividad de las empresas constructoras y a la mejora de la calidad de vida de la población. La visión es proyectarse hacia el desarrollo de nuevas propuestas educativas para la formación continua de los trabajadores, técnicos y profesionales, una industria de la construcción competitiva y segura, con trabajadores calificados, certificados y empleables, contribuyendo a la competitividad de las empresas y aportando estudios de investigación y normalización para el desarrollo integral de nuestro país.

Dr. Daniel Juan Arteaga Contreras

Presidente Ejecutivo

**ESTADO DEL ARTE DEL USO DEL TAPIAL EN LA CONSTRUCCIÓN EN EL
PERÚ**

Urbano Tejada Schmidt

CONTENIDO

Página

INTRODUCCIÓN

ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN
EN CONSTRUCCIÓN CON TIERRA EN EL PERÚ

NOTAS ESTADÍSTICAS

NOTAS AMBIENTALES DE LA CONSTRUCCIÓN
CON TIERRA

SUELOS ADECUADOS PARA CONSTRUIR CON TAPIAL

PROCESO CONSTRUCTIVO DEL TAPIAL

COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL TAPIAL

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ESTADO DEL ARTE DEL USO DEL TAPIAL EN LA CONSTRUCCIÓN EN EL PERÚ

INTRODUCCIÓN

En este documento, de acuerdo a lo que expresa su título, se suministra la información más avanzada sobre los diversos aspectos que conforman la tecnología del Tapial en la actualidad. La información disponible sobre la materia es muy abundante, aunque de calidad muy irregular, por ello, se ha tratado de utilizar selectiva y preferentemente la información procedente de medios académicos, sin generar un documento excesivamente extenso. Se cita información producida en Europa y de América Latina. Sin embargo resulta de mayor interés esta última, dado que guarda mayor relación con las características sociales y técnicas propias del Perú, y de manera particular con sus condiciones de sismicidad.

En el Perú se denomina Tapial a un sistema que consiste en edificar muros de tierra cruda previamente humedecida, amasada, compactada o apisonada dentro de encofrados reutilizables¹. Este sistema, que suele llamarse también Tapia o Adobón, conforma conjuntamente con el Adobe y la Quincha, los principales sistemas constructivos de tierra sin cocer, empleados en el país desde épocas preincaicas. Un numeroso sector de la población continúa utilizándolos.

Notas Históricas

El Tapial es muy antiguo, se estima que su uso primitivo se remonta a 5000 años a.C. en Asiria donde se halló cimientos apisonados de tierra. La Muralla China y las pirámides de Teotihuacán están hechas de tierra apisonada recubierta de piedras, aunque no constituyen tapias tal como los conocemos en la actualidad². En general el uso de la tierra compactada es, a nivel mundial, muy empleado hasta nuestros días.

Es conocido que la edificación con tierra en el Perú comenzó en la costa en épocas preincaicas; la construcción en la sierra era predominantemente de piedra. La construcción con tierra fue objeto de cambios profundos en su arquitectura con la llegada del dominio español y también su empleo se adoptó en la sierra peruana.

Se estima que en el Perú se comienza a construir con Tapial entre el 800 y 1200 d.C., en el valle del Rímac donde se encuentra Cajamarquilla, asentamiento de influencia Huari (F.M. Monzón, 1984).

¹ Es importante señalar que en el Perú designamos como Tapial al muro de tierra compactada. En otros países suelen utilizar la palabra tapial para hacer alusión al encofrado del muro.

² Monografía de Arias Rodolfi, Chemané, Programa de Estudios Abiertos de la Universidad Politécnica Territorial de Mérida, Venezuele.

<http://www.saber.ula.ve/bitstream/123456789/36539/1/articulo8.pdf>

En la ciudad de Lima³, también se encuentran construcciones de tapial o también llamado adobón por algunos. Se muestran las siguientes construcciones declaradas “Patrimonio Cultural de la Nación” por el Ministerio de Cultura:

Zona Arqueológica Huaca Pro (Los Olivos)

Ubicada en la parte derecha del río Chillón, perteneció al Intermedio Tardío (1000 – 1450 d.C.)

Zona Arqueológica Monumental de Huaycán de Pariachi (Ate).

Ubicada en el valle del río Rímac, perteneció a los Yschma (Intermedio Tardío 1000-1450 d.C.). Fue una sede de administración del curacazgo, además es el único caso de pocos donde se aprecia el uso de dos muros grandes.

La Fortaleza de Campoy (San Juan de Lurigancho)

Ubicada en los valles de los ríos Rímac y Lurín, perteneció al Intermedio Tardío (1000- 1470 d.C.). Fue una sede de administración del curacazgo de Lurigancho. La fortaleza consistía en estos muros de tapial de grandes dimensiones, además es el único caso de pocos donde se aprecia el uso de dos muros grandes como base para colocar otro de dimensiones menores.

Zona Arqueológica de Mangamarca (San Juan de Lurigancho)

Perteneciente al Intermedio Tardío (300 d.C.), fue la capital del curacazgo Lurigancho.

Zona Arqueológica de Carapongo B. (Lurigancho-Chosica)

Más de mil años de antigüedad de esta obra hecha fue hecha con muros de Tapial.

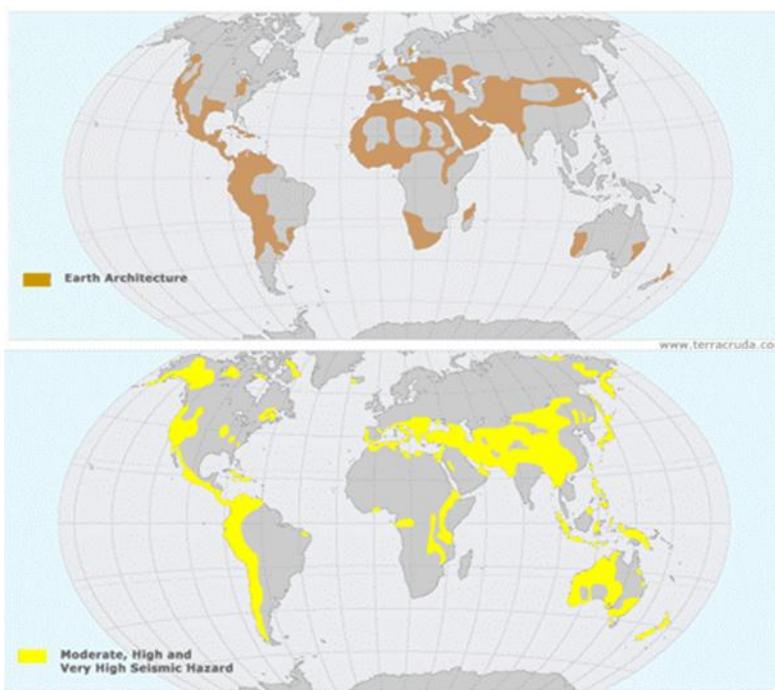
El Tapial tiene también presencia significativa en otros países de Sudamérica, en los Estados Unidos, en el norte del África, en países europeos como Francia, Alemania, España, en la China y en algunas regiones de Oceanía. Aproximadamente un tercio de la población del planeta vive en construcciones de tierra (Célia Neves, 2011).

En las regiones indicadas se ha producido un renacimiento del interés por las edificaciones en Tapial y en otros sistemas de construcción con tierra debido principalmente a consideraciones de tipo ambiental y de ahorro de energía, aspectos que también son de importancia para el Perú. Sin embargo en nuestro país el uso actual del tapial más frecuente es en las viviendas rurales de los sectores de menores ingresos, razón por la cual se pone énfasis en los aspectos constructivos y estructurales que tienen particular interés por las condiciones sísmicas de nuestro país.

³ Ver trabajo “Recopilación y Sistematización de Información Referida al Uso del Tapial en la Construcción” del Bach. Alan Mendoza, que forma parte de la presente investigación.

ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN EN CONSTRUCCIÓN CON TIERRA EN EL PERÚ⁴

El terremoto de Huaraz de Mayo de 1970, puede considerarse como el punto de inicio de las investigaciones sistemáticas en construcción con tierra en el Perú, aunque hubo estudios anteriores. Ese evento sísmico marcó un punto de quiebre y permitió que entidades estatales y universitarias impulsaran la generación de conocimientos sobre el tema; las instituciones que más aportaron en la década del 70 fueron la Oficina de Investigación y Normalización, OIN, entidad que pertenecía al entonces Ministerio de Vivienda, que luego se convertiría en instituto, ININVI; la Universidad Nacional de Ingeniería, UNI, y la Pontificia Universidad Católica de Perú, PUCP. Seguidamente se referirá sólo los principales momentos del desarrollo de la investigación con tierra en el Perú.



El año 1970, al momento del sismo de Huaraz, se encontraba en ejecución el Proyecto Experimental de Vivienda, PREVI, a cargo del Ministerio de Vivienda, el cual incorporó a sus actividades la investigación del adobe, introduciendo el empleo de adobes cuadrados y criterios de modulación, que fueron aplicados en la reconstrucción en zonas afectadas por el terremoto.

En 1972 se realizó el Programa Construcción con Bloque estabilizado, COBE, a cargo del MVC y la UNI, en el cual se trabajó la estabilización de los adobes con asfalto y se introdujo el reforzamiento de muros de adobe utilizando cañas.

⁴ La información consignada en este acápite ha sido parcialmente tomada de la ponencia "Construcción con Tierra: Necesidades de Capacitación y Difusión", presentada por el autor en el evento TERRA 2012.

En 1973 en la PUCP, Corazao y Blondet, desarrollaron el trabajo “Estudio Experimental del Comportamiento Estructural del Adobe frente a Solicitaciones Sísmicas”, que mereció el Premio Sayhuite otorgado por el Banco Peruano de los Constructores.

Desde 1975 hasta 1981, la Oficina de Investigación y Normalización (OIN) del MVC desarrolló la segunda etapa del Programa COBE, con apoyo de la USAID; en esos años se contó también con el aporte de CRATERRE, entidad que trabajo en Huancayo y Arequipa. En esta etapa se sistematizó la edificación con adobe, se aplicaron métodos de diseño estructural, sistemas de refuerzo con caña, recomendaciones para instalaciones de agua, desagüe y electricidad y otros aspectos que hicieron operativa la construcción con adobe.

A partir de 1986 el ININVI⁵ en colaboración con la PUCP realizó estudios sobre el tapial para obtener un mejor conocimiento del sistema y en particular de su comportamiento estructural. Un primer estudio versó sobre las posibilidades de reforzamiento de los tapiales utilizando cañas como elementos de refuerzo y también maderas rollizas de eucalipto. Posteriormente, en un segundo estudio, fueron realizados ensayos en la mesa vibradora del Laboratorio de Estructuras de la PUCP lo que permitió la adquisición de conocimientos del comportamiento dinámico de los muros de tapial.

Hasta 1995, el ININVI, continuó los trabajos de la OIN, y llegó a formular la primera Norma Técnica de Adobe. En ese período también investigó el sistema de Quincha Prefabricada con apoyo de la UNI, el PADT REFORT y de la USAID, logrando su aprobación como Sistema Constructivo No Convencional. En 1995 el ININVI fue desactivado y su acervo documental pasó al SENCICO.

En 1996, la PUCP, CERESIS y GTZ desarrollaron el trabajo “Estabilización de las Construcciones Existentes en los Países Andinos”, que constituyó un notable aporte, porque estableció el sistema de refuerzos con mallas metálicas electro soldadas, herramienta muy importante para la prevención de daños sísmicos en viviendas existentes construidas con tierra.

Finalmente, en años recientes la PUCP ha desarrollado un sistema de reforzamiento sísmico con mallas plásticas o geomallas, que ya ha sido introducido a la Norma de Adobe y que permite también mejorar la capacidad sismorresistente de las edificaciones de tierra.

Una de las más recientes investigaciones realizadas con el sistema de tapial ha sido la denominada Ensayos de Tapial Mejorado, que comprendió ensayos físicos del material (suelo), mecánicos de compresión axial y diagonal en prismas (pilas y muretes) y dinámicos de simulación sísmica en un módulo de vivienda a escala natural. Esta investigación fue realizada mediante un convenio entre la PUCP y SENCICO, el año 2013.

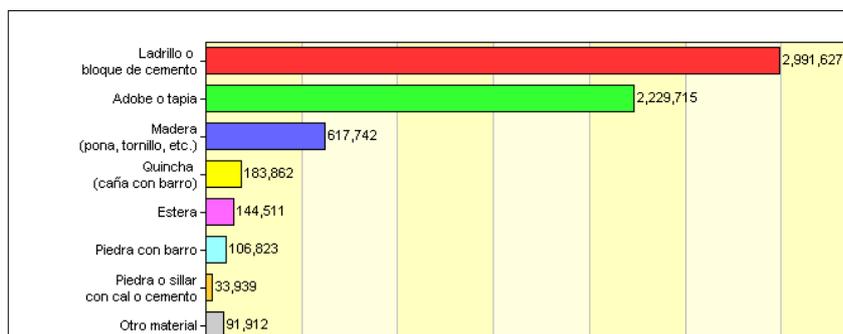
⁵ Como referencia puede verse el libro “Tecnologías desarrollada por el ININVI” del Ing. Urbano Tejada Schmidt, Julio de 1990, editado por el ININVI.

Se debe señalar que una fuente importante de generación de conocimientos sobre tema son las tesis de grado que se desarrollan en algunas universidades. Las Tesis de grado que se encuentran en las bibliotecas de la PUCP, UNI y algunas universidades de provincias, son una excelente fuente de información.

Es interesante señalar que buena parte de las técnicas que ahora utilizamos en el Perú para construir con tierra se nutren de los avances de la ingeniería moderna y, además, han recogido e incorporado conocimientos tradicionales existentes en muchas localidades del país.

NOTAS ESTADÍSTICAS

En el Perú existen, de acuerdo a datos censales del año 2007 suministrados por el INEI, 2 229 715 viviendas con paredes de tierra, lo que representa el 34,8% del total; sin embargo, si excluimos a Lima Metropolitana, la cantidad de viviendas de tierra llegaría al 47,8%, lo que nos indica la importante presencia de viviendas de este material, las que albergan a más de 11 millones de personas. Si tenemos en cuenta además que en 1999 vivían en viviendas de tierra 9 millones de habitantes, corroboramos que el número de usuarios de este tipo de viviendas continúa creciendo, aunque los porcentajes estadísticos disminuyan.



Según el INEI, para el año 2007 la cantidad de viviendas de adobe o tapial en la zona urbana fue de 21,5% y para la zona rural fue de 72,2% (INEI, 2015). Es importante también tomar en cuenta que el empleo de la tierra como material de construcción se utiliza en mayor magnitud en los departamentos que constituyen la sierra central, seguidos por los valles costeros y zonas de selva alta, como puede apreciarse en el mapa adjunto. El uso de tierra en la construcción es mucho más frecuente en localidades urbanas pequeñas, que suelen denominarse urbano- rurales, que están en crecimiento continuo y cuya vida económica se desarrolla fundamentalmente en base a actividades rurales. Esto hace necesario considerar no solamente aspectos tecnológicos de la construcción con tierra, sino también aquéllos que tienen que ver con la arquitectura, urbanismo y dotación de servicios.

Conviene señalar también que no es posible separar, en base a la información estadística disponible, la cantidad de viviendas construidas en adobe de las que lo están en tapial. En muchas localidades suelen coexistir viviendas que emplean ambas tecnologías.

NOTAS AMBIENTALES DE LA CONSTRUCCIÓN CON TIERRA

Además de las razones históricas y sociales que han sido revisadas, la construcción con tierra tiene importancia por sus características favorables al cuidado que requiere, cada vez con mayor urgencia, el medio ambiente.

La tierra como material de construcción tiene características propias en aspectos que tienen directa relación con la habitabilidad, como su baja producción de CO², su comportamiento térmico, sus características acústicas y de resistencia al fuego.

Se suele considerar a la construcción con tierra como sostenible debido a que las edificaciones con este material habitualmente se construyen utilizando materiales localmente disponibles, lo cual reduce en gran medida el consumo de combustibles y, ciertamente, ahorra energía. De otro lado las construcciones con tierra no producen emisiones tóxicas y pueden ser recicladas o desechadas con seguridad sin tratamientos especiales. El consumo de agua requerido no es alto, especialmente en el caso del tapial, donde los muros son trabajados con 10% de humedad. Como se aprecia en el cuadro que sigue, la tierra, y especialmente el tapial, producen, como ya se señaló, emisiones muy bajas de CO₂ como puede verse en el cuadro que sigue, mostrando con elocuencia sus condiciones de sostenibilidad.

COMPARACIÓN DE CARACTERÍSTICAS DE MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN					
Material	Densidad kg/m ³	Conductividad Térmica λ W/mk	Aislamiento acústico db (muros de 0.30 m)	Emisiones de CO ₂ en Kg por Kg de material / y en Kg por m ³ de material	Resistencia al fuego REI en minutos
Tapial	1400 - 2000	0,6 – 1,6	57,85	0,004 / 9,7	90
Adobe	1200	0,46	53,04	0,06 / 74	90
Concreto Armado	2300 - 2500	2,3	59,16	0,18 / 455	90
Bloque de concreto	860	0,91	46,10	-	120
Ladrillo macizo	2170	1,04	58,61	0,19 / 301	120
Ladrillo hueco	670	0,22	47,56	0,14 / 95	-

Datos tomados de "Construcción con tierra en el siglo XXI"⁶

Como se señala en una tesis de la Universidad de Loja⁷, el tapial transpira, como el adobe, es higroscópico y tiene capacidad de difusión; también posee buena capacidad para almacenar frío o calor, siendo buen aislante, y tiene una baja dilatación térmica, así como su buen comportamiento como aislante acústico, debido a sus grandes espesores, con una reducción de 56 decibelios en un muro de 40 cm., para una frecuencia de 500 Hz. Cuando el material está endurecido, presenta buen comportamiento frente al desgaste y al punzonamiento.

⁶ "Construcción con Tierra en el Siglo XXI" S. Bestraten , E. Hormias , A. Altemir, Universidad Politécnica de Catalunya E.T.S.A.B, Barcelona, España.

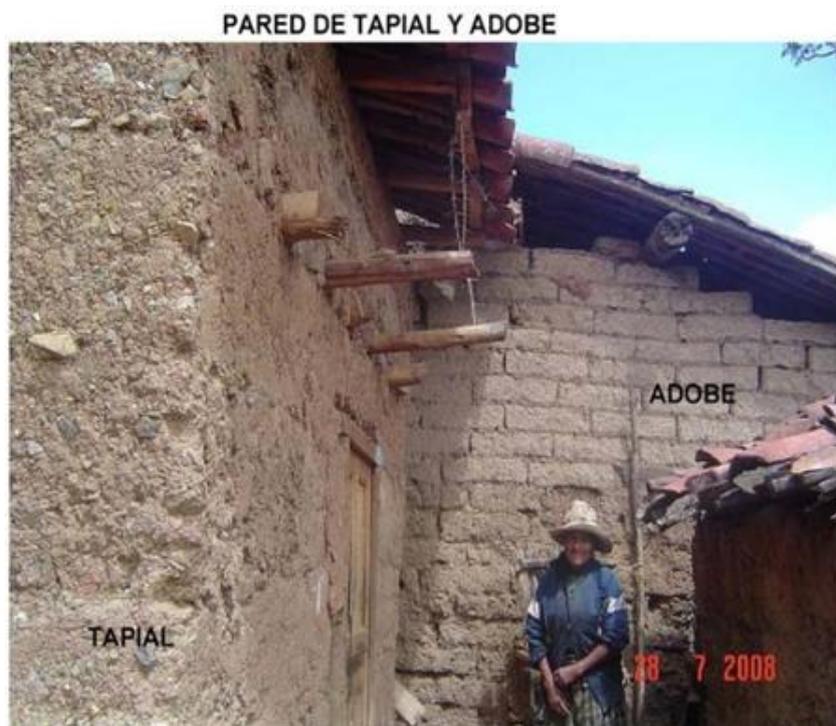
⁷ Tesis "Vivienda de Interés Social de dos Plantas en base a Tapial como una alternativa para el Barrio "Mirador" Situada en la parroquia de Malacatos, Ciudad de Loja: Materiales y Estructuras", Ing.Byron Roberto Febres Torres, Universidad Nacional de Loja, Ecuador. La información suministrada coincide con la de <https://es.wikipedia.org/wiki/Tapial>.

Es interesante indicar que las condiciones de aislamiento acústico de los muros de tierra son muy similares al de los materiales industriales y su conductividad térmica es bastante menor, lo que muestra la posibilidad de obtener viviendas confortables en base a un diseño bien realizado⁸.

Condiciones Climáticas en Zonas que se construyen viviendas de Tapial⁹

Algunas de las ciudades que se conoce por experiencia que se construye el tapial son las siguientes: Ancash, Junín, Cajamarca, Huánuco, Huancavelica y Tarma (Vivienda., 1989). En las ciudades de Cajamarca y Huánuco, que presentan un clima continental templado, es muy recomendable la construcción del tapial. Este clima posee oscilaciones térmicas medias alrededor de 15°C, las noches son frías (menos de 10°C) y la temperatura máxima es alrededor de 27°C. Esto permite que las viviendas de tapial tengan una gran ventaja ante los demás tipos de materiales de construcción al ser este un material con gran inercia térmica. Es decir, almacena y libera lentamente el calor o el frío del exterior dependiendo de las condiciones climáticas que se presenten alrededor, dando confort a los habitantes que se encuentren en aquella vivienda (Rey, 2011). Otro clima adecuado para la construcción del tapial sería el continental frío, donde se encuentran las ciudades de Cajamarca y Tarma.

En estos climas las temperaturas son bajas pero no suelen llegar a 0°C y la humedad relativa suele ser baja.



⁸ Ver "Construcción con Tierra en el Siglo XXI" ya citada

⁹ Tomado de "Bases preliminares para el diseño de viviendas de tapial con un refuerzo de geomallas", documento de pre tesis de Christian Tantaleán, estudiante de la PUCP.

Es interesante anotar que en las localidades indicadas se puede encontrar tanto construcciones de tapial como de adobe. Sin embargo, un buen sector de la población prefiere el uso del tapial considerándolo de menor costo, debido a que es casi siempre construido con material ubicado al pie de obra, lo que implica un importante ahorro en traslados; además, dado que para construir con tapial la tierra se utiliza en estado húmedo, la cantidad de agua requerida es sustancialmente menor que la empleada para hacer adobes que se elaboran con barro. De otro lado el adobe requiere tendales relativamente grandes y sombreados para el proceso de secado y, dependiendo del clima, de 2 a 4 semanas para estar en condiciones de ser utilizado. El proceso constructivo del tapial, de otro lado, es bastante más rápido, ya que éste queda concluido cuando después de compactar el muro se retira el encofrado, mientras que en el caso de adobe toma mayor tiempo debido al proceso de albañilería que se requiere. Sin embargo esta ventaja se ve limitada cuando se trata de construcciones de dos plantas, debido a la dificultad en la manipulación de los encofrados; por ello es notorio que La mayor parte de viviendas de tapial es de solo un piso. En el medio rural la velocidad de construcción suele ser muy importante debido a las épocas que los campesinos dedican a la construcción de sus viviendas son relativamente cortas y están en íntima relación con las actividades agrícolas y condiciones climáticas.

SUELOS ADECUADOS PARA CONSTRUIR CON TAPIAL

La selección de la tierra o suelo adecuado para la construcción de elementos estructurales como muros de Tapial, usualmente es realizada por métodos propios de la Mecánica de Suelos, considerando la granulometría del suelo, que influye mucho en su comportamiento como material de construcción. Entre los textos que tratan la temática de la selección de suelos, su clasificación y ensayos, tanto de campo como de laboratorio, es recomendable el libro denominado Selección De Suelos Y Métodos De Control En La Construcción Con Tierra - Prácticas De Campo¹⁰, que recoge información desarrollada tanto en países latinoamericanos como europeos y que proporciona información muy útil y práctica para la construcción con tierra.

Dependiendo de los autores existen recomendaciones distintas para la composición granulométrica de los muros de tapial. Así, por ejemplo, se presenta las recomendaciones de CRATERRE¹¹ y del CEET y DeS¹²

DIÁMETRO DE LOS GRANOS EN MM.	CLASIFICACIÓN	PORCENTAJES CRATERRE	PORCENTAJES CEET Y DES
2≤d≤20	Grava	0 - 15	5 - 20
0,06≤d<2	Arena	40 - 50	40 - 65
0,002≤d<0,06	Limo	35 - 20	15 - 25
d<0,002	Arcilla	15 - 25	10 - 30

¹⁰ NEVES, Célia María Martins; FARIA, Obede Borges; ROTONDARO, Rodolfo; CEVALLOS, Patricio S.; HOFFMANN, Márcio Vieira. (2009). Selección de suelos y métodos de control en la construcción con tierra – prácticas de campo. Disponible en <http://www.redproterra.org>.

¹¹ P. Doat et al, Building with Earth, First English Edition, 1991. CRATERRE.

¹² Centro de Estudios para la Edificación con Tierra y el Desarrollo Sostenible, Arq. Jorge Luis De Olarte Tristán.

De acuerdo a lo tratado en el Comité de la NTE E.080¹³ es claro que el suelo adecuado debe contener principalmente entre sus componentes, cantidades suficientes de arcilla y de arena. El porcentaje de arcilla, suministra cohesión, uniendo las partículas de arena, conformando una mezcla estructuralmente resistente. Sin embargo el exceso de arcilla puede producir grietas al secarse el tapial, por lo que, en general se considera que no debe exceder el 20%.

Los ensayos de laboratorio para la selección de suelos, como ya se mencionó están muy bien documentados en varias publicaciones. Sin embargo las construcciones de tapial suelen ser realizadas empleando los suelos localmente disponibles y para verificar la idoneidad de su uso, son de mayor utilidad las pruebas de campo, que siempre serán de menor costo y pueden ser aplicadas fácilmente por los constructores. Es importante también hacer notar como lo propone la NTE E.080, que en los suelos arcillosos se debe usar paja de aproximadamente 50 mm de largo en proporción de 1 volumen de paja por 5 de tierra, lo que ayuda al control de fisuras y resistencia.

La mayoría de estas pruebas de campo también son usadas para el adobe, las cuales son numerosas y su descripción extensa (U. Tejada, 2001). Por ello, se abordará en este documento sólo las principales son utilizadas para el tapial.

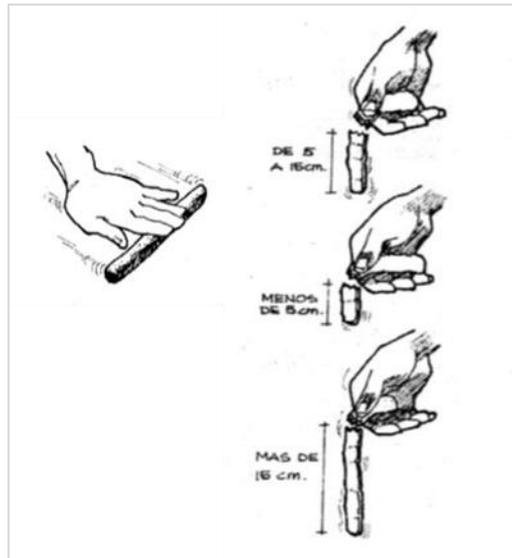
Una primera prueba de campo para seleccionar un suelo adecuado, es una de las técnicas más usadas por los tapialeros, que consiste en tomar un puñado de suelo húmedo y apretarlo fuertemente para que la tierra se quede compacta; si resulta así, significa que la proporción es la adecuada, si se desmenuza es inadecuado. (Ver la figura adjunta).



Suelo adecuado a la derecha y no adecuado a la izquierda.
Fuente: Ing. San Bartolomé.

¹³ Se encuentra en vía de aprobación una actualización de la NTE E.080, que abarcará no solamente las construcciones de Adobe, sino también las de Tapia.

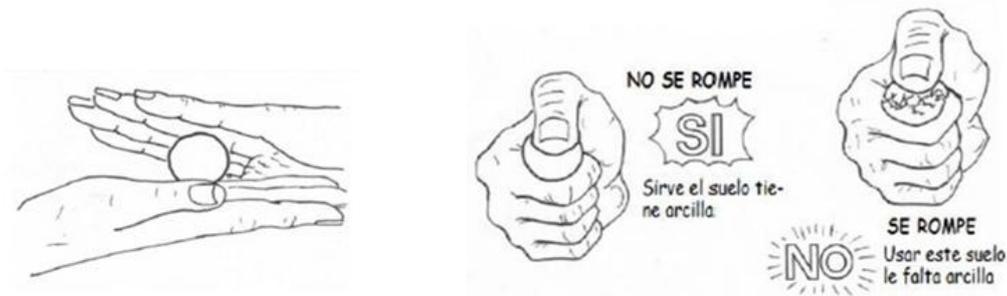
Una segunda prueba, es la denominada del rollito, la cual consiste en formar con las manos un rollito de suelo húmedo con diámetro entre 0,5 a 1 cm. Si el rollito, mientras es deslizado entre los dedos, se rompe entre los 5 a 10 cm de largo el contenido de arena será el adecuado. Si alcanza una longitud mayor el contenido de arcilla es alto; por el contrario, si se rompe antes de los 5 cm entonces se trata de un suelo arenoso (Ver figura).



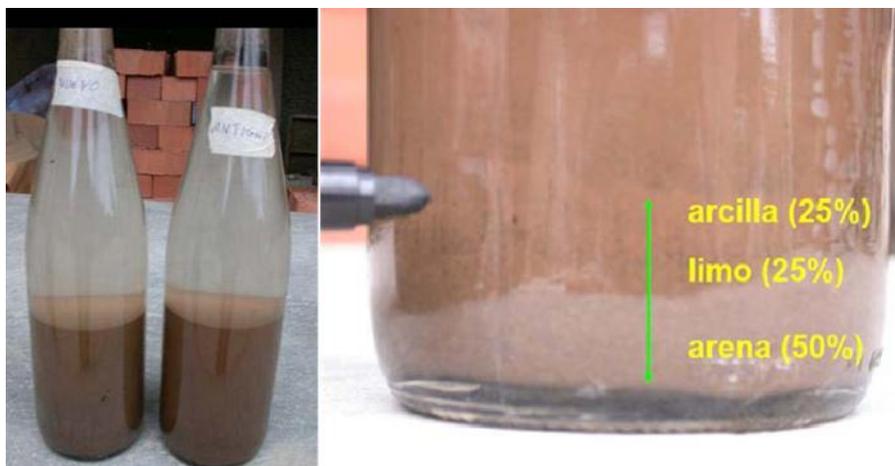
Prueba del rollito.
Fuente: Buena Tierra

Esta prueba guarda similitud con la denominada “Cinta de Barro”, que aparece en la NTE E.080. Estas pruebas nos indican si se está tratando con un suelo arenoso o arcilloso.

Una tercera prueba de suelo es la llamada prueba de la “bolita”, que la NTE denomina prueba de “Presencia Arcilla”, o de “Resistencia Seca”. Consiste en preparar 4 bolitas de suelo húmedo de 2 cm de diámetro, los cuales se dejan secar por 48 horas, bajo techo. Pasado ese tiempo, las bolitas se presionan con el pulgar y el índice, como en la figura. Las 4 bolitas no se deben romper, agrietar o quebrar; si eso pasa, entonces no se puede usar este suelo porqué le falta arcilla.



La última prueba que mencionaremos, es la prueba de sedimentación, donde se utiliza una botella de un litro de capacidad. Se llena $\frac{1}{4}$ partes con suelo y $\frac{3}{4}$ partes de agua, se agita la suspensión y se la deja reposar 5 horas. Luego, de que cada material se encuentre en reposo se establecen los porcentajes de cada componente.



Es importante poner de relieve que, al igual que en el caso del adobe, es posible reciclar la tierra empleada en construcciones antiguas. Esto posibilita la reparación de edificaciones dañadas, sin incurrir en gastos de transporte.

Posibilidades de Estabilización de Suelos¹⁴

Una práctica creciente para mejorar las condiciones técnicas del suelo como material de construcción, es la denominada estabilización de suelos que, además o alternativamente a la paja, utiliza productos industriales como asfalto, cal o cemento como estabilizadores, en proporciones que varían entre el 5% y el 10%. La utilización de materiales estabilizantes en proporciones correctas y suficientemente bajas, no significa riesgos para el entorno natural.

Estabilización con Asfalto.

Como se mencionó en líneas anteriores, en el Programa COBE desarrollado por el ININVI, se estudió la estabilización del adobe mediante el empleo de asfalto RC-2, en proporción variable, pero que en promedio suele ser de 2,5%, generando un incremento de la resistencia de los adobes, y además, la capacidad de absorber agua sin convertirse en lodo, lo que hace que este sistema de estabilización sea muy adecuado en zonas propensas a inundaciones o zonas muy lluviosas.

¹⁴ En el trabajo "Recopilación y Sistematización de Información Referida al Uso del Tapial en la Construcción" del Bach. Alan Mendoza, que forma parte de la presente investigación, aparece mucha información de interés sobre las posibilidades de estabilización de suelos.

Estabilización con Cal.

Sobre este punto se transcribe una extensa cita de la tesis de la Universidad de Loja: “El mejor estabilizante por consolidación con que se cuenta y cuya eficacia ha sido probada a lo largo de los siglos en todo el mundo, es la cal.

Como es sabido, el proceso natural de carbonatación de esta sustancia, que se denomina químicamente hidróxido de calcio, sirve de liga a las partículas del suelo aumentando su resistencia a la compresión y cortante, además de disminuir sus niveles de absorción hídrica y, por lo tanto, su posible retracción al secado.

La cal presenta la cualidad adicional de no modificar la porosidad de la tierra, con lo que se mantiene tanto su capacidad de adherirse a otros materiales constructivos como su virtud de permitir el intercambio de aire y vapor de agua con el medio ambiente, que la hacen funcionar como un sistema natural de control higrotérmico.

Es importante hacer notar que se requiere muy poca cantidad de cal para estos procesos. Se ha comprobado que agregar volúmenes excesivos no incrementa la resistencia del material resultante e incluso puede generar efectos imprevistos al inhibirse la forma natural de trabajo de las arcillas.

En una serie de estudios llevados a cabo en la Universidad Federal de Bahía con miras a determinar el efecto de la composición mineralógica de las arcillas dentro de sistemas compactados de suelo-cal, se han logrado establecer interesantes comparaciones entre tipos de mezclas con distribuciones granulométricas similares. En esas investigaciones se desarrollaron diversos ensayos con probetas en las que se agregaron como estabilizantes fracciones de cal que variaban entre 0 y 12%.

Entre los resultados obtenidos destaca el hecho de que, para determinados tipos de suelos, se pudieron obtener incrementos en la resistencia de la compresión simple que pasó de 6 hasta 15 kg/cm². Además se puso en evidencia la disminución de la contracción de las mezclas debido al secado, así como la limitación en la acumulación de agua. Las mejores respuestas se consiguieron agregando solamente entre 4 y 8% de cal (Hoffmann”).

Estabilización con Cemento.

El mismo documento que se acaba de citar, compara los efectos de la cal y el cemento en la estabilización de suelos, expresando: “El suelo cemento no es otra cosa que tierra apisonada a la que se le ha agregado una pequeña cantidad de cemento, alrededor del 10%. El cemento le aporta a la tierra un aumento de su resistencia y una reducción de la contracción. El porcentaje de cemento puede variar entre el 7 al 12% dependiendo del tipo de suelo. Entre las características del producto ya

curado (tiempo fragüe cemento) se le exigen unas determinadas condiciones de insusceptibilidad al agua, resistencia y durabilidad.

La cal presenta muchas cualidades de tipo constructivo, económico y ecológico, sobre todo si se le compara con el cemento que es su principal “competidor” en este campo. Entre estas ventajas podemos destacar las siguientes.

Las partículas de cal son mucho más pequeñas que las del cemento, por lo que la diversidad granulométrica de los morteros genera una adecuada oclusión de poros con mejores adherencias. Además, este tamaño de partículas permite que “atrapen” de una manera más firme a los cristales de la arena.”

Algunos autores como Paul Downton¹⁵, sugieren que cuando el grosor del muro es de 50 cm o mayor no se requiere el empleo de estabilizantes. Lo consideran útil cuando los muros son más delgados y requieren aumentar su resistencia.

PROCESO CONSTRUCTIVO DEL TAPIAL

La construcción con tapial comienza como cualquier otro sistema con las obras preliminares para la habilitación del terreno, su limpieza, trazado y excavación de las zanjas.

Los muros de tapial debido a su peso requieren de una cimentación competente que transmita adecuadamente las cargas al terreno. En las construcciones realizadas sin apoyo técnico en muchas ocasiones las cimentaciones son insuficientes o no existen, causando asentamientos diferenciales que, a su vez, producen rajaduras o grietas en los muros, debilitándolos y disminuyendo sensiblemente su capacidad resistente frente a sismos.

De otro lado las edificaciones de tapial con frecuencia están ubicadas en zonas lluviosas, de modo que es necesario proteger a los muros de la acción de la humedad mediante la utilización de sobrecimientos apropiadamente construidos.

Cimientos

Las cimentaciones pueden ser, en general, de tres tipos bastante conocidos, cuyo uso dependerá de las condiciones del terreno y de la presencia de agua. Cimiento de Pirca: Piedras grandes, de preferencia de forma angulosa, asentadas con barro, cuyas características se ilustran en la figura adjunta (Fuente: Haiku Deck)¹⁶

¹⁵ Rammed Earth, Paul Downton, 2013.

¹⁶ <https://www.haikudeck.com/sistema-constructivo-education-presentation-Rn1XP4j9Na#slide-3>



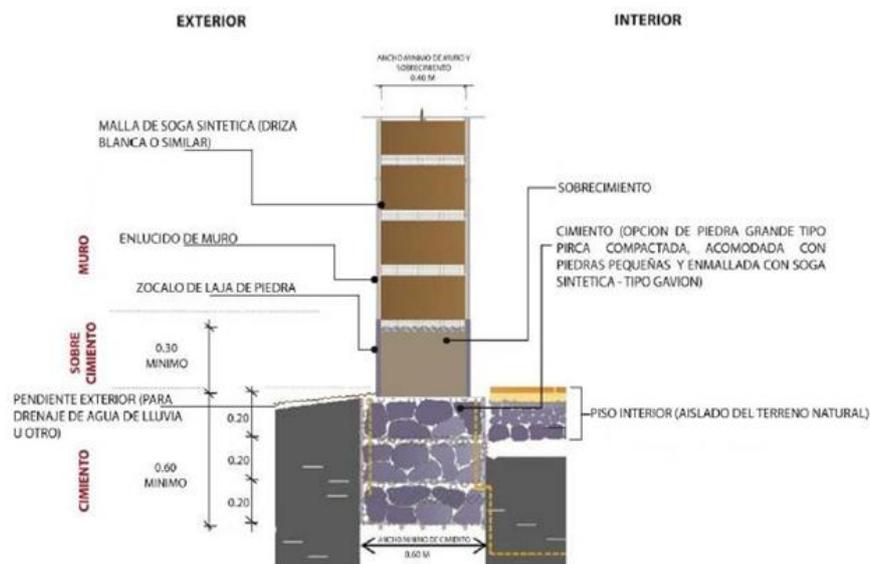
Cimiento de Concreto ciclópeo: Piedras grandes con concreto simple.
 Cimiento de Albañilería de Piedra: con mortero de cemento o cal y arena gruesa.
 Las dimensiones mínimas de ancho y profundidad de los cimientos deben ser de 60 cm.

Sobrecimientos.

Los sobrecimientos suelen ser de dos tipos:

Sobre cimiento de Concreto Ciclópeo: Piedras grandes con concreto simple.
 Sobre cimiento de Albañilería de Piedra: con mortero de cemento o cal y arena gruesa.

El ancho mínimo de los sobrecimientos es de 40 cm. y la altura mínima sobre terreno debe ser de 30 cm. para proteger a los tapiales de la erosión. Además la norma E-080 recomienda el uso de lajas de piedra en las partes laterales del sobrecimiento.



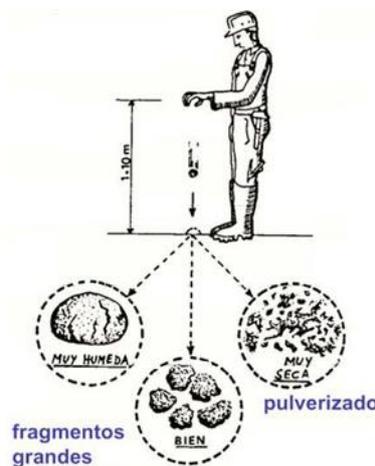
Detalle de la cimentación con sus partes. (Fuente: Norma E-080, MVCS 2013)

Preparación del suelo para construir los muros

Una vez seleccionado el suelo, la primera acción deberá ser someterlo a un proceso de tamizado, a fin de retirar piedras mayores a 3/8 pulgadas, así como otros materiales que impidan su adecuada compactación. Al suelo tamizado, se lo coloca en pozas o en rumas y se procede a mojarlo, suministrándole paja y agua en cantidad suficiente para que quede húmedo (8 a 10 %); en estas condiciones debe permanecer durante 48 horas hasta que toda la masa del suelo esté totalmente hidratada, de modo que la arcilla contenida en el suelo desarrolle su capacidad adhesiva. La importancia de la paja es atenuar la fisuración de la tapia por contracción de secado. A este proceso de hidratación los usuarios suelen llamarlo “dormido”, “podrido” o “macerado” del suelo.



En la literatura revisada se encuentra cierta coincidencia en que el porcentaje de humedad más adecuado para preparar los tapias es cercano al 10%, cifra que puede variar dependiendo del tipo de suelo. Si el suelo está muy seco su capacidad adhesiva será muy pobre; si está muy húmedo el proceso de compactación se dificultará. La prueba de campo para controlar la humedad consiste en formar una bola de suelo húmedo y soltarlo desde una altura de 1m sobre una superficie dura. Si se pulveriza entonces se encuentra muy seca, por el contrario si solo se raja se encuentra muy húmeda. Cuando la pelota se quiebre y se separe en fragmentos grandes la cantidad de agua en la mezcla será la adecuada. Un suelo con mucha humedad tendrá mayores fisuras por contracción de secado.



Prueba para controlar la humedad. Fuente: Ing. San Bartolomé.

Uso de Paja.

El uso de paja para la construcción de tapiales suele ser opcional, dependiendo de las costumbres constructivas de cada localidad. El beneficio de su utilización consiste en la reducción de las contracciones y mejoras en la adherencia de los tapiales.

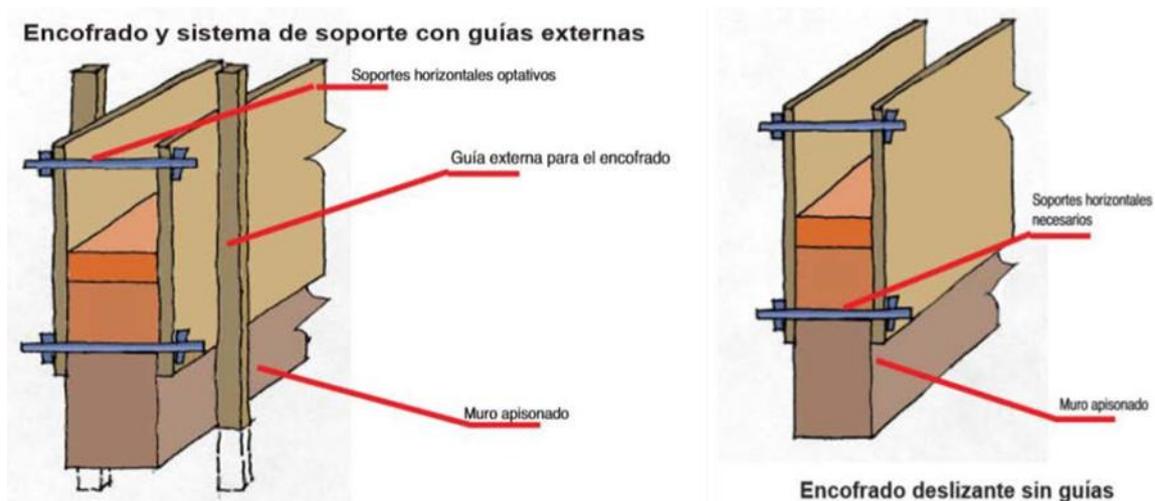
La dosificación adecuada de paja en volumen suele ser de 1 de paja por cada 5 de suelo. La paja se cortará en pequeños filamentos de 50 a 100 mm de longitud.

La paja que se usa comúnmente proviene de arroz, trigo, ichu, gras común, bagazo de caña, grama, guano, crines y similares.

Encofrados

Lo que caracteriza la construcción de tapiales es el empleo de moldes o encofrados, dentro de los cuales se vierte el suelo ya preparado para ser compactado. Durante el proceso de construcción deberá conservarse la verticalidad de los muros, a pesar de la existencia vibraciones, y mantener constantes las dimensiones de ancho del muro, a pesar de las presiones laterales que ejerce el material apisonado, por lo que es necesario que los encofrados sean preparados para que resistan dichos empujes y vibraciones. De otro lado, concluida la compactación de un tramo de muro, será necesario retirar y desplazar el encofrado a su nueva ubicación evitando que sea necesario invertir mucho tiempo en su aplomado.

Existen, entre otros, 2 procedimientos constructivos muy difundidos¹⁷, uno se basa en “guías” que permiten elevar el encofrado con facilidad y el otro es el caso de los encofrados “deslizantes” que se basa en construir sectores del muro que sirven de guía en la construcción de los demás muros (Célia Neves M. o., 2003). En el Perú es más común observar encofrados deslizantes ya que los pobladores no cuentan con muchos recursos para conseguir madera.



¹⁷ Gráficos de la Arq. Graciela M. Viñuales.

En el Perú los moldes tradicionalmente utilizados son de madera, poseen dimensiones no uniformes, varían según las localidades donde son utilizados. Emplean troncos de madera y sogas para la sujeción de la madera usada en el encofrado. El desgaste de las sogas produce peligro en el moldeo y no uniformidad en los dimensiones de los tapiales.



En la fotografía que sigue tomada por la Asociación de Productores de Agropecuarios Ecológicos del Distrito de Musga- Mariscal- Ancash (Ver Link 3), puede apreciarse el moldeo y encofrado de tapial generalmente utilizado en Ancash.

Con fines de estudiar los procesos constructivos la PUCP ha preparado también encofrados para tapial que se muestran a continuación¹⁸. Encofrados laterales. Cara Lateral A: 1,00 m de largo y 40 cm de altura. Cara Lateral B: 28 cm de espesor y 40 cm de altura.



Caras laterales del encofrado y los pisones que se usarán para el moldeo.

¹⁸ Fotos Bach. Alan Julio Mendoza García

Los encofrados PUCP poseen un marco de metal que mantiene la rigidez de estos. Tienen apoyos para poder cargarlos y ubicarlos con facilidad. Además tienen agujeros cuyo diámetro permite colocar varillas de hierro que funcionan como puntales para sujetar el encofrado lateral ayudando a mantener su forma ante los impactos que el apisonamiento produce durante el moldeo.



Marco de metal y agujeros.



Puntales de hierro con tuerca.

Según la norma E-080, las dimensiones de los tapiales deberán tener un de largo máximo de 1,50 m., ancho mayor a 40 cm y altura máxima de 60 cm. El espesor mínimo de los encofrados debe ser de 20 mm.

En relación a la selección de las dimensiones de los encofrados para el tapial, es interesante citar los criterios expuestos en el texto de Albert Cuchi¹⁹: “El elemento más pesado que interviene en el proceso de ejecución de las tapias son los tapiales (encofrados). El control de su peso será decisivo por cuanto de su ligereza dependen los movimientos que debe efectuar a lo largo de la construcción del muro: desencofrado, avanzaren la hilada, girar en las esquinas, levantarse a la hilada superior y los propios de entestadas con otros muros.

Controlar el peso de los tapiales quiere decir limitar sus dimensiones: altura, longitud y grueso. Un tapial ligero, y por tanto de pequeñas dimensiones, facilitará a los tapiadores los movimientos que deben efectuar con él pero, a su vez, implicará poca superficie de muro ejecutado en cada tapia y, por ende, poco rendimiento de las operaciones de desplazamiento y fijación de los tapiales. Será preciso por tanto que las dimensiones de los tapiales sean las máximas posibles, pero sin superar un peso mucho mayor de 25 Kg, considerando éste como el peso que permite manipular el tapial a un solo operario, sujetándolo con un solo brazo y ejecutando movimientos sencillos aplicados en el centro de gravedad del encofrado.”

¹⁹ “La Técnica Tradicional del Tapial”, Albert Cuchi i Burgos, Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción, Madrid, 19-21 septiembre 1996, eds. A. de las Casas, S. Huerta, E. Rabasa, Madrid: I. Juan de Herrera, CEHOPU, 1996.

Moldeo del Tapial.

Siguiendo las recomendaciones de la norma E-080, se verterá el suelo “dormido” con el contenido de humedad adecuado, en capas de 15 cm cada una; se procederá a la compactación hasta llegar a los 10 cm aproximadamente. La compactación se realizará con un mazo de madera de unos 10 Kg aproximadamente. La cantidad golpes para el apisonado de cada capa quedará definido por la persona encargada de este trabajo, cuando sienta que se produce un rebote. La capa superior de cada tapial será nivelado con una paleta de madera.

Terminada la primera hilada, compuesta por un determinado número de capas que depende de la altura del encofrado, éste se retirará y se desplazará lateralmente para trabajar en el tapial contiguo. Para colocar una segunda hilada sobre la primera, se esperará un mínimo de 3 días para asegurarse que esta última esté seca. Además se realizará un picado (1 cm según la norma E-080) en la cara superior endurecida de la primera hilada, y se procederá a regarla con agua a razón de 1 litro/m², para favorecer la adherencia entre las hiladas y reducir el agrietamiento. La segunda hilada se colocará alternando la posición de la primera hilada, para evitar la continuidad de las juntas verticales.

Parte del proceso de compactación se muestra en las fotografías que siguen tomadas del trabajo publicado por el Ing. Ángel San Bartolomé en su blog.



Herramientas de Compactación

Para compactar los muros de Tapial, se emplean diversos tipos de mazos. En los gráficos que siguen se muestran algunos empleados en el Ecuador que tienen dimensiones de 2 m de largo, 1 m de altura y 50 cm de espesor²⁰.



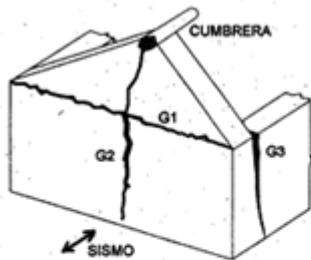
COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL TAPIAL

Los muros de tapial, en forma similar a los de adobe, disponen de una adecuada resistencia a la compresión, lo que les permite soportar cargas de gravedad sin problemas. Las dificultades se presentan cuando los muros deben soportar cargas horizontales de sismo. Cuando estas cargas actúan en el plano del muro, su resistencia depende principalmente de su capacidad de absorber esfuerzos de corte fricción. Cuando las sollicitaciones son perpendiculares al muro su resistencia depende de su capacidad de tracción por flexión que, definitivamente, es muy baja. Por lo tanto existe consenso en considerar que, para reducir la vulnerabilidad de las edificaciones de tierra, éstas deben llevar refuerzos que suplan sus limitaciones mecánicas.

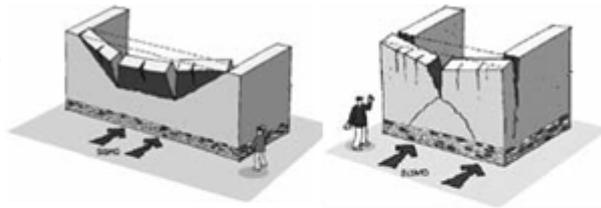
²⁰ Fotos, Minke 2001 e Ing. Ángel San Bartolomé.

De otro lado es importante destacar que, además de requerir de refuerzos las construcciones con tierra, deben de disponer de diseños adecuados que utilicen densidades de muros similares en sus direcciones ortogonales, para minimizar esfuerzos debidos a torsión, y cuyas esbelteces no produzcan pandeos; que utilicen vanos pequeños y alejados de las esquinas, para no debilitarlas.

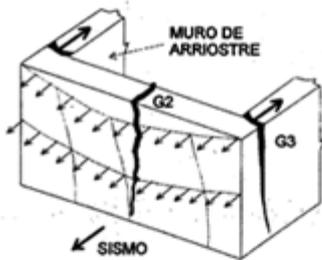
Esquemas de Fallas más Comunes.



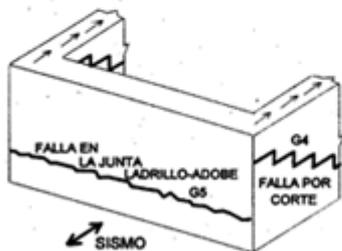
GRIETAS EN LOS MUROS POR ACCIONES SISMICAS PERPENDICULARES AL PLANO.



FUERZAS PARALELAS AL PLANO. FALLAS POR CORTANTE.



DEFORMACION DEL MURO POR CARGA SISMICA TRANSVERSAL.



OTRAS FALLAS EN LOS MUROS DE ADOBE.

Las fallas observadas en muros de tapial debido a la acción de sismos, guarda cierta similitud con las que se observa en los muros de adobe, sobre todo en las que se presentan en las esquinas y las de volcamiento. Sin embargo, las fisuras por esfuerzos cortantes, que suelen presentarse formando un ángulo de 45° con la horizontal, dada la relación dimensional entre la altura y la longitud de cada adobón, cercana al 1:2, suelen irse por las juntas de construcción, afectando la capacidad de corte-fricción del tapial, el que queda peligrosamente expuesto al volcamiento.

Como ilustración se acompaña una figura cuyos dibujos muestran esquemáticamente, las principales fallas que suelen presentarse en las edificaciones con tierra. Se han tomado los gráficos del Anexo 1 del estudio de CERESIS²¹ y del Estudio de Vulnerabilidad sísmica de varios académicos colombianos²².

Características Mecánicas del Tapial.

El peso específico del tapial compactado varía alrededor de 1900 kg/m³ siendo algo mayor que el del adobe. En la investigación realizada por el ININVI en convenio con el Laboratorio de Estructuras del Departamento de Ingeniería (LEDI) de la PUCP en 1989²³, se determinó en los ensayos un peso específico compactado de 1955 kg/m³, valor muy cercano al suministrado en el Estudio de Vulnerabilidad colombiano²⁴ ya citado, de 1930 kg/m³. De otro lado en un documento de la Universidad Nacional de Loja, Ecuador²⁵ se registraron cifras que varían entre 1800 y 2300 kg/m³.

Compresión Axial

En los ensayos realizados en Agosto del 2013 en el LEDI de la PUCP por encargo del SENCICO²⁶, se estableció que la resistencia promedio a compresión axial del tapial, obtenida al ensayar muretes (28x20x39 cm), es de 1155.60 kPa u 11.78 kg/cm², con una desviación estándar (D.E.) de 0,61 kg/cm² y con un coeficiente de variación del 5,19%.

Como comparación es interesante señalar que ensayos realizados en la Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, en muretes de tapial (50x25x50 cm) el valor promedio para el esfuerzo a compresión fue de 0,6 MPa o 6 kg/cm², con una D.E. de 1,4 kg/cm². Se acompaña también las Curvas Esfuerzo – Deformación, para muretes de adobe y de Tapial²⁷.

²¹ Informe de CERESIS de la Reunión Taller “Reforzamiento de Viviendas Existentes de Adobe en Zonas Sísmicas de la Región Andina”. Ing. Luis Zegarra, Ing. Ángel San Bartolomé, Ing. Daniel Quiun, de la PUCP, e Ing. Alberto Giesecke de CERESIS, Junio de 1998.

²² Estudios de Vulnerabilidad Sísmica, Rehabilitación y Refuerzo de casa en Adobe y Tapia Pisada”, Luis Eduardo Yamín, Camilo Phillips, Juan Carlos Reyes, Daniel Ruiz. Revista Apuntes vol. 20, 2007, páginas 386- 303.

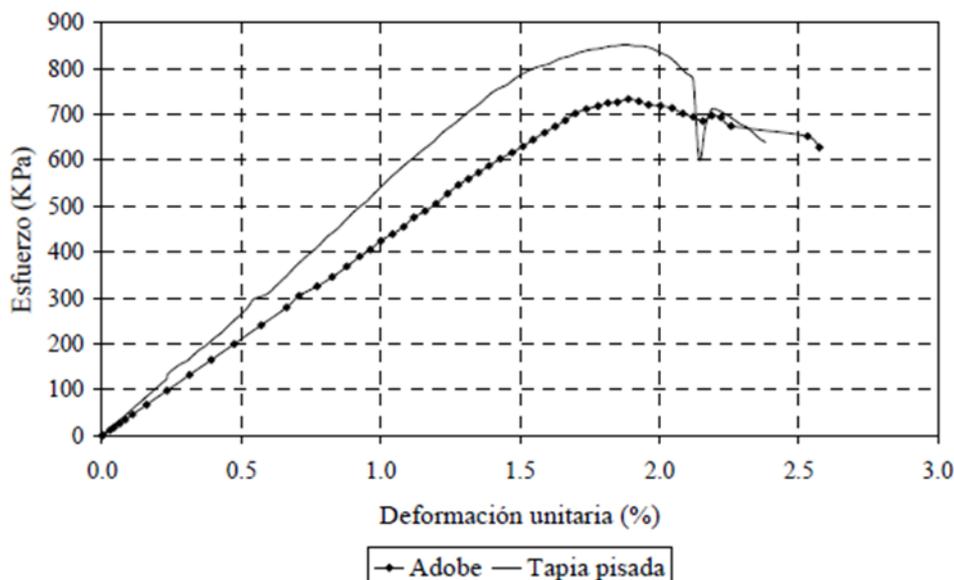
²³ “Construcción con Tapial”, editado por ININVI, 1989. Elaborado por el Ing. Ángel San Bartolomé.

²⁴ “Estudios de Vulnerabilidad Sísmica, Rehabilitación y Refuerzo de casa en Adobe y Tapia Pisada”, ya citado.

²⁵ Tesis “Vivienda de Interés Social de dos Plantas en base a Tapial como una alternativa para el Barrio “Mirador” Situada en la parroquia de Malacatos, Ciudad de Loja: Materiales y Estructuras”, Ing. Byron Roberto Febres Torres, Universidad Nacional de Loja, Ecuador, ya citada.

²⁶ Ensayos en Tapial Mejorado, Informe LE 068.13 del LEDI de la PUCP, elaborado por el Ing. Wilson Silva B.

²⁷ Alternativas de rehabilitación de adobe y tapia pisada. K. Diaz & J. Ríos. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia.



De otro lado el mencionado trabajo ecuatoriano suministra una cifra de 15 kg/cm³ para el esfuerzo a compresión axial. Como se aprecia los resultados obtenidos de diversas fuentes son muy dispares, debido a causas múltiples que es difícil dilucidar, pero que muestran la necesidad de realizar un mayor número de ensayos que conduzcan a disponer de cifras más confiables.

Esfuerzos Cortantes

En el mismo proyecto encargado por SENCICO se determinó que el esfuerzo cortante promedio del tapial es de 0,165 Mpa o 1,685 kg/cm², con una D.E. de 0,24 kg/cm² y con un coeficiente de variación de 14,19%.

Los esfuerzos de Corte-fricción fueron determinados para el Tapial en el estudio "Construcción con Tapial" ya citado, se estableció, mediante ensayos estáticos, estableciéndose las siguientes relaciones:

$$\begin{aligned} \text{Para muros tradicionales: } v &= 0,07 + 0,35 \sigma \text{ en kg/cm}^2 \\ \text{Para muros mejorados: } v &= 0,12 + 0,35 \sigma \text{ en kg/cm}^2 \end{aligned}$$

En las cuales σ es el esfuerzo a compresión por el peso propio (confinamiento). Es interesante señalar que los valores que se encontraron con las expresiones anteriores fueron corroborados con los ensayos dinámicos. También es importante señalar que la mejora de los muros consistió en rayar y limpiar las juntas horizontales y humedecerlas (1 litro de agua por m²) antes de construir la tapia inmediata superior.

Valores de la NTE E-080 en vías de Aprobación.

El Comité de la NTE E.080, propuso para la tierra como material de construcción, sea de adobe o tapial, los siguientes valores:

ESFUERZOS DE ROTURA MÍNIMOS	MPA	KGF/CM2
Resistencia Última del Material Tierra a Compresión.(En	1,0	10,2
Resistencia Última del Material Tierra a la Tracción.	0,08	0,81
Resistencia Última del Mortero a la Tracción.	0,012	0,12
Resistencia Última del Murete de Tierra a la Compresión.	0,6	6,12
Resistencia Última del Murete a Tracción Indirecta.	0,025	0,25
Resistencia última de Muros a Tracción por Flexión.	0,14	1,42
Módulo de Elasticidad de los Muros de Tierra	200	2040

Conjuntamente con los valores mostrados, se indica el procedimiento de ensayo que se ha seguido, el mismo que deberá ser utilizado en sucesivos ensayos para que éstos sean comparables.

Esfuerzos Admisibles.

De acuerdo a la Norma los esfuerzos admisibles se deben calcular tomando un coeficiente de seguridad de 2,5 por variación de calidad en material, calidad de ejecución y evaluación de las cargas. En caso de no realizar los ensayos de laboratorio se considerará un coeficiente de seguridad de 3.

Consideraciones para el Diseño Estructural

Las edificaciones de tapial deben ser analizadas estructuralmente para verificar que soporten adecuadamente las cargas de gravedad y las cargas laterales producidas por sismos y vientos.

Tal como se ha visto, los muros de tapial, en forma similar a los de adobe, tienen muy poca capacidad de deformación y su capacidad para soportar tracciones es muy pequeña. Esta condición lleva a la conclusión que lo más razonable es la utilización de métodos elásticos para analizar y diseñar estructuras de tapial. Además muestra la conveniencia de diseñar los muros de tapial con dimensiones tales - de espesor y altura - que soporten únicamente esfuerzos de compresión.

Es también un importante criterio estructural utilizar elementos de refuerzo, los cuales deben ser diseñados para absorber los esfuerzos de tracción que pudieran generarse por un sismo real que supere en magnitud al sismo reglamentario de diseño.

Usualmente los techos empleados en las edificaciones de tapial no funcionan como diafragmas rígidos, por lo tanto, para asignar las cargas de diseño para los muros y otros elementos estructurales, es conveniente utilizar los procedimientos de cargas tributarias.

Es importante considerar en el diseño de edificaciones con tapial el uso de contrafuertes o mochetas como elementos de arriostre y confinamiento de los muros. La estabilidad de los contrafuertes debe ser verificada a volteo y corte.

Los tramos de muro comprendido entre contrafuertes serán analizados a compresión tomando en cuenta su esbeltez. También serán analizados a flexión y corte, para lo cual pueden asimilarse a la teoría de placas, tomando en consideración las condiciones de borde.

Un elemento estructural que siempre debe estar presente es la viga collar, generalmente de madera, que se debe diseñar para absorber fuerzas sísmicas y, a la vez, distribuir uniformemente las cargas del techo o entrepisos.

Es importante orientar el diseño estructural basándose en las NTE vigentes, empleando los valores que éstas suministran para las características mecánicas de los materiales, que suelen estar del lado de la seguridad. También las normas señalan los procedimientos que deben seguir los ensayos de materiales cuando se requiera usar valores distintos a los normados.

Los refuerzos estructurales para las edificaciones con tapial son similares a los empleados para el adobe. Pueden ser empleadas las mallas electro soldadas de acero, mallas de plástico o geomallas, refuerzos con elementos de madera u otros.

CONCLUSIONES

Son pocas las investigaciones nacionales realizadas sobre el tema del tapial, también las tesis producidas sobre el tema son escasas. En consecuencia los datos disponibles sobre las características físico – mecánicas relativas al tapial son estadísticamente insuficientes.

Los datos físico – mecánicos que se puede encontrar en la literatura de otros países difiere de la peruana en aspectos importantes por lo que su aplicación directa no es recomendable.

En el Perú, por parte del ININVI y de la PUCP, se planteó el empleo de refuerzos internos en los muros de tapial utilizando eucalipto y caña, como una primera modalidad. Luego se emplearon refuerzos exteriores de eucalipto. En ambos casos se obtuvo mejoras en el comportamiento estructural de los muros de tapial, pero sus resultados, aunque satisfactorios, requieren de nuevos ensayos para mejorar los procedimientos constructivos y conseguir confiabilidad estadística.

La experiencia colombiana en la utilización de refuerzos exteriores de madera ha mostrado también resultados satisfactorios. Esa experiencia sumada a la realizada en nuestro país, podría dar lugar al desarrollo de una modalidad de refuerzo externo de muros de tapial utilizando un material localmente disponible.

El reforzamiento externo de muros de adobe utilizando, tanto mallas de acero electro-soldadas como geomallas, ha producido resultados satisfactorios que han sido ya incorporados a la NTE E.080. Esta modalidad de refuerzo que se encuentra bastante bien documentada, aparece también como una posibilidad de refuerzo para los muros de tapial que podría ser estudiada con

detenimiento, tomando en cuenta que el comportamiento estructural de los muros de tapial guarda muchas similitudes con las de adobe.

En materia de encofrados, se aprecia similitudes y diferencias en la forma en que éstos son empleados en las diversas localidades del país. Podría ser de mucha utilidad estudiar un tipo de encofrado que, manteniendo los usos tradicionales, introduzca mejoras que faciliten el proceso constructivo, reduzca los riesgos de su empleo e introduzca criterios de modulación.

De acuerdo a las fuentes consultadas, agregar un porcentaje adecuado de cal puede mejorar el comportamiento estructural de los muros de tapial y reducir su fisuración sin alterar su porosidad y condiciones higrotérmicas. Como la cal es un material que puede encontrarse en muchos lugares de nuestro país, su empleo adecuado podría ser de utilidad para mejorar las técnicas locales de tapial, razón por la cual puede ser considerado como un tema de investigación.

RECOMENDACIONES

Tomando en consideración las condiciones de riesgo sísmico existentes en nuestro país, conviene priorizar el desarrollo de investigaciones que permitan conocer con mayor precisión las características físico – mecánicas del tapial, y simultáneamente formular sistemas de refuerzo para los muros elaborados con tapial. Se considera que debería priorizarse el estudio de sistemas externos de reforzamiento, en razón a su facilidad constructiva y a que posibilitarían mejorar las condiciones estructurales de las viviendas existentes en tapial.

Entre las posibilidades de refuerzos externos está el empleo de mallas plásticas o geomallas, en forma similar a la aplicada para muros de adobe. Comprender el funcionamiento estructural de las mallas externas de refuerzo, posibilitará encontrar productos alternativos para generar mallas con materiales alternativos de menor costo.

Otra posibilidad de mucho interés para generar refuerzos externos es el empleo de madera. Ello implicaría continuar y profundizar los primeros esfuerzos desarrollados por el SENCICO en esa dirección a través de su proyecto “Ensayos en Tapial Mejorado” que llevó a cabo en colaboración con la PUCP el año 2013.

Sería también muy importante tratar de desarrollar un sistema de encofrados que recoja las experiencias locales y mejores las prácticas constructivas de los usuarios, introduciendo criterios de modulación y de seguridad.

Finalmente sería de mucha utilidad difundir entre los usuarios los hallazgos de las investigaciones y los conocimientos adquiridos, para mejorar las prácticas constructivas y retroalimentar las investigaciones.

BIBLIOGRAFÍA²⁸

1. Célia M.Martins Neves, M. o. (2003). Arquitecturas de Tierra en Iberoamérica. Salvador, Brasil: Proterra. :
Resumen: Es una recopilación de la tecnología de la construcción en tierra y la categorización de las técnicas constructivas. De este libro se obtuvo información para los procesos constructivos del tapial.
2. Célia Neves, O. B. (2011). Técnicas de construcción con tierra. PROTERRA.
Resumen: Es un compendio de las investigaciones, enseñanza y talleres impartidos por la Red Iberoamericana PROTERRA sobre las construcciones con tierra. Se obtuvo referencias para los antecedentes del tapial.
3. F.M.Monzón, A. V. (1984). Seguir construyendo con tierra. Lima: CRATERRE. :
Resumen: Se trata de un libro que ve la parte económica de la población y su cultura en relación con las construcciones de adobe y tapial. Se obtuvieron los datos históricos del uso del tapial en el Perú.
4. INEI. (23 de Junio de 2015). Población y vivienda: Viviendas, según material predominante en las paredes exteriores y área de residencia. Obtenido de <http://www.inei.gov.pe/estadisticas/indice-tematico/poblacion-y-vivienda/>
Resumen: El INEI es el instituto nacional de estadística e informática, donde se obtuvieron los datos estadísticos de las viviendas que utilizan como material de construcción el adobe y el tapial en sus muros.
5. Martín, J. S. (1995). Planeamiento de un módulo de tapial reforzado. Lima: PUCP.
Resumen: Estudia las características generales de la construcción del tapial y la realización de ensayos para el reforzamiento con cañas de eucalipto en el interior de los muros. Se utiliza como referencia para conocer los ensayos realizados para este tipo de refuerzos.
6. Ministerio de Vivienda, C. y. (Noviembre de 2013). Proyecto de actualización de la norma E.080 ADOBE. Obtenido de <http://www.vivienda.gov.pe/dnc/proyecto-actualizacion-norma-e080-adobe.pdf>
Resumen: Posee las normas para la construcción de adobe o construcciones a base de tierra. Se tomaron algunos datos para la construcción de cimientos y sobrecimientos.

²⁸ Tomado de "Bases preliminares para el diseño de viviendas de tapial con un refuerzo de geomallas", documento de pre tesis de Christian Tantaleán, estudiante de laPUCP, ya citada.

7. Ottazzi Pasino, G. A. (1995). Recomendaciones para la elaboración de normas técnicas de edificaciones de adobe, tapial, ladrillos y bloques de suelo-cemento. La Paz: Red HABITERRA- CYTED.
Resumen: cuenta con información sobre las normas técnicas del adobe y tapial. Se tomará como referencia para la creación del diseño de una vivienda de tapial.
8. P.Doat, A. H. (1979). Construire en terre. France: EDITIONS ALTERNATIVE ET PARALLELES / ANARCHITECTURE.
Resumen: Es una investigación extensa hecha en Francia sobre el proceso constructivo para tapias en particular lo referido al suelo, las herramientas, formas de compactar, etc. Se utilizaron muchos datos para la parte del proceso constructivo y el suelo.
9. Rauch, A. v. (2011). Paredes de tapial y su industrialización (encofrados y sistemas de compactación). Informes de la Construcción, vol.63,523,35-40.
Resumen: Este artículo indica que el tapial como parte de la industrialización permite una racionalización de los costes de la mano de obra y tiempos de ejecución. Se utilizó esta información para enfatizar la necesidad de valorar esta técnica de construcción artesanal.
10. Rey, M. W. (2011). Consideraciones bioclimáticas en el diseño arquitectónico: el caso peruano. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú.
Resumen: Elabora una matriz de recomendaciones para el diseño arquitectónico en función de los diferentes climas que tiene el Perú. Se obtuvo las características de los climas donde hay presencia de tapial
11. Silva, W. (2013). Ensayos en Tapial Mejorado. Lima: Laboratorio de Estructuras Antisísmicas.

Resumen: Se realizan ensayos de un módulo de tapial reforzado con cañas de eucalipto en los exteriores de los muros. También se muestran los resultados de ensayos físicos del material y ensayos a compresión axial en pilas y de compresión diagonal en muretes cuadrados.
12. Tejada, U. (Agosto de 2001). Buena Tierra. Apuntes para el diseño y construcción con adobe. Lima, Perú.
Resumen: Posee bastante información en cuanto a la construcción, diseño y refuerzo en adobe. Se utilizará para la parte del diseño de viviendas de tapial.
13. Torrealva, D. (2009). Diseño sísmico de muros de adobe reforzados con geomallas. Lima: CARTOLAN E.I.R.L.
Resumen: En este informe se plantea como refuerzo del adobe las geomallas, en la cual describen los ensayos estáticos y dinámicos con el uso de este refuerzo y se realiza un diseño sismorresistente con la aplicación de un programa de computación. Se utilizará como guía para los ensayos que se deban de realizar para el conjunto tapial-geomalla.

14. Velarde, D. (2014). Manual de la técnica constructiva validada. Lima: FINCyT.
Resumen: Es un proyecto financiado por FINCyT que tiene como objetivo la mejora de la Hacienda Santa María de Tarma, mediante la técnica de tapial mejorado. Se obtienen varios datos para el proceso constructivo.
15. Vivienda., I. N. (Diciembre de 1989). Construcción con tapial / Instituto Nacional de Investigación y Normalización de la Vivienda. Lima, Perú: ININVI.
Resumen: se describe la técnica de construcción tradicional del tapial en los departamentos de Junín y Ancash, los ensayos estáticos realizados en muretes y muros, se investiga el efecto de diversas variables sobre la resistencia al corte del tapial y se analiza el comportamiento ante un sismo para 2 módulos de vivienda y 6 muros con diversos tipos de refuerzo.

Bibliografía y Links de internet²⁹.

16. Ministerio de Vivienda (). Norma E-080: Diseño y Construcción con Tierra.
17. Ángel San Bartolomé, Daniel Quiun y Wilson Silva (). Diseño y Construcción de Estructuras Sismorresistentes de Albañilería.
18. Julio Vargas (1983). Memorias: Seminario Latinoamericano de Construcciones de Tierra en Áreas Sísmicas. Pontificia Universidad Católica del Perú.
19. Instituto Nacional de Estadística e investigación (INEI). Censo 2007.
20. Patricio Cevallos Salas (20 mayo 2006). La construcción con Tierra en el Ecuador. Quito, Ecuador.
21. Daniel Torrealva (Junio 2013). Caracterización de daños en Construcciones de Adobe. Pontificia Universidad Católica del Perú.
22. ININVI (1989). Construcción con Tapial. Lima, Perú.
23. Francisco Javier Castilla (2003). La técnica del tapial en la Construcción tradicional de la Provincia de Albacete. Patrimonio Etnológico de Castilla-La Mancha, España.
24. Albert Cuchi (1996). La técnica tradicional del tapial. Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción. Madrid, España.
25. Félix José Sandoval y otros (2010). Proceso de Reconstrucción de los Muros de Tapial de la Iglesia de San Nicolás de Bari en Sinovas. Burgos, España.

²⁹ Tomados del trabajo ya citado: "Recopilación y Sistematización de Información Referida al Uso del Tapial en la Construcción" del Bach. Alan Mendoza, que forma parte de la presente investigación.

26. La Revue Durable (Février 2006). Des technologies appropriées pour la construction, l'eau et la santé. France.
27. Ministerio de Vivienda. Norma E-080: Diseño y Construcción con Tierra.
28. José Darío Ferreyros Villacorta. "Comparación de la resistencia de la mampostería de tapial con adobe", 1986.
29. ININVI: Construcción con Tapial. "Ensayos estáticos y dinámicos en construcción con Tapial", 1989.
30. Célia M Martins Neves. "Selección de suelo y métodos de control en la construcción con tierra – Prácticas de Campo". PROTERRA, 2009.
31. William Castillo. "El reforzamiento estructural de edificaciones de Tapia: Un caso en los Andes Venezolanos". Memorias del seminario Latinoamericano de construcciones de tierra en áreas sísmicas. Lima, 1983.
32. Silvana Del Rocio Jaguaco. "Uso del adobe como material de construcción". Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador. 2007.
33. Hartkopf Volker. "Indigenous buildings techniques of Peru and their potential for improvement to better with stand earthquakes". Under contract to the Agency for International Development. Washington 1981.
34. A. Vildoso y F. M. Monzón. "Seguir construyendo con Tierra". Lima, 1984.

Documentos:

- a) Sistema Constructivo Tapial.
<https://www.haikudeck.com/sistema-constructivo-education-presentation-Rn1XP4j9Na#slide-3>
- b) Blog de ingeniero Ángel San Bartolomé. :
<http://blog.pucp.edu.pe/blog/adobetapial/>
- c) PAED MUSGA (2009). Ancash, Perú.
<http://es.slideshare.net/ElsaBenavente/fotos-paed-musga>
- d) Patricio D. Salas (2012). La construcción en Tapial, el caso ecuatoriano.
<http://arquitecturasdeterra.blogspot.com/2012/09/la-construccion-en-tapial-el-caso.html>
- e) Ministerio de Cultura, sitio web: <http://www.cultura.gob.pe/es>
- f) Revista Antigua y Medieval, sitio web:
<http://antiguaymedieval.blogspot.com/2010/07/intervienen-murallas-afectadas-por.html>

g) Sitios Arqueológicos por Lizardo Tavera Vega, sitio web:

<http://www.arqueologiadelperu.com.ar/lacentinela.htm>

h) Albañilería de Tierra Cruda: Adobe y Tapial. San Bartolomé, sitio web:

<http://textos.pucp.edu.pe/texto/C18-Adobe-Curso-Albanileria-Estructural>

Videos:

<https://www.youtube.com/watch?v=fvN4Th-YKNc>

https://www.youtube.com/watch?v=YQYVb_O6OGc

<https://www.youtube.com/watch?v=oLoGqe8CfNk>

https://www.youtube.com/watch?v=kk_KDhOrKhU

<https://www.youtube.com/watch?v=Voy5wSyTgCc>

<https://www.youtube.com/watch?v=OGBDSIILIMI>

<https://www.youtube.com/watch?v=okRewKaNH2E>

Fotos de Carátula :

Casa cajamarquina, Wikipedia

Casa en Lamas, "TIPOLOGÍAS CONSTRUCTIVAS TRADICIONALES EN LAMAS TAPIAL Y QUINCHA",
Grupo Tierra, PUCP. Arq. Teresa Montoya

**RECOPILACIÓN Y SISTEMATIZACIÓN DE INFORMACIÓN
REFERIDA AL USO DE TAPIAL EN LA CONSTRUCCIÓN**

Urbano Tejada Schmidt
Alan Mendoza García

CONTENIDO

Página

RECOPIACIÓN Y SISTEMATIZACIÓN DE INFORMACIÓN REFERIDA AL USO DEL TAPIAL EN LA CONSTRUCCIÓN	
Antecedentes Históricos	
Ecuador	
Perú	
La Centinela (Chincha)	
Datos Estadísticos	
Materiales	
Partes de la Estructura	
Cimiento	
Sobrecimiento	
Muros	
Techos	
Ensayos en Campo	
Prueba de la Bolita	
Prueba de Sedimentación	
Prueba de Rodillo	
Humedad adecuada en el Suelo	
Procedimiento Constructivo	
Tratamiento del Suelo	
Encofrados	
Moldeo y compactación	
Procedimiento Constructivo recomendado por Vildoso	
Tipos de Tapiales en diferentes lugares	
Tapiales en Ancash	
Tapiales en España	
Tapiales ecuatorianos	
Características del Suelo	
Límites de Atterberg	
Humedad	
Ensayo de Laboratorio	
Bibliografía	
ANEXOS	
Anexo 1: Construcción con tapial mejora la resistencia del corte	
Conclusiones	
Experiencia con muretes	
Proceso constructivo	
Ensayo con diagonal	
Resultados	
Experiencia con muros	
Muros	
Resultado con muros	
Anexo 2: Comparación de la resistencia de la mampostería de tapial con adobe	
Procedimiento constructivo	
Clasificación de Suelo PUC	

Instrumentos
Procedimiento constructivo
Variables consideradas
Programa experimental
Resultado de ensayos
Conclusiones
Comparación entre tapial y adobe

RECOPIACIÓN Y SISTEMATIZACIÓN DE INFORMACIÓN REFERIDA AL USO DEL TAPIAL EN LA CONSTRUCCIÓN

Antecedentes Históricos

El tapial o también llamado “adobón” es el bloque de tierra compactada en diferentes capas con un encofrado de dimensiones dadas de acuerdo a la tradición de cada lugar. En España el tapial es el encofrado, mientras que la tapia viene a ser el bloque construido. La diferencia principal con el adobe es que el tapial no es una construcción de tipo “mampostería”, sino que se construye en el mismo lugar donde permanecerá la pared o muro de la vivienda.

El uso del Tapial se remonta a muchos años atrás; alrededor de 5000 años a.C. en Siria donde se encontró cimientos de tierra. En general el uso de la tierra compactada es a nivel mundial muy usado hasta nuestros días.

En España se encuentran construcciones como torres y Atalayas. Murallas e iglesias que también fueron construidos con tapial. También en el norte de África se encuentran las llamadas fortalezas “kashbah” que resaltan por su gran belleza.

En América el uso del tapial se remonta a tiempos prehispánicos. Por ejemplo, en México se observan yacimientos arqueológicos y la cultura de Casa Grandes en Chihuahua muestra al mundo el uso de adobe y tapial desde entonces.

A continuación se muestra una distribución de construcciones con tierra cruda a nivel mundial; donde se observa que toda la parte oeste de América tiene presencia de este tipo de material.

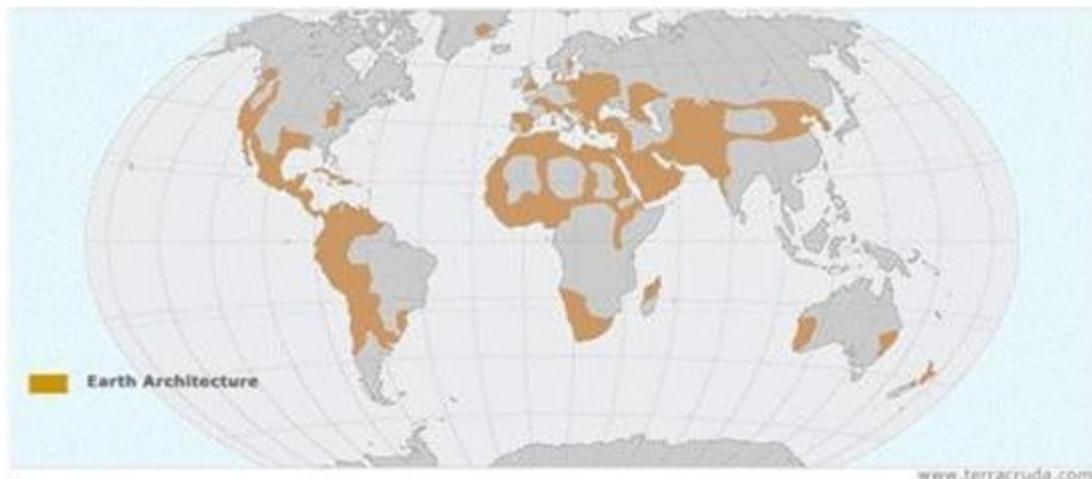


Figura 1. Construcciones con tierra cruda en todo el mundo.
Fuente: Terra cruda

También debemos de tener en cuenta que el tapial como material de construcción aún necesita un refuerzo en su construcción si se ubica en

lugares cercanos a las zonas de sismicidad. En el gráfico siguiente se muestra estas zonas.



Figura 2. Zonas de mayor sismicidad.

Ecuador

Hasta fines de los años sesenta las construcciones estaban basadas en un sistema estructural de muros portantes de materiales como el adobe, tapial y albañilería. En los años setenta se trató de modernizar las edificaciones con el uso de concreto armado. Sin embargo, el elevado coste del concreto armado, para las familias comunes, hace inadecuado su uso en todas las zonas del Ecuador, específicamente en las zonas rurales.

En los años de 1987 y 1996 se presentan sismos con resultados desastrosos para las viviendas en base a tierra cruda construidas en los últimos años. Las viviendas de tierra cruda antiguas se mantienen en pie en su mayoría. Esto se debe a que se intentó replicar los procesos constructivos de años anteriores pero no se tomaron en consideración unas adecuadas cimentaciones, soleras y otros por un tema económico.

Lo expuesto hace reflexionar de la adecuada capacitación de personal técnico e ingenieros en el tema de tierra cruda, ya que, muchas veces nos encontramos referidos a la construcción con acero y concreto. Como menciona Cevallos⁶ (2006) "El material utilizado en la construcción no es sinónimo de seguridad". La difusión de congresos, capacitaciones, cursos, etc. es adecuado para mejorar las pautas a seguir en la construcción con tierra cruda.



Figura 3. Viviendas construidas con tierra cruda no colapsaron.

Perú

En el Perú se tiene un fácil acceso a la materia prima. Su uso se hace adecuado por la poca accesibilidad económica de los pobladores de las viviendas rurales. Además es relevante su uso porque posee un coeficiente térmico elevado, lo cual ayuda mucho a retener el calor dentro de la vivienda, dejando así al material noble como segundo plano. Los muros de tapial, por ello, se dan predominantemente en la Sierra y parte de Selva.

Según la norma E-030. El Perú se encuentra dividido en tres zonas de acuerdo a la intensidad con que llega el sismo a cada lugar. Se muestra el gráfico de la norma y además en esta norma peruana de edificaciones ¹⁴ se podrá revisar el listado de departamentos dentro de cada zona.



Figura 4. Distribución de zonas sísmicas en el Perú
Fuente: Norma E-030

En la ciudad de Lima, también se encuentran construcciones de tapial o también llamado “adobón” por algunos. Se muestran las siguientes construcciones declaradas “Patrimonio Cultural de la Nación” por el Ministerio de Cultura: ²⁶

Zona Arqueológica Huaca Pro (Los Olivos)

Ubicada en la parte derecha del río Chillón, perteneció al Intermedio Tardío (1000- 1450 d.C.)

Zona Arqueológica Monumental de Huaycán de Pariachi (Ate) Ubicada en el valle del río Rímac, perteneció a los Yschma (Intermedio Tardío 1000- 1450 d.C.) y a los Incas (Horizonte Tardío 1450- 1532 d.C.)

La Fortaleza de Campoy (San Juan de Lurigancho) Ubicada en los valles de los ríos Rímac y Lurín, perteneció al Intermedio Tardío (1000-1470 d.C.). Fue una sede de administración del curacazgo de Lurigancho. La fortaleza consistía en estos muros de tapial de grandes dimensiones, además es el único caso de pocos donde se aprecia el uso de dos muros grandes como base para colocar otro de dimensiones menores encima de estos.

Zona Arqueológica de Mangamarca (San Juan de Lurigancho) Perteneciente al Intermedio Tardío (300 d.C.), fue la capital del curacazgo Lurigancho.

Zona Arqueológica de Carapongo B. (Lurigancho-Chosica) Más de mil años de antigüedad de esta obra hecha fue hecha con muros de Tapial.

Fuera de Lima también se encuentran construcciones denominados patrimonios culturales. Se indica a continuación algunos de estos, donde se aprecia sus muros de tapial.

La ciudad de Chan Chan (Trujillo) Se remonta su desarrollo a los siglos IX y XV d.C. Situada entre los ríos Tumbes y Chillón. Se muestra murallas y estructuras con formas piramidales hechas de adobe y tapial.



Figura 5. Reparación de las murallas de tapial de Chan Chan. (Llegan a tener 10 metros de alto)

La Centinela (Chincha)

La huaca de la Centinela en Chincha se estableció en los años 900 – 1450 d.C. Presencia de muros de tapial grandes y gruesos. Saqueada por Hernando Pizarro en el siglo XVI en busca de riquezas; destruyó gran parte de estas edificaciones por las perforaciones y fosas que hicieron.



Figura 6. Muros de tapial de La Centinela donde se aprecia el deterioro de estos.

Datos Estadísticos

Se tienen valores de Censos de vivienda de años anteriores, lo cual se muestra en el estudio elaborado por el ingeniero San Bartolomé 29. Se toman para este censo las viviendas de tierra cruda de adobe y tapial respecto del total de viviendas en el Perú.

Tabla 1. Porcentaje de viviendas construidas con tierra cruda

1961	1972	1981	1993	2005	2007
54%	49%	48%	43%	37%	35%

Nota: Si bien los valores de porcentajes se mantienen respecto del total, hay que tener presente que la cantidad de viviendas ha ido aumentando. Con lo cual, existe aún un incremento del número de viviendas de tierra cruda.

Se tiene además referencia de la tesis elaborada por José Darío Ferreyros Villacorta³⁰ en el año 86, donde se puede apreciar el censo de 1961 - 1972 - 1982, concluyendo lo siguiente:

El 50% de las viviendas de todo el territorio peruano son de tapial y adobe (tierra cruda)

Se observa que en la zona urbana el 45% son de tierra cruda.

Sin embargo, en las zonas rurales se aprecia que el 60% son de adobe y tapial.

Un efecto muy importante que considerar es que en esos años se produjo el auge del ladrillo como material de construcción. El uso del ladrillo fue incrementándose solo en las zonas urbanas, sin embargo se tuvo un pequeño 2% de viviendas en la zona rural.

En el año 2007 el INEI realizó un Censo a nivel Nacional acerca de varios temas de ámbito social. Uno de esos datos se refiere a la cantidad de viviendas existentes con diferentes tipos de material de construcción en las paredes. Se muestra a continuación el correspondiente gráfico donde se puede observar que el 35% corresponden a viviendas de adobe y tapial.

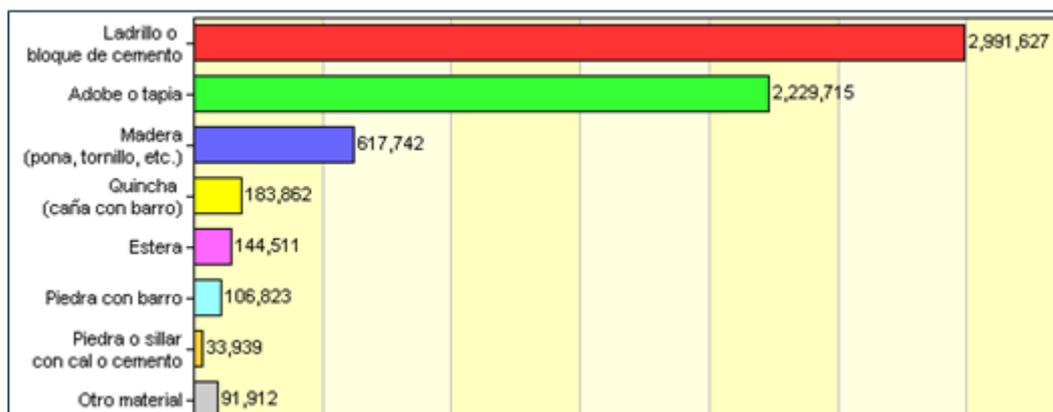


Figura 7. Número de viviendas de acuerdo al material predominante en las paredes.

Fuente: INEI, Censo Nacional 2007

Materiales

Suelo

El suelo adecuado debe ser una mezcla de arcilla y de arena. El porcentaje adecuado de arcilla debe estar en el rango de 20 a 30 % y el resto de arena. El objetivo principal de tener arcilla es de formar una mezcla cohesiva y resistente, pero no mucha para no producir grietas al secarse el tapial. El suelo se debe tamizar por una malla con cocada de 3/8 de pulgada; y si se utilizarán los granos que se puedan pulverizar y los que no se descartarán.



Figura 8. Tamizado del suelo.
Fuente: San Bartolomé

Según Valderrama³⁴ el suelo arcilloso trabaja adecuadamente hasta un valor de humedad de 15%. Luego de esto se producen fisuras en los muros. Recomienda la eliminación de piedras y material que sea grueso en el suelo.

Además afirma que las partículas de arcilla son de forma plana, hexagonal. Estas partículas de arcilla en presencia de agua se asientan una encima de otra logrando estratos de suelo como una pila de ladrillo. Se logrará mayor densificación de la masa con una mejor uniformidad de la estructura de partículas de arcilla; así las propiedades mecánicas del suelo aumentarán. Es muy importante por ello eliminar cualquier material grueso porque cambia la organización de las partículas y produce la posible ruptura del bloque.

Agua

El agua básicamente debe estar libre de impurezas. Su uso es para dar cierta consistencia al suelo, teniendo cuidado de no formar charcos o barros excesivamente húmedos. Su función primordialmente consiste en activar la arcilla y lograr una humedad adecuada para realizar la compactación.

Paja

El uso de paja para la construcción de tapiales en las localidades es de manera opcional. El beneficio consiste en disminuir las contracciones y pérdida de adherencia de los tapiales. La paja trabaja a tensión durante el intento de separación de los tapiales.

La dosificación adecuada de paja estará en la siguiente relación de volumen con respecto al suelo: 1 de paja por cada 5 de suelo. La paja se separará en pequeños filamentos de 50 mm de longitud.

La paja que se llega a usarse comúnmente proviene de arroz, trigo, ichu, gras común, bagazo de caña, grama, guano, crines y similares.

Ichu

Planta gramínea, su nombre científico es *Calamagrostis rígido*, *Festuca scirpifolia*. Su crecimiento se da comúnmente entre las alturas de 3500 a 5000 msnm. Es muy duro y brota en manojos espaciados. Normalmente logra los 50 cm de alto.

Su uso es el más adecuado para combinarlo con el suelo para tapiales, ya que, es de gran abundancia en la Sierra. Además su crecimiento se puede dar en suelos terrosos o pedregosos.



Figura 9. Ichu en la sierra.

Cañas

La mayoría de zonas utilizan el Eucalipto como refuerzo vertical. El eucalipto es una planta que se utiliza medicinalmente, pero también se vino a usar como refuerzo principalmente vertical. Tiende a tener como hábitat suelos ácidos y secos. Se muestra algunos valores de sus propiedades mecánicas de esta planta.

Tabla 2. Valores de resistencias mecánicas del eucalipto

σ compresión // a la fibra (Kg/cm ²)	σ compresión perpendicular a la fibra (Kg/cm ²)	σ corte // a la fibra (Kg/cm ²)	E compresión // a la fibra (Kg/cm ²)	Módulo de ruptura (ensayo de flexión estática) (Kg/cm ²)	E flexión estática (Kg/cm ²)
391,2	94	98,2	10740	1025	123000

También se puede usar las siguientes cañas como refuerzo: La caña de Guayaquil entera y sin pulpa, carrizo y caña brava. Se tienen diámetros de 2,5

cm. para la caña brava, ½” y 1 1/2” para el carrizo y de 10 a 40 cm para la caña de Guayaquil. Las cañas más usadas son la de la caña de

Guayaquil que presenta 600 especies, poseen además tabiques transversales que ayudan a su rigidez.

Las cañas son fáciles de trabajar (cortar) cuando tienen una humedad adecuada. Sin embargo cuando están secas poseen una dureza considerable. La durabilidad de la caña viene con la idea que no esté expuesta al medio ambiente. Por ello, se recomienda un correcto embebido en el muro de tapial.

Tabla 3. Características de los diferentes tipos de cañas.

Tipo de Caña	Nombre Científico	Esfuerzo a tracción fs. (Kg/cm ²)	E (Kg/cm ²)
Caña Guayaquil entera	Guadua Angustifolia	1350	1,52 x 10 ⁵
Caña Guayaquil sin pulpa	Guadua Angustifolia	1810 - 1900	2,25 a 2,6 x 10 ⁵
Carrizo	Chusquea spp.	1100 - 1150	1,3 a 1,77 x 10 ⁵
Caña Brava	Gynesium	1319 - 2700	2,59 a 4,2 x 10 ⁵

Fuente ININVI-PUCP

Partes de la Estructura de una Vivienda

Cimiento

Las cimentaciones pueden ser de tres tipos, dependiendo del deterioro que podría presentarse por presencia de agua en el suelo al lado de la cimentación. En este caso se debe elegir las dos últimas de las siguientes:

Cimiento de Pirca: Piedras, de preferencia de forma angulosa, asentadas con barro.



Figura 10. Cimiento de pirca.

Fuente: Haiku Deck

Cimiento de Concreto ciclópeo: Piedras grandes con concreto simple.
Cimiento de Albañilería de Piedra con mortero de cemento o cal y arena gruesa.

Las dimensiones mínimas de ancho y profundidad deben ser de 60 cm.

Sobrecimiento

Los sobrecimientos pueden ser de dos tipos:

Sobre cimiento de Concreto ciclópeo: Piedras grandes con concreto simple.

Sobre cimiento de Albañilería de Piedra con mortero de cemento o cal y arena gruesa.

Básicamente la función es llegar a transmitir las cargas a la cimentación, el ancho mínimo es de 40 cm y la altura sobre terreno debe ser de 30 cm para proteger a los tapiales de la erosión. Además la norma E-080 recomienda el uso de lajas de piedra en las partes laterales del sobrecimiento.

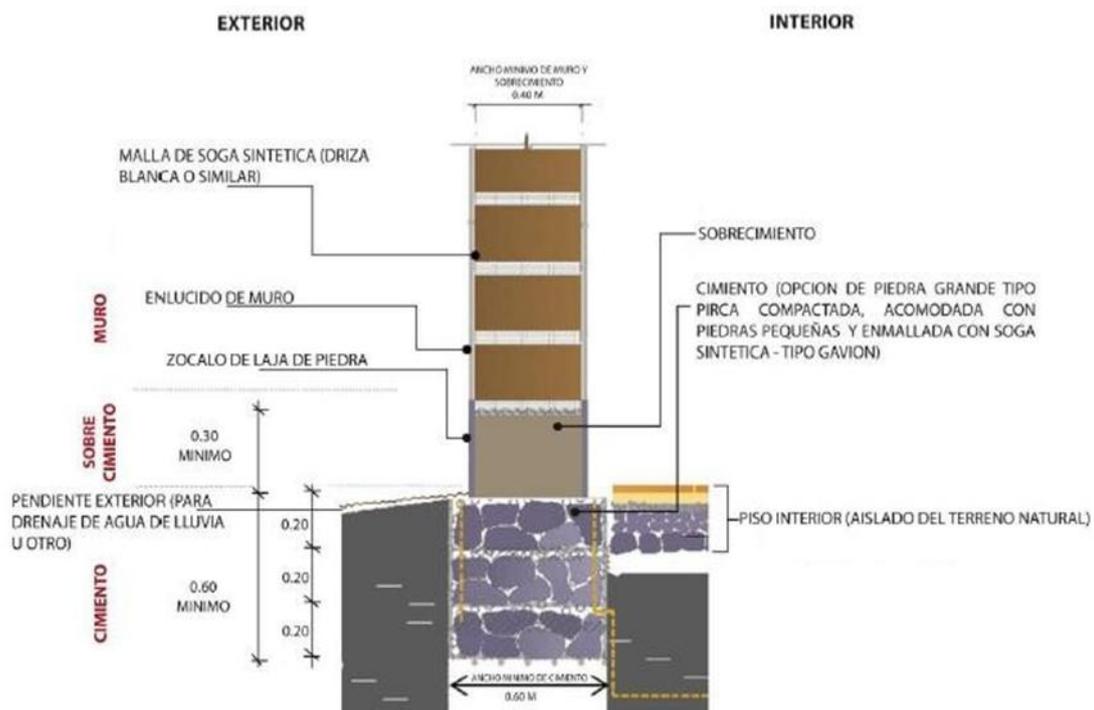


Figura 11. Detalle de la cimentación con sus partes.
Fuente: Norma E-080

Muros

Los muros son la parte perimetral de la construcción. Estos sirven de gran protección a los habitantes, tiene la propiedad de no perder calor por el tamaño

de sus muros y de lo más importante la compactación que se realiza durante su llenado con tierra cruda.

Los muros se apoyan en el sobrecimiento (normalmente pirca) y se construyen en hiladas. La construcción de los muros en una hilada es de manera sucesiva, para ello se necesita encofrados deslizantes que ayuden a no tener que armar y desarmar el armazón del encofrado.

La siguiente hilada se realizará luego de tres días, porque a este tiempo el tapial toma una consistencia sólida – compacta. Y además porque llega a obtener el 50 % de la resistencia a compresión de la que se obtiene a los 28 días (ver Anexo 1)

Los muros varían de dimensiones de acuerdo al encofrado utilizado en cada ciudad y/o provincia. Las dimensiones normales son de 1,5 m. de largo, 50 cm de ancho y 40 a 60 cm de alto. En algunos casos no se tiene muros de sección rectangular sino también en sección en forma de “T”. Este último se ve en los encuentros de dos muros. La idea es evitar las fallas que se podrían producir por desgarro.



Figura 12. Construcción de un muro de tapial.
Fuente: San Bartolomé

La norma E – 080 de “Diseño y construcción con tierra” recomienda que las juntas de los muros sean inclinadas en un ángulo de 45° . El objetivo es aminorar las fisuras en las juntas verticales, esto también se consigue con el refuerzo vertical que se lo coloca alternadamente en distancias de 40 cm aproximadamente.

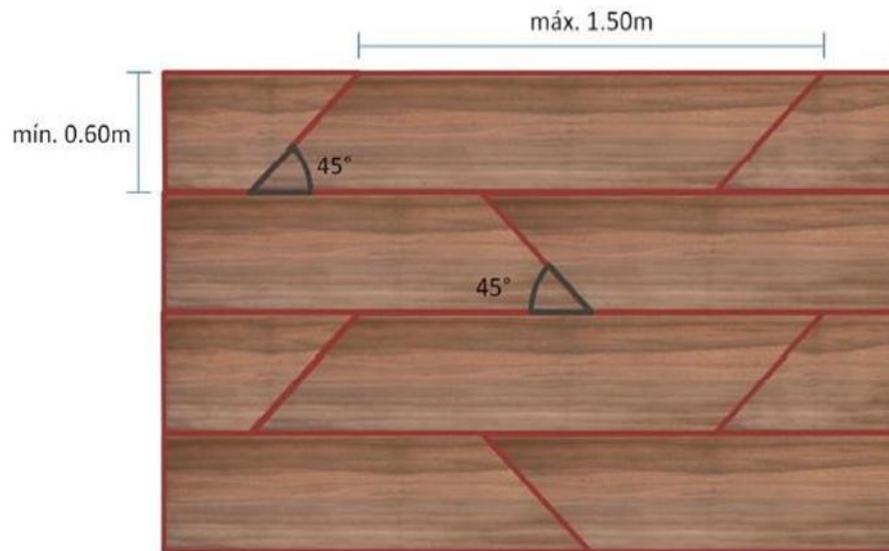


Figura 13. Juntas verticales inclinadas en la unión de los tapiales.

Techos

Los techos deben de ser peso ligero con una adecuada distribución de pesos sobre los muros; para ello se utilizará vigas soleras sobre los muros. Además no son considerados como diafragmas rígidos; por su poca solidez. También deben de ser los adecuados para poder soportar cambios de temperatura, así como también el intemperismo de las lluvias.



Figura 14. Techos comunes de viviendas de Tapial.
Fuente: San Bartolomé

Ensayos en Campo

Porcentaje y/o proporción de arcilla y arena en el suelo

Prueba de la Bolita

Se hará una pequeña bola y se dejará secar por 48 horas (Ver figura 15) Se colocará entre los dedos y se aplastará (Ver figura 16), si se pulveriza

contendrá mucha arena y si no se rompe tendrá mucha arcilla. Por ello, se espera una fractura en trozos grandes.

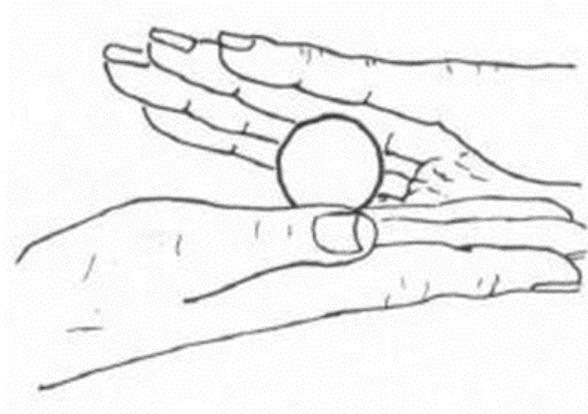


Figura 15: Bola hecha con suelo
Fuente: Norma E.080



Figura 16. Ruptura de la bola.
Fuente: Norma E.080

Prueba de Sedimentación

Se colocará el suelo en una botella con agua; se agitará y se dejará reposar 24 horas. Los sedimentos de arena y arcilla formarán capas y se medirá el espesor de estas capas para hallar su proporción.

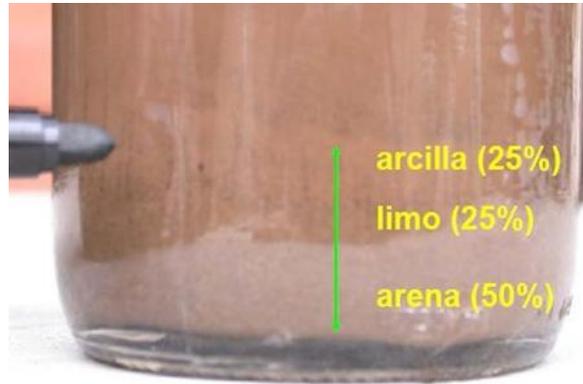


Figura 17. Asentamiento de material en la botella con agua.
Fuente: San Bartolomé

Prueba de Rollito

Se tomará un puñado de suelo y se formará un rodillo con las dos manos; si la longitud del rollito no llega a los 5 cm se deducirá que no tiene mucha arena, y si supera los 15 cm se tendrá en el suelo mucha arcilla. Lo ideal es estar en el rango de 5 a 15 cm.



Figura 18. Proceso de fabricación del rollito.
Fuente: San Bartolomé

Humedad adecuada en el suelo

Se formará una bola de suelo y se dejará caer desde una altura de 1 metro aproximadamente. Si se pulveriza en pequeños granos, estará muy seca; por el

contrario si no se quiebra, el suelo estará muy húmedo. La humedad ideal es cuando la bola se fracture en granos grandes.

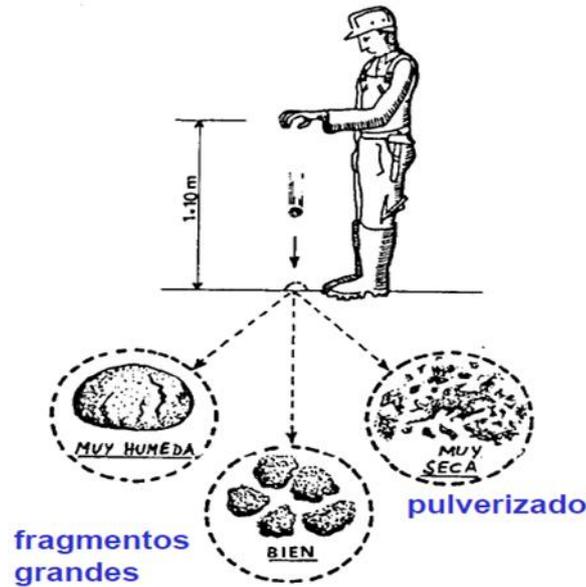


Figura 19. Ensayo de humedad en campo.
Fuente: San Bartolomé

Procedimiento Constructivo

Tratamiento del suelo

El suelo luego de ser tamizado, se mezclará con agua y paja para así formar una mezcla consistente pero no barrosa. Se dejará reposar por 24 horas, a esto se le llama que “duerma”. El agua penetra en todas las partículas de arcilla presente, ayudando a homogenizar la mezcla.



Figura 20. Proceso del suelo “durmiendo”
Fuente: San Bartolomé

Encofrados

El encofrado consiste en paredes laterales con espesores y dimensiones dadas. Los tapiales son elementos prismáticos resultado del uso de estos moldes.

Según la norma E-080, las dimensiones de los tapiales tendrán un máximo de largo de 1,50 m, ancho mayor a 40 cm. y altura máxima de 60 cm. El espesor mínimo de los encofrados debe ser de 20 mm.

El encofrado podrá ser de madera o metal. Además se sujetarán mediante pernos y “puntales de fierro” distribuidos en conjunto racionalmente en la cara lateral para una sujeción adecuada; estos fierros pasarán el tapial a lo largo de su ancho.

Existe diferentes tipos de sistemas de encofrados según la costumbre y/o tradición de la zona, las dimensiones y el material del encofrado variarán. Se muestra el encofrado usado en la PUCP para investigación.

Encofrados del Laboratorio de Estructuras LEDI en la PUCP.

Encofrados laterales.



Figura 21. Caras laterales del encofrado y los pisones que se usarán para el moldeo.

Cara Lateral A: 1,00 m de largo y 40 cm de altura.

Cara Lateral B: 28 cm de espesor y 40 cm de altura.

Los encofrados poseen un marco de metal que mantiene la rigidez de estos. Tendrán apoyos para poder cargarlos y ubicarlos con facilidad. Además se

tendrá agujeros donde se colocarán unos fierros y se sujetará el encofrado lateral, con prensas si es necesario, ayudando a mantener su forma ante el apisonamiento durante el moldeo.



Figura 22. Marco de metal y agujeros.



Figura 23. Puntales de fierro con tuerca.

Moldeo y compactación

Se verterá el suelo “dormido” en capas de 15 cm cada una; se procederá a la compactación hasta llegar a 10 cm aproximadamente. La compactación se realizará con un mazo de unos 10 kg aproximadamente. La cantidad de apisonados quedará definido por la persona encargada de este trabajo. La capa superior de cada tapial será nivelado con una paleta de madera.

El encofrado se desplazará lateralmente para el nuevo tapial contiguo a construir. Se terminará la primera hilada de tapias y se esperará 3 días. Se realizará un picado (1 cm por norma E- 80) en la cara superior, y se procederá a regar con agua a razón de 1 litro/m². La segunda hilada se colocará alternando la posición de la primera hilada.

El sentido de la compactación es eliminar al mínimo los espacios de los poros. Se tiene la idea que si se tiene una adecuada compactación se obtendrá una mayor resistencia a la compresión simple.

Existen tres métodos de compactación de acuerdo al equipo usado y al modo de realización.

Compactación estática

Consiste en aplicar una fuerza con una prensa hidráulica o mecánica.

Compactación dinámica por impacto:

Se usa pisonos para la compactación. Este método es el más usado en la construcción de tapial.

Compactación dinámica por vibración

Es el que se usa para compactar pistas y carreteras. Se usa pisonos neumáticos, hidroneumáticos y eléctricos. Su uso se da en Francia, donde se automatiza la producción de muros de tapial.²³

En Venezuela existen encofrados hasta 1,80 m de alto³⁴, lo cual evidentemente es mucho más alto que los comunes en otras zonas. Hartkopf Volker³⁶ recomienda no tener muros mayores a los 75 cm de altura porque la compactación en las zonas inferiores será deficiente. Monzón³⁷ además indica que los pisonos no deben de tener un área mayor de 225 cm² en la cabeza.

Procedimiento Constructivo recomendado por Vildoso³⁷

Los procedimientos constructivos son similares en todos los lugares con. La única diferencia son los aditivos naturales que se usan en cada lugar y por supuesto el suelo que se tenga en el lugar. Vildoso³⁷ indica los siguientes pasos para la construcción de un muro de tapial que debe durar alrededor de 20 a 30 min.

Limpiar con la ayuda de un badilejo las caras internas de los encofrados.

Usar una plomada para corroborar la nivelación del encofrado.

Llevar la tierra húmeda (dormida) al encofrado.

Compactar mecánicamente

110 a 140 golpes por capa.

6 a 10 capas para una altura de hilada de 70 cm.

La última capa se apisona con el canto del pisón, se puede usar cenizas para que el suelo no se adhiera al pisón.

Retira las agujas transversales de sujeción, se desmolda y se adecua para el siguiente tapial.

Tipos de tapiales en diferentes lugares

Se recomienda ver los videos enumerados del 19 al 25 ubicados en la bibliografía. Se dará una idea de lo que se tiene en Tierra Cruda y se visualizará incluso como se llegó a automatizar la construcción en Tapial en Francia usando compactación con pisones hidroneumáticos.

Los constructores tienen la experiencia necesaria para poder dar fin a la compactación, comentan que el sonido que produce al compactar indica que ya está en su punto adecuado.

Tapiales en Ancash

Los moldes son de madera, poseen dimensiones no uniformes (Ver figura 24) Poseen troncos de madera y sogas para la sujeción de las maderas usadas en el encofrado. El desgaste de las sogas produce peligro en el moldeo y no uniformidad en las dimensiones de los tapiales. Mazos grandes usados para el apisonamiento.



Figura 24. Moldeo y encofrado de tapial en Ancash.

Fuente Asociación de Productores de Agropecuarios Ecológicos del Distrito de Musga-Mariscal- Ancash.¹⁷

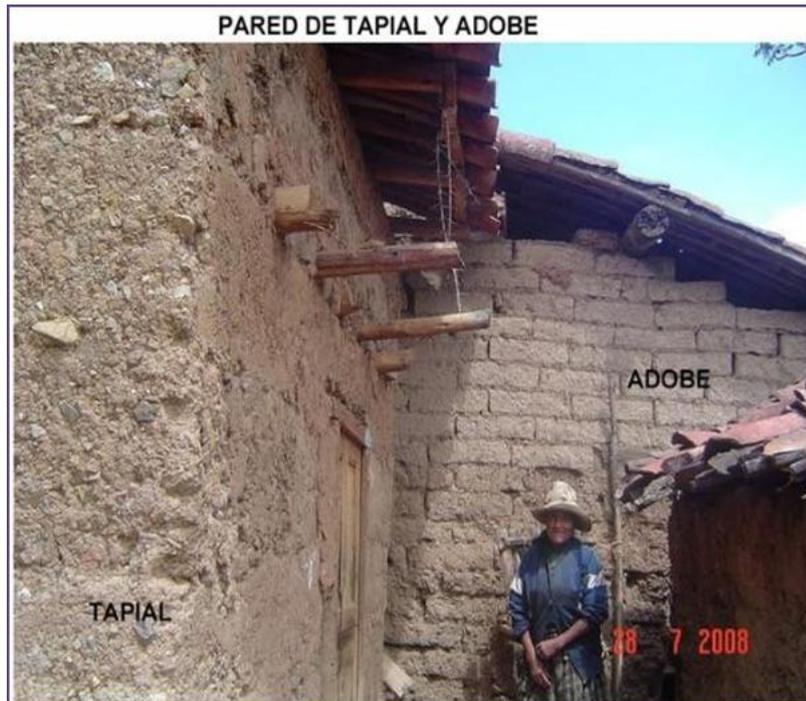


Figura 25. Casas hechas con tierra cruda: adobe y tapial.

Fuente Asociación de Productores de Agropecuarios Ecológicos del Distrito de Musga-Mariscal- Ancash.¹⁷

Tapiales en España

La construcción del Tapial, o llamado también tapia en España (Tapial: encofrado de la tapia), es un proceso que debe de considerar varios factores para su realización. El más importante de ellos es el tiempo, el fácil desplazamiento o movilidad de los encofrados hacia el siguiente moldeado de tapial, lo cual ayuda a agilizar el proceso. Se usa para ello, unas agujas de metal, que serán soportes y amarres de las paredes laterales de encofrado (montantes); servirán además como ruedas de deslizamiento para la ubicación del siguiente tapial.

El peso recomendado para los encofrados laterales debe de ser de 25 kg para facilitar la manipulación de un solo operario. Es por ello, que las dimensiones del tapial deben de quedar limitados a apoyar el fácil trabajo.

El apisonado propiamente dicho, implica que el operario tenga espacio suficiente para poder mover la parte media de su cuerpo. La altura que se deberá considerar como máxima para este fin está en el rango de 75 – 85 cm. La longitud del tapial tiene que ver con dos factores principalmente, el primero es no tener mucha separación entre los soportes de sujeción de las caras laterales y también no producir una excesiva presión de la tierra sobre el encofrado, lo cual implicaría un aumento del espesor del encofrado. Si bien en principio podríamos buscar una máxima longitud del tapial, está queda limitada por lo expuesto; la longitud recomendable es de 2 metros debido a que comúnmente se usa tres zonas de apoyo (teniendo de 150 – 170 cm) más unos solapes que redondean los 2 m.

El ancho del tapial queda limitado por la facilidad con que un operario entre en el encofrado, se usa unos 60 cm. como tradición. Y el espesor de las maderas utilizadas en el encofrado debe de ser las necesarias para evitar un pandeo horizontal debido a la presión ejercida por el apisonado. Diversos autores recomiendan que se encuentre en el rango de 2,5 cm – 3,3 cm.

Las hiladas de madera usadas para el encofrado tienden a sufrir cambios de dimensiones por la humedad proporcionada por la tierra colocada. Se debe buscar, por ello, la ventilación de las maderas. Todo esto recae sobre el uso de dos puntales de madera colocados en las partes extremas del encofrado, principalmente para la sujeción de las tablas que la conforman. Muchos autores recomiendan el uso de estos puntales de manera exterior, sin tener que entrometerse en el molde interior. Sin embargo, se encontró un uso práctico para dejar a la madera libre de humedad en la medida que se pueda. La solución implica que en un extremo se encuentre un puntal externo y en el otro uno interno con el fin de que se pueda girar la madera para su uso en el siguiente moldeo (Ver Figura 1). Así se dejará siempre una cara libre con la humedad impregnada por la tierra de moldeo. Además se puede usar 6mm de separación entre las tablas horizontales que conforman la pared lateral del encofrado, con la finalidad de la eliminación de la humedad por estas rendijas.

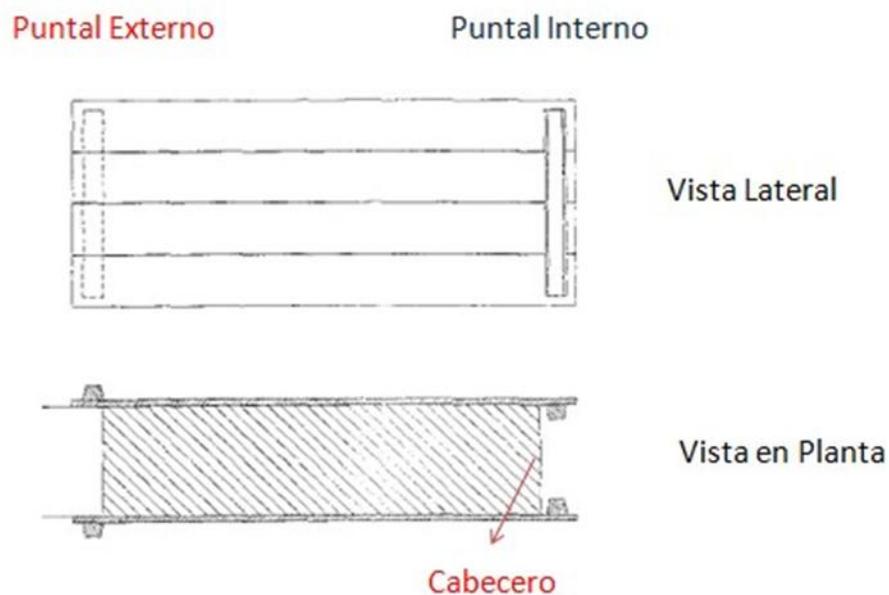


Figura 26. Uso de puntales (montantes) interior y exterior al molde.
Fuente: Albert Cuchi ¹⁰

En la figura 26 se muestra también un nuevo elemento del encofrado llamado “cabecero” que vendría a ser una pared que cierra el molde de tapial internamente. Su uso es sencillo y práctico.

El desplazamiento de las paredes laterales se efectúa de manera tal que no se tenga que desprender todo el encofrado, sino solo se necesitará el deslizamiento de estos hacia la siguiente ubicación de moldeo. Las agujas de

metal cumplen esta función de manera ideal, ya que, son tres. Al momento de deslizar las paredes se apoyan en dos de ellos y evita el giro del muro (Ver figura 27), previniendo inseguridad para el operario. La unión de las hiladas (contrapeado) en las esquinas debe de tratar de evitar el desplome de estas, de manera que se engranan alternadamente para evitar un desprendimiento del tipo desgarre que se presenta en los muros de adobe (Ver figura 28)

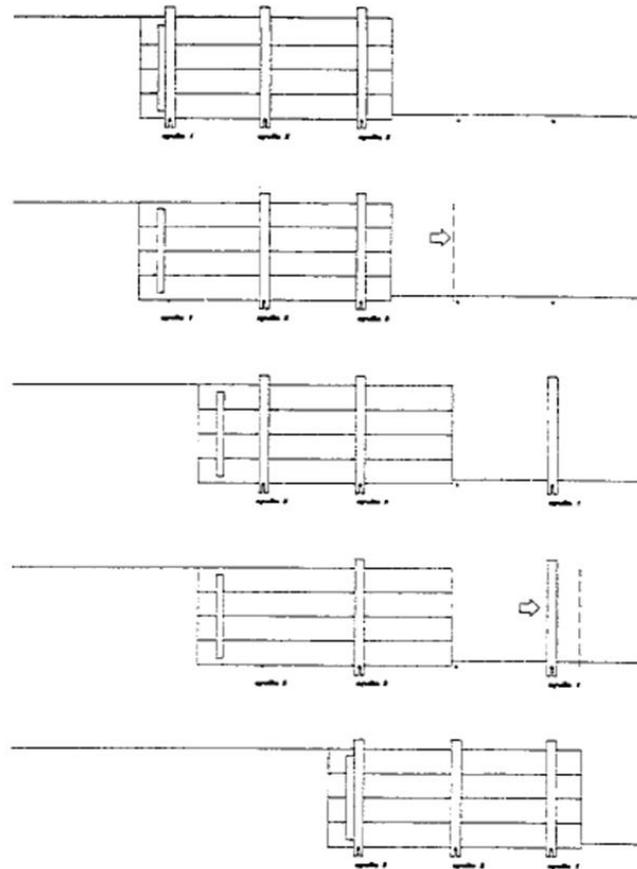


Figura 27. Secuencia de deslizamiento de los encofrados laterales.
Fuente: Albert Cuchi¹⁰

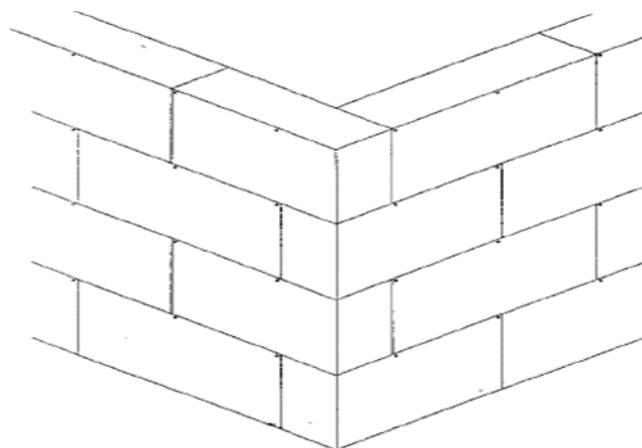


Figura 28. Unión de las hiladas en la esquina.
Fuente: Albert Cuchi¹⁰

Tapiales ecuatorianos

Los moldes usados en Ecuador tienen dimensiones de 2 m de largo, 1 m de altura y 50 cm de espesor.

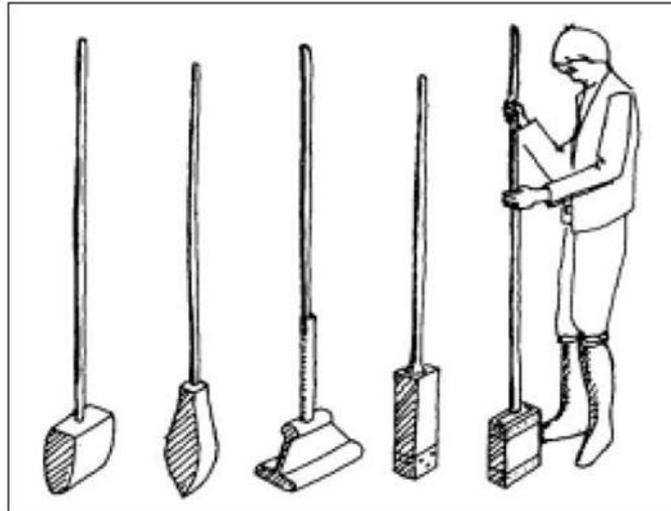


Figura 29: Diferentes tipos de pisones o mazos usados para el moldeo de tapiales Fuente: Muros de tapial y adobe Minke 2001.



Figura 30: Mazo o pisón usado con dos cabezas. Fuente: Muros de tapial y adobe Minke 2001.

Características del suelo

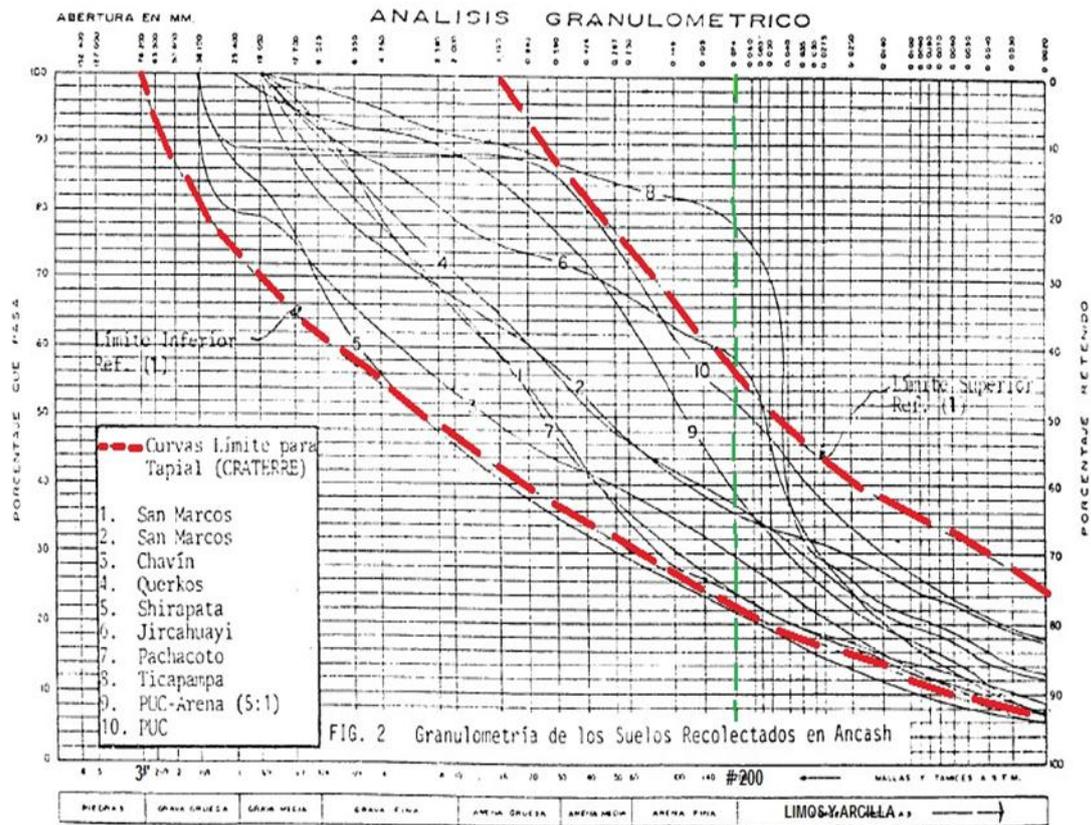
Granulometría del suelo

El suelo a usar puede tener diferentes tamaños de partículas, por ello, se puede realizar los ensayos de granulometría que conocemos en nuestro medio.

Para partículas con tamaño mayor a 0,075mm (malla #200) se realiza el tamizado mecánico por diferentes tipos de mallas.

Para partículas más pequeñas que las de la malla #200 se debe realizar el ensayo de hidrometría, el cual está basado en el concepto de sedimentación. Las partículas se sedimentan a diferentes velocidades y por ende en tiempo también de acuerdo a sus tamaños.

La institución CRATERRE de Francia recomienda una curva de granulometría para el suelo a utilizar para la construcción de tapial.



Límites de Atterberg

Para poder determinar las humedades que se consideran como cambios de consistencia se realizará los ensayos que se exponen líneas abajo. Los ensayos son realizados con la parte final del suelo.

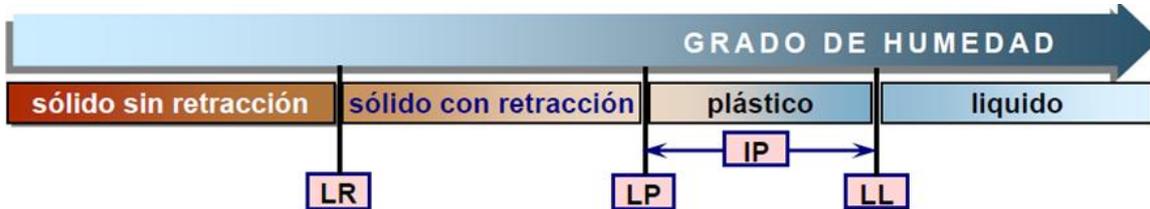


Figura 32. Grados de humedad del suelo.³³

Límite Líquido: Se usará el ensayo de Casagrande, el cual consiste en encontrar una humedad tal que al darle 25 golpes con plato metálico se cierre una hendidura de 1 cm.

Límite de Plasticidad: El ensayo consiste en encontrar una humedad para el suelo tal que se puede realizar un rodillo de 3 mm. de diámetro y 12 -15 cm. de largo.

Retracción: Es la humedad a partir de la cual no se produce contracción del suelo en estado sólido. Aquí es donde se da la evaporación total del agua.

Humedad

Humedad natural del suelo

El ensayo de humedad consiste en colocar una muestra del suelo natural en el horno y obtener su peso luego seco. Con ello se determinará la humedad del suelo y qué cantidad de agua hay que agregar posteriormente.

El agua en el suelo representada por la humedad es muy importante porque realiza la activación de la arcilla. La arcilla da la cohesión necesaria al suelo para que se obtenga una mezcla barrosa con el agua. Las partículas de agua logran estar polarizadas e interactúan con las partículas de arcilla. El agua además puede tener una tensión en el aire, debido a que las partículas de está tratan de permanecer unidas.

Según algunos autores recomiendan que el suelo arenoso deba obtener una humedad promedio de 8%; mientras que un suelo arcilloso la humedad debe de ser de 16%. La arena no tiene una propiedad de cohesión, sin embargo, ayuda a reducir notablemente las fisuración por secado en los muros de tapial.

Humedad óptima

Este parámetro se realizó con el ensayo de Próctor Estándar, el cual consiste en compactar el mismo suelo solo que variando las humedades. Con esto se obtendría diferentes densidades. Para la densidad mayor se dice que se obtiene una humedad óptima.

El motivo de buscar la densidad máxima es que el suelo tiene menos espacios vacíos; con lo cual, se obtendría menos zonas de falla ante fuerzas de compresión. Sin embargo, en la tesis elaborada por José Darío Ferreyros Villacorta³⁰ contradice esta relación.

Ensayos de Laboratorio

Ensayo de compresión de cubos de 10 cm.

Consiste en elaborar cubos de 10 cm de lado, estos cubos se someterán a compresión simple. La idea de realizar este ensayo primero que las siguientes es la de encontrar una buena mezcla de suelos ya sea entre suelos diferentes o con un aditivo cerámico.

Ensayo de compresión diagonal de Muretes.

Se construirán muretes con la finalidad de encontrar la resistencia de compresión diagonal del murete construido. Los muretes son importantes para comparar el resultado al variar las juntas de los muretes que se pueden realizar en dos partes. Además es un efecto a escala de lo que se podría ver en los muros a escala natural.

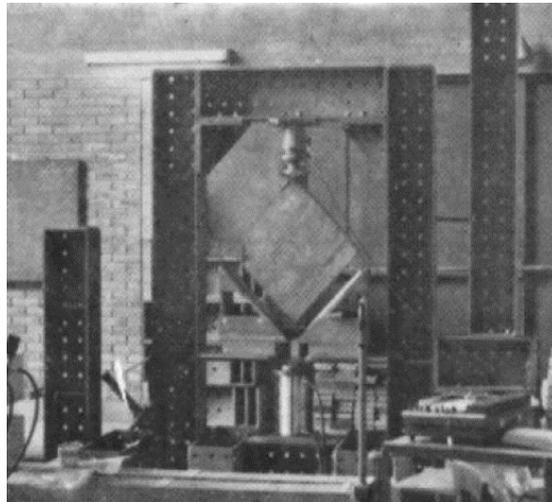


Figura 33. Ensayo de compresión diagonal de muretes.⁸

Ensayo de Compresión Diagonal de Muros.

Los muros se someten a cargas aplicadas a lo largo de sus hiladas, analizando así la adherencia que existe del suelo entre las diferentes juntas (seca, húmeda), juntas con refuerzo o sin refuerzo tanto horizontal como vertical.

Los muros desarrollaran falla por desplazamiento entre las hiladas o falla diagonal. Los muros son construidos siguiendo las pautas de compactación de los pobladores de la zona donde se quiere analizar el tapial.

Ensayos de Laboratorio

“Some studies on Improving the Properties of Earth Materials used for construction of Rural Earth Houses in Seismic Regions of Iran”, Iran 1981.

Solo agregando cal al suelo reduce la resistencia a compresión y aumenta cuando se usa cal y cemento en conjunto.

Menores valores de 5% de cemento respecto al suelo en peso, tiende a bajar la resistencia. Depende del contenido de arena y arcilla.

Tabla 4. Resultados de ensayos de compresión de bloques de tierra prensada con y sin aditivo.

BLOQUE Nº	Edad en días	Descripción	Resistencia a Compresión
1	50	Suelo Puro	15,59
2	35	5 % Cemento	37,48
3	40	15 % Cal	14,24
4	50	20 % Cal	12,29
5	33	2,5 % Cemento+ 5 % Cal	34,18
6	33	2,5 % Cemento+ 10 % Cal	26,23
7	35	5 % Cemento+ 5 %	46,75
8	35	5 % Cemento+ 10 %	43,17

“Mejoramiento y estabilización de suelos” México 1982. Fernández Loiza, Carlos. “Agencia: Laboratoire Central des Ponts et Chaussés”

Muestras de suelo con 5% de cal a diferentes días de curado: La resistencias aumentan hasta un contenido máximo de 40% arena y 60% arcilla, mayor porcentaje de arena baja la resistencia hasta casi cero cuando solo es arena y cal.

El Departamento de la Gerencia de la Investigación y Capacitación (GIN) aporta con algunos documentos desarrollados en Tapial.

Análisis Comparativo del comportamiento sísmico de un módulo de tapial y uno de adobe reforzado. ININVI – PUCP, 1991.

Expediente Técnico Típico Vivienda de Tapial – Sierra. Ing. Isabel Moromi e Ing. Mercedes Dongo, 1990.

Construcción con Tapial. ININVI – PUCP, 1986 – 1987.

Construcciones de Tapial Estudio de Fisuración y Conexión entre Muros. ININVI – PUCP, 1998.

Se presentan también algunos datos, resultados y conclusiones de tesis y trabajos de la PUCP referidas a la investigación en tema de tapiales:

“Construcciones con tapial mejora de la resistencia al corte”, Raúl Enrique Carbajal Alfaro, 1987 (Ver anexo 1)

“Comparación de la resistencia de la mampostería de tapial con adobe”, José Darío Ferreyros Villacorta, 1986 (Ver anexo 2)

“Planeamiento de un módulo de Tapial reforzado”, Jaime del Solar San Martín, 1995.

Ensayos en Tapial Mejorado. “Ensayos Físicos del material (Suelos): Mecánicos de compresión axial y diagonal en prismas (Pilas y muretes) y dinámico de simulación sísmica en un módulo de Vivienda a escala natural”. SENCICO, Ing. Wilson E. Silva Berrios, 2013.

Bibliografía

- 1) Ministerio de Vivienda. Norma E-080: Diseño y Construcción con Tierra.
- 2) Ángel San Bartolomé, Daniel Quiun y Wilson Silva. Diseño y Construcción de Estructuras Sismorresistentes de Albañilería.
- 3) Urbano Tejada Schmidt (2011). Buena Tierra. Apuntes para el Diseño y Construcción con Adobe.
- 4) Julio Vargas (1983). Memorias: Seminario Latinoamericano de Construcciones de Tierra en Áreas Sísmicas. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- 5) Instituto Nacional de Estadística e investigación (INEI). Censo 2007.
- 6) Patricio Cevallos Salas (20 mayo 2006). La construcción con Tierra en el Ecuador. Quito, Ecuador.
- 7) Daniel Torrealva (Junio 2013). Caracterización de daños en Construcciones de Adobe. Pontificia Universidad Católica del Perú.
- 8) ININVI (1989). Construcción con Tapial. Lima, Perú.
- 9) Francisco Javier Castilla (2003). La técnica del tapial en la Construcción tradicional de la Provincia de Albacete. Patrimonio Etnológico de Castilla-La Mancha, España.
- 10) Albert Cuchi (1996). La técnica tradicional del tapial. Actas del Primer Congreso Nacional de Historia de la Construcción. Madrid, España.
- 11) Félix José Sandoval y otros (2010). Proceso de Reconstrucción de los Muros de Tapial de la Iglesia de San Nicolás de Bari en Sinovas. Burgos, España.
- 12) Dirección Nacional de Construcción. Fomenta la construcción sostenible. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.
- 13) La Revue Durable (Février 2006). Des technologies appropriées pour la construction, l'eau et la santé. France.
- 14) Ministerio de Vivienda. Norma E-080: Diseño y Construcción con Tierra.
- 15) Sistema Constructivo Tapial. Sitio web: <https://www.haikudeck.com/sistema-constructivo-presentation-Rn1XP4j9Na#slide-3>
- 16) Ángel San Bartolomé (Blog). Sitio web: <http://blog.pucp.edu.pe/blog/adobetapial/>

- 17) PAED MUSGA (2009). Ancash, Perú. Sitio web: <http://es.slideshare.net/ElsaBenavente/fotos-paed-musga>
- 18) Patricio D. Salas (2012). La construcción en Tapial, el caso ecuatoriano. Sitio web: <http://arquitecturasdeterra.blogspot.com/2012/09/la-construccion-en-tapial-el-caso.html>
- 19) El Tapial: Sitio web: <https://www.youtube.com/watch?v=fvN4Th-YKNc>
- 20) Haciendo el tapial con Narciso, Pepin y Adrian. Sitio web: https://www.youtube.com/watch?v=YQYVb_O6OGc
- 21) La construcción con Tapial. Sitio web: <https://www.youtube.com/watch?v=oLoGqe8CfNk>
- 22) Construire Et Habiter Avec La Terre Crue. Sitio web: https://www.youtube.com/watch?v=kk_KDhOrKhU
- 23) Une chanteur de construction en terre crue. Sitio web: <https://www.youtube.com/watch?v=Voy5wSyTgCc>
- 24) Film Briques Terre Crue. Sitio web: <https://www.youtube.com/watch?v=OGBDSIILIMI>
- 25) Conservatoire Dynamique des Gestes Techniques: l'écoconstruction-enduits terre. Sitio web: <https://www.youtube.com/watch?v=okRewKaNH2E>
- 26) Ministerio de Cultura, sitio web: <http://www.cultura.gob.pe/es>
- 27) Revista Antigua y Medieval, sitio web: <http://antiguaymedieval.blogspot.com/2010/07/intervienen-murallas-afectadas-por.html>
- 28) Sitios Arqueológicos por Lizardo Tavera Vega, sitio web: <http://www.arqueologiadelperu.com.ar/lacentinela.htm>
- 29) Albañilería de Tierra Cruda: Adobe y Tapial. San Bartolomé, sitio web: <http://textos.pucp.edu.pe/texto/C18-Adobe-Curso-Albanileria-Estructural>
- 30) José Darío Ferreyros Villacorta. "Comparación de la resistencia de la mampostería de tapial con adobe", 1986.
- 31) Imagen editada de internet. Sitio web: www.flickr.com
- 32) ININVI: Construcción con Tapial. "Ensayos estáticos y dinámicos en construcción con Tapial", 1989.
- 33) Célia M Martins Neves. "Selección de suelo y métodos de control en la construcción con tierra – Prácticas de Campo". PROTERRA, 2009.

- 34) William Castillo. "El reforzamiento estructural de edificaciones de Tapia: Un caso en los Andes Venezolanos". Memorias del seminario Latinoamericano de construcciones de tierra en áreas sísmicas. Lima, 1983.
- 35) Silvana Del Rocio Jaguaco. "Uso del adobe como material de construcción". Escuela Politécnica Nacional. Quito, Ecuador. 2007.
- 36) Hartkopf Volker. "Indigenous buildings techniques of Peru and their potential for improvement to better with stand earthquakes". Under contract to the Agency for International Development. Washington 1981.
- 37) A. Vildoso y F. M. Monzón. "Seguir construyendo con Tierra". Lima, 1984.

Anexos

Anexo 1: Construcción con tapial mejora de la resistencia al corte

Experiencia con CUBOS.

Referencias y Materiales que se usaron:

Límites de Atterberg: ASTM D423 y 424 por la malla # 40 (0,43mm)

Granulometría de Craterre.

Se usó la norma ASTM D421 para la granulometría de partículas de tamaño mayor a 0,074 mm.

Y la ASTM D422 para las partículas menores a 0,074 mm; este último se realizó en el hidrómetro.

Gravedad específica Norma ASTM D854.

Humedad norma ASTM D 2216.

Se tomó dos tipos de suelo: SUELO PUCP CL-ML (arcilla inorgánica) y SUELO COMAS (Arena limosa bien graduada con contenido de finos no plásticos)

Se usó CAL, CEMENTO como estabilizadores de suelo.

Se usó el CÉSPED para reducir el agrietamiento (No hay ICHU, ni Paja de Trigo)

El Césped se usó bien seco y en longitudes aproximadas de 10 cm.

Molde para compactación de 10 cm x 10 cm x 10 cm.

Pisón de Madera de 300 g.

Los cubos tienen una dimensión de 10 cm por cada lado. Y la proporción de césped fue de 0,25% del peso del suelo. El suelo previamente fue tamizado por una malla de 2".

Los tipos de cubos fueron los siguientes y en las siguientes proporciones de mezclas de suelos desde el tercer tipo.

	Cal Hidratada			Cemento	
	Natural	2,5%	5%	2,5%	5%
Pucp	4	4	4	4	4
Comas	4	4	4	4	4
Comas – Pucp 1:0,25	4	4	4	4	4
Comas – Pucp 1:0,5	4	4	4	4	4
Comas – Pucp 1:0,75	4	4	4	4	4
Comas – Pucp 1:1	4	4	4	4	4

Los cubos fueron moldeados en 2 capas de 5 cm de espesor con 10 golpes por capa.

Se realizó curado para los cubos con estabilizadores de cal y cemento. El agua se roció en proporción de 1 litro/ m², es decir 50 m por cubo.

Peso unitario del material compactado promedio 2gr/cm³; es decir que cada cubo pesa 2 kg. Se ensayaron 1 cubo a los 3 días y los otros 3 de cada tipo a los 28 días.

Tabla de Humedades de los cubos en el día de la fabricación

	Natural	Cal Hidratada		Cemento	
		2,5%	5%	2,5%	5%
Pucp	14,9	19,1	18,7	21,6	19,0
Comas	7,9	8,9	9,1	9,1	9,3
Comas – Pucp 1:0,25	10,2	10,3	11,2	10,6	10,5
Comas – Pucp 1:0,5	13,4	12,3	15,2	9,2	9,9
Comas – Pucp 1:0,75	12,8	13,8	14,7	8,9	11,0
Comas – Pucp 1:1	14,0	12,8	15,4	9,6	10,8

Tabla de Humedades de los cubos a los 28 días

	Natural	Cal Hidratada		Cemento	
		2,5%	5%	2,5%	5%
Pucp	5,2	4,0	4,0	5,5	4,2
Comas	2,6	1,6	1,4	1,6	1,9
Comas – Pucp 1:0,25	2,7	2,0	1,5	2,4	2,5
Comas – Pucp 1:0,5	3,1	2,7	2,7	2,8	3,1
Comas – Pucp 1:0,75	2,7	2,9	2,4	2,8	2,5
Comas – Pucp 1:1	4,1	2,7	2,8	2,4	3,6

Se muestran a continuación las resistencias alcanzadas a compresión.

Tabla de Resistencias a Compresión (kg/cm²) de los cubos a los 3 días

	Natural	Cal Hidratada		Cemento	
		2,5%	5%	2,5%	5%
Pucp	2,5	0,75	0,83	1,5	5,5
Comas	1,5	-	0,83	1,88	2,75

Comas – Pucp 1:0,25	1,88	0,89	0,63	1,70	2,7
Comas – Pucp 1:0,5	2,5	1,15	1,45	1,83	1,35
Comas – Pucp 1:0,75	1,85	1,18	1,45	2,0	2,6
Comas – Pucp 1:1	2,65	0,75	1,48	1,25	2,95

Tabla de Resistencia promedio de Compresión (kg/cm²) de los tres cubos restantes a los 28 días

	Natural	Cal Hidratada		Cemento	
		2,5%	5%	2,5%	5%
Pucp	4,7	3,1	2,0	7,97	10,9
Comas	2,53	0,66	1,9	4,02	7,83
Comas – Pucp 1:0,25	4,97	1,15	1,62	4,03	8,13
Comas – Pucp 1:0,5	6,57	1,56	2,14	2,63	6,1
Comas – Pucp 1:0,75	5,5	1,86	2,73	4,47	6,2
Comas – Pucp 1:1	4,23	1,21	2,36	2,37	5,1

Conclusiones

No hubo mejora en la resistencia con 2,5 % y 5% de cal. Más bien se redujo la resistencia a los 3 y 28 días.

Hubo mejora en la resistencia con 5% de cemento.

Con el SUELO COMAS se logró triplicar su resistencia y en el SUELO PUCP duplico su resistencia con la adición de 5% de cemento.

Mejora se dio con la mezcla de los dos tipos de Suelo. Fue suficiente esto para aumentar la resistencia.

El aumento de resistencia con el SUELO DE COMAS fue de 83% a los tres días y 209% a los 28 días.

La mezcla de suelo COMAS-PUCP (1:0,5) resultó ser 67% mayor a los tres días y 160% a los 28 días.

La adición de MEZCLA DE SUELOS con 5% de cemento no aumentó la resistencia.

La mezcla óptima fue la del SUELO COMAS-PUCP (1:0,5)

Suelo estabilizado con 5% de cemento a los 3 días alcanzó 44% de la resistencia a los 28 días. Se puede concluir que se puede vaciar a escala natural la segunda hilada de Tapial a los 3 días por la resistencia que ya se alcanza.

Se recomienda fabricación de muretes con 5% de cal y 5% de cemento. La idea es ver si se incrementa la resistencia al corte con la adición de cal.

Se realizará 6 muretes con 5% de cal, tres a los 28 días y 3 a los 60 días, con la finalidad de ver el efecto del tiempo de la estabilización con cal.

Se llevará las mezclas de suelos a muretes y se adicionará la mezcla PUCP-COMAS (1:0,5)

Experiencia con muretes

Se buscó obtener, analizar o comparar las siguientes cosas:

Resistencia al corte en muretes monolíticos con suelo arcilloso y arenoso estabilizados con 5% de cal o cemento.

Muretes curados y no curados.

Mejorar la resistencia al corte en la zona crítica de junta horizontal, por ello se elaborará muretes en dos partes variando el tipo de junta horizontal (60 cm x 30 cm x 15 cm)

Los muretes tendrán una dimensión final de 60 cm x60 cm x15 cm.

Herramientas:

Se utilizó encofrado de madera.

Los pisones o mazos que se usaron fueron de 10 kg. Para la zona central y 9,5 kg. Para la zona de bordes y esquinas.

Se trató de utilizar las mismas herramientas que las utilizadas que en la construcción de un tapial en el Valle del Mantaro.

Se usó pico y lampa para preparar la tierra.

Carretilla, latas, plomada, nivel, badilejo.

Muretes con aditivos:

SUELO	Sin curado			Con curado		
	Natural	5% Cal	5% Cemento	Natural	5% Cal	5% Cemento
PUCP	3	3	3	3	3	3
COMAS	3	3	3	3	3	3

Adicionalmente se crearon 3 muretes de suelo, Sin curado con 5% de Cal para ensayarlo a los 60 días. Teniendo en total 39 muretes.

Muretes con junta:

Muretes sin curar, los cuales fueron construidos en dos partes: con dimensiones de 60 cm x 30 cm x 15 cm cada parte.

Se llenó hasta la mitad de la altura (30 cm) y se dejará secar una semana para luego completar la segunda parte del murete.

Se construyó 3 muretes por cada tipo de junta, se realizó 7 tipos de junta y son las siguientes:

Junta 1: Junta seca, natural y tradicional.

Junta 2: Junta húmeda – rayada. Se rayará pequeños surcos en el plano horizontal en forma de x.

Junta 3: Junta de cemento de 1 “de espesor lo cual se vació con concreto pobre, en la siguiente relación de componentes 1:4:4; cemento: arena: piedra (1/2“)

Junta 4: Junta de piedra, se usó 3 piedras de 2 “y se colocó en el centro del espesor del murete.

Junta 5: Junta ondulada, el objetivo fue crear una conexión tipo entrabe mecánico solo con suelo.

Junta 6: Junta de caña, se usó 2 medias cañas de ½ “.

Junta 7: Junta de eucalipto, se usó 3 troncos de eucalipto de 1 ½ “. Se incrustó 7,5 cm en el tapial inferior y 7,5 cm en el superior.

Muretes con mezcla de suelos

Mezcla de suelo	Proporción	Muretes
COMAS- PUCP	1:0,25	3
COMAS-PUCP	1:0,5	3
COMAS-PUCP	1:0,75	3
PUCP-COMAS	1:0,5	3

El cemento que se utilizó fue portland; y la cal hidratada de marca Lima.

El curado fue una vez al día en muretes con aditivo.

Proceso constructivo

Tamizamos el suelo en malla de 2 “.

Se eliminó cualquier material orgánico.

Se preparó 3 muretes por cada casa.

Peso unitario compactado fue de aproximadamente 2000 kg/m³.

El peso de cada murete fue de 324 kg.

Se mezcló Cal y cemento con tierra usando una lampa para obtener un color uniforme.

Césped en proporción de 0,25% de peso de tierra.

Humedades naturales de los suelos fueron para COMAS 1,45% y para PUCP 5,09%.

Los muretes sin aditivo se dejó la mezcla reposar 1 día (dormido), esto es para que la arcilla logre una humedad uniforme.

Para minimizar la pérdida de humedad por evaporación se cubrió con costales de húmedos.

Se colocó los paneles es decir las 2 compuertas con 4 fierros de ½" para sujetar. También se usó prensas.

La compactación se realizó en capas de 10 cm de espesor.

La altura de caída de los mazos fue de 80 cm 40 golpes en la parte central con el mazo de 10 kg y 20 golpes en las esquinas y perímetro con el mazo de 9,5 kg.

La fabricación de la segunda parte del murete fue a los 7 días de la primera.

Ensayo Compresión Diagonal

Se ensayó los muretes a los 28 días.

Mismo día se ensayará a compresión simple el cubo respectivo de cada murete.

Celda de carga de 50 ton.

Dos LVDT`s.

Dos graficadores.

Rótula.

Amplificadores.

Ensayo

Solamente los muretes con junta usarán un LVDT en el sentido diagonal. La velocidad de aplicación de carga es de 200 kg/min. Para los muretes con junta los dos graficadores darán la gráfica Cargas versus Deformación diagonal.

$$v = \text{Carga máxima (kg)} / \text{Área diagonal (cm}^2\text{)}$$

Donde el Área diagonal es Longitud diagonal x espesor. Este valor de área fue el promedio de 3 muretes.

Módulo de corte

$$G \text{ (Kg/cm}^2\text{)} = \frac{v_m \text{ (50\%)} - v_m \text{ (15\%)}}{y \text{ (50\%)} - y \text{ (15\%)}}$$

Tabla de humedades de los cubos a los 28 días

Suelo	Curado	Aditivo (5%)	Resistencia al corte v(Kg/cm ²)	Dispersión (%)	Humedad de fabricación (%)	Humedad de ensayo (%)	Peso unitario (ton /m ³)	Edad de ensayo (días)
PUCP	NO	-	1,79	4,8	16,9	7,4	2,02	28
PUCP	NO	Cal	0,87	18,6	17,4	7,3	1,87	28
PUCP	NO	Cemento	1,55	24,2	15,2	6,9	1,9	28
PUCP	SI	-	1	29,5	15,2	6,2	1,92	29

PUCP	SI	Cal	0,81	18,5	17,9	8,9	1,91	29
PUCP	SI	Cemento	1,58	21	17,3	8	1,93	28
COM	NO	-	0,59	3,5	8,6	2,6	2,09	28
COM	NO	Cal	0,53	4,7	12,3	3,6	2,03	28
COM	NO	Cal	0,85	6,8	11,7	1,9	2,05	60
COM	NO	Cemento	1,72	3,7	12,4	3,6	2,14	28
COM	SI	-	0,38	8,5	6,8	2,5	1,98	29
COM	SI	Cal	0,62	16,5	10,1	3,4	2,03	28
COM	SI	Cemento	2,74	20,5	10	5,4	2,1	28

Tabla de Resistencia a la compresión de los cubos (promedio de 3 cubos) con efecto de aditivo y curado.

Suelo	Curado	Aditivo (5%)	Resistencia con presión (Kg/cm3)	Dispersión humedad (%)	Humedad de fabricación (%)	Humedad de ensayo (%)	Edad de ensayo (días)
PUCP	NO	-	5,47	29,3	16,9	3,5	28
PUCP	NO	Cal	3,8	46,3	17,4	4,8	28
PUCP	NO	Cemento	6,87	21,1	15,2	4,3	28
PUCP	SI	-	6,8	17,9	15,2	3,9	29
PUCP	SI	Cal	5,17	36,8	17,9	4,3	29
PUCP	SI	Cemento	6,93	41,5	17,3	5,6	28
COM	NO	-	1,75	32,2	8,6	1,2	28
COM	NO	Cal	2,50	28,8	12,3	1,4	28
COM	NO	Cal	4,73	14,8	11,7	1,3	60
COM	NO	Cemento	6,63	14,3	12,4	1,9	28
COM	SI	-	2,13	19,5	6,8	1,2	29
COM	SI	Cal	2,70	19,2	10,1	1,6	28
COM	SI	Cemento	8,47	15,7	10	3,1	28

Tabla de resultados de ensayo con presión diagonal de muretes con junta (promedio 3 muretes)

JUNTA Nº	TIPOS	RESISTENCIA AL CORTE V (kg/cm ²)	DISPERSIÓN	MÓDULO DE CORTE G (kg /cm ²)	HUMEDAD DE FABRICACIÓN	HUMEDAD DE ENSAYO	EDAD DE ENSAYO
1	SECA	0,49	55,7	377,2	13,7	5,34	28
2	HÚMEDAD	0,92	7,8	504,9	13,,1	4,8	28
3	CONCRETO (e = 1 “)	0,72	30,6	541,2	13,0	4,9	29
4	PIEDRA	0,59	6,8	279,5	12,7	5,3	27
5	ONDULADA	0,48	12,6	539,6	13,2	5,2	28
6	CAÑA	0,68	24,3	395,2	13,5	5,4	29

7	ESTACAS DE EUCALÍPTO	0,83	13,3	268.5	13,6	5,6	28
---	----------------------------	------	------	-------	------	-----	----

Tabla de resultados de ensayo con presión diagonal de muretes con mezcla de suelos (Promedio 3 muretes)

SUELO	% DE SUELO PUCP EN LA MEZCLA	RESISTENCIA AL CORTE v(kg/cm ²)	DISPERSIÓN (%)	HUMEDAD DE FABRICACIÓN	HUMEDAD DE ENSAYO (%)	EDAD DE ENSAYO
COMAS-PUCP (1:0.25)	20%	0,4	17,5	6,6	2,7	28
COMAS-PUCP (1:0.5)	33%	0,49	13	8,7	2,6	27
COMAS-PUCP (1:0.75)	43%	0,52	5,6	10,2	3,7	28
COMAS-PUCP (1:2)	63%	0,89	4,6	11,1	5,0	26

Tabla de resultados de ensayos compresión en cubos de MEZCLAS DE SUELOS (promedio de 3 muretes)

SUELO	RESISTENCIA A COMPRESIÓN (kg/cm ²)	DISPERSIÓN (%)	HUMEDAD DE FABRICACIÓN	HUMEDAD DE ENSAYO (%)	EDAD DE ENSAYO
COMAS-PUCP (1:0.25)	2,27	20,7	6,6	1,2	28
COMAS-PUCP (1:0.5)	2,16	31,5	8,7	1,1	27
COMAS-PUCP (1:0.75)	2,94	19,3	10,2	2,3	28
COMAS-PUCP (1:2)	5,32	28,9	11,1	2,9	27

Resultados

Influencia del tipo de Suelo

Suelo PUCP (arcilloso) logrará mayor cohesión a comparación del Suelo COMAS (arenoso), por lo tanto, la resistencia al corte logró $1,79 \text{ kg/cm}^2 = 3 (0,59 \text{ kg/cm}^2)$ el triple de la del suelo de COMAS.

Suelo PUCP tiene una humedad 15,2% - 16,9%, mayor cantidad de agua para activar la arcilla.

Suelo COMAS tiene un rango de humedad de 6,8% - 8,6%.

Peso unitario promedio es de 2000 kg/ m^3 .

Mejor apariencia externa con el suelo PUCP arcillosa respecto al de COMAS.

Influencia del curado en suelo natural

Curado es perjudicial en suelos naturales, resistencia, y la resistencia al corte baja 40 %.

Influencia del estabilizante y del curado

El suelo PUCP no debe ser curado, no requiere de ningún estabilizante.

Suelo COMAS mejora con 5% de cemento y curado. Y más baja con suelo natural – curado.

Suelo COMAS con 5 % de Cal llegó a aumentar su resistencia a los 60 días ($0,85 \text{ kg/cm}^2$) respecto del de 28 días ($0,53 \text{ kg/cm}^2$)

La mezcla de suelos óptimo se obtiene con la de COMAS- PUCP (1:2); se incrementó 50% más respecto al suelo de COMAS NATURAL.

Se observó que el uso de la Cal y cemento mejora la apariencia externa de los muretes para los dos tipos de suelos PUCP- COMAS.

Muretes con juntas (un solo tipo de suelo, PUCP)

Se obtiene resistencias bajas respecto a los muretes monolíticos.

Se crea una zona débil y potencial de falla en la zona horizontal.

La segunda mitad se compactó a los 7 días después; teniendo una combinación de muros secos y otros húmedos.

La junta tipo 2 (húmeda y rayada) alcanzó mayor resistencia. Luego siguieron la junta de eucalipto, concreto, caña, piedra y la seca y ondulada respectivamente.

La forma de falla para la junta húmeda y la de estaca de eucalipto fue en la diagonal del murete. En la diagonal vertical de la posición de ensayo y de los otros fueron en la junta central horizontal o en una subcapa.

La junta ondulada y con caña partida no mejora la adherencia se recomienda juntas humedecidas y el uso de parantes verticales de eucalipto.

Correlación de resultados entre los ensayos de murete a compresión diagonal y cubos a compresión.

Menor resistencia a compresión en el cubo, no implica menor resistencia al corte; esto se observó en los resultados de ensayo de corte de los muretes.

Se muestra mayor mejora con cemento que Cal.

Experiencia con muros

Referencias

Junta horizontal denominado junta fría de vaciado, es decir, los bloques tenderán a deslizarse independientemente, teniendo como oposición solo a la fricción entre suelos (hiladas)

Se diseñará un refuerzo horizontal para conectar los bloques.

El refuerzo vertical tratará de mantener unidos los bloques de tapias y las subcapas de las diferentes hiladas.

Se tomó como referencia la metodología de elaboración del Valle del Mantaro, donde usaron además refuerzos de eucalipto con fines de disminuir las fisuras de secado.

El motivo de usar Eucalipto fue que es de gran abundancia en la Sierra Central.

Objetivos

Ver y analizar el efecto del refuerzo en la obtención de la fuerza cortante.

Analizar la influencia del tipo de suelo en la resistencia al corte.

Comparar la influencia de tipo de SUELO PUCP y la mezcla de SUELO PUCP-COMAS (1:0.5)

Comparar la fuerza cortante usando refuerzo vertical de eucalipto y caña brava.

Comparar el refuerzo de doble malla contra el refuerzo solo vertical.

Características

Cimentación hecha de PIRCA (piedra ligada con barro)

La fuerza horizontal que se aplicará al muro será distribuida de manera triangular.

Los parantes verticales serán anclados a la cimentación.

	EUCALIPTO		CAÑA BRAVA		
σ_u compresión // a la fibra	391,2	kg /cm ²	σ tracción	2680	Kg/cm ²
σ_u compresión perpendicular a la fibra	94	kg /cm ²	E	421190	Kg/cm ²

σ corte // a la fibra	98,2	kg /cm ²	Ensayo de hinchazón	Incremento de peso	19%
E compresión // a la fibra	10740	kg /cm ²	Ensayo de hinchazón	Incremento de espesor	21%
Módulo de ruptura (ensayo de flexión estática)	1025	kg /cm ²			
E flexión estática	123000	kg /cm ²			
w %	15	%			

Muros

Se realizaron 6 muros en total de dimensiones de 2 m de largo 2 m de alto y 0,4 de espesor.

Muro	1	2	3	4	5	6
Suelo	PUCP	Mezcla	Mezcla	Mezcla	PUCP	Mezcla
Junta	Seca	Húmeda	Húmeda	Húmeda	Seca	Húmeda
Refuerzo	-	-	I Eucalipto	II Eucalipto	II Eucalipto	II Caña Brava

Materiales

Encofrado de madera de dos diferentes dimensiones.

1,5 x 0,5 x 0,4 m.

0,5 x 0,5 x 0,4 m.

En total el largo del muro fue de 2 m.

Se colocó una viga base para el muro.

Comba de 10 kg, mazo de madera para la última capa.

Nivel, plomada y cordel.

Comba de hierro (5 kg) para compactación de los alrededores.

Buggy, sacos, latas, escalera, pico, lampa, alambre # 16 y clavos.

Variabes

Se extraerán cubos de los muros construidos para ensayarlas.

Para la humedad se tomará tres muestras de cada hilada.

Construcción

El proceso constructivo de la compactación trata de ser similar al del Valle de Mantaro. Y además cada hilada será luego de 7 días para evitar una propagación de la fisura vertical.

La cimentación será con piedras de canto rodado de 4" a 10" asentado con barro (pirca)

El ancho del sobrecimiento también será de pirca y esperaremos 10 días para vaciar la primera hilada del tapial.

La tierra se tamizará con una malla de 2". Se le adicionará césped en porcentaje de 0,25% del peso. La cantidad de agua se determinará con el ensayo en campo indicado por CRATERRE.

Peso por hilada del tapial será de $2000 \times 2 \times 0,5 \times 0,4 = 800$ kg.

Se colocó el encofrado de madera con los fierros pasantes y la altura será de 0,65 m compuesto de 0,15m. de apoyo y 0,5 de tapial.

La junta húmeda se logró rociando agua.

El ancho del tapial será la suficiente para que una persona pueda entrar en el molde.

Se compactó con una comba 10 kg hasta que ya no penetró. Luego se utilizó el mazo de madera para obtener una superficie plana.

Se completó la segunda parte longitudinal del tapial de 0,5 m.

Se utilizó alambre # 16 para el amarre del refuerzo o también era posible usar cuero de vaca o nylon.

Ensayo de corte

Las fuerzas aplicadas se colocaron de manera triangular con un sistema de masa repartida. Se colocarán a la altura de la mitad de la 4ta, 3ra y 2da hilada.

Para lograr una distribución lineal de fuerzas de inercia, se logró transmitir mediante tirantes de acero con mayor rigidez.

Los tirantes serán de 3/4 ", 5/8", 1/2" de arriba hacia abajo.

Equipo necesario

MTS (actuador dinámico de 500 KN)

1 celda de carga de control (500 KN)

3 celdas de carga de 200 KN.

3 LVDT de 500mm.

3 LVDT de 100mm.

1 LVDT de 200mm.

Ensayo

Se colocó yeso en los puntos de aplicación de carga.

Aplicamos tirantes de 10, 15, 20 kg de arriba hacia abajo.

Velocidad de ensayo de 2mm/min.

Se paralizó cuando haya fisuras considerables.

Se tomó una lectura por segundo.

ÁNALISIS ELÁSTICO

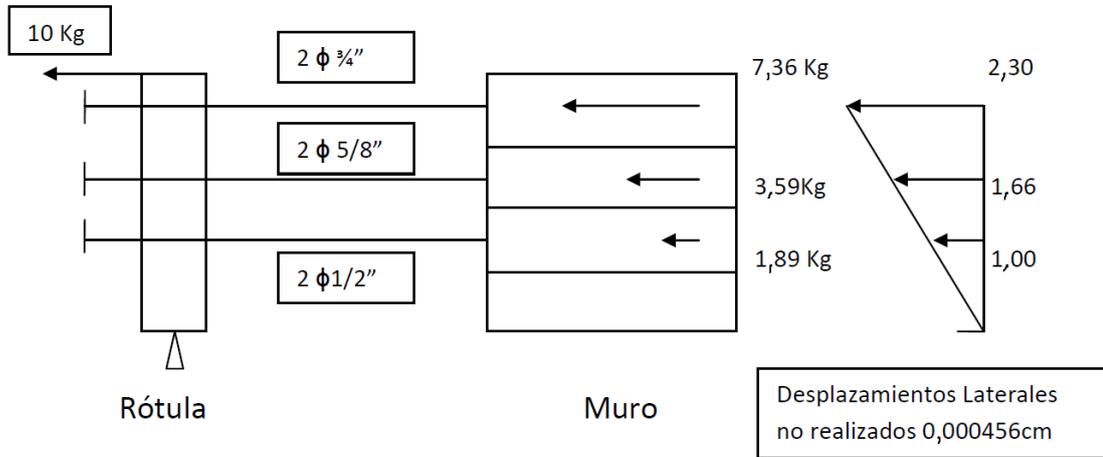


Diagrama de desplazamientos tomadas y deslizamientos en las juntas

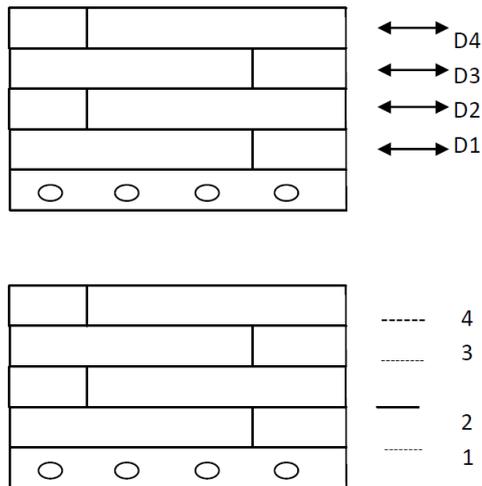


Tabla de humedades de los muros al instante de la compactación

Muro	Hila				Promedio (%)
	Inferior	Segundo	Tercero	Superior	
1	16,6	16	14,8	15	15,6
2	13,0	12,9	10,8	12	12,2
3	13,0	13,1	13,3	12,7	12,9
4	13,5	10,6	10,5	10,7	11,3
5	14,7	15,8	14,6	15,5	15,2
6	13,2	11	11,3	12	11,9

Tabla de valores de resistencia a la compresión de los cubos extraídos de los muros

Muro	Hila				σ_c (kg/cm ²)	Dispersión (%)
	Inferior	Segundo	Tercero	Superior		
1	9,2	11,4	9,3	6,8	9,2	20
2	9,6	7,3	6,7	12,,8	9,1	30
3	13,2	7,5	7,1	11,8	9,9	30
4	10,6	9,3	6,5	5,8	8,1	28
5	8,0	8,8	6,8	5,3	7,2	21
6	6.8	5,6	8,0	8,0	7,1	16

Resultados muros

Los ensayos se realizaron a los 35 días.

Las humedades del SUELO PUCP estuvieron en el rango de 15,2 % a 15,6%, mientras que el SUELO MEZCLA PUCP-COMAS fue de 11,9% a 12,9%.

Se relacionaron las 2 fuerzas (F2 y F3) con F1 en el rango elástico, porque se buscó una distribución de fuerzas de tipo triangular.

Las fallas por deslizamiento producen que se pierda la relación triangular.

Las relaciones de desplazamiento laterales de D2/D1, D3/D1, D4 /D1 son constantes, por lo que se concluye que el ensayo ha sido con desplazamiento controlado.

Los muros sin refuerzo M1 y M2 desarrollarán una falla típica por “corte-fricción”.

La comparación de resistencias a compresión de los cubos extraídos del tapial tiene valores diferentes a los de los cubos elaborados en el primer experimento. Esto se debe a que la resistencia aumenta por la compactación realizada en los tapiales.

Muros no reforzados M1 y M2

Tabla X

Junta	MURO 1		Junta	MURO 2	
	vm	σ_{pp}		vm	σ_{pp}
1	0,17	0,30	2	0,22	0,30
2	0,10	0,10	3	0,20	0,20
			4	0,15	0,10

Relacionamos “vm “y “ σ_{pp} ” con una correlación lineal.

Muro 2: $vm = 0,12 + 0,35 \sigma_{pp}$

Muro 1: $vm = 0,12 + 0,35 \sigma_{pp}$

Se deduce que se tiene un coeficiente de fricción $\mu_e = 0,35$

Comparación de Muros no reforzados

Se puede simular 1 sola fuerza en muretes con junta que soporten una carga vertical que simule el peso de las hiladas superiores en un muro a escala natural.

Muro 2: Se observó un mejor comportamiento a fuerza cortante.

Valor promedio se obtuvo de la siguiente manera:

$$G = h \cdot \Sigma Vi \text{ (Kg/cm}^2\text{)} A \cdot \delta \text{ sup.}$$

Donde, h = altura (50cm)
 ΣVi = sumatoria de cortantes (4 hiladas) A = área (8000 cm²)
 $\delta \text{ sup}$ = desplazamiento en la hilada superior (LVDT 1)

Los módulos de corte "G" son

	Muros	Muretes con junta	
Muro 1	145 Kg /cm ²	Seca	377 Kg /cm ²
Muro 2	436 Kg /cm ²	Húmeda	505 Kg /cm ²

Se concluye que la mayor rigidez se da en el muro 2 y junta húmeda. Las fisuras se dan de manera más controlada en el muro 2 por ser una mezcla se suelos.

Comparación de Muros Reforzados M4 y M5

Los dos son con refuerzo tipo II.

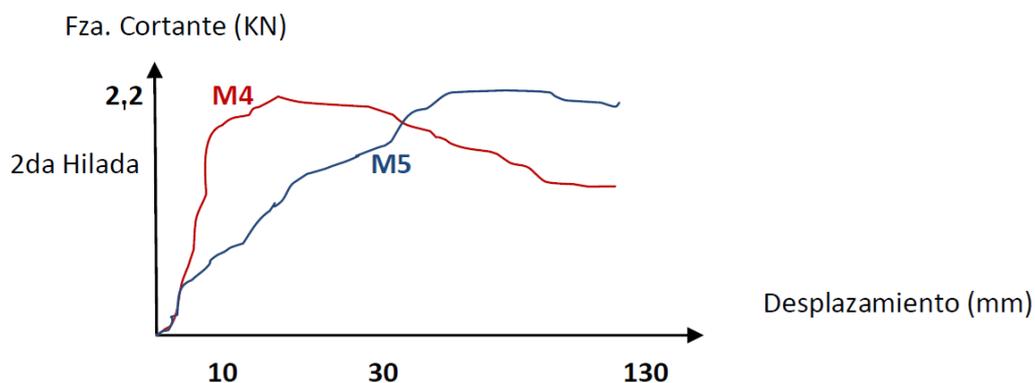
Se observó un mejor comportamiento con el Muro 4 (junta húmeda) que con el Muro 5 donde se produjo deslizamientos en todas las juntas.

Refuerzo vertical adecuado en el Muro 4 donde se observa falla por tracción diagonal. No se puede correlacionar la resistencia al corte con el peso propio (σ_{pp})

Se presentó menor rigidez inicial en el "Muro 5", pero parecidas resistencias máximas.

Se observó grandes deslizamientos en los dos muros, lo que generó también grandes grietas.

Gráfico Fuerza cortante vs Desplazamiento (mm)



Comparación de muros con suelo arcilloso M1 y M5

El Muro 1 falla en la junta 2 por fricción.

En el Muro 5 se observa redistribución de desplazamientos.

El Muro 5 logró mayor resistencia que el Muro 1.

Se observó menor rigidez inicial en el Muro 5, posiblemente por las fisuras que se formaron antes del ensayo en zonas alrededor del refuerzo vertical.

Se recomienda una mayor longitud de anclaje vertical por el momento de volteo (30 cm es muy poco)

Comparación de muros con mezcla de suelos M3, M4 y M6

Se recomienda refuerzo tipo II, porque controla el desarrollo de las grietas.

Los Muros 4 y 6 presentan igual rigidez inicial (hasta los 5 mm de desplazamiento) luego de esto el Muro 4 tiene alcanza una mayor cortante (13% más)

En ambos casos se observa que se levanta el cimiento, porque fallo los anclajes verticales (travesaños)

Se recomienda usar Eucalipto.

Comparación de muros reforzados y sin refuerzo

Tabla Y

Muro	Refuerzo	Vmax (ton)	Desplazamiento relativo (mm) Junta 2 para Vmáx.	Vmax / Vmuro 2
2	-	1,77	2,20	1
3	Tipo I	1,96	44,50	1,11
4	Tipo II	2,18	8,78	1,23
6	Tipo II	1,92	13,74	1,08

Mejor cortante "V" en el muro 4, y por momentos también.

Se recomienda utilizar un enmallado en las dos direcciones como refuerzo, ya que, el comportamiento post-agrietamiento mejora.

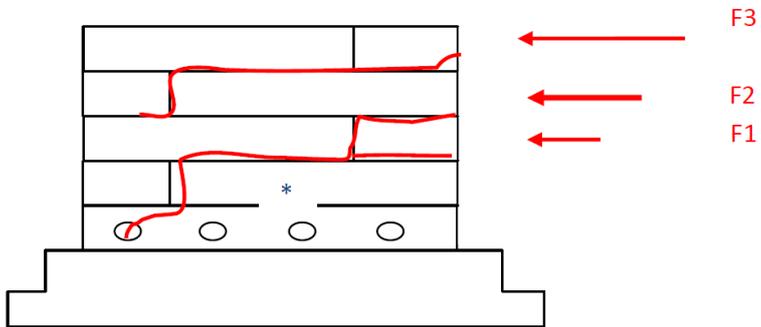
El Muro 4 es mejor que el Muro 1, porque el muro 4 tiene una falla por tracción diagonal que es mejor que una falla por deslizamientos del Muro 1.

Los momentos alcanzados por volteo son mejores en el Muro 4.

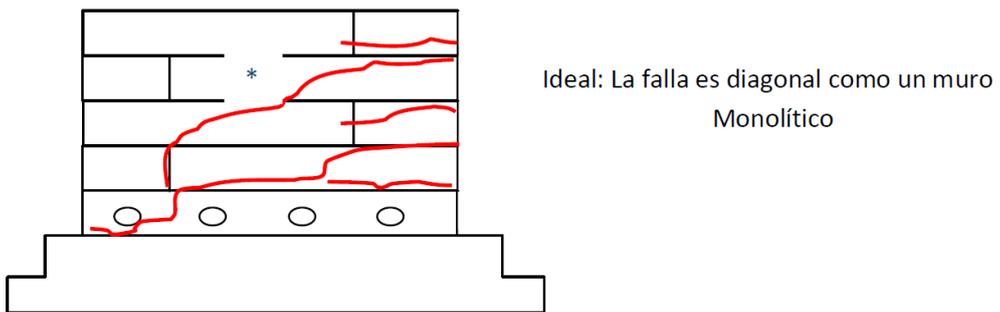
Momento muro 4 = 173% Momento muro 1.

Desarrollo de los agrietamientos en los muros, el agrietamiento inicial se denota por el símbolo *

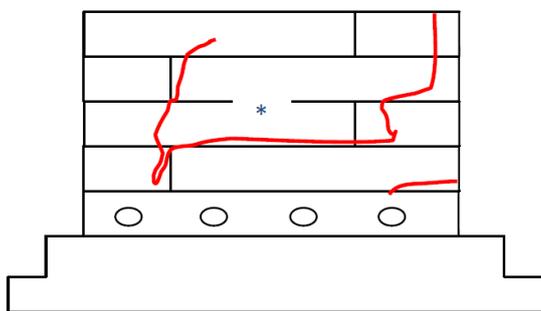
Muro 1



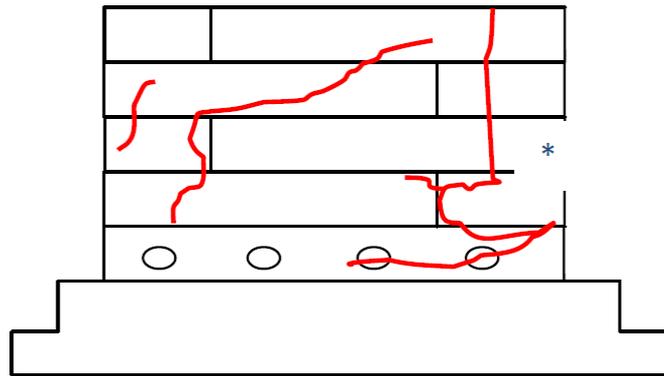
Muro 2



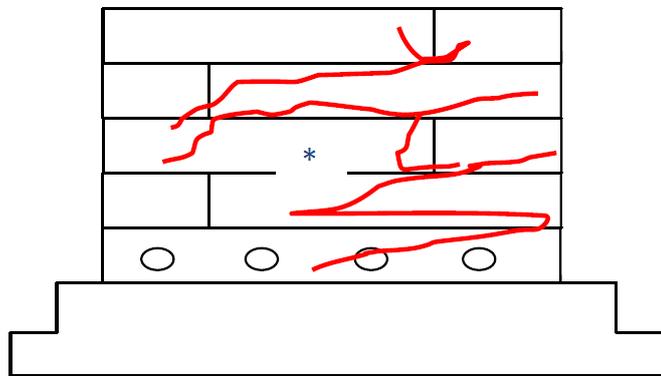
Muro 3



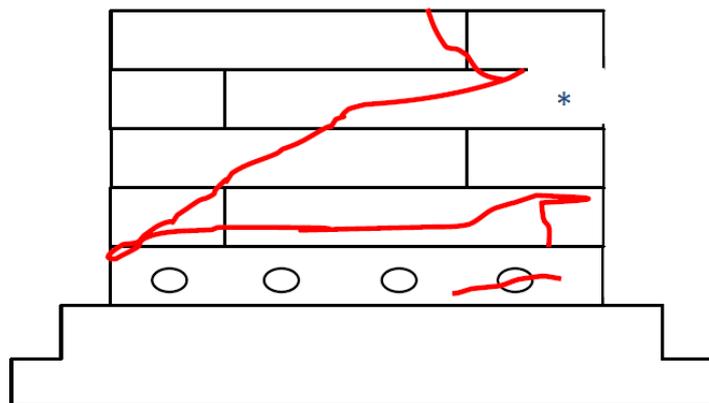
Muro 4



Muro 5



Muro 6



Anexo 2: Comparación de la resistencia de la mampostería de tapial con adobe

Nomenclatura

Suelo PUC: Suelo del Campus Universitario.

Suelo PUCA: Suelo PUCP + Arena.

Suelo PUCI: Suelo PUCP + Ichu.

Suelo PUCC: Suelo PUCP + Césped.

Suelo PUCP: Suelo PUCP + Piedra.

Objetivos

Se analizó las propiedades físicas de los suelos

Análisis Granulométrico.

Límites de Atterberg.

Gravedad Específica.

Humedad.

Próctor Estándar.

Compresión diagonal en muretes 60 x 60 x 15 cm con suelos arcillosos y arenosos.

Rango de humedades de tapial para una adecuada compactación.

Determinar cómo repercute la compactación en la resistencia y también determinar el número de golpes por capa.

La influencia de los aditivos naturales como el ichu, arena y grava para lograr mayores valores de resistencia.

Análisis en compresión simple de cubos de 10 x 10 x 10cm. Obtener la resistencia a compresión simple (σ_c) y módulo de elasticidad (E)

Se ensayarán muretes de 60x 60 x 15 cm monolíticos y muretes en dos partes de 60 x 30 x 15 cm para analizar diferentes tipos de juntas.

Determinar los suelos apropiados para los muros de 2 x 2 x 0,2 m.

Comparar la resistencia de muros armados con caña partida y caña vertical.

Comparar las propiedades mecánicas de las mamposterías de tapial y adobe.

Procedimientos Constructivos

Se revisó los procedimientos constructivos de los países como Ecuador, Venezuela, Francia, España y otros.

Los procedimientos constructivos son similares, varían en el uso de diferentes aditivos naturales.

Se tomó como referencia las recomendaciones tomadas por los autores A. Vildoso y F.M. Monzón.³⁷

Materiales

Se tomó dos muestras M1 y M2 del suelo PUC para promediar los valores de análisis de sus características físicas.

Ensayo de granulometría

Se realizó el tamizado por diferentes mallas para la parte granular del suelo. La norma de referencia fue la de ASTM D421-58. Se dedujo un suelo bien graduado.

Para los fines se consideró el ensayo de hidrometría (ASTM D422-63) teniendo un suelo PUCP muy fino porque 70% pasa la malla #200.

Límites de Atterberg

Se consideró la norma ASTM D423-66, ASTM D424-59. El límite líquido (LL) fue de 30% y el límite plástico (LP) fue de 13,5%. Con lo que se deduce que el Índice de Plasticidad fue de 16,5%.

Para determinar el límite de contracción se consideró la norma ASTM D427-61. Obteniéndose un valor de humedad de 15,5% y un Límite de contracción por cambio de volumen versus cambio de humedad de 2,85%.

Según Casagrande el Suelo PUC fue arcilla inorgánica con plasticidad media.

Según los límites de Atterberg se tendría una humedad óptima (w_{opt}) igual a 13,2% para el ensayo de compactación estándar.

La gravedad específica fue de $G_s=2,66$, teniendo como referencia la norma ASTM D854-58.

La humedad promedio fue de 8%, norma utilizada ASTM D22216-71.

Próctor Standard

Se determinó la humedad óptima y la densidad máxima con la norma ASTM T99-70.

Tipo de Suelo	Humedad Óptima	Y máx (gr/cm ³)
PUC	14,0	1,78
PUCA (1 : 0,5)	12,6	1,87
PUCA (1 : 1,2)	11,9	1,97
PUCA (1 : 2,0)	11,6	2,02

Clasificación del Suelo PUC

AASHTO: Arcilla parda-oscuro A-6 (7). Suelo CL ó CH.

SUCS: Arcilla inorgánica con plasticidad baja y media.

Arena

Arena bien graduada.

G_s = 2,62.

AASHTO: Suelo A-a-1, arena SW.

SUCS: arena bien graduada y limpia SW.

Piedra

TM ½" (piedra chancada o partida).

Ichu

Planta perteneciente y abundante en la Sierra Central.

Agua

Sirve principalmente para activar la arcilla, y además debe de estar libre de impurezas.

Instrumentos

Encofrado

Se usó madera Mohena.

Se usó tablones y prensas manuales.

Agujas pasantes de ½" de diámetro. En el caso de los muretes se usó en total 4 varillas en los extremos y 6 varillas para los muros, el diámetro fue de 1 ½".

Se observó que la fuerza producida por la compactación ocasionaba empujes laterales, lo cual, se aseguró con un tablón a cada lado de 1 1/2" de espesor.

Para el caso del encofrado lateral para el muro se usaron 5 soportes verticales cada 0,5 m. aproximadamente.

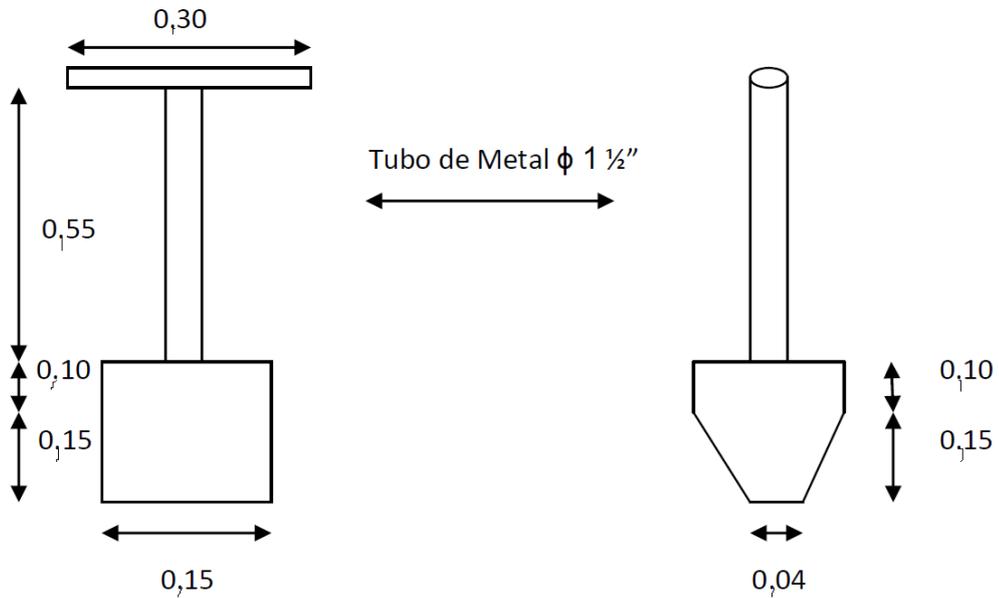
Pisones

Tubos de metal huecos de 1 ½" y 1" de diámetro.

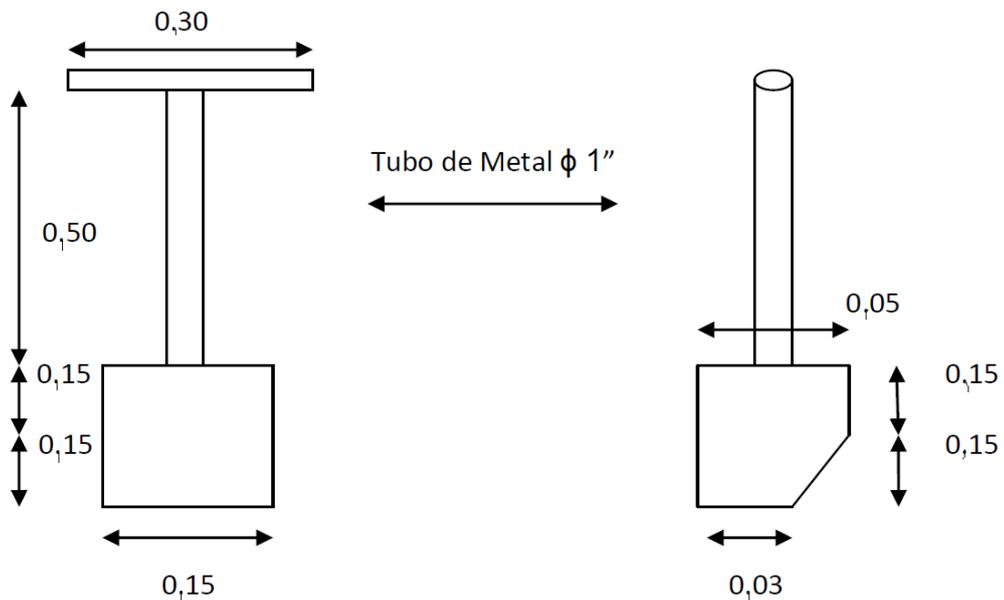
Los pesos fueron de 10 Kg (pisón 1) y 9,5 Kg (pisón 2)

El pisón 1 fue para compactar la zona central y el pisón 2 fue para compactar el pisón 2.

Pisón 1 (dimensiones en metros)



Pisón 2 (dimensiones en metros)



Procedimiento constructivo

Se contrató a personal del Instituto Nacional de Cultura, que ahora sería el Ministerio de Cultura.

El suelo fue agregado con agua de manera experimental por los trabajadores y batido con los pies de ellos, logrando una humedad experimental de $w_o = 20\%$.

Preparación de Tierra

El peso del suelo compactado aumenta logrando un peso específico de 1800 Kg/m³. Este aumento es de alrededor de 20%.

Se eliminó las piedras de tamaño mayor a 1½" y también las raíces y terrones muy grandes.

El suelo se colocó en forma de un cono y se regó agua lateralmente, al centro de esta se colocó agua para que se pueda mezclar la arcilla con agua lentamente, proceso que dura normalmente un día, además se cubrió con costales de yute. Se batió un poco antes de dejarlo "durmiendo" y al día siguiente se batió un poco mezclando todo homogéneamente.

Colocación del Encofrado

Los muretes de dos partes se construyen luego de tres días la segunda parte.

Los muretes y muros se apoyan en unas vigas de concreto.

Los muros son de dos tipos: Los de 1,50 m de largo y los de 0,50 m de largo.

Los muros tienen 5 niveles o hiladas de 40 cm de altura cada una.

Se debe verificar la verticalidad y horizontalidad en cada momento con los niveles.

Se ajustan las paredes laterales con unas agujas de ½" de diámetro.

Llenado

Todo el llenado se realizó en capas de 10 cm de espesor compactado.

Compactación

Se deja caer el pisón a una altura de 80 cm.

La distribución de golpes es con el pisón 1 para la zona central y el pisón 2 para la zona de los bordes.

La compactación fue de tipo dinámica por impacto.

Desencofrado

Se retiran las prensas y se aflojan los tornillos. Con la ayuda de un martillo se desmolda el encofrado con cuidado deslizándolos.

Se usó desmoldantes como petróleo y arena fina para que no se quede pegado el encofrado a los muros.

Variables consideradas

Composición del suelo

Suelo PUC: Arcilla inorgánica con plasticidad entre baja y media (CL)

En el Perú tenemos suelos arcillosos en poca cantidad por eso se consideró el análisis de una mezcla de suelo PUC con arena gruesa.

Tabla de Proporciones de suelo arcilla y arena

Suelo PUC + Arena gruesa	PUCA	1 : 0,5
Suelo PUC + Arena gruesa	PUCA	1 : 1,2
Suelo PUC + Arena gruesa	PUCA	1 : 2,0

Se clasificó el suelo de dos formas

Clasificación 1

Arcilla < #200

Arena < #4

Grava > #4

Suelo	Proporción	Arcilla	Arena	Grava
PUCA	1 : 0,5	46,3 %	50,0 %	3,7 %
PUCA	1 : 1,2	31,7 %	64,2 %	4,1 %
PUCA	1 : 2,0	23,4 %	72,3 %	4,3 %

Clasificación 2:

Arcilla y limo < #40

Arena gruesa > #40

Suelo	Proporción	Arcilla y limos	Arena
PUCA	1 : 0,5	65,3 %	34,7 %
PUCA	1 : 1,2	50,0 %	50,0 %
PUCA	1 : 2,0	40,6 %	59,4 %

Programa experimental

Muretes monolíticos

Se considerarán 69 muretes con cambios de humedad, compactación y aditivos naturales.

Murete	Descripción		
M1 al M6	Suelo PUC	-	Variable: Humedad (13% – 22%)
M7 – M12	Suelo PUCI	Compactación: 60 golpes por capa	Variable Ichu: 0.5%, 1% y 2%
M13 – M21	Suelo PUCA	Compactación: 60 golpes por capa	Variable Arena: 1 : 0,5, 1 : 1,2 y 1 : 2,0
M22 – M24	Suelo PUCP	Compactación: 60 golpes por capa	Variable Grava
M25 – M27	Suelo PUCI	Compactación: 60 golpes por capa	Variable Ichu: 1% , 2%
M28 – M30	Suelo PUCA	Compactación: 60 golpes por capa	Variable Arena: 1 : 2,0
M31 – M48	Suelo PUC	Humedad: 17% - 20%	Variable Compactación: 20 – 120 golpes por capa
M49 – M54	Suelo PUC	Compactación: 60 golpes por capa	Variable: Agua e Ichu en subjuntas
M55 – M69	Suelo PUCA y PUCI	-	Variable: Agua en Subjuntas. Incremento de humedad, Ichu 0,25% y 0,5%. Arena

Humedad

Tipo de Suelo		Humedades (%)
PUC		13,2 – 22,3
PUCA	1 : 0,5	10,2 – 17,5
PUCA	1 : 1,2	9,0 – 14,4
PUCA	1 : 2,0	6,8 – 11,4
PUCI	0,25 %	20,0 – 20,7
PUCI	0,5 %	14,8 – 21,7
PUCI	1 %	17,3 – 19,2
PUCI	2 %	18,4 – 22,8
PUCP		13,9 – 15,2

Muretes con junta:

Muretes	Aditivo en la Junta
MJ 1 – MJ 3	Ninguno
MJ 4 – MJ 6	Ichu
MJ 7 – MJ 9	Grava 1"
MJ 10 – MJ 12	Piedra 2"
MJ 13 – MJ 15	Gravilla ¼"
MJ 16 – MJ 18	Caña Partida

Muros a escala natural:

Muro	Características
T1 y T2	Suelo PUCI 0,25% Agua en juntas y subjuntas. Piedra de 2" en las juntas.
T3 y T4	Suelo PUCI 0,25 % Agua en juntas y subjuntas. Caña partida en las juntas. Refuerzo vertical de caña cada 40 cm.
T5	Suelo PUCI 0,25 % Agua en juntas y subjuntas.
T6	Suelo PUCI 1 : 0,8 % Agua en juntas y subjuntas.
T7	Suelo PUCI 1 : 0,5 % Agua en juntas y subjuntas.
T8	Suelo PUCI 1 : 1,2 % Agua en juntas y subjuntas.

Resultados de ensayos

Tabla de ensayos de compresión axial en cubos

Identificación	Tipo de Suelo	Carga (kg)	Área (cm ²)	Sigma σ_c (kg/cm ²)	σ_c promedio (kg/cm ²)	Módulo de Elasticidad (kg/cm ²)	E promedio (kg/cm ²)	Edad (días)
C -1 -1	PUC	3375	128,82	26,20		-		63
C -1 -2	PUC	2400	123,17	19,49	20,59	1263	1238	63
C -1 -3	PUC	2050	127,53	16,07		1213		63
C -2 -1	PUCI 0,5%	3675	129,95	28,80		1415		59
C -2 -2	PUCI 0,5%	3750	124,3	30,17	30,61	1213	1434	58

C -2 -3	PUCI 0,5%	4375	131,10	33,37		1673		58
C -3 -1	PUCI 1%	1850	113,36	16,32		577		58
C -3 -2	PUCI 1%	1550	104,00	14,90	14,70	611	675	58
C -3 -3	PUCI 1%	1300	100,98	12,87		837		58
C -4 -1	PUCI 2%	2250	119,90	18,77		300		51
C -4 -2	PUCI 2%	2500	113,30	22,07	21,94	449	438	51
C -4 -3	PUCI 2%	2550	102,00	25,00		565		51
C -5 -1	PUCA 1:0,5	1225	107,10	11,44		665		57
C -5 -2	PUCA 1:0,5	1425	102,06	13,96	12,70	675	670	57
C -6 -1	PUCA 1:1,2	525	108,15	4,85		-		56
C -6 -2	PUCA 1:1,2	1075	110,25	9,75	8,12	479	474	56
C -6 -3	PUCA 1:1,2	1075	110,25	9,75		468		56
C -7 -1	PUCA 1:2,0	780	115,54	6,75		377		53
C -7 -2	PUCA 1:2,0	850	118,60	7,17	6,64	427	378	53
C -7 -3	PUCA 1:2,0	700	116,60	6,00		331		53
C -8 -1	PUCC	1425	100,00	14,25		550		72
C -8 -2	PUCC	1725	103,95	16,59	15,46	720	709	72
C -8 -3	PUCC	1600	103,02	15,53		856		72
C -9 -1	Tapia Incaica	925	100,94	9,16	9,16	-		

Tabla de ensayos de compresión axial en pilas

Identificación	Tipo de Suelo	Carga (kg)	Área (cm ²)	Sigma σ_c (kg/cm ²)	Módulo de Elasticidad	Edad (días)
P1	PUC	4400	438,00	10,05	1257	45
P2	PUC	5000	439,46	11,38	1508	45

Tabla de ensayos de compresión diagonal en muretes monolíticos del Suelo PUC

Identificación	# golpes	Humedad (%)	Carga (kg)	Área (cm ²)	Sigma σ_c (kg/cm ²)	Módulo de Corte (kg/cm ²)	Edad (días)	Peso Unitario (gr/cm ³)
M - 1	60	16,7	1750	1263,7	1,38	1869	28	1,88
M - 2	60	22,1	2760	1216,9	2,27	1697	28	2,04
M - 4	80	16,0	2760	1233,9	2,24	1836	25	2,01
M - 5	50	14,5	1450	1241,2	1,17	417	25	1,99
M - 6	60	13,2	890	1273,8	0,70	-	25	1,80
M - 31	30	19,0	2180	1180,2	1,85	-	40	1,85
M - 32	40	17,4	1200	1223,5	0,98	-	40	1,70
M - 33	50	17,5	1500	1232,9	1,22	-	34	2,05
M - 34	60	17,4	1800	1257,8	1,43	-	34	1,90
M - 35	70	17,1	850	1252,7	0,68	-	34	1,79
M - 36	20	17,8	600	1250,6	0,48	-	34	1,78
M - 37	90	17,4	1770	1231,8	1,44	-	34	1,96
M - 38	40	15,1	540	1223,4	0,44	-	34	1,94

M – 40	30	21,2	1840	1236,2	1,49	-	24	2,03
M – 41	60	21,0	1680	1212,7	1,39	-	24	1,97
M – 42	90	22,3	1740	1151,9	1,51	-	24	2,03
M – 43	100	21,7	1890	1194,2	1,58	-	24	1,99
M – 44	120	19,4	1440	1271,2	1,13	-	23	2,20
M – 45	100	18,2	1770	1247,1	1,42	-	23	2,06
M – 46	80	21,4	1460	1265,8	1,15	-	23	1,98
M – 47	60	17,6	1500	1236,7	1,21	-	23	1,96
M – 48	40	21,6	1540	1237,8	1,24	-	23	2,10
M – 49	70	16,7	675	1185,1	0,57	-	18	1,81
M – 50	70	16,9	1000	1159,6	0,86	-	18	1,83
M – 51	70	16,5	975	1157,8	0,84	-	18	2,08
M – 52	70	17,5	2500	1152,3	2,17	-	17	1,92
M – 53	70	18,5	1600	1169,3	1,37	-	17	2,00
M – 54	70	17,6	2050	1166,2	1,76	-	17	1,93

Tabla de ensayos de compresión diagonal en muretes monolíticos del Suelo
PUCA

Identifi- cación	# golpes	Hume- dad (%)	Carga (Kg)	Área (cm2)	σ_c (Kg/cm2)	Módulo de Corte (Kg/cm2)	Edad (días)	TIPO	Peso Unitario (gr/cm3)
M – 13	60	11,0	470	1266,4	0,33	-	21	PUCA	1,88
M – 14	60	11,3	1300	1286,5	1,01	357	21	PUCA	2,05
M – 15	60	10,2	760	1278,1	0,59	357	21	PUCA	1,89
M – 55	70	15,8	1440	1246,5	1,16	-	23	PUCA	-
M – 56	70	15,2	1680	1219,6	1,38	-	23	PUCA	1,72
M – 57	70	14,9	1860	1215,5	1,53	-	23	PUCA	2,05
M – 64	60	17,5	2240	1223,4	1,83	1774	19	PUCA	1,90
M – 65	60	15,9	2100	1218,3	1,72	2049	19	PUCA	1,82
M – 66	60	15,9	2100	1217,3	1,73	1773	19	PUCA	1,92
M – 16	60	9,7	910	1288,7	0,71	694	20	PUCA	1,89
M – 17	60	9,0	360	1277,0	0,28	-	20	PUCA	2,03
M – 18	60	9,1	810	1295,1	0,63	544	20	PUCA	2,00
M – 67	60	14,4	1560	1280,9	1,17	1678	19	PUCA	2,05
M – 68	60	14,3	1600	1243,3	1,29	2108	19	PUCA	2,02
M – 69	60	13,9	1440	1272,8	1,13	1275	20	PUCA	1,95
M – 19	60	7,2	180	1271,7	0,14	-	18	PUCA	1,93
M – 20	60	6,8	390	1289,9	0,30	219	18	PUCA	2,03
M – 21	60	7,1	340	1259,1	0,27	291	18	PUCA	1,84
M – 29	60	11,4	880	1266,4	0,69	523	20	PUCA	2,00

Tabla de ensayos de compresión diagonal en muretes monolíticos del Suelo PUCI

Identificación	# golpes	Humedad (%)	Carga (kg)	Área (cm ²)	σ_c (kg/cm ²)	Módulo de Corte (kg/cm ²)	Edad (días)	TIPO	Peso Unitario (gr/cm ³)
M – 58	70	20,0	1850	1119,7	1,55	-	14	PUCI+0,25%	1,92
M – 59	70	20,7	1780	1210,5	1,47	-	14	PUCI+0,25%	1,84
M – 60	70	20,5	1225	1297,9	0,94	-	14	PUCI+0,25%	2,03
M – 7	60	14,9	1620	1278,1	1,27	633	22	PUCI+0,50%	2,12
M – 8	60	15,4	660	1257,1	0,53	-	22	PUCI+0,50%	1,70
M – 9	60	14,8	1960	1243,4	1,58	754	22	PUCI+0,50%	2,06
M – 61	70	21,7	1980	1182,3	1,67	-	22	PUCI+0,50%	1,85
M – 62	70	21,2	2020	1253,0	1,61	-	22	PUCI+0,50%	1,81
M – 63	70	21,2	1770	1193,5	1,48	-	22	PUCI+0,50%	1,88
M – 10	60	17,3	1680	1225,5	1,37	610	21	PUCI+1,0%	1,72
M – 11	60	17,8	900	1200,6	0,75	-	21	PUCI+1,0%	1,87
M – 25	60	19,2	1220	1246,4	0,98	193	20	PUCI+1,0%	1,83
M – 12	60	22,8	850	1268,5	0,67	-	21	PUCI+2,0%	1,55
M – 26	60	21,0	780	1271,7	0,61	-	20	PUCI+2,0%	1,75
M – 27	60	18,4	300	1250,6	0,24	-	20	PUCI+2,0%	1,63

Tabla de ensayos de compresión diagonal en muretes monolíticos del Suelo PUCP

Identificación	# golpes	Humedad (%)	Carga (kg)	Área (cm ²)	σ_c (kg/cm ²)	Módulo de Corte (kg/cm ²)	Edad (días)
M – 22	60	13,9	300	1255,8	0,24	-	20
M – 23	60	15,2	1040	1252,8	0,83	646	20
M – 24	60	14,0	870	1265,4	0,69	298	20
M – 39	100	13,5	1700	1268,6	1,34	-	34

Tabla de ensayos de compresión diagonal en muretes con JUNTA

Tipo de Suelo: PUCI 0,25%

Número de golpes: 60

Eficiencia = σ_m promedio aditivo / σ_m promedio natural

Identificación	Tipo de Junta	Humedad (%)	Carga (Kg)	Área (cm ²)	σ_m (Kg/cm ²)	Módulo de Corte (Kg/cm ²)	Edad (días)	Peso Unitario (gr/cm ³)	Eficiencia
MJ – 1	Natural	17,2	2840	1216,2	2,34	2541,7	28	2,08	1,00
MJ – 2	Natural	18,3	2800	1148,8	2,34	-	25	1,92	
MJ – 3	Natural	16,9	2400	1235,0	1,94	1840,6	25	2,04	
MJ – 4	Ichu	18,4	2420	1208,0	2,00	1675,5	25	1,91	0,77
MJ – 5	Ichu	18,2	1840	1228,6	1,50	1724,4	25	1,68	
MJ – 6	Ichu	20,0	1980	1232,7	1,61	800,6	25	1,93	

MJ - 7	Grava 1"	19,1	1980	1223,2	1,62	1701,0	20	1,94	
MJ - 8	Grava 1"	17,9	1680	1246,1	1,35	1355,7	20	1,86	0,66
MJ - 9	Grava 1"	18,0	1740	1214,1	1,43	1150,3	20	1,89	
MJ - 10	Piedra 2"	17,6	1880	1292,6	1,45	1294,1	17	1,97	
MJ - 11	Piedra 2"	18,4	1710	1251,6	1,37	1313,9	17	2,20	0,63
MJ - 12	Piedra 2"	16,9	1720	1244,0	1,38	1671,9	17	1,94	
MJ - 13	Gravilla ¼"	17,1	2080	1318,5	1,58	1413,9	17	1,97	
MJ - 14	Gravilla ¼"	17,9	1750	1231,8	1,42	1249,4	16	1,87	0,70
MJ - 15	Gravilla ¼"	17,8	2040	1236,0	1,65	1539,0	16	2,24	
MJ - 16	Caña Partid	17,2	1530	1229,6	1,24	-	16	1,85	
MJ - 17	Caña Partid	17,8	1360	1231,0	1,10	-	16	1,81	0,49
MJ - 18	Caña Partid	16,9	1140	1211,2	0,94	-	16	1,95	

Tabla de Ensayo de Compresión diagonal en Muros a escala natural

Número de golpes: 60/900 cm²

Subjuntas: Agua

Identificación	Juntas	Refuerzo Vertical	Tipo de Suelo	Humedad Promedio (%)	Carga (kg)	Área (cm ²)	σ_m (kg/cm ²)	Módulo de Corte (kg/cm ²)	Edad (días)
T -1	Piedra 2"	-	PUCI 0,25%	18,52	8481	5418,1	1,57	649	21
T -2	Piedra 2"	-	PUCI 0,25%	18,91	6088	5412,1	1,12	993	22
T -3	Caña Partida	Caña a 40 cm.	PUCI 0,25%	19,06	5286	5460,1	0,97	28	22
T -4	Caña Partida	Caña a 40 cm.	PUCI 0,25%	19,70	5230	5419,0	0,97	27	21
T -5	Natural	-	PUCI 0,25%	17,23	10287	5356,5	1,92	516	20
T -6	Natural	-	PUCI 1:0,8	13,39	6738	5494,3	1,23	742	20
T -7	Natural	-	PUCI 1:0,5	13,38	7511	5446,4	1,38	622	20
T -8	Natural	-	PUCI 1:1,2	11,52	5309	5460,0	0,97	726	21

Identificación	Carga máxima lateral (Kg)	Desplazamiento lateral para carga máxima (mm)		
		h = 1,90	h = 1,20	h = 0,50
T -1	5997	29,96	25,59	6,47
T -2	4288	37,50	27,53	11,53
T -3	3738	59,71	30,14	4,96
T -4	3689	58,19	35,36	6,46
T -5	7265	28,71	20,54	8,16

T-6	4777	12,82	975	-
T-7	5343	20,19	15,55	7,36
T-8	3754	21,61	15,17	6,79

A continuación se comparan los resultados con los datos del Proyecto AID 936/5542 realizado en la PUCP (82-84). Este proyecto estuvo a cargo de los ingenieros Julio Vargas Neumann, Juan Bariona y Marcial Blondet.

Análisis granulométrico y clasificación

Suelo	Clasificación	% Arena		% Limo	% Arcilla
		Fina	Gruesa		
Cajamarca	CL	31	8	33	28
Cuzco	CL-ML	21	20	50	9
Huancayo	ML	37	15	20	29
Huaraz	CL	23	30	25	22
Pisco	CL	48	11	29	12
PUC (Adobe)	CL	24	11	20	45
PUC (Tapial)	CL	19	11	20	50

Compresión simple de cubos

Suelo	σ_c (kg/cm ²)
Cajamarca	37,2
Cuzco	20,4
Huaraz	18,8
Pisco	19,9
PUC (Adobe)	22,5
PUC (Tapial)	20,6

Suelo	Tapial	Adobe
	σ_c (kg/cm ²)	σ_c (kg/cm ²)
PUC	20,6	22,5
PUCA 1:0.5	12,7	22,6
PUCA 1:1.0	-	17,9
PUCA 1:1.2	8,12	-
PUCA 1:1.5	-	14,7
PUCA 1:2.0	6,72	12,8
PUCA 1:2.5	-	11,4

Compresión diagonal en muretes

Suelo	σ_m (kg/cm ²)
-------	----------------------------------

Cajamarca		0,50
Suelo	Tapial	Adobe
	σ_m (kg/cm ²)	σ_m (kg/cm ²)
PUC	1,52	0,47
PUCA 1 : 0.5	1,37	1,08
PUCA 1 : 1.0	-	1,17
PUCA 1 : 1.2	0,99	-
PUCA 1 : 1.5	-	1,09
PUCA 1 : 2.0	0,42	1,28
PUCA 1 : 2.5	-	1,07
Cuzco		0,96
Huancayo		0,54
Huaraz		0,98
Pisco		0,72
PUC (Adobe)		0,47
PUC (Tapial)		1,52

Compresión diagonal en muros

Tapial				Adobe		
Suelo	Juntas	σ_m (kg/cm ²)	Desplazamiento a Carga máxima (h = 1,90m)	Suelo	σ_m (kg/cm ²)	Desplazamiento (h = 1,95m)
PUCI 0.25%	Piedra 2"	1,57	29,96	PUC	0,7	8,86
PUCI 0.25%	Piedra 2"	1,12	37,50	PUCI 2%	1,46	5,39
PUCI 0.25%	Caña	0,97	59,71	PUCI 2%	1,47	5,15
PUCI 0.25%	Caña	0,97	58,19	PUCA 1:1	1,08	4,10
PUCI 0.25%	Sin aditivo	1,92	28,71	PUCA 1:1	1,17	5,14
PUCI 1:0.5	Sin aditivo	1,38	20,19			
PUCI 1:0.8	Sin aditivo	1,23	12,82			
PUCI 1:1.2	Sin aditivo	0,97	21,61			

Conclusiones

El aumento de la humedad en todos los suelos produce un incremento a la compresión diagonal del tapial. Teniéndose un Límite Máximo para el suelo PUC 20 %, produciéndose deformaciones en los muretes con mayores valores de humedad.

Para valores de humedad en el rango de 19% - 21% no se presenta incremento de la resistencia a compresión diagonal. Mientras que para valores entre 17% - 19% si se aprecia aquello. Finalmente para valores menores a 17% no se tiene información.

Si bien el ichu controla las fisuraciones en los muretes, la resistencia a la compresión diagonal disminuye con el aumento del porcentaje del ichu. Por ello, se recomienda valores entre 0,25% y 0,5% de volumen de suelo.

En los muros y muretes se determina pérdida de la resistencia a la compresión diagonal. Sin embargo, hay que comprender que la arena controla las fisuraciones y produce superficies uniformes.

El uso de aditivos en las juntas de adherencia con el suelo es ineficiente. La adherencia suelo-suelo es mayor en los muros y muretes, logrando mejores valores de compresión de diagonal sin aditivos en las juntas.

Los aditivos naturales logran aumentar la capacidad de desplazamiento de los muros. Para el caso de la caña partida en juntas y caña vertical de 40 cm. logra duplicar los desplazamientos.

Las proporciones de ichu y arena que ayudan a controlar las fisuras en los muretes, no producen este efecto en los muros. Se requiere mayor proporción.

El ensayo de compresión diagonal en muretes es más adecuado económicamente que el ensayo en muros.

Comparación entre tapial y adobe

La arena gruesa disminuye la resistencia a compresión simple en los cubos de 10 cm de lado tanto en adobe como tapial.

En el caso de los tapias la arena gruesa disminuye la resistencia a compresión diagonal. Sin embargo, para el adobe si logra aumentar esta resistencia y controla la microfisuración. El ichu también disminuye la resistencia a compresión diagonal en el tapial, pero en el adobe aumenta.

Se aprecia mayor ductilidad en los muros de tapial que de adobe, la relación es de tres a uno. Esta relación se dio en el Suelo PUC y Suelo PUCA.

Se observó mayor valores de resistencia en los muros de Tapial que las de adobe (Suelo PUC) incluso con la adición de arena. Además se comparó también con suelos de las provincias de Cajamarca, Cuzco, Huancayo, Huaraz y Pisco.

EXPEDIENTE TÉCNICO TAPIAL MEJORADO

Daniel Torrealva Dávila

CONTENIDO

Página

MEMORIA DESCRIPTIVA GENERAL DEL SISTEMA CONSTRUCTIVO DE TAPIAL MEJORADO

Breve Descripción General del Sistema Propuesto

Aplicaciones del Sistema

ESPECIFICACIONES TECNICAS CONSTRUCTIVAS

SISTEMA CONSTRUCTIVO DE TAPIAL MEJORADO

Materiales

Dimensiones modulación y peso

Estructura interna del módulo constructivo

Proceso de fabricación

Construcción del muro

Tolerancia de geometría y ubicación de refuerzo

Almacenaje, transporte y montaje

Uniones

Selección y preparación del suelo para tapial

Construcción de muros

Colocación de refuerzos de muros

Colocación de vigas soleras

Construcción de tímpanos

Construcción de techos

MEMORIA DE DISEÑO ESTRUCTURAL SISTEMA

CONSTRUCTIVO DE TAPIAL MEJORADO

Tipología estructural y criterio de diseño

Ejemplo de distribución arquitectónica

Verificación de los esfuerzos por cargas verticales en el muro central

Cálculo de la fuerza sísmica horizontal

Diseño de muros a flexión transversal. Diseño del refuerzo de eucalipto o similar

Análisis de esfuerzo en la sección central del muro

Análisis de flexión en el poste

Análisis sísmico simplificado

Desarrollo

Verificación de los esfuerzos por cargas verticales en el muro central

Cálculo de la fuerza sísmica horizontal

Diseño de muros a flexión transversal. Diseño del refuerzo de eucalipto o similar

Análisis de esfuerzo en la sección al centro del muro

Análisis de flexión en el poste.

Análisis sísmico simplificado

CERTIFICADOS DE ENSAYOS Y ANÁLISIS INTERPRETATIVOS.

SISTEMA TAPIAL MEJORADO

Análisis de suelos

Interpretación de resultados

Comprensión diagonal de muretes

Comprensión axial de pilas

Ensayo dinámico de módulo

Construcción del espécimen

NOTAS

Descripción del ensayo

Descripción del comportamiento sísmico del módulo

Interpretación de los resultados

CONCLUSIONES

MODELO A ESCALA NATURAL SISTEMA CONSTRUCTIVO
DE TAPIAL MEJORADO

Construcción del espécimen

REQUERIMIENTOS COMPLEMENTARIOS DEL SISTEMA
CONSTRUCTIVO DE TAPIAL MEJORADO

Factibilidad de insumos

Método de control de calidad y producción

CERTIFICADO DE ENSAYO Y ANÁLISIS INTERPRETATIVOS.
SISTEMA DE TAPIAL MEJORADO

Análisis de suelos

Interpretación de resultados

Comprensión diagonal de muretes

Comprensión axial de pilas

Ensayo del módulo

Construcción del espécimen

NOTAS

Descripción del ensayo

Descripción del comportamiento sísmico del módulo

Interpretación de los resultados

CONCLUSIONES

MODELO A ESCALA NATURAL SISTEMA CONSTRUCTIVO
DE TAPIAL MEJORADO

Construcción del espécimen

NOTAS

REQUISITOS COMPLEMENTARIOS SISTEMA CONSTRUCTIVO
DE TAPIAL MEJORADO

Factibilidad de insumos

Justificación del sistema demostrando economía y originalidad

MEMORIA DESCRIPTIVA GENERAL DEL SISTEMA CONSTRUCTIVO DE TAPIAL MEJORADO

Breve Descripción General del Sistema Propuesto

El tapial es un tipo de construcción en base a tierra húmeda apisonada, de gran uso en nuestra serranía y segundo en importancia después del adobe. Por la rapidez en su construcción, las viviendas de tapial resultan más económicas que las de adobe. Sin embargo, al ser una construcción de tierra cruda sin ningún tipo de refuerzo y tener gran masa que produce fuerzas de inercia importantes, el tapial resulta vulnerable a las acciones sísmicas.

El proceso constructivo básico de la pared de tapial se mantiene en la forma que tradicionalmente se viene construyendo en cada localidad de la sierra del Perú: las dimensiones de los moldes que varían ligeramente de zona a zona, la forma, material y peso del pisón y otras herramientas y la elección de la cantera apropiada así como el contenido de humedad necesario se debe coordinar en cada caso con los maestros tapialeros de la zona quienes tienen el conocimiento de la calidad del suelo disponible para fabricar la pared de tapial así como para el enlucido de la pared.

El Sistema Constructivo de Tapial Mejorado, está orientado a incrementar la capacidad de la estructura de resistir fuerzas sísmicas a niveles compatibles con las construcciones de adobe que se ejecutan conforme a la norma NTE.080 y a mejorar la durabilidad de la estructura de tierra frente al efecto de la humedad y agua. Para el primer objetivo se propone la inclusión de refuerzos externos de madera (ver Figuras 1.2 y 1.3), la cual puede ser madera rolliza de eucalipto o madera aserrada de otra especie y la mejora de las conexiones entre muros y sistemas de entepiso o techo. Para la mejora de la durabilidad se especifica el uso de cimientos y sobre-cimientos para protección del muro de la humedad del suelo y aleros para la protección de las lluvias.

Otras especificaciones para mejorar la competencia estructural frente a cargas sísmicas y cargas verticales son limitar la esbeltez de los muros a 6 o menos, colocar arriostres verticales y vigas soleras de coronación; estas y otras recomendaciones, son adoptadas de la norma NTE.080 para construcciones de adobe.

Aplicaciones del sistema

El Sistema Constructivo de Tapial Mejorado, está orientado a su uso en construcción de viviendas de un piso (ver Figura 1.1), es de fácil construcción y muy económico por usar materiales naturales del lugar. Debido al espesor considerable de sus muros, posee excelentes características aislantes térmicas y acústicas.

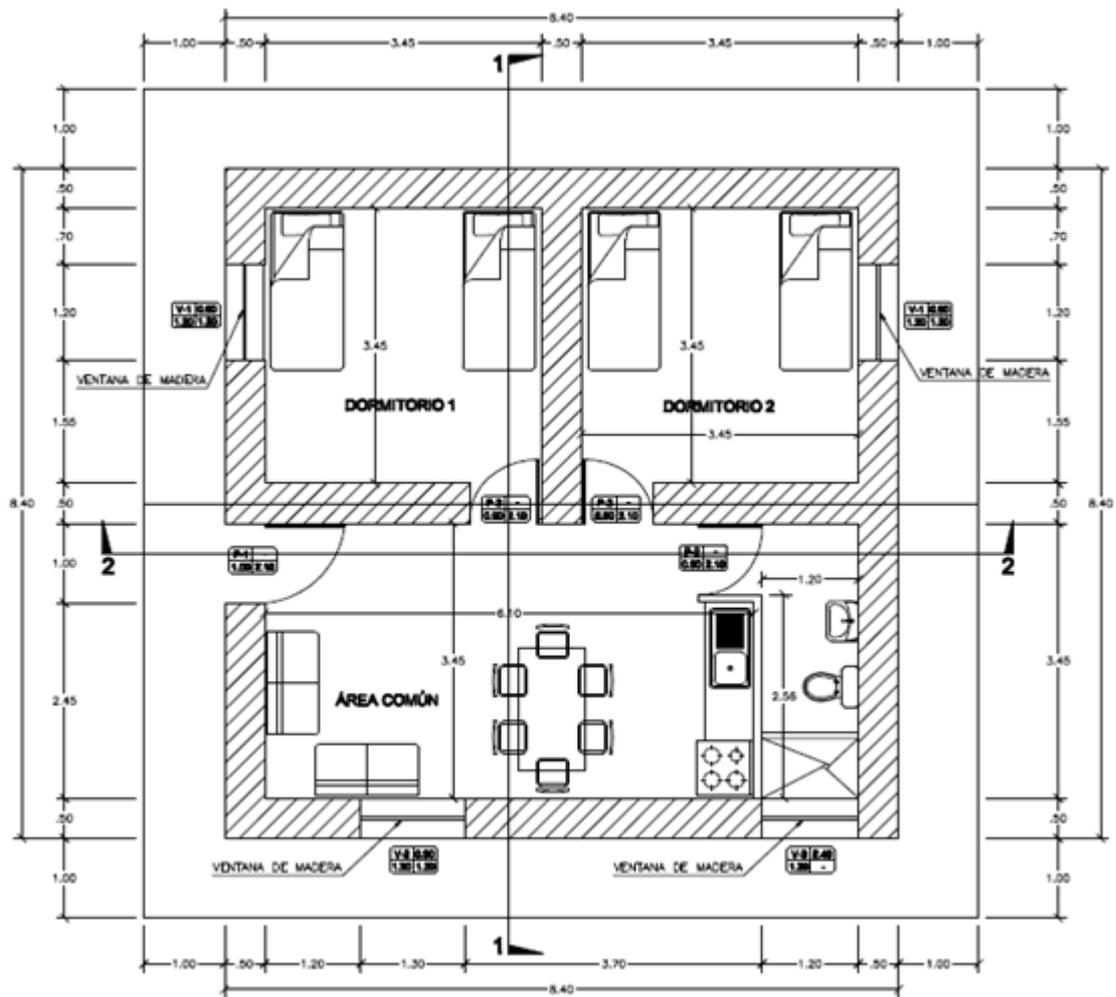


Figura 1.1. Propuesta de distribución de vivienda unifamiliar estructuralmente competente.

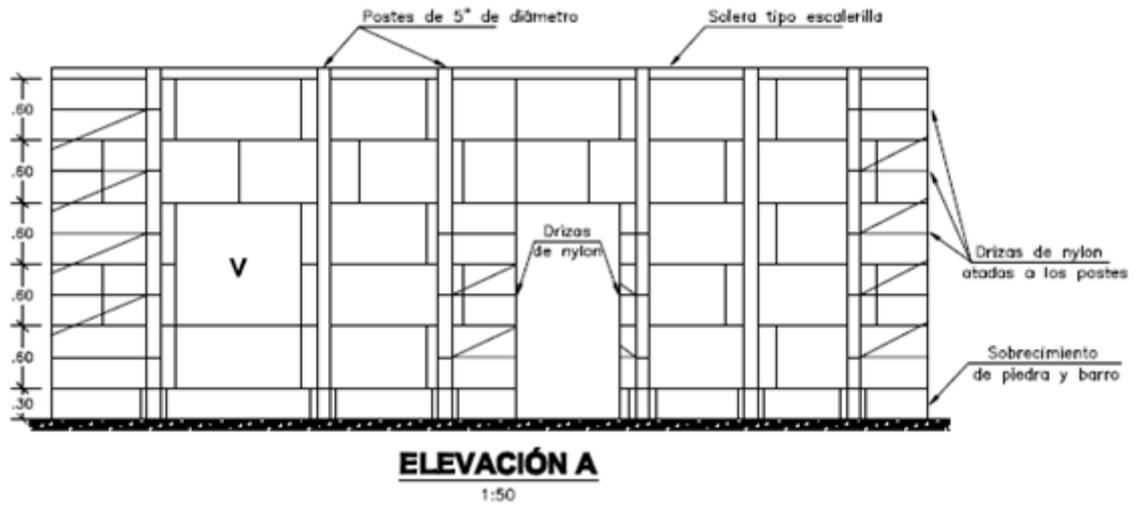


Figura 1.2 Distribución de los refuerzos verticales en elevación.

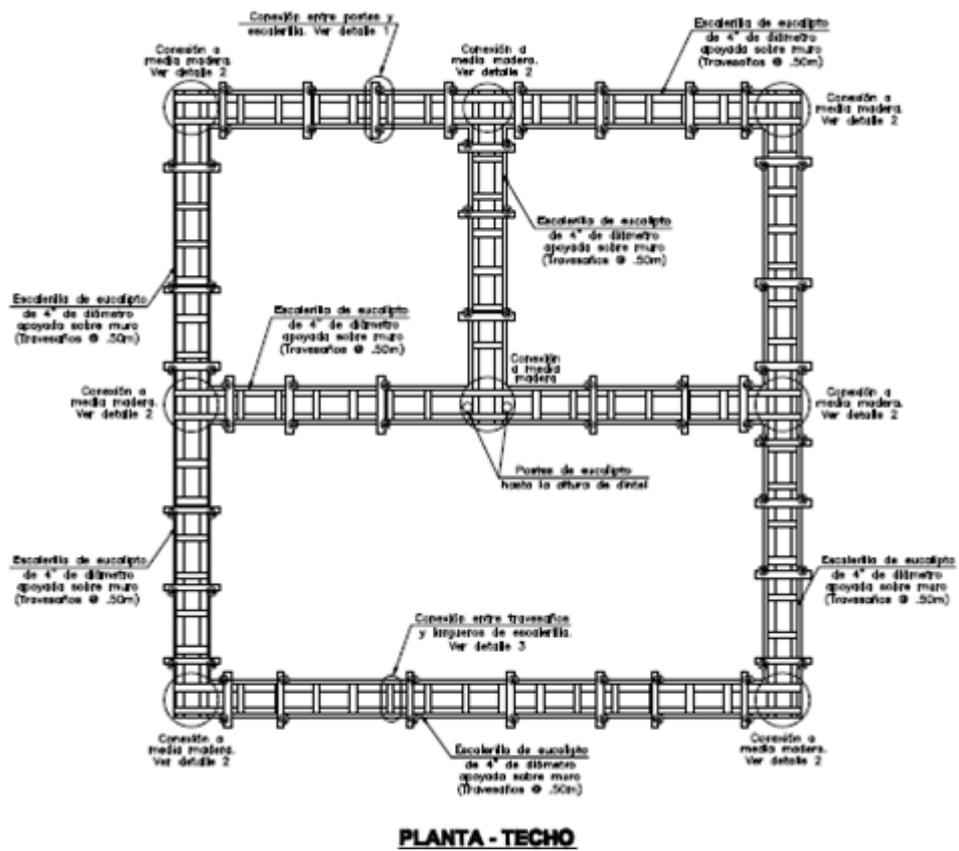


Figura 1.3 Distribución de los refuerzos verticales en planta.

Cimentaciones

El sistema propuesto requiere de un cimiento y sobre-cimiento del mismo ancho del muro y construido en pirca de piedra asentada con barro, pirca de piedra asentada con mortero de suelo-cemento o arena-cemento o un concreto ciclópeo, en todo caso lo que se busca es tener una cimentación que proteja el muro del agua del subsuelo que asciende por capilaridad y del agua de escorrentía superficial que erosiona la base de los mismos. La elección del tipo de material influye en tener una cimentación más o menos económica de acuerdo a la disponibilidad de medios económicos del propietario. En zonas donde la humedad no es un problema, en zonas donde no hay peligro de desborde de canales y ríos se puede utilizar la pirca mortero de barro y piedra, en los otros casos, se deberá hacer un cimiento y sobre-cimiento más resistente.

Elementos Verticales

Los elementos verticales son los muros de tapial reforzados con elementos verticales de madera (Ver Figuras 1.2 y 1.3), los cuales son el principal elemento estructural del sistema ya que resisten cargas verticales y horizontales de sismo. Son también los elementos que definen la distribución espacial de la vivienda.

Elementos horizontales (pisos y techos)

Los entresijos típicos están formados de viguetas de madera y un entablado también de madera. Los techos típicos a dos aguas de estructura de madera en par y nudillo, la cobertura es de cañas, barro y teja de arcilla, eventualmente se pueden utilizar otros materiales para el techo como planchas de calamina o asbesto-cemento. Si bien el sistema es para construcciones de un solo piso, es posible que por la altura de los muros se puedan colocar altillos en parte de la vivienda así como también un techo horizontal al nivel del arranque de los techos a dos aguas. Dentro de los elementos horizontales se debe incluir las vigas collar o viga solera.

Instalaciones Eléctricas

El uso de materiales y técnicas constructivas ancestrales como el tapial no debe evitar las mejoras en términos de confort a la vida moderna por lo que las instalaciones eléctricas deberán ser colocadas de forma que sean compatibles con las paredes de tapial y techos de madera. No se debe picar los muros de tapial para colocar tubos de instalaciones eléctricas

Instalaciones Sanitarias

El uso de materiales y técnicas constructivas ancestrales como el tapial no debe evitar las mejoras en términos de confort a la vida moderna por lo que las instalaciones sanitarias de agua y desagüe deberán ser colocadas de forma que sean visibles para prevenir a tiempo posibles fugas de agua las cuales son particularmente peligrosas para la estabilidad de las paredes de tapial. Las

instalaciones sanitarias no deben ir embebidas en las paredes de tapial sino adosadas a ellas.

Recubrimientos especiales

No tiene recubrimientos especiales. El enlucido típico se hace con barro arcilloso, con paja en una primera capa y mortero de cal/arena en la segunda y final. Combinaciones de otros materiales para enlucidos también pueden ser utilizados como el yeso y/o cal y/o suelo.

ESPECIFICACIONES TECNICAS CONSTRUCTIVAS SISTEMA CONSTRUCTIVO DE TAPIAL MEJORADO

Materiales

La factibilidad económica de este sistema constructivo requiere que se utilice la tierra simple del lugar en donde se va a levantar la vivienda para la construcción de muros, tal como se aprecia en la Figura 2.1.



Figura 2.1. Extracción de la tierra adyacente al lugar de construcción de muros.

Dimensiones modulación y peso

Los bloques de tapial llamados “tapias” tienen dimensiones variables de altura, largo y espesor. El espesor de la tapia define el espesor del muro y varía entre 40 y 60 cm; la altura de la tapia es constante en toda la edificación y su tamaño varía entre 50 y 70 cm; el largo de la tapia es la variable con mayor rango y su

tamaño puede variar desde 70 cm hasta 200 cm su dimensión se adecúa a las dimensiones y disposición de los muros de la vivienda así como a la ubicación de puertas y ventanas.



Figura 2.2. Molde típico de tapia.

Estructura interna del elemento constructivo

La tierra apta para la construcción de muros de tapial debe ser libre de material orgánico y contener arcillas, limos y arenas en proporciones comprendidas entre los siguientes límites.

MATERIALES	PORCENTAJES (%)
Arena/grava	de 55 a 70
Arcilla	de 10 a 20
Limo	de 15 a 25

Puede contener grava de tamaño máximo de $\frac{3}{4}$ " en proporciones entre el 10% y 20 % siempre que no dificulte la compactación manual. La tierra para fabricar el tapial debe estar humedecida, (ver Figura 2.3)



Figura 2.3. Preparación de la tierra para tapial.

Proceso de fabricación

Trazado del área de construcción

Se limpiará y nivelará la zona donde se construirá la vivienda antes de trazar la ubicación de los muros de acuerdo a los planos.

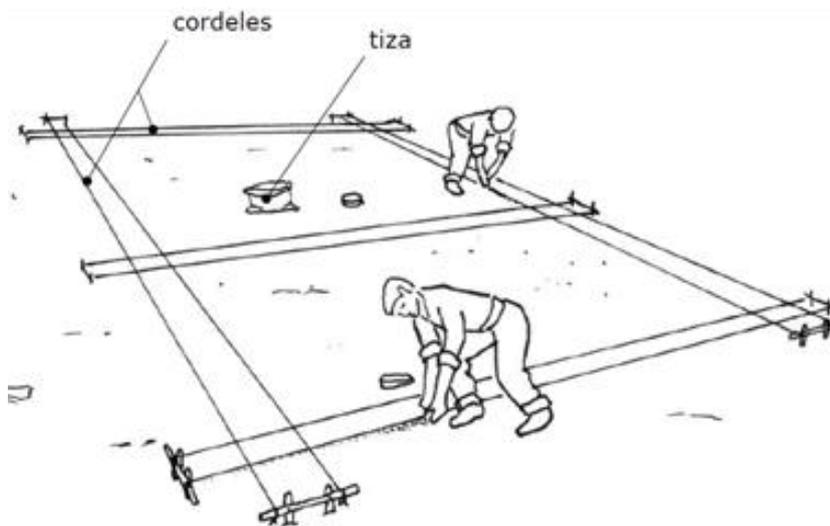


Foto 1. Trazado del área de trabajo.

Excavación para cimentación

Luego del trazo, se excava una profundidad mínima de 60 cm o hasta alcanzar el suelo natural, en ningún caso se debe cimentar sobre material de relleno. El cimiento y sobre-cimiento tienen la misma composición ya sea concreto ciclópeo, pirca asentada con mortero de barro o de cemento. El sobre-cimiento debe sobresalir del nivel del terreno exterior una altura mínima de 70 cm y del nivel de piso interior mínimo 30cm con la finalidad de proteger el muro del agua de escorrentía por lluvia u otros (Figura 2.4)

La profundidad de cimentación dependerá de la calidad del terreno, se deberá cimentar la vivienda sobre terreno firme. La profundidad mínima será de 60cm y el ancho mínimo será 50 cm.

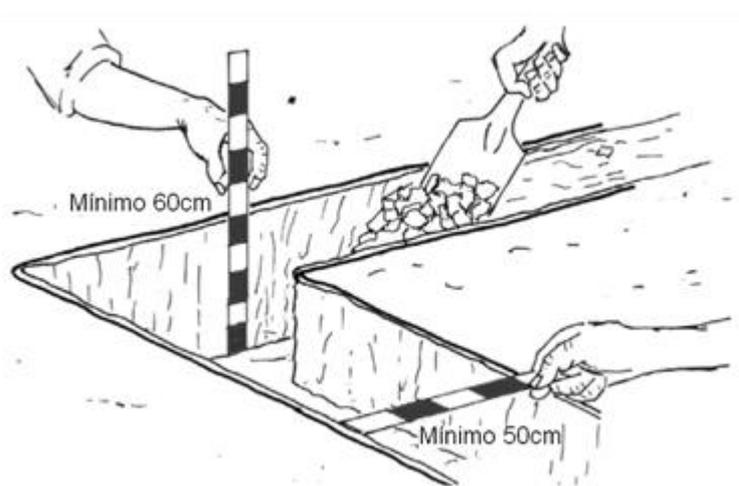


Foto 2. Excavación de cimiento.

Construcción de cimiento y sobrecimiento

La composición del cimiento y sobrecimiento dependerá del nivel de precipitaciones y peligro de inundación de la zona en la que se construya la vivienda.

ZONAS DE CONSTRUCCIÓN	TIPO DE CIMIENTO Y SOBRECIMIENTO
Con lluvias escasas	Pirca de piedra grande asentada con barro
Con lluvias moderadas	Pirca de piedra grande + mortero cemento/arena o cal/arena
Con lluvias torrenciales	Pirca de piedra grande + concreto ciclópeo ($f'c = 140\text{kg/cm}^2$)

Además se deberán tener en cuenta las siguientes consideraciones:

El cemento y el sobrecimiento tendrán el mismo espesor.

Antes de vaciado del sobrecimiento se colocarán trozos de eucalipto de 3,5” de diámetro embutidos hasta la mitad de su sección y en la ubicación de los troncos de refuerzo de los muros. Estos trozos serán retirados posteriormente para la colocación del refuerzo verdadero.

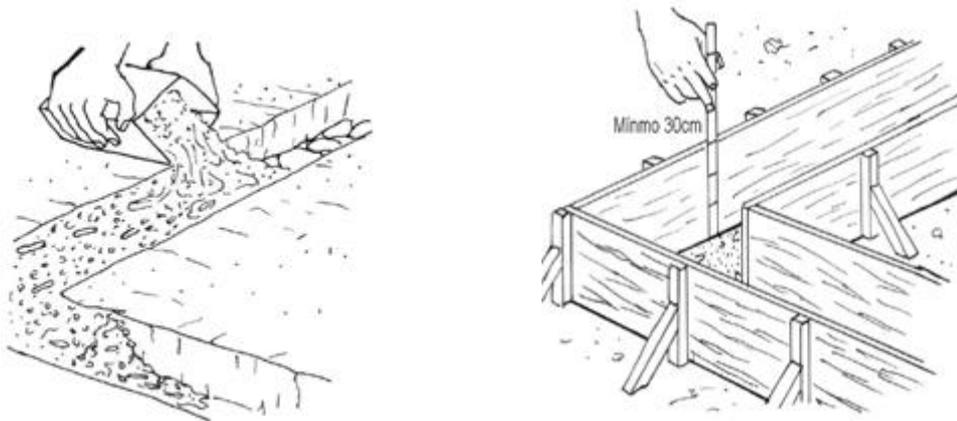


Foto 3. Vaciado de cemento (Izq.) y encofrado de sobrecimiento (Der.).

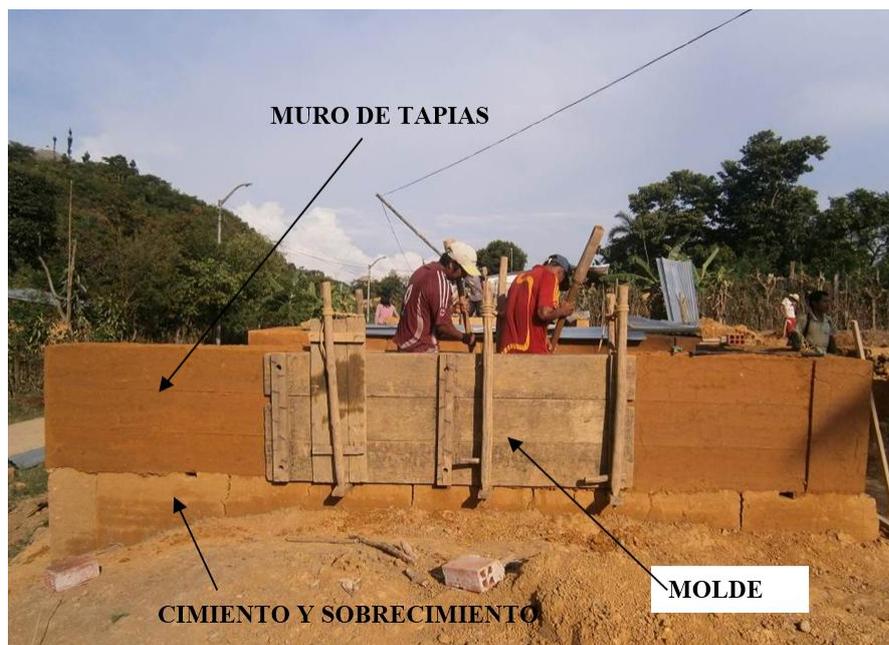


Figura 2.4. Elementos de la pared de Tapial

Construcción del muro

El muro se construye colocando los moldes de madera según las hiladas pares o impares y cuidando que exista traba entre los bloques, las juntas verticales no deben coincidir. Se coloca una capa de aproximadamente 20 cm de suelo y se compacta con el pisón hasta conseguir una superficie

compacta, se repite el procedimiento hasta completar la altura del molde de madera.



Figuras 2.5 y 2.6. Compactando el suelo colocado dentro del molde.

En las esquinas se debe conseguir el amarre de los muros ortogonales de tapial, no se debe permitir juntas verticales corridas en las esquinas. (Figura 2.7)



Figura 2.7. Amarre en esquina de muro de tapial.



Figura 2.8. Colocación de dintel.



Figura 2.9. Distribución del refuerzo exterior.



Figura 2.10. Distribución del refuerzo exterior.



Figura 2.11. Distribución del refuerzo exterior.



Figura 2.12. Colocación del techo de cañas.



Figura 2.13. Colocación del techo de cañas.

Tolerancia de geometría y ubicación del refuerzo

El refuerzo vertical consta de troncos de eucalipto de 4" de diámetro o madera aserrada de 3" x 4" y se colocan a ambos lados del muro en pareja. Los refuerzos verticales se conectan entre sí a través del muro en cada junta seca del muro de tapial con cuerdas de nylon o similar.

Almacenaje, transporte y montaje

No aplica.

Uniones

Se deben conseguir uniones fuertes entre la viga solera y los refuerzos verticales. También se debe conseguir amarre en las esquinas de los muros Ver Figura 2.14



Figura 2.14. Detalle de unión entre refuerzo vertical y solera.

Selección y preparación de suelo para tapial

El 100% de suelo utilizado para la elaboración del tapial deberá pasar la malla N°3 (3"). La grava podrá ser como máximo el 40% del total del suelo.

La mezcla estará compuesta por material fino (20-50%), arena (40-50%), agua (humedad aproximada de la mezcla de 14%) y paja.

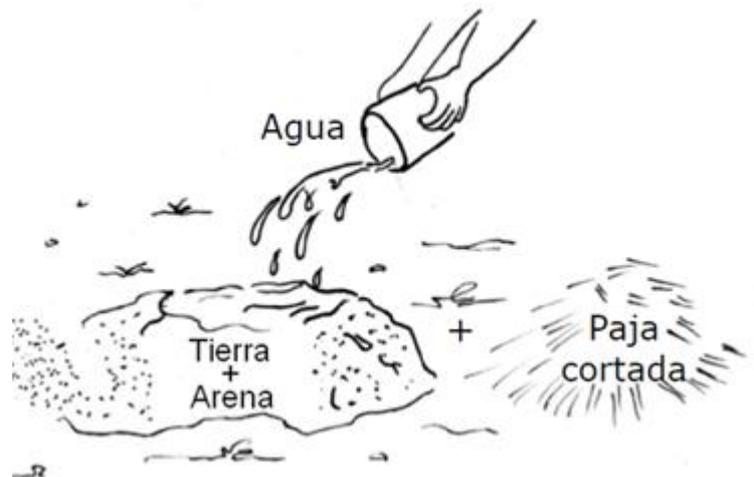


Foto 4. Componentes de la mezcla para tapial.

Construcción de muros

Los muros se construirán de manera tradicional, teniendo en cuenta además las siguientes consideraciones:

Espesor de muro: mínimo 0,5 m.

Altura de muro: 3,5 m.

Longitud libre entre muros transversales: 6,0 m.

Los dinteles de puertas y vanos irán a una altura de 2,10 m.

A cada hilada se dejarán tiras de nylon en la ubicación de los troncos de eucalipto que servirán como refuerzo. La longitud de las tiras de nylon tendrá 60 cm más aparte del espesor del muro para poder amarrar los troncos.

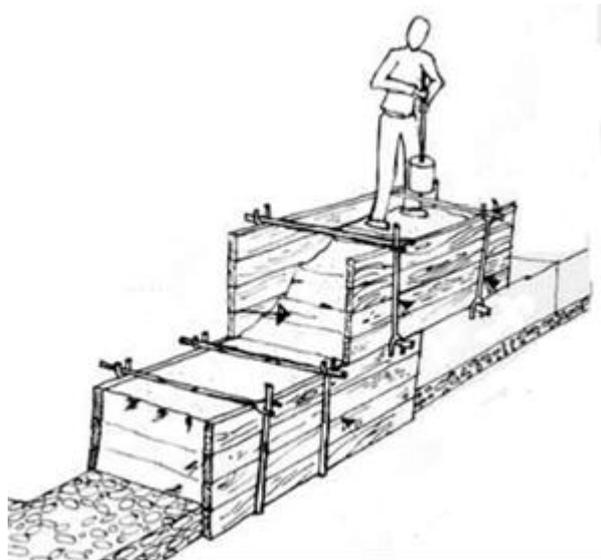


Foto 5. Proceso de compactación o apisonado del tapial.

Colocación de refuerzo de muros

El refuerzo de los muros consiste en troncos de eucalipto de 3,5" de diámetro cuya distribución dependerá de las longitudes de los muros y la ubicación de los vanos de puertas y ventanas. Se deberán tener en cuenta las siguientes consideraciones:

Los troncos irán embutidos hasta la mitad de su sección en los muros.

Los troncos se amarrarán con las tiras de nylon en ambos lados.

La longitud de los troncos dependerá de la altura de los muros. En los muros con tímpano los troncos deberán llegar hasta la cima del mismo.

Las uniones entre troncos y vigas soleras serán clavadas.

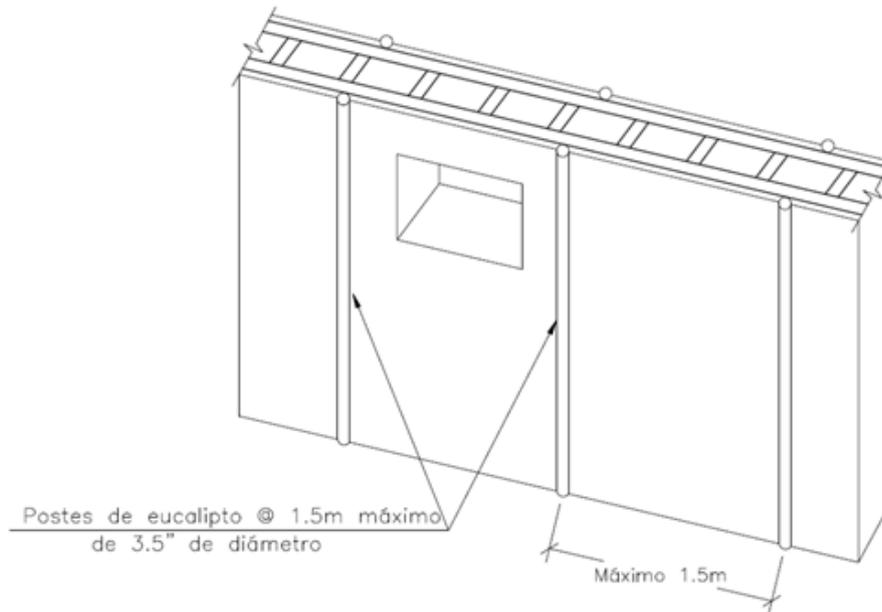


Foto 6. Porción de muro de tapial reforzado.

Colocación de vigas soleras

Las vigas soleras serán escalerillas conformadas por troncos de eucalipto de 3,5" unidos por transversales de la misma sección cada 50 cm. Se deberán tener en cuenta las siguientes consideraciones:

Las uniones entre los elementos de las vigas serán clavadas.

Las uniones entre escalerillas serán a media madera.

Las uniones entre vigas soleras y troncos de refuerzo de los muros serán clavadas.

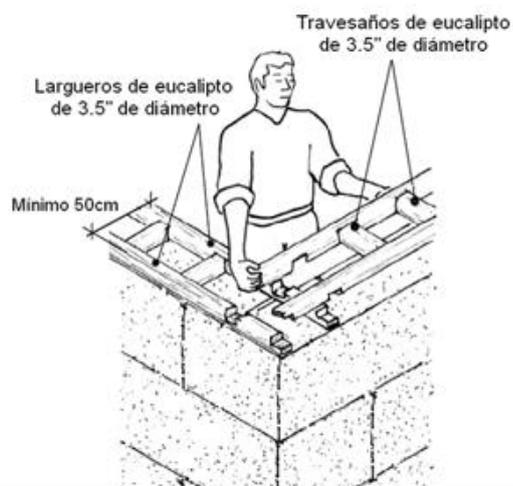


Foto 7. Colocación de vigas soleras en forma de escalerilla sobre los muros.

Construcción de tímpanos

Los tímpanos de tapial serán construidos sobre las vigas soleras. Se deberán tener las siguientes consideraciones:

Altura de tímpano: 1,0 m.

Espesor igual a la del muro.

Sobre el tímpano se colocará una escalerilla igual a las vigas soleras de los muros, la cual se conectará a éstas mediante clavos.

En cada hilada se colocarán tiras de nylon igual que en los muros inferiores para amarrar los troncos de eucalipto en ambos lados.

Construcción de techos

El techo estará conformado por tijerales, correas y una viga cumbrera de eucalipto cuyas secciones tendrán 5" de diámetro. Además se colocará un cielo raso de arpillera en toda el área del techo. Se deberán tener las siguientes consideraciones:

Las uniones de los elementos de los tijerales serán clavadas.

Los tijerales irán clavados a las vigas soleras de los muros.

La separación máxima entre tijerales será de 1,30 m.

La altura de los tijerales será igual a la altura de los tímpanos.

Las correas y la viga cumbrera irán orientadas en dirección transversal a los tijerales.

Las uniones entre correas y vigas cumbreras con los tijerales serán clavadas.

Las coberturas de techo pueden ser de paja, cañas, tablas de madera de $\frac{3}{4}$ " de espesor o calamina.

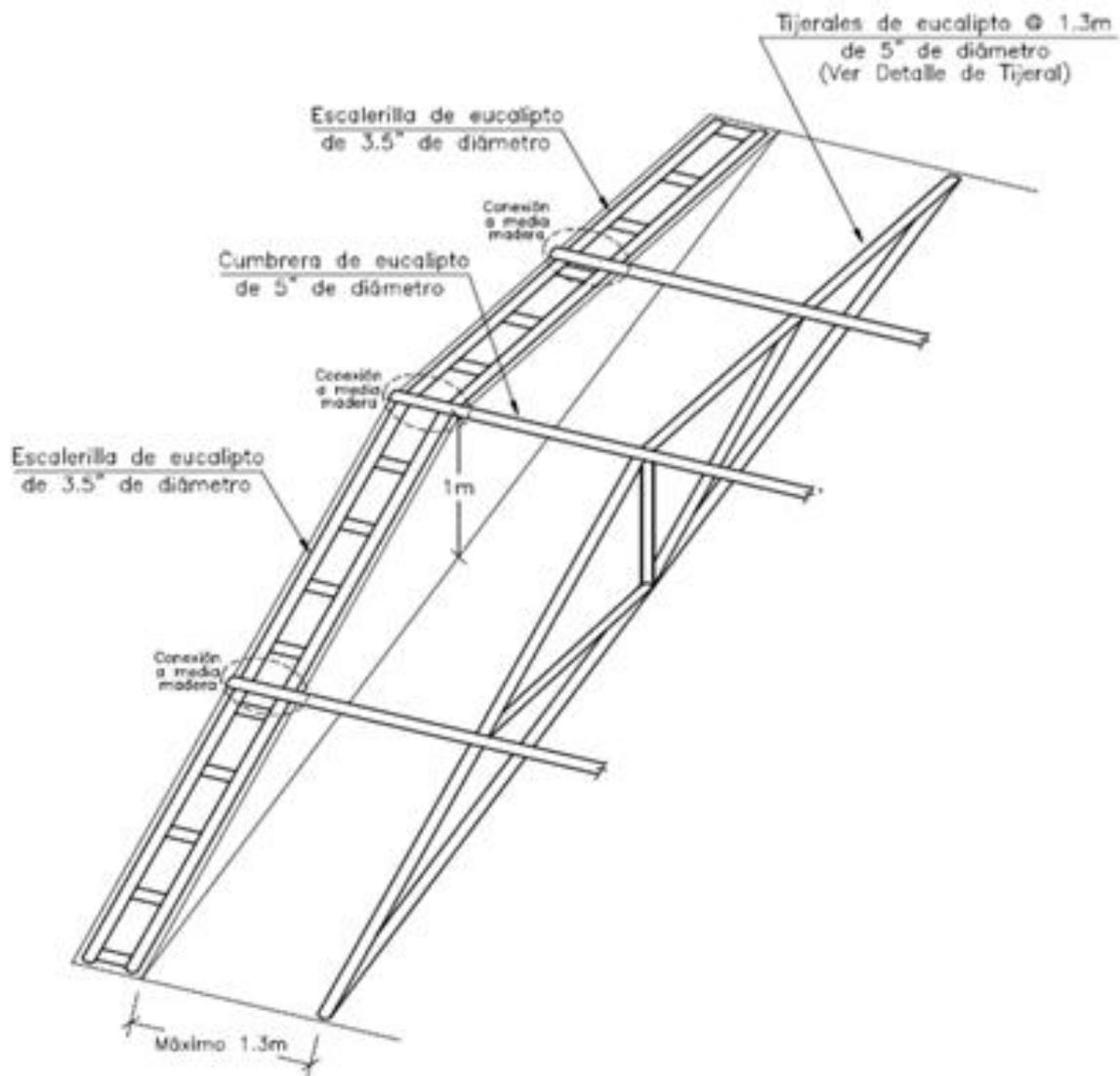


Foto 8. Isometría de una porción del techo.

MEMORIA DE DISEÑO ESTRUCTURAL SISTEMA CONSTRUCTIVO DE TAPIAL MEJORADO

Tipología estructural y criterio de diseño

El Sistema Constructivo de Tapial Mejorado se considera como una estructura de tierra simple en la cual se han incorporado elementos de refuerzo de madera compatibles con el material tierra con el objetivo de incrementar su competencia estructural para resistir cargas de sismo. La tipología estructural es similar a muros de mampostería de baja calidad donde las unidades vienen a ser los bloques apisonados unidos entre sí en las juntas horizontales por la fricción proveniente del apisonado y peso propio, la unión entre juntas verticales es menor que en las juntas horizontales ya que solo interviene la fricción proveniente del apisonado vertical que hace una menor presión sobre las paredes laterales. Al igual que las construcciones de mampostería, los

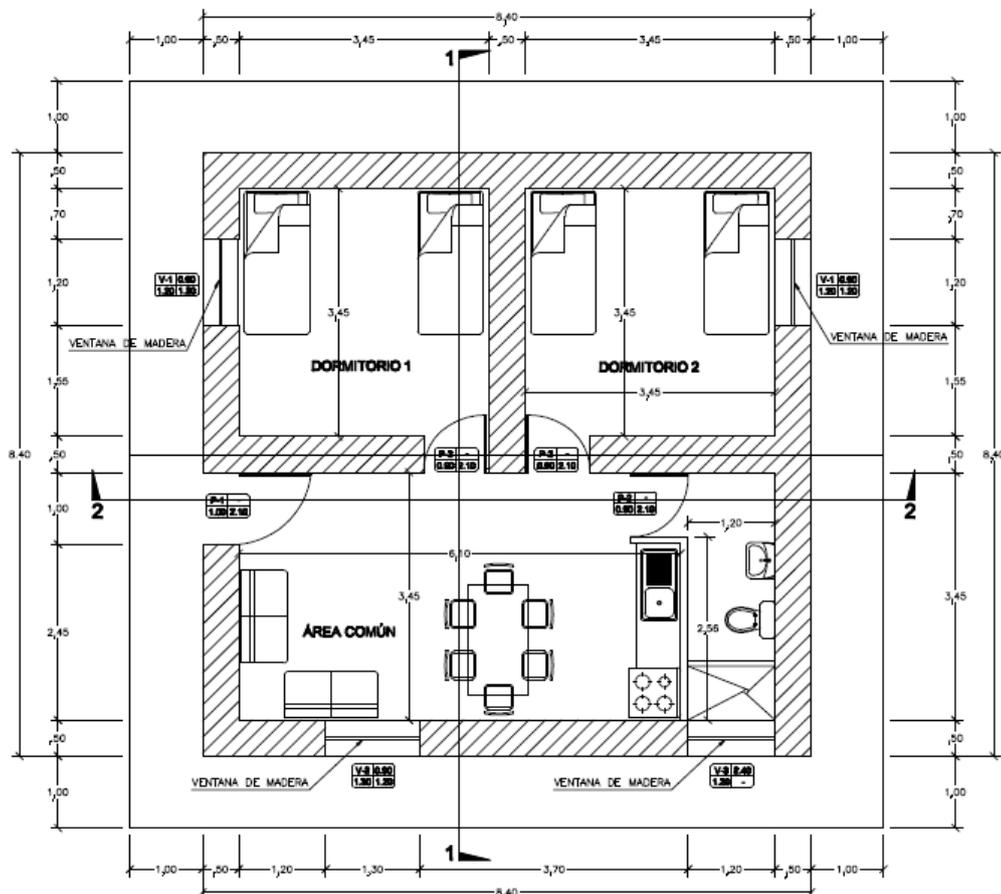
muros de tapial son el principal elemento estructural que sirve tanto para resistir las cargas verticales como para resistir los esfuerzos provenientes de los sismos. Los muros también definen la distribución arquitectónica de la construcción por lo que se adoptan algunas de las recomendaciones para las construcciones de albañilería de adobe en cuanto a alturas máximas, dimensiones en planta y disposición de aberturas. Para ello y dado que se trata de una construcción de tierra, se utilizará en lo que sea aplicable, la norma NTE.080 ADOBE.

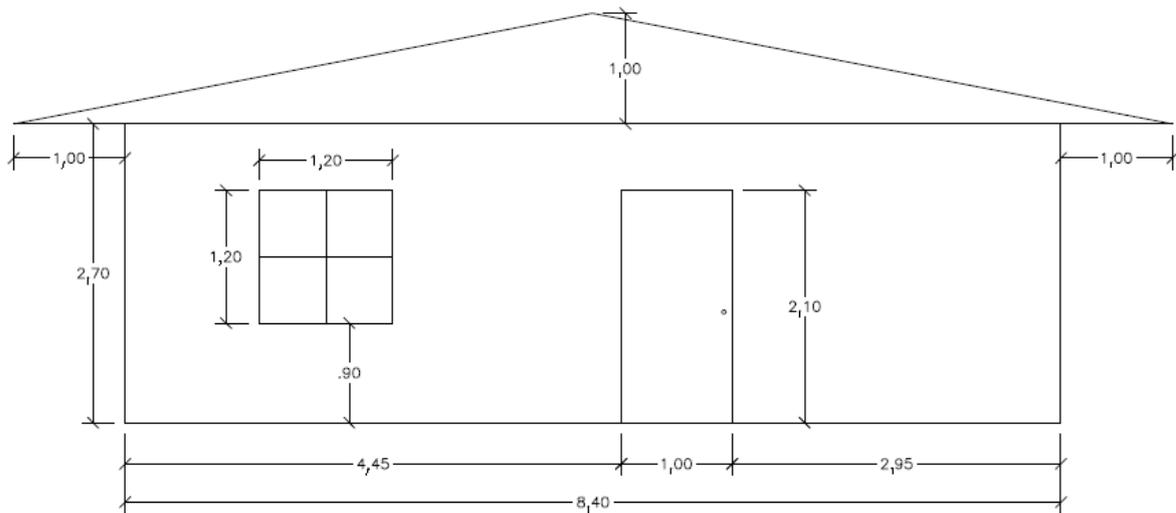
En el caso de la carga vertical se usará el criterio de diseño por esfuerzos admisibles en compresión y aplastamiento de los muros.

En el diseño sísmico, el criterio que gobierna el Sistema Constructivo de Tapial Mejorado es evitar el colapso total o parcial de las construcciones en casos de sismos severos. En caso de sismos moderados a medianos se puede esperar fisuras en las paredes de tapial las cuales pueden ser reparadas.

Ejemplo de distribución arquitectónica.

Se realizará el análisis de una vivienda de un solo piso de 70 m² de área bruta incluyendo el área de los muros más no el área de los aleros del techo y 50 m² de área útil. El techo es a dos aguas y por esta razón el muro central es más alto que los laterales. La cobertura se asume que es de teja asentada sobre torta de barro con un peso total de 200 kg/m².





Verificación de los esfuerzos por cargas verticales en el muro central

Se calcularán los esfuerzos de compresión en el muro más cargado que es el central por su mayor altura y porque recibe techo a ambos lados del muro. El cálculo se hará por unidad de longitud de muro.

Densidad específica del tapial = 1800 kg/m^3

Peso del techo de teja serrana asentada sobre mortero de barro más paja = 200 kg/m^2

Sobrecarga del techo = 30 kg/m^2

Altura del muro = $3,70 \text{ m}$

Espesor del muro = $0,50 \text{ m}$

Calculamos el esfuerzo de compresión en la base del muro a la altura del sobrecimiento.

Peso propio del muro = $0,50 \text{ m} \times 1,00 \text{ m} \times 3,40 \text{ m} \times 1800 \text{ kg/m}^3 = 3,060 \text{ kg}$

Peso del techo incluyendo sobrecarga

$CM + CV = 200 \text{ kg/m}^2 + 30 \text{ kg/m}^2 = 230 \text{ kg/m}^2$

Peso total del techo.

$(3,45 \text{ m} + 3,45 \text{ m}) \times 1 \text{ m} / 2 \times 230 \text{ kg/m}^2 = 793,5 \text{ kg}$

P total sobre el muro = $3,060 \text{ kg} + 793,50 \text{ kg} = 3853,50 \text{ kg}$

Esfuerzo de compresión $\sigma = 3853,50 \text{ kh} / 50 \times 100 = 0,77 \text{ kg/cm}^2$ OK

Calculo de la fuerza sísmica horizontal

Según la NTE 080:

$$H = S U C P$$

Donde:

S: Factor de suelo.

Tipo	Descripción	Factor S
I	Rocas o suelos muy resistentes con capacidad portante admisible $\geq 3 \text{ Kg/cm}^2$	1,0
II	Suelos intermedios o blandos con capacidad portante admisible $\geq 1 \text{ Kg/cm}^2$	1,2

U: Factor de uso.

Tipo de las Edificaciones	Factor U
Colegios, Postas Médicas, Locales Comunales, Locales Públicos	1,3
Viviendas y otras edificaciones comunes	1,0

U: Coeficiente sísmico:

Zonas Sísmica	Coeficiente Sísmico C
3	0,20
2	0,15
1	0,10

P: Peso de la edificación:

Entonces:

$$H = 1,2 \times 1,0 \times 0,2 P = 0,24 P$$

Diseño de muros a flexión transversal. Diseño del refuerzo de eucalipto o similar

El diseño de muros sometidos a fuerza de inercia perpendicular a su plano es un diseño a flexión con los siguientes lineamientos:

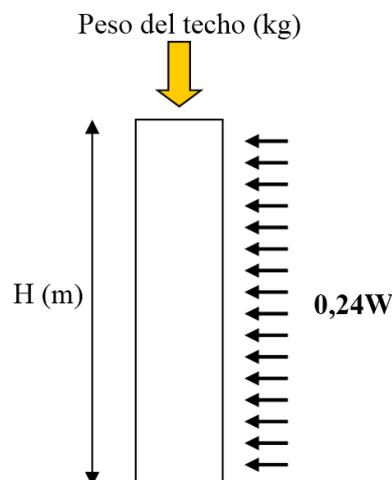
La flexión transversal es soportada por los postes de madera trabajando simplemente apoyados en la parte superior al nivel de la solera y en la base.

La fuerza horizontal uniformemente repartida es debida a la aceleración horizontal del sismo.

El momento máximo se produce al centro de la luz libre.

El refuerzo vertical de tronco de eucalipto tiene por finalidad controlar la falla por fuerzas de inercia perpendiculares al plano del muro. Para ello se analizará una franja del muro central de 1m de longitud en el cual se colocará un poste de eucalipto de 5" o 4" de diámetro. Se ha elegido el muro central del módulo por ser el de mayor altura y por lo tanto el de mayores esfuerzos de flexión transversal.

La hipótesis de cálculo es considerar tanto el muro como el refuerzo vertical como elementos simplemente apoyados en la parte superior (solera) y en la base a la altura del sobrecimiento. Para la fuerza de inercia se toma el mismo coeficiente sísmico que se utiliza en el análisis de los muros sometidos a fuerza en el plano del muro el cual es el 24% del peso del muro [1] Se considera también el efecto de la carga vertical producto del peso del techo que soporta y su peso propio.



Peso del techo = 793,5 kg

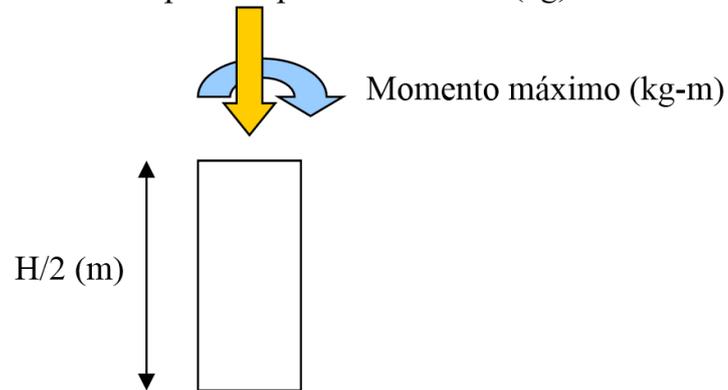
Cálculo de la fuerza de inercia distribuida:

$$0,24 W = 0,24 \times (0,5 \text{ m} \times 1 \text{ m} \times 1800 \text{ kg/m}^3) = 216 \text{ kg/m}$$

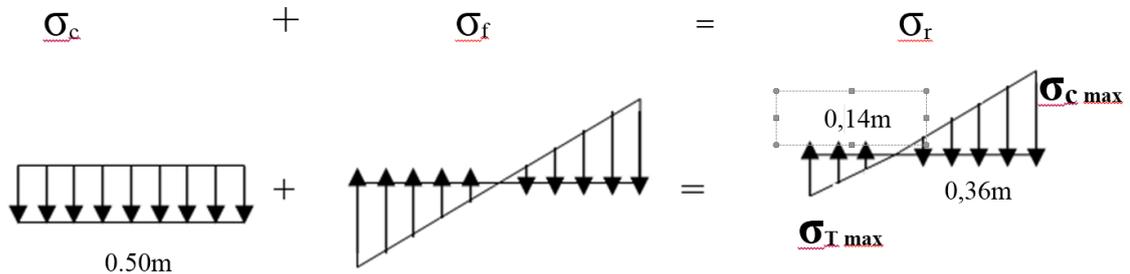
$$\text{Momento máximo} = 0,24W \times H^2 / 8 = 216 \text{ kg/m} \times 3,402 \text{ m}^2 / 8 = 312 \text{ kg-m}$$

Análisis de esfuerzos en la sección al centro del muro

Peso del techo + peso de porción de muro (kg)



$$\text{Peso del techo + peso de porción de muro} = 793,5 \text{ kg} + 3,4 \text{ m} \times 0,5 \text{ m} \times 1800 \text{ kg/m}^3 / 2 = 2325 \text{ kg}$$



$$\sigma_c = - 2,325 \text{ kg} / (50 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}) = -0,47 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_f \text{ max} = (M \times y) / I = M / z$$

$$\sigma_f \text{ max} = 31,200 \text{ kg-cm} / (100 \text{ cm} \times 50^2 \text{ cm}^2 / 6) = +/- 0,75 \text{ kg/cm}^2$$

$$\rightarrow \sigma_t \text{ max} = +0,75 - 0,47 = + 0,28 \text{ kg/cm}^2$$

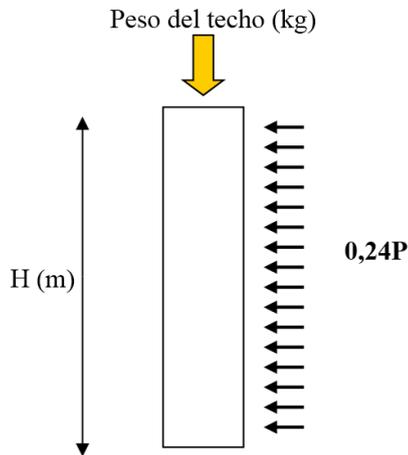
$$\rightarrow \sigma_c \text{ max} = -0,75 - 0,47 = - 1,22 \text{ kg/cm}^2$$

El análisis de la sección central muestra que se presentan tracciones en el muro por efecto de la flexión transversal. Para contrarrestar esto se diseñará el refuerzo vertical para que tome los esfuerzos de flexión del muro

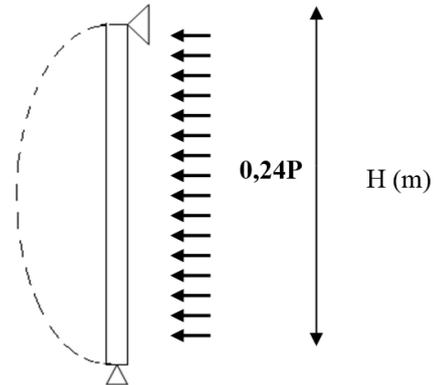
Análisis de flexión en el poste

Se asume conservadoramente, que la fuerza de inercia que produce el muro en dirección perpendicular a su plano será tomada íntegramente por el refuerzo de poste de eucalipto trabajando a flexión.

DCL del muro:



DCL del poste:



Para una sección circular de 5" de diámetro:

Momento máximo = 312 kg-m

$$I = (\pi \times R^4) / 4 = (3,1415 \times 6,35^4) / 4 = 1277 \text{ cm}^4$$

$$z = I / y_{\text{max}} = 1277 \text{ cm}^4 / 6,35 \text{ cm} = 201,1 \text{ cm}^3$$

$$\rightarrow \sigma_u = M / z = 31200 \text{ kg-cm} / 201,1 \text{ cm}^3 = 155 \text{ kg/cm}^2$$

Para una sección circular de 4" de diámetro:

$$I = (\pi \times R^4) / 4 = (3,1415 \times 5,08^4) / 4 = 523 \text{ cm}^4$$

$$z = I / y_{\text{max}} = 523 \text{ cm}^4 / 5,08 \text{ cm} = 103 \text{ cm}^3$$

$$\rightarrow \sigma_u = M / z = 31200 \text{ kg-cm} / 103 \text{ cm}^3 = 303 \text{ kg/cm}^2$$

Del Compendio de Información Técnica de Especies Forestales de la Confederación Peruana de la Madera [1] se tiene que el módulo de ruptura en flexión del Eucalipto es 678 kg/cm², por lo que tanto en el caso de la sección circular de 5" como la de 4", los esfuerzos por flexión están alejados del valor de esfuerzo último y son aceptables.

Los factores de seguridad serían:

Para tronco de 5" de diámetro: $F.S. = 678/155 = 4,37$

Para tronco de 4" de diámetro: $F.S. = 678/303 = 2,23$

Aun cuando los factores de seguridad para la madera son usualmente altos 4 a 6, estos valores pueden ser aceptables pues se trata de diseño sísmico que ya contiene el factor de probabilidad incluido en el coeficiente sísmico.

Análisis sísmico simplificado

Hipótesis de cálculo

El análisis sísmico simplificado tiene las siguientes hipótesis:

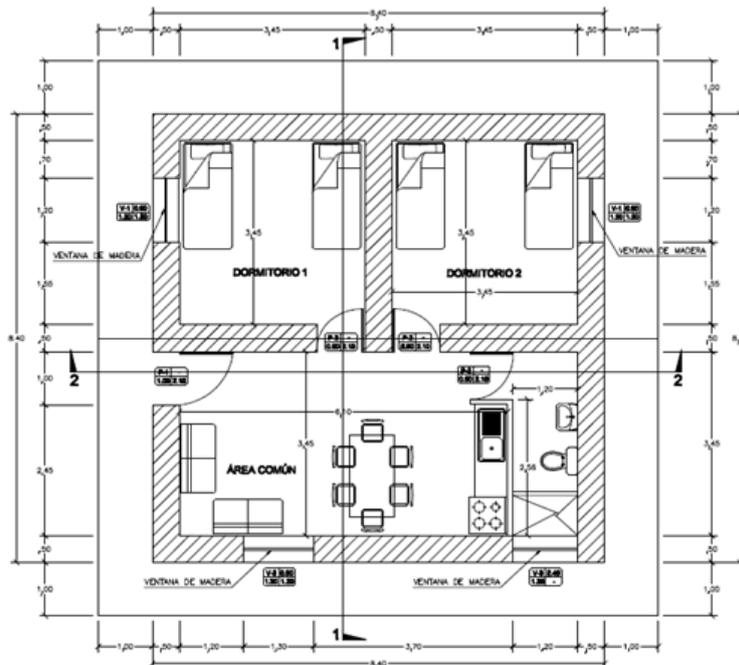
El techo de madera se considera un diafragma flexible y por lo tanto la distribución de fuerzas sísmica en los muros es de acuerdo a la masa tributaria.

Se considera la masa del techo y la masa del muro sobre el nivel +1,20m del piso.

El área de corte resistente se determina descontando la longitud de aberturas de puertas y ventanas.

Desarrollo

Arquitectura propuesta:



Verificación de los esfuerzos por cargas verticales en el muro central

Se calcularán los esfuerzos de compresión en el muro más cargado que es el central por su mayor altura y porque recibe techo a ambos lados del muro. El cálculo se hará por unidad de longitud de muro.

Densidad específica del tapial = 1,800 kg/m³.

Peso del techo de teja serrana asentada sobre mortero de barro más paja = 200 kg/m²

Sobrecarga del techo = 30 kg/m².

Altura del muro = 3,70 m.

Espesor del muro = 0,50 m.

Calculamos el esfuerzo de compresión en la base del muro a la altura del sobrecimiento.

Peso propio del muro = 0,50 m x 1,00 m x 3,40 m x 1800 kg/m³ = 3060 kg.

Peso del techo incluyendo sobrecarga.

CM + CV = 200 kg/m² + 30 kg/m² = 230 kg/m².

Peso total del techo.

(3,45 m + 3,45 m) x 1 m / 2 x 230 kg/m² = 793,5 kg.

P total sobre el muro = 3,060 kg + 793,50 kg = 3853,50 kg.

Esfuerzo de compresión $\sigma = 3853,50 \text{ kh} / 50 \times 100 = 0,77 \text{ kg/cm}^2$ OK.

Calculo de la fuerza sísmica horizontal

Según la NTE 080:

$$H = S U C P$$

Donde:

S: Factor de suelo.

Tipo	Descripción	Factor S
I	Rocas o suelos muy resistentes con capacidad portante admisible $\geq 3 \text{ Kg/cm}^2$	1,0
II	Suelos intermedios o blandos con capacidad portante admisible $\geq 1 \text{ Kg/cm}^2$	1,2

U: Factor de uso.

Tipo de las Edificaciones	Factor U
Colegios, Postas Médicas, Locales Comunales, Locales Públicos	1,3
Viviendas y otras edificaciones comunes	1,0

U: Coeficiente sísmico:

Zonas Sísmica	Coeficiente Sísmico C
3	0,20
2	0,15
1	0,10

P: Peso de la edificación:

Entonces:

$$H = 1,2 \times 1,0 \times 0,2 P = 0,24 P$$

Diseño de muros a flexión transversal. Diseño del refuerzo de eucalipto o similar

El diseño de muros sometidos a fuerza de inercia perpendicular a su plano es un diseño a flexión con los siguientes lineamientos:

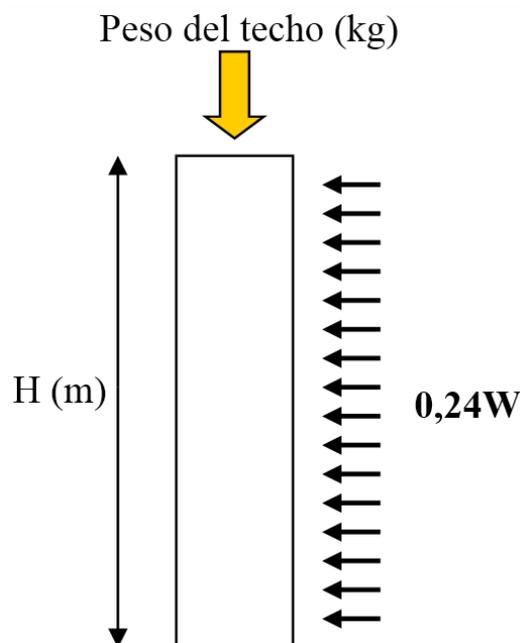
La flexión transversal es soportada por los postes de madera trabajando simplemente apoyados en la parte superior al nivel de la solera y en la base.

La fuerza horizontal uniformemente repartida es debida a la aceleración horizontal del sismo.

El momento máximo se produce al centro de la luz libre.

El refuerzo vertical de tronco de eucalipto tiene por finalidad controlar la falla por fuerzas de inercia perpendiculares al plano del muro. Para ello se analizará una franja del muro central de 1m de longitud en el cual se colocará un poste de eucalipto de 5" o 4" de diámetro. Se ha elegido el muro central del módulo por ser el de mayor altura y por lo tanto el de mayores esfuerzos de flexión transversal.

La hipótesis de cálculo es considerar tanto el muro como el refuerzo vertical como elementos simplemente apoyados en la parte superior (solera) y en la base a la altura del sobrecimiento. Para la fuerza de inercia se toma el mismo coeficiente sísmico que se utiliza en el análisis de los muros sometidos a fuerza en el plano del muro el cual es el 24% del peso del muro [1] Se considera también el efecto de la carga vertical producto del peso del techo que soporta y su peso propio.



Peso del techo = 793,5 kg

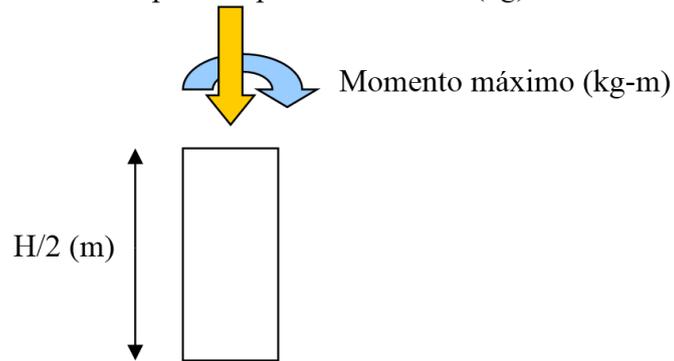
Cálculo de la fuerza de inercia distribuida:

$$0,24W = 0,24 \times (0,5\text{m} \times 1\text{m} \times 1800 \text{ kg/m}^3) = 216 \text{ kg/m}$$

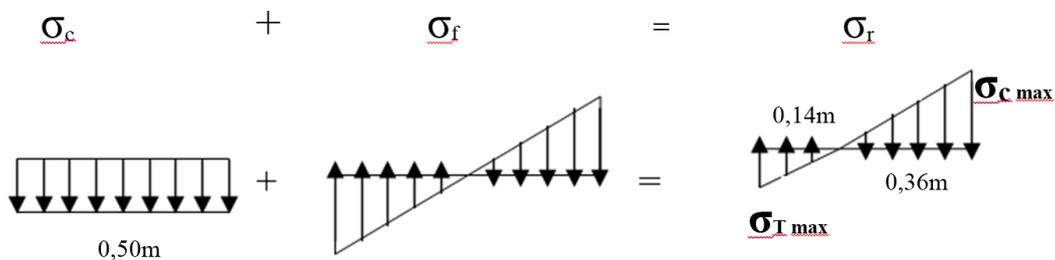
$$\text{Momento máximo} = 0,24W \times H^2 / 8 = 216 \text{ kg/m} \times 3,402 \text{ m}^2 / 8 = 312 \text{ kg-m}$$

Análisis de esfuerzos en la sección al centro del muro

Peso del techo + peso de porción de muro (kg)



$$\text{Peso del techo + peso de porción de muro} = 793,5 \text{ kg} + 3,4 \text{ m} \times 0,5 \text{ m} \times 1800 \text{ kg/m}^3 / 2 = 2325 \text{ kg}$$



$$\sigma_c = -2,325 \text{ kg} / (50 \text{ cm} \times 100 \text{ cm}) = -0,47 \text{ kg/cm}^2$$

$$\sigma_f \text{ max} = (M \times y) / I = M / z$$

$$\sigma_f \text{ max} = 31,200 \text{ kg-cm} / (100\text{cm} \times 50^2\text{cm}^2 / 6) = +/- 0,75 \text{ kg/cm}^2$$

$$\rightarrow \sigma_t \text{ max} = +0,75 - 0,47 = + 0,28 \text{ kg/cm}^2$$

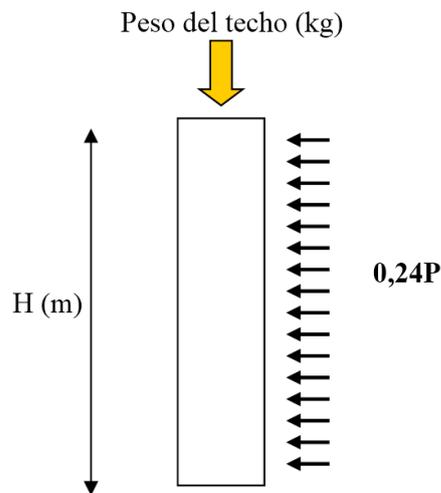
$$\rightarrow \sigma_c \text{ max} = -0,75 - 0,47 = - 1,22 \text{ kg/cm}^2$$

El análisis de la sección central muestra que se presentan tracciones en el muro por efecto de la flexión transversal. Para contrarrestar esto se diseñará el refuerzo vertical para que tome los esfuerzos de flexión del muro

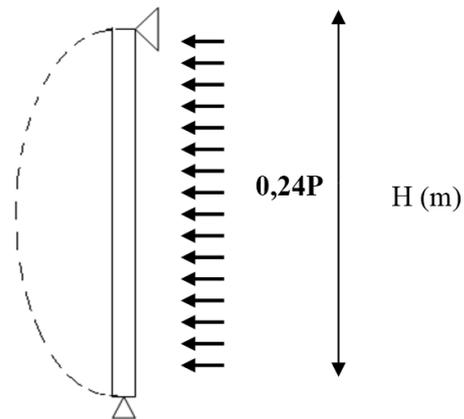
Análisis de flexión en el poste

Se asume conservadoramente, que la fuerza de inercia que produce el muro en dirección perpendicular a su plano será tomada íntegramente por el refuerzo de poste de eucalipto trabajando a flexión.

DCL del muro:



DCL del poste:



Para una sección circular de 5" de diámetro:

Momento máximo = 312 kg-m

$$I = (\pi \times R^4) / 4 = (3,1415 \times 6,35^4) / 4 = 1277 \text{ cm}^4$$

$$z = I / y_{\text{max}} = 1277 \text{ cm}^4 / 6,35 \text{ cm} = 201,1 \text{ cm}^3$$

$$\rightarrow \sigma_u = M / z = 31200 \text{ kg-cm} / 201,1 \text{ cm}^3 = 155 \text{ kg/cm}^2$$

Para una sección circular de 4" de diámetro:

$$I = (\pi \times R^4) / 4 = (3,1415 \times 5,08^4) / 4 = 523 \text{ cm}^4$$

$$z = I / y_{\text{max}} = 523 \text{ cm}^4 / 5,08 \text{ cm} = 103 \text{ cm}^3$$

$$\rightarrow \sigma_u = M / z = 31200 \text{ kg-cm} / 103 \text{ cm}^3 = 303 \text{ kg/cm}^2$$

Del Compendio de Información Técnica de Especies Forestales de la Confederación Peruana de la Madera [1] se tiene que el módulo de ruptura en flexión del Eucalipto es 678 kg/cm², por lo que tanto en el caso de la sección circular de 5" como la de 4", los esfuerzos por flexión están alejados del valor de esfuerzo último y son aceptables.

Los factores de seguridad serían:

$$\text{Para tronco de 5" de diámetro: F.S.} = 678 / 155 = 4,37$$

$$\text{Para tronco de 4" de diámetro: F.S.} = 678 / 303 = 2,23$$

Aun cuando los factores de seguridad para la madera son usualmente altos 4 a 6, estos valores pueden ser aceptables pues se trata de diseño sísmico que ya conti

ene el factor de probabilidad incluido en el coeficiente sísmico.

Análisis sísmico simplificado

Hipótesis de cálculo.

El análisis sísmico simplificado tiene las siguientes hipótesis:

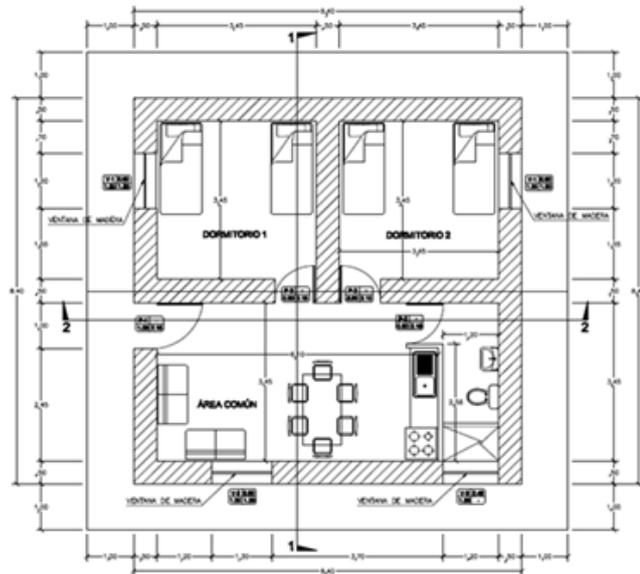
El techo de madera se considera un diafragma flexible y por lo tanto la distribución de fuerzas sísmica en los muros es de acuerdo a la masa tributaria.

Se considera la masa del techo y la masa del muro sobre el nivel +1,20m del piso.

El área de corte resistente se determina descontando la longitud de aberturas de puertas y ventanas.

Desarrollo

Arquitectura propuesta:



Datos:

Peso del techo = 200 kg/m^2

Densidad específica del tapial = 1800 kg/m^3

Sobrecarga de techo = 30 kg/m^2 [1]

Esfuerzo último en compresión = $11,91 \text{ kg/cm}^2$ (valor de ensayo de compresión axial Ver anexo 5)

Esfuerzo último en corte = $1,66 \text{ kg/cm}^2$ (valor de ensayo de compresión diagonal)

Si se afectan los esfuerzos últimos por un factor de reducción de 0,5 para aumentar el Factor de Seguridad:

Esfuerzo último en compresión = $11,91 \times 0,5 = 5,95 \text{ kg/cm}^2$

Esfuerzo último en corte = $1,66 \times 0,5 = 0,83 \text{ kg/cm}^2$

Coefficiente sísmico de la NTE.080:

H = SUCP

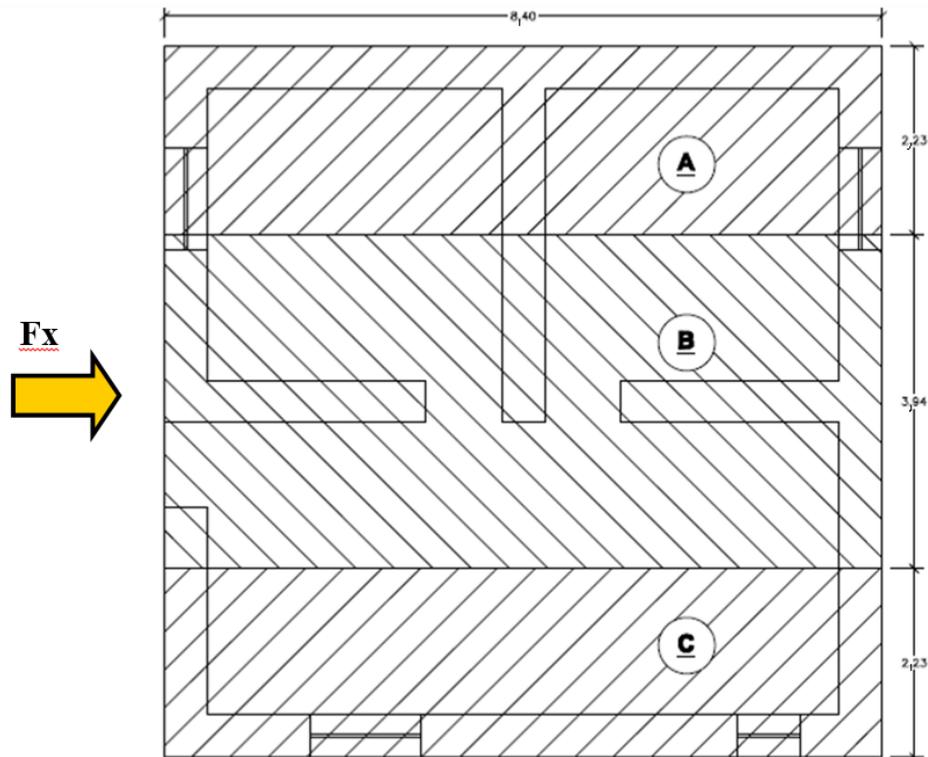
S = 1,2 (suelo intermedio)

U = 1,0 (edificación común)

C = 0,2 (Zona sísmica 3)

H = $1,2 \times 1,0 \times 0,2 = 0,24P$

Análisis Sísmico en X-X:



Pesos de techo:

Zona A = $2,23 \text{ m} \times 8,4 \text{ m} \times 200 \text{ kg/m}^2 = 3750 \text{ kg}$

Zona B = $3,94 \text{ m} \times 8,4 \text{ m} \times 200 \text{ kg/m}^2 = 6620 \text{ kg}$

Zona C = $2,23 \text{ m} \times 8,4 \text{ m} \times 200 \text{ kg/m}^2 = 3750 \text{ kg}$

Pesos de muros:

Se realiza un análisis a una altura de 0,9 m.

Peso de muro = (Volumen de muros) $\times 1800 \text{ kg/m}^3$

Zona A = $9,27 \text{ m}^3 \times 1800 \text{ kg/m}^3 = 16685 \text{ kg}$

$$\text{Zona B} = 15,40 \text{ m}^3 \times 1800 \text{ kg/m}^3 = 27720 \text{ kg}$$

$$\text{Zona C} = 8,20 \text{ m}^3 \times 1800 \text{ kg/m}^3 = 14760 \text{ kg}$$

Áreas de corte:

$$\text{Zona A} = 8,4 \text{ m} \times 0,5 \text{ m} = 4,2 \text{ m}^2 = 42\,000 \text{ cm}^2$$

$$\text{Zona B} = 3,05 \text{ m} \times 0,5 \text{ m} + 0,5 \text{ m} \times 0,5 \text{ m} = 3,3 \text{ m}^2 = 33\,000 \text{ cm}^2$$

$$\text{Zona C} = 8,4 \text{ m} \times 0,5 \text{ m} = 4,2 \text{ m}^2 = 42\,000 \text{ cm}^2$$

Esfuerzos de corte:

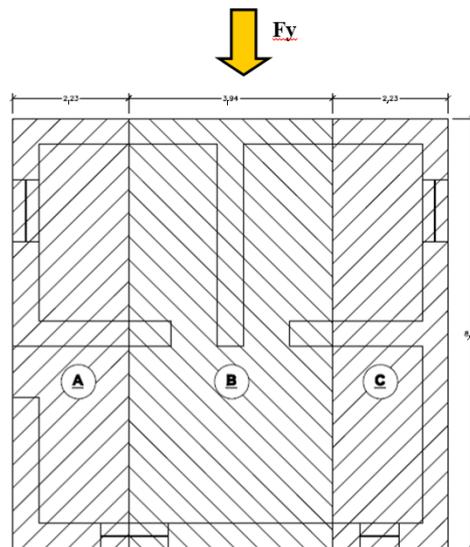
$$\text{Esfuerzos} = (\text{peso de techo} + \text{peso de muro}) \times 0,24 / (\text{área de corte})$$

$$\text{Zona A} = (3750\text{kg} + 16685\text{kg}) \times 0,24 / 42000\text{cm}^2 = 0,12 \text{ kg/cm}^2 < \tau_u = 0,83 \text{ kg/cm}^2, \text{ OK}$$

$$\text{Zona B} = (6620\text{kg} + 27720\text{kg}) \times 0,24 / 33000\text{cm}^2 = 0,25 \text{ kg/cm}^2 < \tau_u = 0,83 \text{ kg/cm}^2, \text{ OK}$$

$$\text{Zona C} = (3750\text{kg} + 14760\text{kg}) \times 0,24 / 42000\text{cm}^2 = 0,11 \text{ kg/cm}^2 < \tau_u = 0,83 \text{ kg/cm}^2, \text{ OK}$$

Análisis Sísmico en Y-Y:



Pesos de techo:

$$\text{Zona A} = 2,23 \text{ m} \times 8,4 \text{ m} \times 200 \text{ kg/m}^2 = 3750 \text{ kg}$$

$$\text{Zona B} = 3,94 \text{ m} \times 8,4 \text{ m} \times 200 \text{ kg/m}^2 = 6620 \text{ kg}$$

$$\text{Zona C} = 2,23 \text{ m} \times 8,4 \text{ m} \times 200 \text{ kg/m}^2 = 3750 \text{ kg}$$

Pesos de muros:

Se realiza un análisis a una altura de 0,9 m.

$$\text{Peso de muro} = (\text{Volumen de muros}) \times 1800 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Zona A} = 9,79 \text{ m}^3 \times 1800 \text{ kg/m}^3 = 17\,620 \text{ kg}$$

$$\text{Zona B} = 12,42 \text{ m}^3 \times 1800 \text{ kg/m}^3 = 22\,360 \text{ kg}$$

$$\text{Zona C} = 8,07 \text{ m}^3 \times 1800 \text{ kg/m}^3 = 14\,530 \text{ kg}$$

Áreas de corte:

$$\text{Zona A} = (4,45 \text{ m} + 2,95 \text{ m}) \times 0,5 \text{ m} = 3,7 \text{ m}^2 = 37\,000 \text{ cm}^2$$

$$\text{Zona B} = 4,45 \text{ m} \times 0,5 \text{ m} = 2225 \text{ m}^2 = 22\,250 \text{ cm}^2$$

$$\text{Zona C} = 8,4 \text{ m} \times 0,5 \text{ m} = 4,2 \text{ m}^2 = 42\,000 \text{ cm}^2$$

Esfuerzos de corte:

$$\text{Esfuerzos} = (\text{peso de techo} + \text{peso de muro}) \times 0,24 / (\text{área de corte})$$

$$\text{Zona A} = (3750 \text{ kg} + 17\,620 \text{ kg}) \times 0,24 / 37\,000 \text{ cm}^2 = 0,14 \text{ kg/cm}^2 < \tau_u = 0,83 \text{ kg/cm}^2, \text{ OK}$$

$$\text{Zona B} = (6620 \text{ kg} + 22\,360 \text{ kg}) \times 0,24 / 22\,250 \text{ cm}^2 = 0,31 \text{ kg/cm}^2 < \tau_u = 0,83 \text{ kg/cm}^2, \text{ OK}$$

$$\text{Zona C} = (3750 \text{ kg} + 14\,530 \text{ kg}) \times 0,24 / 42\,000 \text{ cm}^2 = 0,10 \text{ kg/cm}^2 < \tau_u = 0,83 \text{ kg/cm}^2, \text{ OK}$$

CERTIFICADOS DE ENSAYOS Y ANALISIS INTERPRETATIVOS. SISTEMA TAPIAL MEJORADO

Como parte del expediente técnico de Tapial Mejorado, se desarrolló el plan de ensayos que se describe a continuación:

Análisis de suelos

Objetivo

Obtener la granulometría de la tierra usada en la construcción del módulo a escala para el ensayo dinámico. Asimismo, conocer la humedad de las mezclas utilizadas en diferentes hiladas del módulo para verificar su variación y determinar la humedad óptima de la mezcla para tapial.

Descripción de ensayos

Contenido de Humedad: Se determinó el contenido de agua en cada una de las muestras analizadas. Las muestras se obtuvieron de las diferentes hiladas durante la construcción del módulo de tapial mejorado.

Muestra	Humedad (%)
M-1 (3ra hilada)	20,26
M-2 (3ra hilada)	18,62
M-3 (4ta hilada)	17,32
M-4 (4ta hilada)	17,90
M-5 (5ta hilada)	20,01
Promedio =	18,82

Tabla 5.1. Contenido de humedad al momento de la construcción.

Proctor Modificado: Se realizó este ensayo para determinar la humedad de compactación para la cual se obtiene la máxima densidad seca o humedad óptima.

Punto	Humedad (%)	Densidad seca (g/cm ³)
1	8,0	1,82
2	10,0	1,86
3	12,0	1,88
4	14,2	1,86
5	16,2	1,79
Máxima densidad seca =		1,88 g/cm ³
Humedad óptima =		12,1%

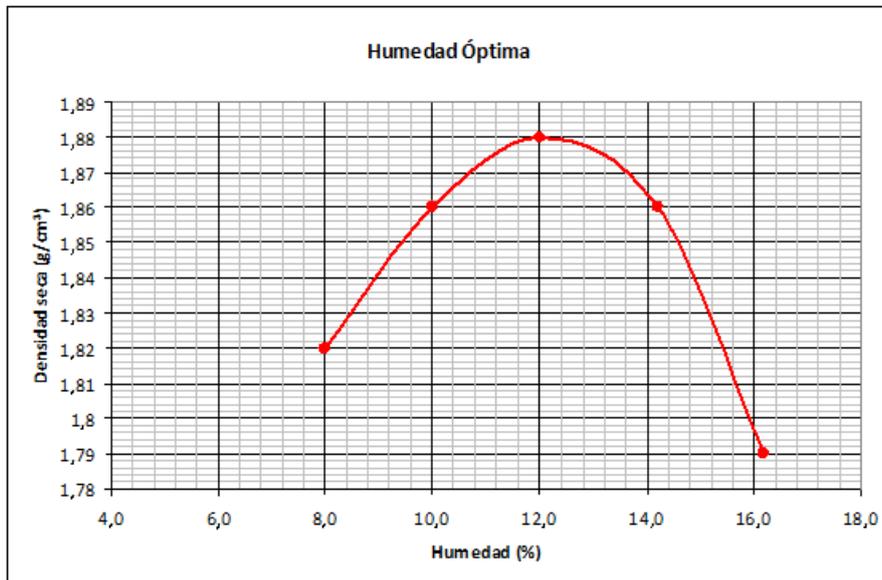


Figura 5.1. Ensayo de contenido óptimo de humedad (PROCTOR)

Granulometría: Se realizó la clasificación por tamaños de dos muestras obtenidas de mezclas preparadas para construir el módulo de tapial mejorado. Además, de cada una de las muestras, se obtuvieron el límite líquido, límite plástico y el índice de plasticidad.

Clasificac. SUCS =		Muestra: M-1			
	CL	Tamiz ASTM	% que pasa	Diámetro (mm)	% que pasa
Límite Líquido =	31,0	3"	100,0	0,040	59,1
Límite Plástico =	20,0	2"	100,0	0,029	56,4
Límite Cohesión =	1,0	1 1/2"	100,0	0,024	54,3
Índice Plasticidad=	11,0	1"	100,0	0,021	53,2
		3/4"	100,0	0,015	50,0
		3/8"	100,0	0,011	46,3
		#4	99,4	0,008	44,0
		#10	94,7	0,006	39,9
		#20	88,5	0,004	36,2

#40	82,0	0,003	32,1
#60	76,1	0,002	28,0
#140	66,1	0,001	24,6
#200	63,0	-	-

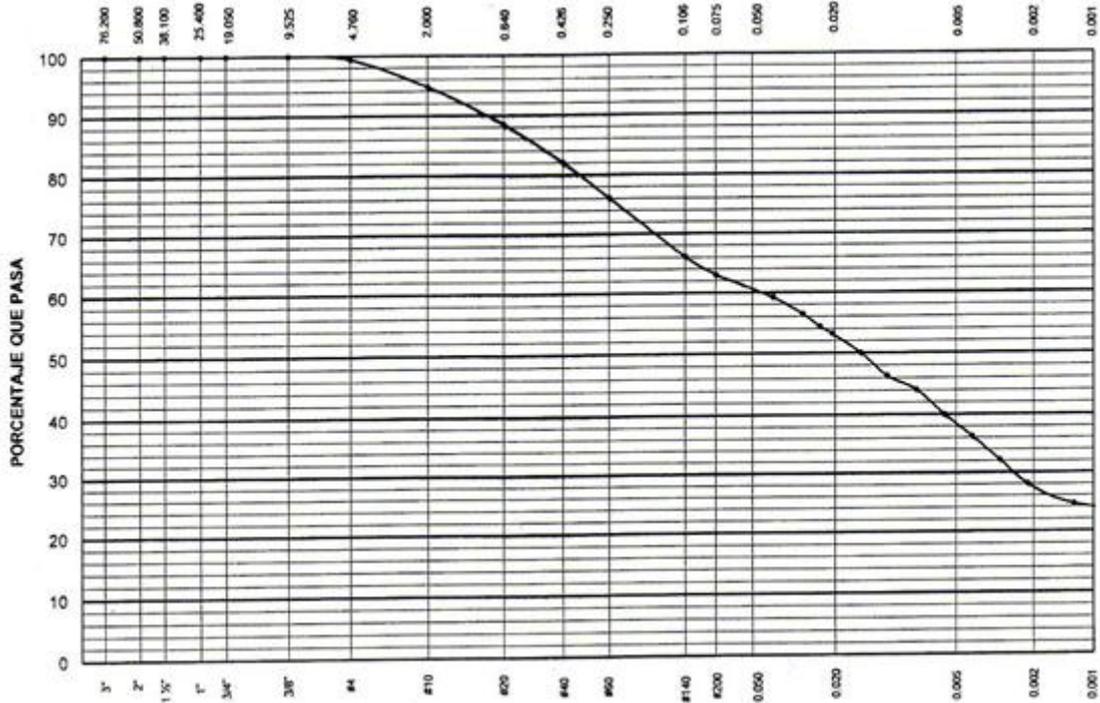


Figura 5.2. Granulometría de Muestra 1.

Clasificac SUCS = CL
Límite Líquido = 32,0
Límite Plástico = 19,0
Límite Cohesión = 11,0
Índice Plasticidad = 13,0

Muestra: M-2			
Diámetro (mm)	% que pasa	Diámetro (mm)	% que pasa
76,200	100,0	0,040	56,1
50,800	100,0	0,029	52,7
36,100	100,0	0,024	50,7
25,400	100,0	0,021	50,0
19,050	100,0	0,015	46,1
9,25	100,0	0,011	43,6
4,60	99,2	0,008	41,4
2,00	93,7	0,006	36,8
0,640	87,0	0,004	32,5
0,426	80,2	0,003	29,6
0,250	74,0	0,002	25,5
0,106	63,8	0,001	23,2
0,075	60,5	-	-

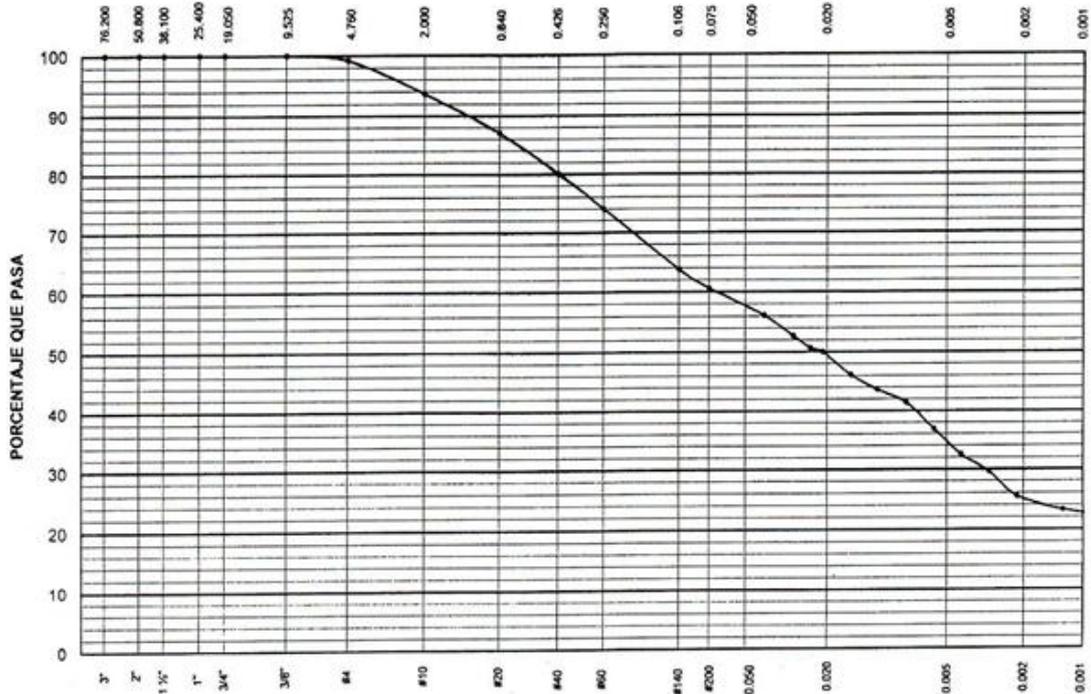


Figura 5.3. Granulometría de Muestra 2.

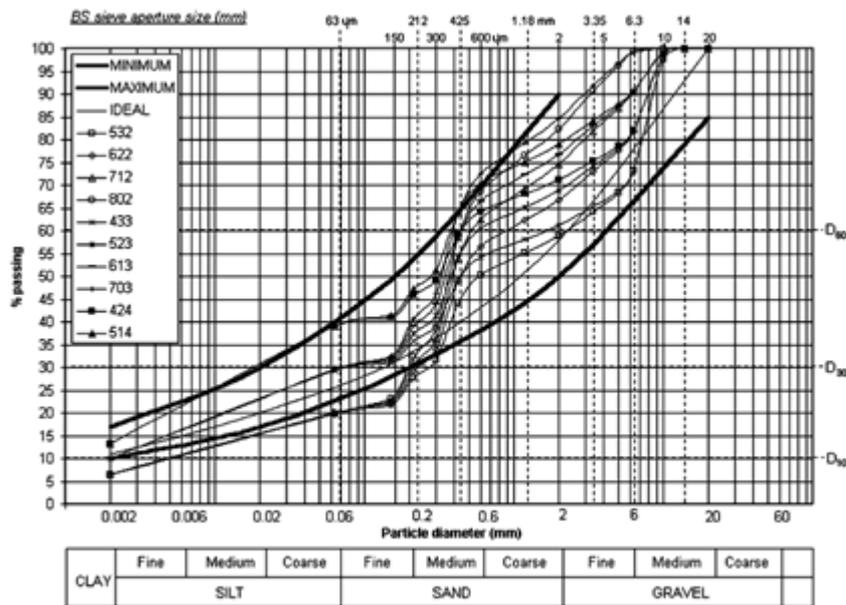


Fig. 3. BS 1377 Particle-size distribution chart with rammed earth soil data.

Figura 5.4 Rango de granulometría para construcción con tapial, referencia: Rammed earth sample production context recommendations and consistency_Hall_Djerbib

Interpretación de resultados

Se observa que el contenido de humedad promedio de trabajo de los obreros es de 18,8% mientras que el óptimo contenido de humedad para obtener la mejor compactación es de 12,2% obtenido del ensayo Proctor. Habría una tendencia a trabajar con suelo más húmedo que el necesario.

Con respecto a la granulometría se observa que el contenido de finos en las muestras del suelo con el cual se ha construido el módulo es mayor que los valores de referencias internacionales donde existe mayor contenido de arena y grava.

Compresión diagonal de muretes

Objetivo

Determinar la resistencia al corte de los bloques de tapial con los que se construyó el módulo de tapial mejorado. Asimismo, relacionar la resistencia obtenida en cada bloque con su respectivo contenido de humedad.

Especímenes y descripción de ensayo

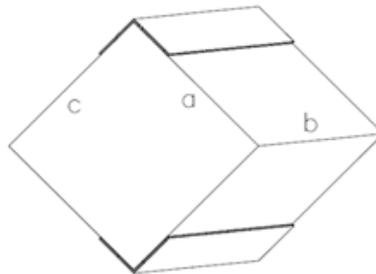


Figura 5.5. Esquema de espécimen para ensayo a compresión diagonal.



Figura 5.6. Espécimen de ensayo a compresión diagonal.

Murete	a (cm)	b (cm)	c (cm)	Carga Máx. (KN)	Humedad (%)
M-1	40	27	39,5	27,59	6,10
M-2	39,5	27	38	20,72	7,54
M-3	38	26,5	38	24,97	8,07

MURETE	ÁREA DIAGONAL CM2	CARGA MÁXIMA KN	ESFUERZO CORTANTE KPA
M-1	1,503	27,59	0,18
M-2	1,466	20,72	0,14
M-3	1,420	24,97	0,18

El esfuerzo cortante promedio es 0,166kPa, mucho mayor que el de la mampostería de adobe que varía entre 0,025kPa y 0,04kPa.

Compresión axial de pilas

Objetivo

Determinar la resistencia a compresión axial de los bloques de tapial con los que se construyó el módulo de tapial mejorado. Asimismo, relacionar la resistencia obtenida en cada bloque con su respectivo contenido de humedad.

Especímenes y descripción de ensayo

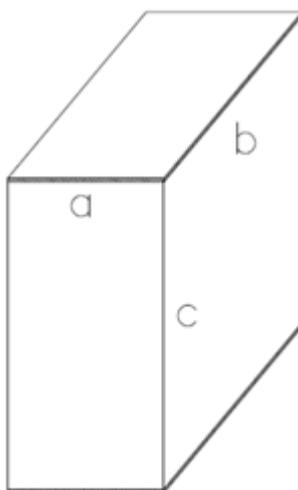


Figura 5.7. Esquema de espécimen de ensayo a compresión axial.



Figura 5.8. Espécimen de ensayo a compresión axial.

Pila	a (cm)	b (cm)	c (cm)	Carga Máx. (KN)	Humedad (%)
P-1	20,5	27,5	40,0	67,40	7,82
P-2	20,0	28,0	40,5	65,67	5,76
P-3	20,0	28,5	40,5	68,73	6,26

PILA	ÁREA CM2	CARGA MÁXIMA KN	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN KPA
P-1	563,8	67,40	1,19
P-2	560,0	45,67	0,81
P-3	570,0	68,73	1,21

La resistencia promedio a la compresión es de 1.07kPa, que es un valor muy cercano a lo que se solicita en la norma de adobe para las unidades (12kg/cm²). Teniendo en cuenta que el espesor de las paredes de tapial es bastante mayor que las paredes adobe para viviendas de uno y dos pisos, este valor se puede considerar adecuado.

Ensayo dinámico de módulo

Objetivo

Analizar el comportamiento sísmico de un módulo de tapial con el sistema de reforzamiento propuesto.

Descripción del espécimen

Se construyó un módulo de tapial con las siguientes características:

Dimensiones de tapias típicas: 0,28 x 0,40 x 0,90 m.
 Área del módulo: 3,26 x 3,26 m.
 Altura: 1,90 m.

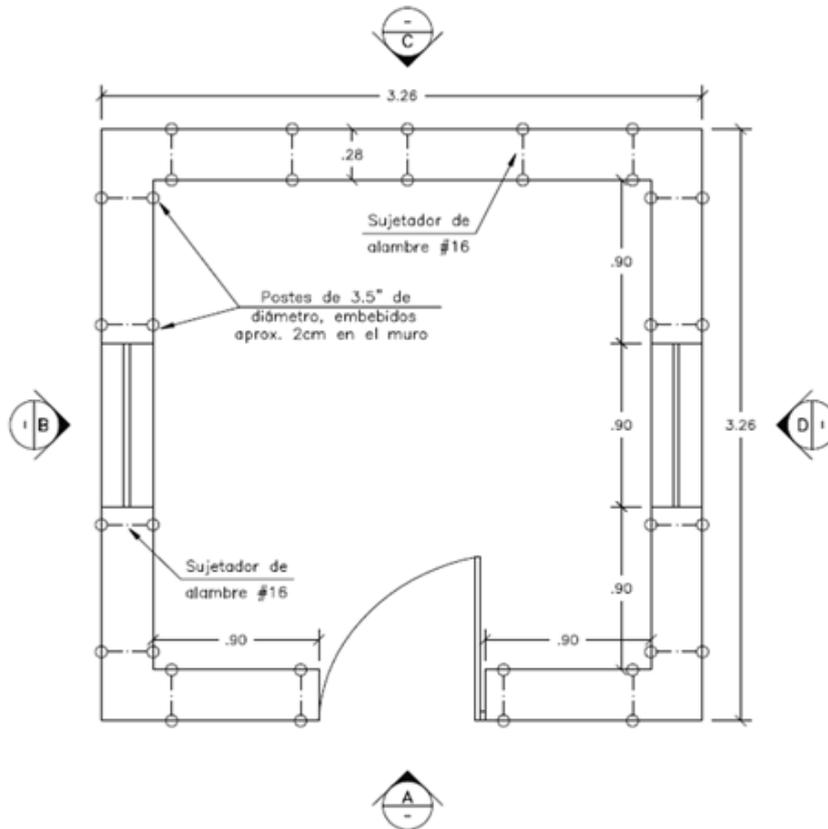


Figura 5.9. Planta del módulo de ensayo.

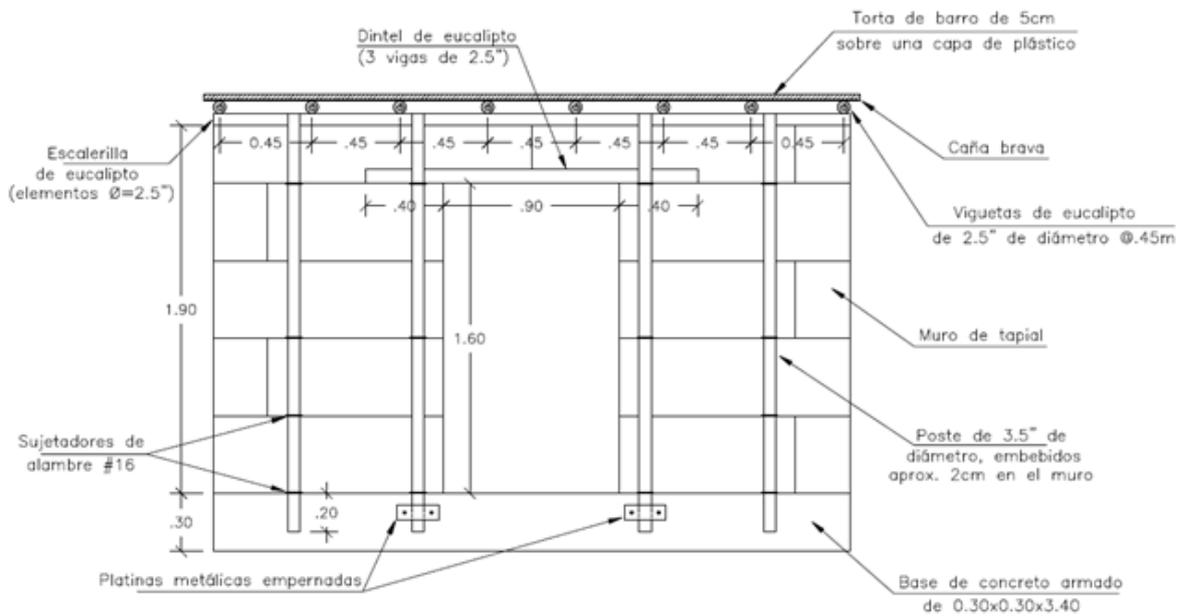


Figura 5.10. Elevación A del módulo de ensayo.

Construcción del espécimen

Para la construcción del módulo se utilizó un molde de madera de 0,28 m de ancho, 0,40 m de altura y longitud variable, según corresponda el plano de las hiladas, y un pisón de madera de 20 kg de peso aproximadamente.



Figura 5.11. Molde de madera utilizado (Izquierda) y pisón de madera (Derecha)

La proporción en volumen de la mezcla utilizada fue la siguiente:

- 12 unidades de tierra (remojuadas durante 24 horas)
- 2 unidades de arena.
- 2 unidades de agua.
- 0,5 unidades de paja

Los muros del módulo se construyeron siguiendo la siguiente disposición de tapias:

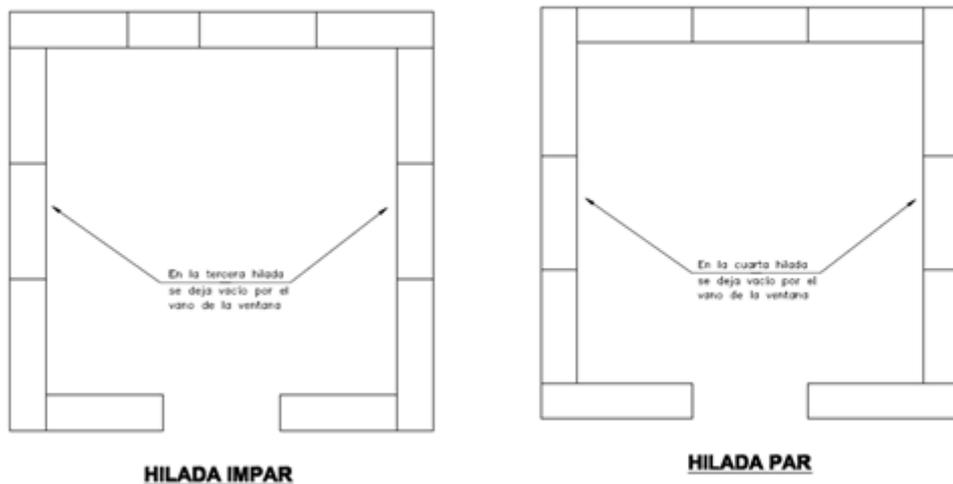


Figura 5.12. Disposición de las hiladas en el módulo de tapial.



Fig 5.13. Construcción de la quinta hilada del módulo.



Fig. 5.14. Dintel de una de las ventanas del módulo.



Fig. 5.15. Elaboración de rebajes de máximo 2 cm en los muros del módulo.



Fig. 5.16. Atortolado de los sujetadores de alambre.



Fig. 5.17. Vista del armado del techo.



Fig. 5.18. Resane de fisuras por contracción.

NOTAS

En las dos primeras hiladas se mantuvieron las bases de madera como parte del molde de tapial; a partir de la tercera hilada estas bases fueron reemplazadas por pernos de $\frac{3}{4}$ " de diámetro iguales a los colocados en la parte superior del molde.

En la quinta y última hilada la altura de los bloques de tapial se redujo de 0,40 a 0,35 m para mantener una altura total de 1,90 m.

Durante la construcción del módulo se generaron fisuras de contracción de secado en los muros del módulo, las cuales fueron resanadas adecuadamente.

Antes del proceso de resane se realizó un registro de fisuras en todos los muros para evitar confundirlas con las fisuras que se generen debido al ensayo dinámico.

Descripción del ensayo

La señal sísmica utilizada para el ensayo dinámico fue la del terremoto ocurrido en Ancash el 31 de mayo de 1970.

Las fases del ensayo fueron las siguientes:

- Fase 1: amplitud de desplazamiento = 30 mm.
- Fase 2: amplitud de desplazamiento = 60 mm.
- Fase 3: amplitud de desplazamiento = 90 mm.
- Fase 4: amplitud de desplazamiento = 130 mm.

Descripción del comportamiento sísmico del módulo



Figura 5.19. Módulo de tapial mejorado antes y después del ensayo.

Interpretación de resultados

El módulo de tapial resistió con buen comportamiento movimientos sísmicos equivalentes a sismos severos o raros con daños menores en las esquinas los cuales pueden ser fácilmente reparables o podrían ser también evitados si se coloca una malla de sogu u otro material equivalente en las esquinas.

CONCLUSIONES

Se ha comprobado experimentalmente que la construcción con tapial puede ser más resistente que la construcción con adobe.

La resistencia promedio a la compresión de la tapia ($10,7 \text{ kg/cm}^2$) es comparable a la requerida por la norma NTE.080 para unidades de adobe (12 kg/cm^2) sin embargo en la mampostería de adobe. La resistencia admisible baja a 2 kg/cm^2 lo que no ocurriría en el tapial por ser una construcción sin juntas de mortero.

La resistencia al corte del Tapial Mejorado (0.166 kPa), es mucho mayor que el de la mampostería de adobe que varía entre $0,025 \text{ kPa}$ y $0,04 \text{ kPa}$ y como los espesores del tapial son mayores que los de adobe entonces la capacidad resistente a carga vertical es alta en comparación.

Desde el punto de vista sísmico, el Tapial Mejorado tiene buena resistencia y buen comportamiento al tener refuerzos verticales de madera que evitan el volteo lateral de los muros y al contar con la visa solera de madera que asegura el trabajo conjunto de los muros.

El modelo a escala natural ha resistido bien un movimiento sísmico simulado equivalente a un sismo raro.

MODELO A ESCALA NATURAL SISTEMA CONSTRUCTIVO DE TAPIAL MEJORADO

El espécimen que se ensayó en el Laboratorio de Estructuras de la PUCP, se construyó a escala natural.

Se construyó un módulo de tapial con las siguientes características:

Dimensiones de tapias típicas: 0,28 x 0,40 x 0,90 m.

Área del módulo: 3,26 x 3,26 m

Altura: 1,90 m

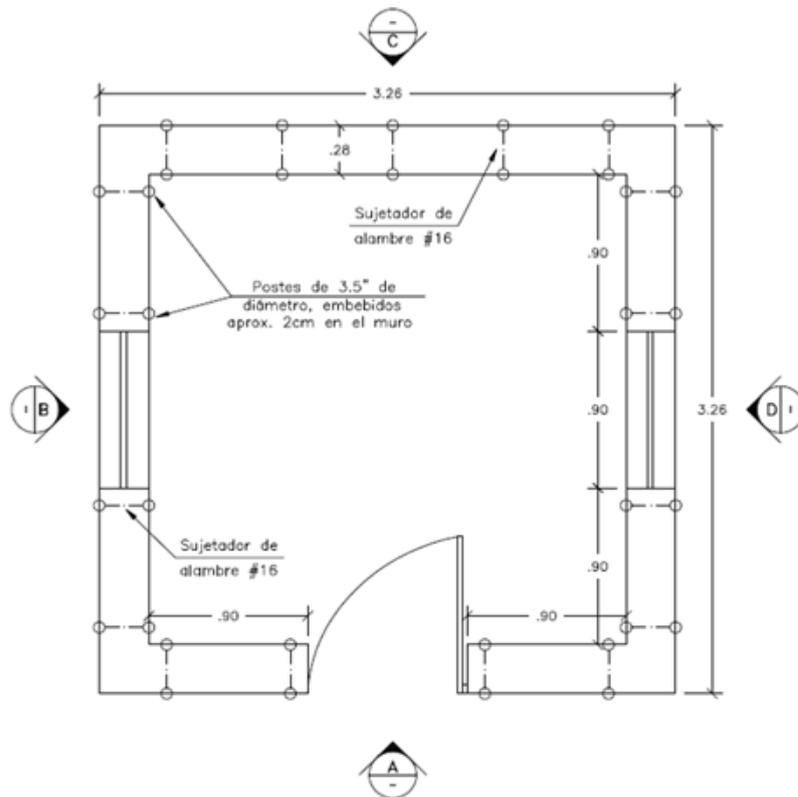


Figura 6.1. Planta del módulo de ensayo.

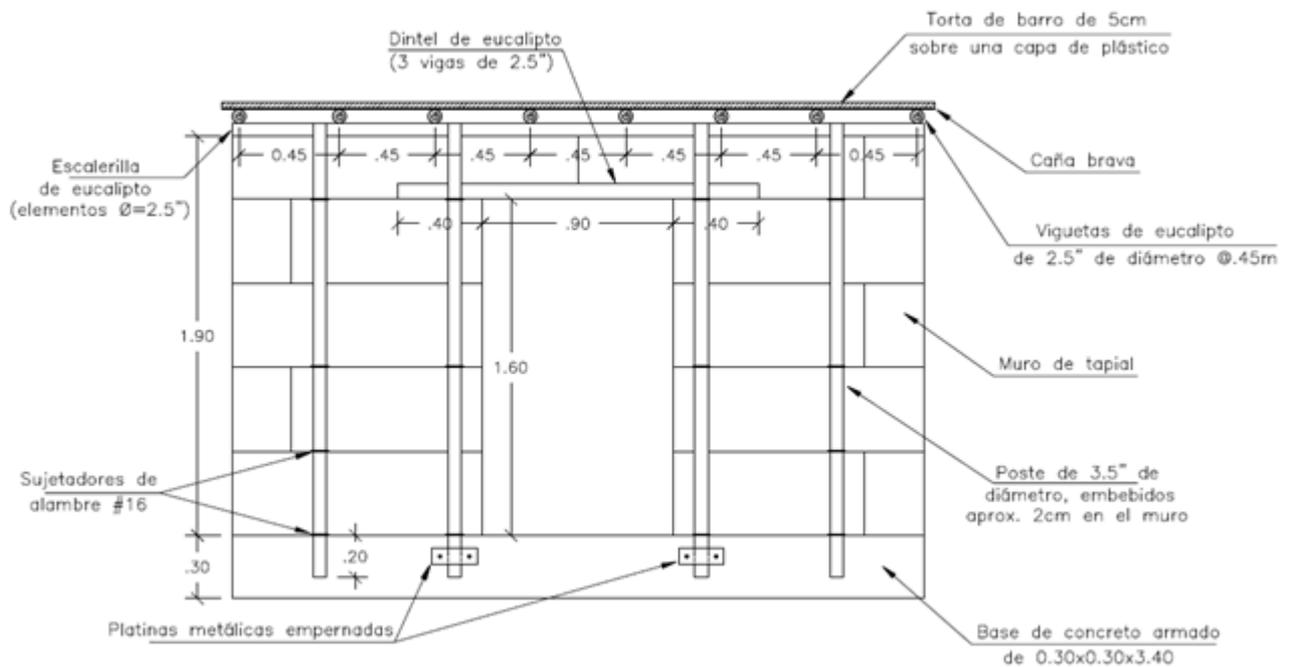


Figura 6.2. Elevación A del módulo de ensayo.

Construcción del espécimen

Para la construcción del módulo se utilizó un molde de madera de 0,28 m de ancho, 0,40 m de altura y longitud variable, según corresponda el plano de las hiladas, y un pisón de madera de 20 kg de peso aproximadamente.



Figura 6.3. Molde de madera utilizado (izquierda) y pisón de madera (derecha).

La proporción en volumen de la mezcla utilizada fue la siguiente:

- 12 unidades de tierra (remojadas durante 24 horas)
- 2 unidades de arena
- 2 unidades de agua

0,5 unidades de paja

Los muros del módulo se construyeron siguiendo la siguiente disposición de tapias:

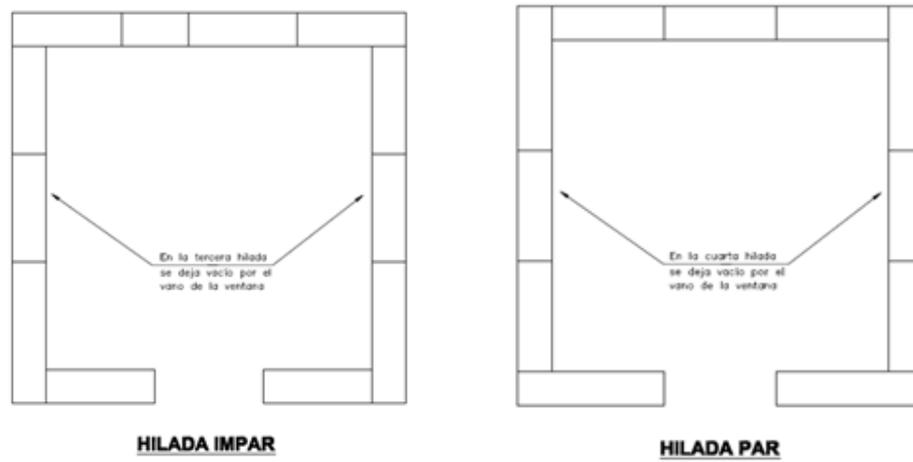


Figura 6.4. Disposición de las hiladas en el módulo de tapial.



Figura 6.5. Construcción de la quinta hilada del módulo.



Figura 6.6. Dintel de una de las ventanas del módulo.



Figura 6.7. Elaboración de rebajes de máximo 2cm en los muros del módulo.



Figura 6.8. Atortolado de los sujetadores de alambre.



Figura 6.9. Vista del armado del techo.



Figura 6.10. Resane de fisuras por contracción.

NOTAS

En las dos primeras hiladas se mantuvieron las bases de madera como parte del molde de tapial; a partir de la tercera hilada estas bases fueron reemplazadas por pernos de $\frac{3}{4}$ " de diámetro iguales a los colocados en la parte superior del molde.

En la quinta y última hilada la altura de los bloques de tapial se redujo de 0,40 a 0,35 m para mantener una altura total de 1,90 m.

Durante la construcción del módulo se generaron fisuras de contracción de secado en los muros del módulo, las cuales fueron resanadas adecuadamente.

Antes del proceso de resane se realizó un registro de fisuras en todos los muros para evitar confundirlas con las fisuras que se generen debido al ensayo dinámico.



Figura 6.11. Módulo terminado y colocado en la plataforma de ensayo.

REQUISITOS COMPLEMENTARIOS SISTEMA CONSTRUCTIVO DE TAPIAL MEJORADO

Costo máximo y mínimo por m² de construcción.

El costo de construcción del Sistema Constructivo No Convencional “Tapial Mejorado” está relacionado a la localidad de ejecución, es un sistema particularmente ventajoso cuando la construcción se realiza utilizando la materia prima del lugar, es decir la tierra que se usa es la del mismo sitio.

En esas condiciones es más económico que la construcción con adobe ya que no requiere un doble proceso.

Los costos por m² de construcción tomado como referencia los costos de construcción con tierra en zonas rurales serían:

Costo mínimo = S/. 220 por m²

Costo máximo = S/. 350 por m²

Factibilidad de insumos

Los insumos son convencionales, tierra sin material orgánico, agua, y madera o metal para los moldes del tapial. Todos los insumos son fácilmente obtenibles en las zonas rurales.

Método de control de calidad y producción

Para controlar la calidad de la construcción de tapial es necesario que el suelo usado como material de construcción tenga una composición que esté dentro de los siguientes rangos.

MATERIALES	PORCENTAJES (%)
Arena/grava	de 55 a 70
Arcilla	de 10 a 20
Limo	de 15 a 25

Asimismo el contenido de humedad de la mezcla previa al apisonado debe ser entre 9% y 15%.

Insumo de horas-hombre por m² de área techada: De acuerdo a la práctica in situ.

Justificación del Sistema demostrando economía y originalidad.

El sistema es ya ampliamente utilizado en la zona andina y de ceja de selva, la variación consiste en la inclusión de refuerzos de madera y la propuesta de utilizar un cimientó y sobrecimiento que impida que la humedad del suelo trepe por las paredes del tapial.

CERTIFICADOS DE ENSAYOS Y ANALISIS INTERPRETATIVOS. SISTEMA TAPIAL MEJORADO

Como parte del expediente técnico de Tapial Mejorado, se desarrolló el plan de ensayos que se describe a continuación:

Análisis de suelos

Objetivo

Obtener la granulometría de la tierra usada en la construcción del módulo a escala para el ensayo dinámico. Asimismo, conocer la humedad de las mezclas utilizadas en diferentes hiladas del módulo para verificar su variación y determinar la humedad óptima de la mezcla para tapial.

Descripción de ensayos

Contenido de Humedad: Se determinó el contenido de agua en cada una de las muestras analizadas. Las muestras se obtuvieron de las diferentes hiladas durante la construcción del módulo de tapial mejorado.

MUESTRA	HUMEDAD (%)
M-1 (3ra hilada)	20,26
M-2 (3ra hilada)	18,62
M-3 (4ta hilada)	17,32
M-4 (4ta hilada)	17,90
M-5 (5ta hilada)	20,01
Promedio =	18,82

Tabla 5.1. Contenido de humedad al momento de la construcción.

Proctor Modificado: Se realizó este ensayo para determinar la humedad de compactación para la cual se obtiene la máxima densidad seca o humedad óptima.

PUNTO	HUMEDAD (%)	DENSIDAD SECA (g/cm ³)
1	8,0	1,82
2	10,0	1,86
3	12,0	1,88
4	14,2	1,86
5	16,2	1,79
Máxima densidad seca =		1,88 g/cm ³
Humedad óptima =		12,1%

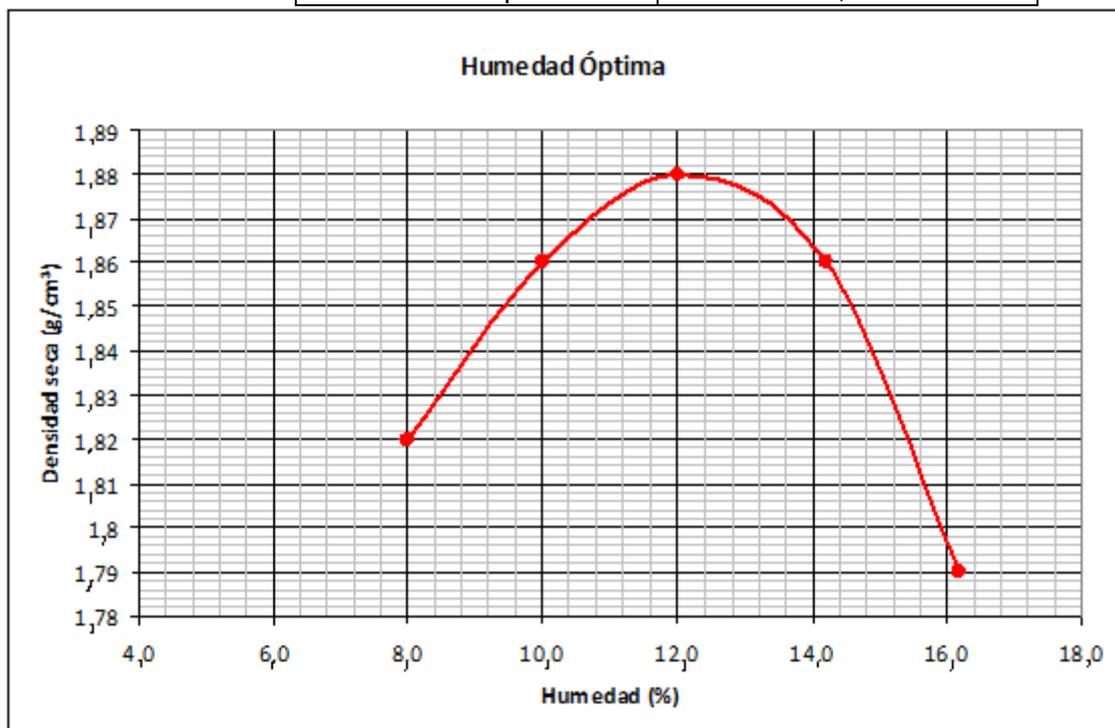


Figura 5.1. Ensayo de contenido óptimo de humedad (PROCTOR)

Granulometría: Se realizó la clasificación por tamaños de dos muestras obtenidas de mezclas preparadas para construir el módulo de tapial mejorado.

Además, de cada una de las muestras, se obtuvieron el límite líquido, límite plástico y el índice de plasticidad.

Muestra:	M-1		
Tamiz ASTM	% que pasa	Diámetro (mm)	% que pasa
3"	100,0	0,040	59,1
2"	100,0	0,029	56,4
1 1/2"	100,0	0,024	54,3
1"	100,0	0,021	53,2
3/4"	100,0	0,015	50,0
3/8"	100,0	0,011	46,3
#4	99,4	0,008	44,0
#10	94,7	0,006	39,9
#20	88,5	0,004	36,2
#40	82,0	0,003	32,1
#60	76,1	0,002	28,0
#140	66,1	0,001	24,6
#200	63,0	-	-

Clasificac. SUCS =	CL
Límite Líquido =	31,0
Límite Plástico =	20,0
Límite Cohesión =	10,0
Índice Plasticidad=	11,0

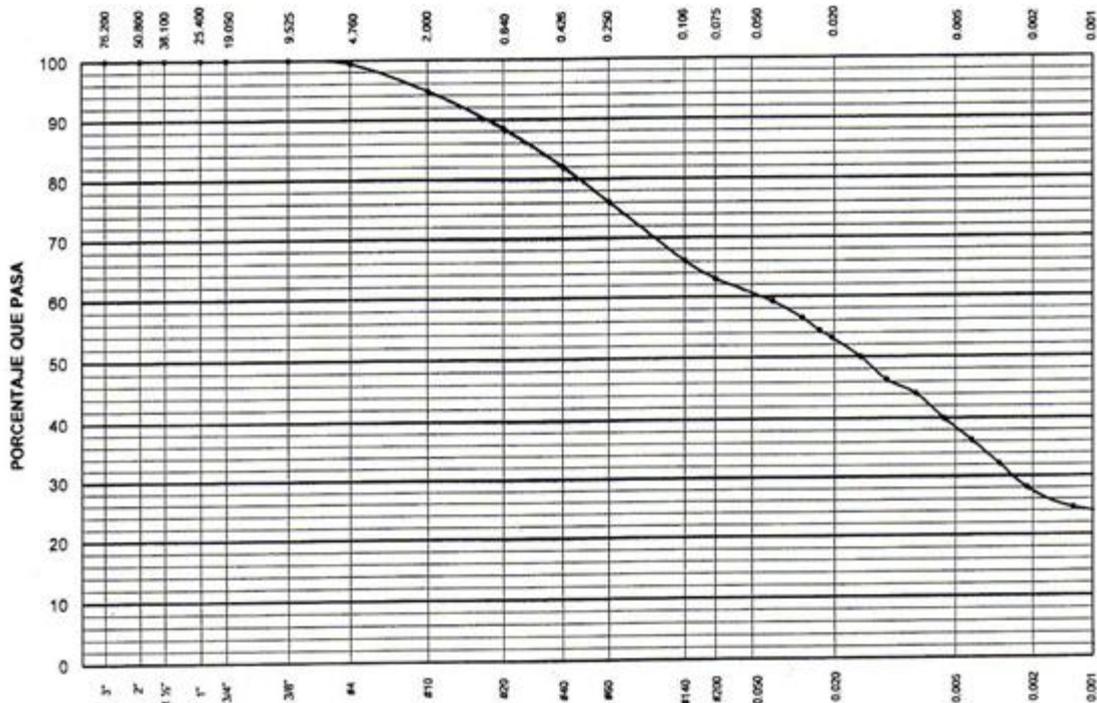


Figura 5.2. Granulometría de Muestra 1.

Clasificac SUCS =	CL
Límite Líquido =	32,0
Límite Plástico =	19,0
Límite Cohesión =	11,0
Índice Plasticidad=	13,0

Muestra:	M-2		
Diámetro (mm)	% que pasa	Diámetro (mm)	% que pasa
76,200	100,0	0,040	56,1
50,800	100,0	0,029	52,7
36,100	100,0	0,024	50,7
25,400	100,0	0,021	50,0
19,050	100,0	0,015	46,1
9,525	100,0	0,011	43,6
4,760	99,2	0,008	41,4
2,000	93,7	0,006	36,8
0,640	87,0	0,004	32,5
0,426	80,2	0,003	29,6
0,250	74,0	0,002	25,5
0,106	63,8	0,001	23,2
0,075	60,5	-	-

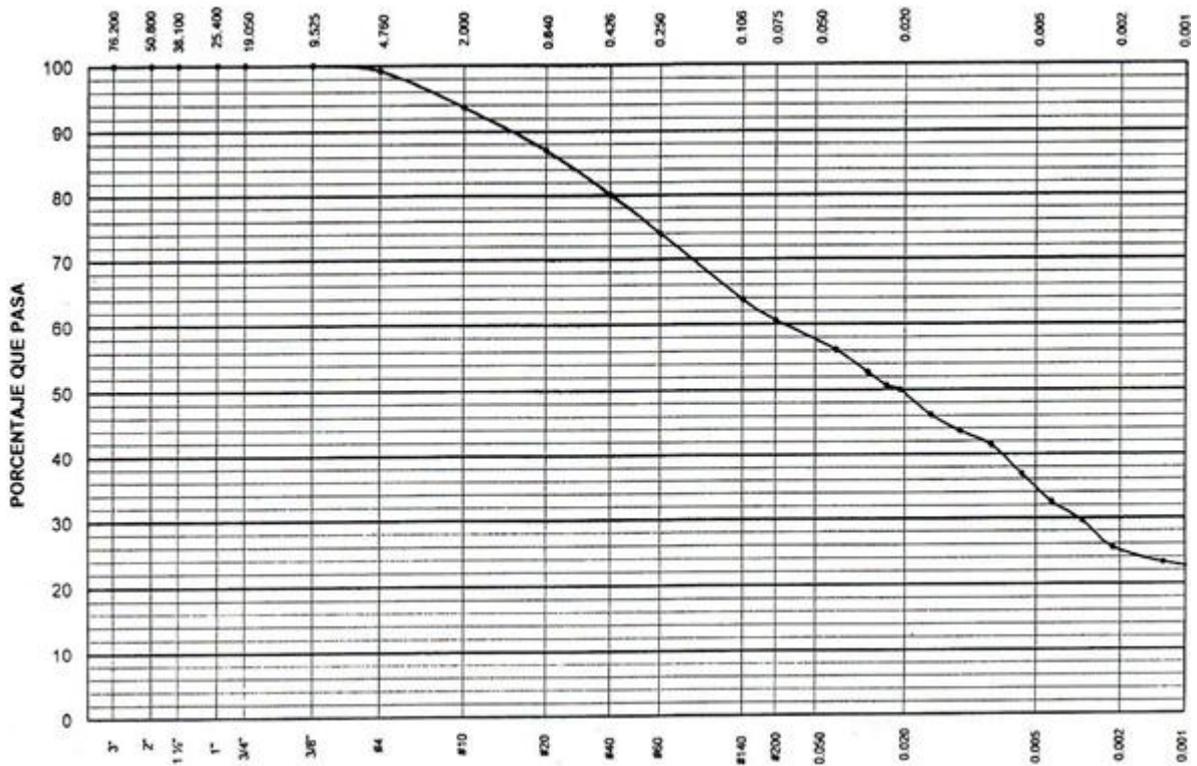


Figura 5.3. Granulometría de Muestra 2.

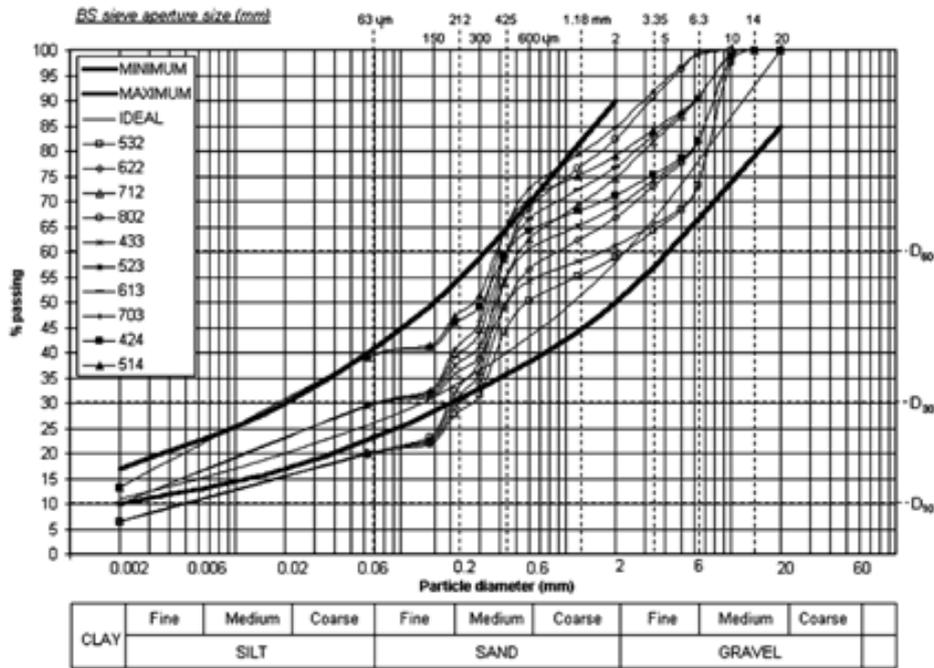


Fig. 3. BS 1377 Particle-size distribution chart with rammed earth soil data.

Figura 5.4. Rango de granulometría para construcción con tapial, referencia: Rammed earth sample production context recommendations and consistency_Hall_Djerbib

Interpretación de resultados

Se observa que el contenido de humedad promedio de trabajo de los obreros es de 18,8% mientras que el óptimo contenido de humedad para obtener la mejor compactación es de 12,2% obtenido del ensayo Proctor. Habría una tendencia a trabajar con suelo más húmedo que el necesario.

Con respecto a la granulometría se observa que el contenido de finos en las muestras del suelo con el cual se ha construido el módulo es mayor que los valores de referencias internacionales donde existe mayor contenido de arena y grava.

Compresión diagonal de muretes

Objetivo

Determinar la resistencia al corte de los bloques de tapial con los que se construyó el módulo de tapial mejorado. Asimismo, relacionar la resistencia obtenida en cada bloque con su respectivo contenido de humedad.

Especímenes y descripción de ensayo

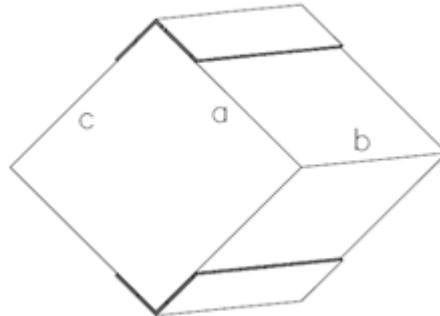


Figura 5.5. Esquema de espécimen para ensayo a compresión diagonal.



Figura 5.6. Especimen de ensayo a compresión diagonal.

Murete	a (cm)	b (cm)	c (cm)	Carga Máx. (kN)	Humedad (%)
M-1	40	27	39,5	27,59	6,10
M-2	39,5	27	38	20,72	7,54
M-3	38	26,5	38	24,97	8,07

Murete	Área Diagonal cm ²	Carga Máxima kN	Esfuerzo Cortante kPa
M-1	1,503	27,59	0,18
M-2	1,466	20,72	0,14
M-3	1,420	24,97	0,18

El esfuerzo cortante promedio es 0,166kPa, mucho mayor que el de la mampostería de adobe que varía entre 0,025kPa y 0,04kPa.

Compresión axial de pilas

Objetivo

Determinar la resistencia a compresión axial de los bloques de tapial con los que se construyó el módulo de tapial mejorado. Asimismo, relacionar la resistencia obtenida en cada bloque con su respectivo contenido de humedad.

Especímenes y descripción de ensayo

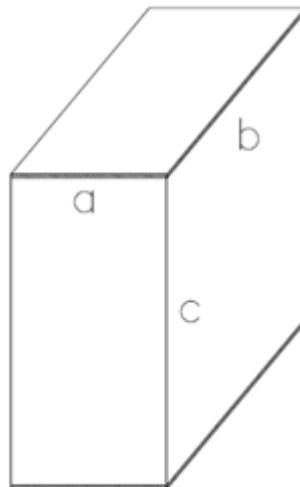


Figura 5.7. Esquema de espécimen de ensayo a compresión axial.



Figura 5.8. Espécimen de ensayo a compresión axial.

Pila	a (cm)	b (cm)	c (cm)	Carga Máx. (KN)	Humedad (%)
P-1	20,5	27,5	40,0	67,40	7,82
P-2	20,0	28,0	40,5	65,67	5,76
P-3	20,0	28,5	40,5	68,73	6,26

PILA	ÁREA CM2	CARGA MÁXIMA KN	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN KPA
P-1	563,8	67,40	1,19
P-2	560,0	45,67	0,81
P-3	570,0	68,73	1,21

La resistencia promedio a la compresión es de 1,07kPa, que es un valor muy cercano a lo que se solicita en la norma de adobe para las unidades (12kg/cm²). Teniendo en cuenta que el espesor de las paredes de tapial es bastante mayor que las paredes adobe para viviendas de uno y dos pisos, este valor se puede considerar adecuado.

Ensayo dinámico de módulo

Objetivo

Analizar el comportamiento sísmico de un módulo de tapial con el sistema de reforzamiento propuesto.

Descripción del espécimen

Se construyó un módulo de tapial con las siguientes características:

Dimensiones de tapias típicas: 0,28 x 0,40 x 0,90 m.

Área del módulo: 3,26 x 3,26 m.

Altura: 1,90 m.

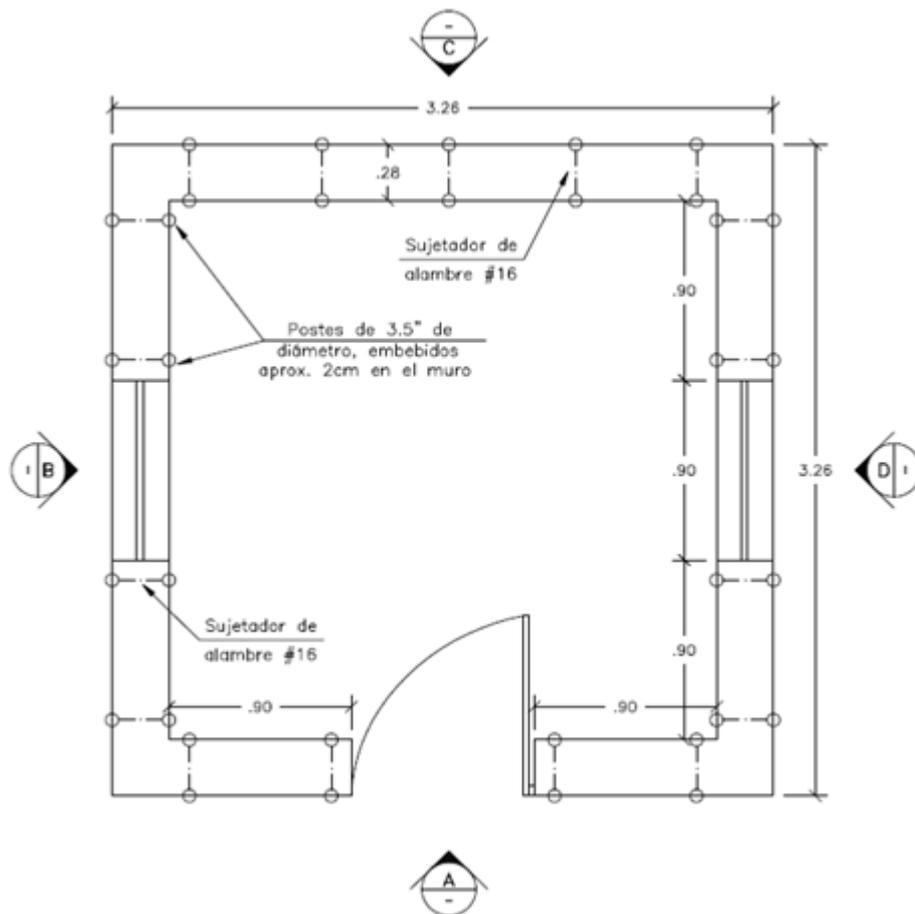


Figura 5.9. Planta del módulo de ensayo.

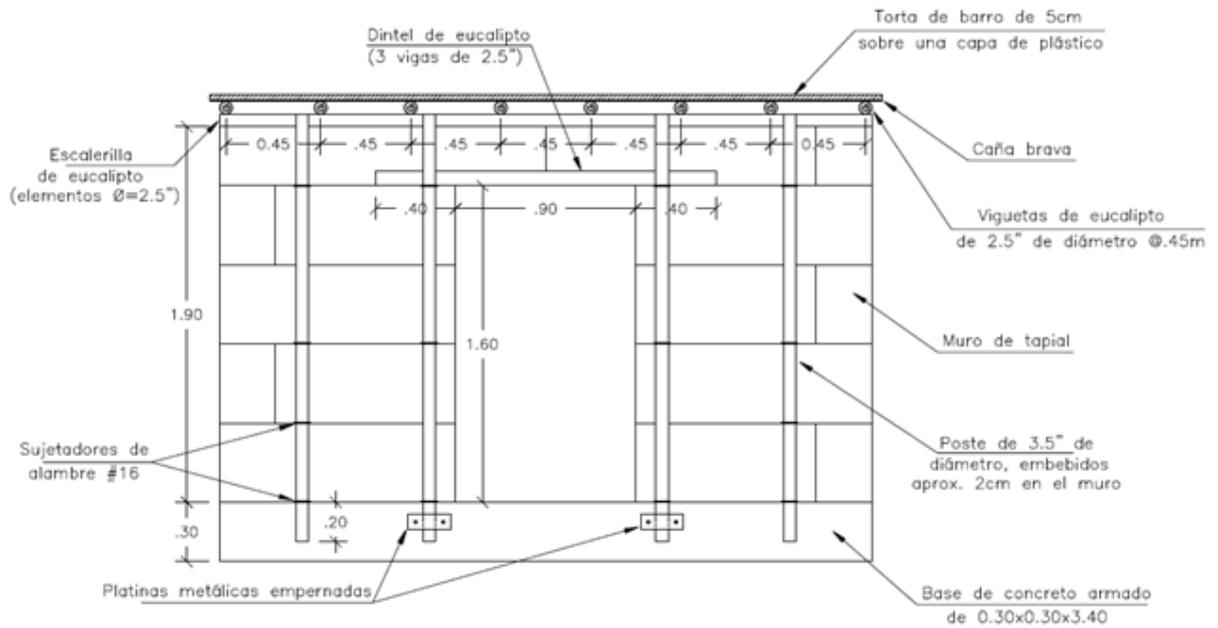


Figura 5.10. Elevación A del módulo de ensayo.

Construcción del espécimen

Para la construcción del módulo se utilizó un molde de madera de 0,28 m de ancho, 0,40 m de altura y longitud variable, según corresponda el plano de las hiladas, y un pisón de madera de 20 kg de peso aproximadamente.



Figura 5.11. Molde de madera utilizado (izquierda) y pisón de madera (derecha)

La proporción en volumen de la mezcla utilizada fue la siguiente:

- 12 unidades de tierra (remojadas durante 24 horas)
- 2 unidades de arena.
- 2 unidades de agua.
- 0,5 unidades de paja.

Los muros del módulo se construyeron siguiendo la siguiente disposición de tapias:

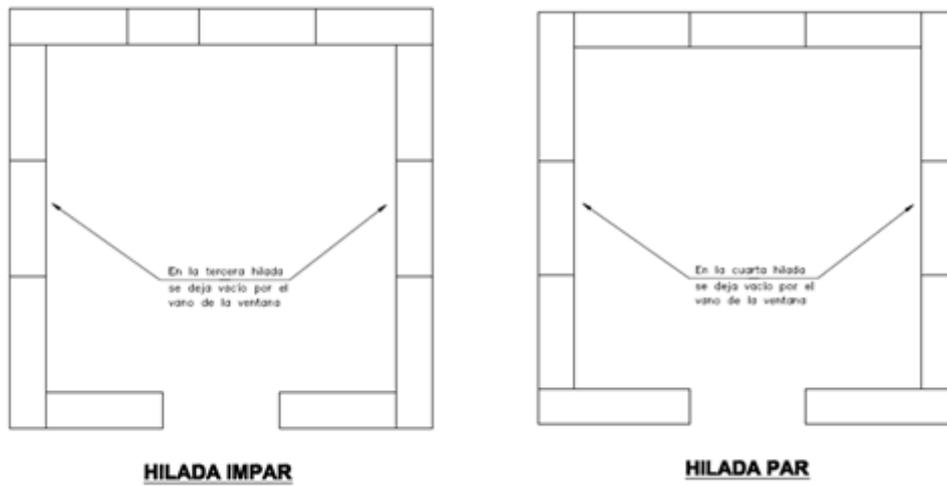


Figura 5.12. Disposición de las hiladas en el módulo de tapial.



Figura 5.13. Construcción de la quinta hilada del módulo.



Figura 5.14. Dintel de una de las ventanas del módulo.



Figura 5.15. Elaboración de rebajes de máximo 2cm en los muros del módulo.



Figura 5.16. Atortolado de los sujetadores de alambre.



Figura 5.17. Vista del armado del techo.



Figura 5.18. Resane de fisuras por contracción.

NOTAS

En las dos primeras hiladas se mantuvieron las bases de madera como parte del molde de tapial; a partir de la tercera hilada estas bases fueron reemplazadas por pernos de $\frac{3}{4}$ " de diámetro iguales a los colocados en la parte superior del molde.

En la quinta y última hilada la altura de los bloques de tapial se redujo de 0,40 a 0,35 m para mantener una altura total de 1,90 m.

Durante la construcción del módulo se generaron fisuras de contracción de secado en los muros del módulo, las cuales fueron resanadas adecuadamente.

Antes del proceso de resane se realizó un registro de fisuras en todos los muros para evitar confundirlas con las fisuras que se generen debido al ensayo dinámico.

Descripción del ensayo

La señal sísmica utilizada para el ensayo dinámico fue la del terremoto ocurrido en Ancash el 31 de mayo de 1970.

Las fases del ensayo fueron las siguientes:

- Fase 1: amplitud de desplazamiento = 30 mm.
- Fase 2: amplitud de desplazamiento = 60 mm.
- Fase 3: amplitud de desplazamiento = 90 mm.
- Fase 4: amplitud de desplazamiento = 130 mm.

Descripción del comportamiento sísmico del módulo



Figura 5.19. Módulo de tapial mejorado antes y después del ensayo.

Interpretación de resultados

El módulo de tapial resistió con buen comportamiento movimientos sísmicos equivalentes a sismos severos o raros con daños menores en las esquinas los cuales pueden ser fácilmente reparables o podrían ser también evitados si se coloca una malla de sogá u otro material equivalente en las esquinas.

CONCLUSIONES

Se ha comprobado experimentalmente que la construcción con tapial puede ser más resistente que la construcción con adobe.

La resistencia promedio a la compresión de la tapia ($10,7 \text{ kg/cm}^2$) es comparable a la requerida por la norma NTE.080 para unidades de adobe (12 kg/cm^2) sin embargo en la mampostería de adobe. La resistencia admisible baja a 2 kg/cm^2 lo que no ocurriría en el tapial por ser una construcción sin juntas de mortero.

La resistencia al corte del Tapial Mejorado ($0,166 \text{ kPa}$), es mucho mayor que el de la mampostería de adobe que varía entre $0,025 \text{ kPa}$ y $0,04 \text{ kPa}$ y como los espesores del tapial son mayores que los de adobe entonces la capacidad resistente a carga vertical es alta en comparación.

Desde el punto de vista sísmico, el Tapial Mejorado tiene buena resistencia y buen comportamiento al tener refuerzos verticales de madera que evitan el volteo lateral de los muros y al contar con la visa solera de madera que asegura el trabajo conjunto de los muros.

El modelo a escala natural ha resistido bien un movimiento sísmico simulado equivalente a un sismo raro.

MODELO A ESCALA NATURAL SISTEMA CONSTRUCTIVO DE TAPIAL MEJORADO

El espécimen que se ensayó en el Laboratorio de Estructuras de la PUCP, se construyó a escala natural.

Se construyó un módulo de tapial con las siguientes características:

La proporción en volumen de la mezcla utilizada fue la siguiente:

- 12 unidades de tierra (remojadas durante 24 horas)
- 2 unidades de arena.
- 2 unidades de agua.
- 0,5 unidades de paja.

Los muros del módulo se construyeron siguiendo la siguiente disposición de tapias:

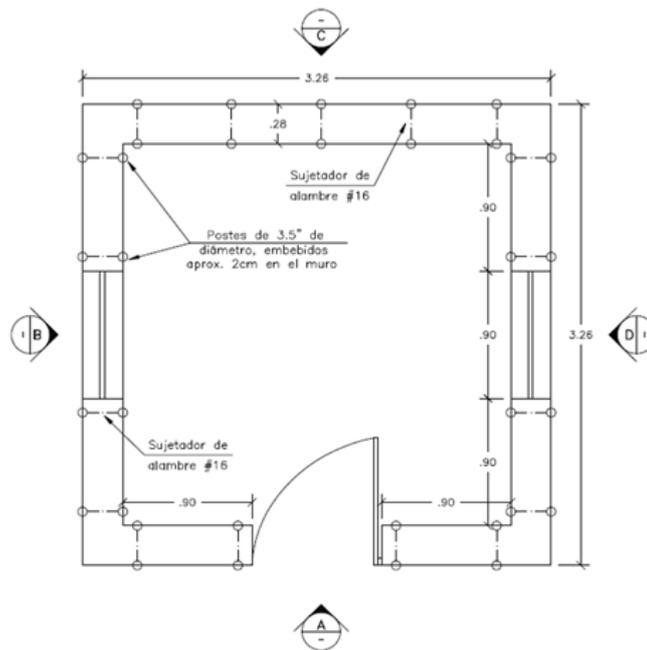


Figura 6.1. Planta del módulo de ensayo.

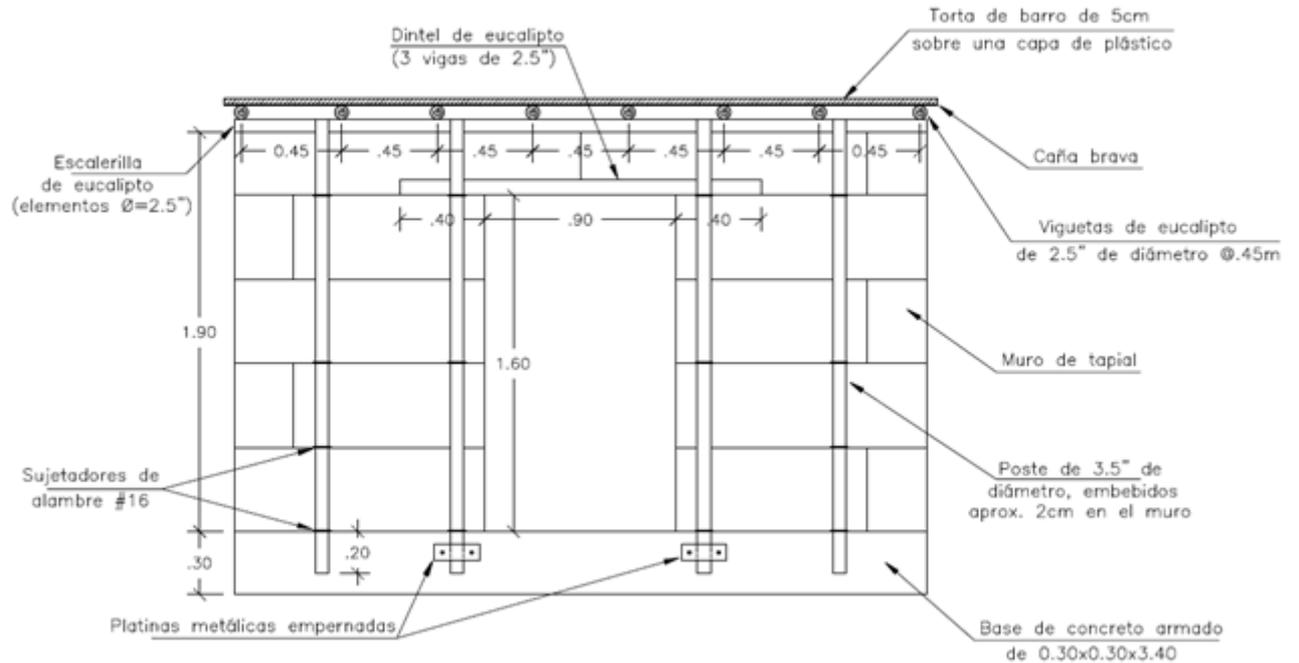


Figura 6.2. Elevación A del módulo de ensayo.

Construcción del espécimen

Para la construcción del módulo se utilizó un molde de madera de 0,28 m de ancho, 0,40 m de altura y longitud variable, según corresponda el plano de las hiladas, y un pisón de madera de 20 kg de peso aproximadamente.



Figura 6.3. Molde de madera utilizado (izquierda) y pisón de madera (derecha)

La proporción en volumen de la mezcla utilizada fue la siguiente:

- 12 unidades de tierra (remojadas durante 24 horas)
- 2 unidades de arena.
- 2 unidades de agua.

0,5 unidades de paja.

Los muros del módulo se construyeron siguiendo la siguiente disposición de tapias:

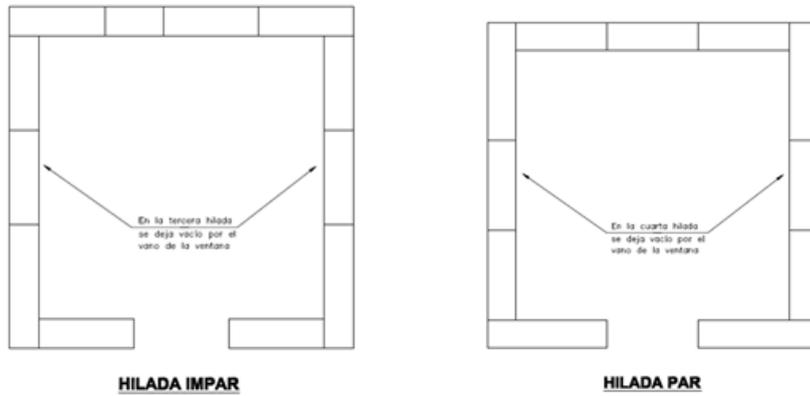


Figura 6.4. Disposición de las hiladas en el módulo de tapial.



Figura 6.5. Construcción de la quinta hilada del módulo.



Figura 6.6. Dintel de una de las ventanas del módulo.



Figura 6.7. Elaboración de rebajes de máximo 2 cm en los muros del módulo.



Figura 6.8. Atortolado de los sujetadores de alambre.



Figura 6.9. Vista del armado del techo.



Figura 6.10. Resane de fisuras por contracción.

NOTAS

En las dos primeras hiladas se mantuvieron las bases de madera como parte del molde de tapial; a partir de la tercera hilada estas bases fueron reemplazadas por pernos de $\frac{3}{4}$ " de diámetro iguales a los colocados en la parte superior del molde.

En la quinta y última hilada la altura de los bloques de tapial se redujo de 0,40 a 0,35 m para mantener una altura total de 1,90 m.

Durante la construcción del módulo se generaron fisuras de contracción de secado en los muros del módulo, las cuales fueron resanadas adecuadamente.

Antes del proceso de resane se realizó un registro de fisuras en todos los muros para evitar confundirlas con las fisuras que se generen debido al ensayo dinámico.



Figura 6.11. Módulo terminado y colocado en la plataforma de ensayo.

REQUISITOS COMPLEMENTARIOS SISTEMA CONSTRUCTIVO DE TAPIAL MEJORADO

Costo máximo y mínimo por m² de construcción.

El costo de construcción del Sistema Constructivo No Convencional “Tapial Mejorado” está relacionado a la localidad de ejecución, es un sistema particularmente ventajoso cuando la construcción se realiza utilizando la materia prima del lugar, es decir la tierra que se usa es la del mismo sitio.

En esas condiciones es más económico que la construcción con adobe ya que no requiere un doble proceso.

Los costos por m² de construcción tomado como referencia los costos de construcción con tierra en zonas rurales serían:

Costo mínimo = S/. 220 por m².

Costo máximo = S/. 350 por m².

Factibilidad de insumos

Los insumos son convencionales, tierra sin material orgánico, agua, y madera o metal para los moldes del tapial. Todos los insumos son fácilmente obtenibles en las zonas rurales.

Método de control de calidad y producción

Para controlar la calidad de la construcción de tapial es necesario que el suelo usado como material de construcción tenga una composición que esté dentro de los siguientes rangos.

MATERIALES	PORCENTAJES (%)
Arena/grava	de 55 a 70
Arcilla	de 10 a 20
Limo	de 15 a 25

Asimismo el contenido de humedad de la mezcla previa al apisonado debe ser entre 9% y 15%. Insumo de horas-hombre por m² de área techada. De acuerdo a la práctica in situ.

Justificación del sistema demostrando economía y originalidad

El sistema es ya ampliamente utilizado en la zona andina y de ceja de selva, la variación consiste en la inclusión de refuerzos de madera y la propuesta de utilizar un cimientó y sobrecimiento que impida que la humedad del suelo trepe por las paredes del tapial.