

UNIVERSIDAD DE TALCA.
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA EN CONSTRUCCIÓN



**“ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD TÉCNICO-ECONÓMICA DE
CONSTRUCCIÓN DE VIVIENDAS DE TAPIAL EN ZONAS
RURALES DE LA REGIÓN DEL MAULE”**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CONSTRUCTOR.

PROFESOR GUÍA: JORGE BRAVO GONZALEZ

HUMBERTO ERNESTO LAZO BECAR

CURICÓ – CHILE

2022

CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Curicó, 2023

AGRADECIMIENTOS

La verdad es que esto me resulta complejo y emocionante a la vez, ya que está a sido una de las etapas más importantes y significativas en mi vida. Quiero dejar bien claro que detrás de esto, hay muchas horas de trabajo, esfuerzo, dedicación, compromiso y sobre todo sacrificios.

Para mí es de suma importancia mencionar que yo no he llagado solo hasta aquí, al contrario, esta meta no es solo mía, si bien es personal, pero a la vez, también le pertenece a un grupo de personas que han estado a mi lado incondicionalmente en diferentes aspectos, formado el escenario y las condiciones necesarias para que este logro fuese posible, a continuación dedicare las siguientes líneas a quienes me apoyaron y guiaron a lo largo de éste proceso, contribuyendo la persona que soy el día de hoy.

Daré comienzo otorgándole los más grandes y sinceros agradecimientos desde el fondo de mi corazón a mis padres, Alicia Elva Becar Varas y Domingo Humberto Lazo Ortiz, ellos me inculcaron desde pequeño que yo puedo, que si me esfuerzo lo suficiente puedo cumplir todos mis sueños y metas, gracias padres por la base tan sólida que me inculcaron, les agradezco todos sus esfuerzos, porque yo de pequeño vi día a día como luchaban y lo daban todo para darnos a mis hermanas y a mí lo mejor de lo mejor, por apoyarme siempre incondicionalmente desde el día que llegue a este mundo, nunca me faltó nada, ni lo más mínimo, sobre todo estoy muy agradecido por haberme otorgado un cálido hogar y una familia llena de amor, por todo lo anterior, muchas gracias padres, los amo con todo mi corazón.

También le estoy muy agradecido a dos mujeres que han sido pilares fundamentales en este ciclo, a mis hermanas, Katherine Lazo Becar, quien siempre me ha apoyado incondicionalmente en todos los sentidos a lo largo de toda mi vida, del mismo modo a Paula Lazo Becar, por ser mi hermana mayor, sabia, madura y llena de amor. Se que siempre puedo contar con ellas, ya que ambas son como madres para mí.

Ahora le daré mis más sinceros agradecimientos a tres docentes que fueron claves en mi crecimiento académico, otorgándome herramientas y habilidades que poseo al día de hoy, uno estos docentes es mi profesor guía, Jorge Bravo, el cual no solo resulto ser un buen docente, sino que además fue una persona muy comprensiva y empática, eso lo comprendí en el transcurso de esta memoria, donde en un comienzo me resultó complejo comprender el tema, pero él ni yo nos rendimos,

por lo que trabajamos más, reuniéndonos dos veces por semana, así fue capaz de ayudándome con la mejor de las voluntades. También mis más sinceros respetos y agradecimientos al profesor, Enzo Arellano, quien me oriento mucho en mi periodo académico, siendo muy certero a la hora de enseñar, estricto, pero por el bien del alumno. Por último, agradecer al docente y director de escuela de Ingeniería en Construcción, Armando Duran, quien me entrego siempre su mejor disponibilidad y preocupación, con vocación para enseñar la realidad del terreno. Por lo anterior, muchas gracias a ustedes docentes por haberme ayudado en mi formación como profesional.

También daré las gracias a mis amigos, y digo esto porque aprendí lo mucho que valen los amigos verdaderos, aquellos con los que sé que puedo contar, evidentemente son muy pocos, pero con pocos basta y me siento pleno y feliz por ello, partiré mencionando a mi Sensei Cristian Rivas Rodríguez, 6 Dan de karate Ken Shin Kan, él ha sido una persona fundamental en toda esta etapa, siempre ha sido un excelente amigo y maestro de Karate, contando incondicionalmente con él, inclusive desde antes de entrar a esta gran Universidad, solidificando mis bases valóricas y sobre todo me otorgo una gran seguridad y confianza, aprendiendo que si los demás pueden, yo también puedo, y eso es invaluable. Continuare otorgando los merecidos agradecimientos a tres amigos, empezando con Mauricio Echeverría y José Moreno, con los que me esforcé, dedique, trasnoche y avance académicamente en la Universidad, por ultimo a mi amigo Roberto Vásquez, quien me ayudo a complementar y fortalecer mis capacidades en terreno, entregándome siempre su apoyo incondicional, espero siga siendo así ya que es un excelente mentor y amigo, muchas gracias amigos por haber estado conmigo codo a codo durante esta etapa.

Para finalizar daré las gracias y los merecidos créditos a todo el equipo docente de la Facultad de Ingeniería en Construcción de la Universidad de Talca, quienes han demostrado a lo largo de los años ser muy competentes en sus áreas, entregado las herramientas y competencias necesarias para formar a los Ingenieros Constructores, que sin duda alguna demuestran ser muy capaces y competentes en sus carreras profesionales.

DEDICATORIA

Desde lo más profundo de mi corazón, quiero dedicar esta Memoria de Título a mis amados padres.

Humberto Ernesto Lazo Becar.

RESUMEN EJECUTIVO

La contaminación en el siglo XXI está muy lejos de tener algún control que resulte realmente eficiente y consecuente con el medio ambiente. Las obras de construcción no se quedan atrás, contribuyendo con altos índices de volumen de desechos anualmente. Por esta razón, se lleva a cabo el estudio de una vivienda que posea una estructura amigable con el ambiente, capaz de dejar una baja huella ecológica a corto y largo plazo, debido a esta necesidad se analiza la factibilidad técnica y económica de la construcción de una vivienda en una estructura de tipo tapial.

Se analiza en primera instancia con normas y ensayos extranjeros, ya que actualmente no se cuenta en Chile con alguna norma o procedimiento constructivo para edificaciones en tapial, por ello se busca información concreta de países vecinos, como lo es Colombia, ya que se cuenta con una similar situación sísmica y geográfica. Este último punto es uno de los más relevantes a tomar en cuenta en esta Memoria, donde se analiza empíricamente un caso estudio para la Región del Maule; en dicho análisis se toma en cuenta la Nch 433 y el Decreto Supremo 61 (DS61).

En un comienzo, la investigación se basa en el procedimiento constructivo de una vivienda tipo tapial utilizado actualmente en Colombia, la que es respaldada por la Asociación Sísmica de dicho país. Así, al proyectarse y calcularse en el sector de estudio, se llegó a la conclusión de que dicho procedimiento no es factible para la zona rural del Maule, debido a que no resiste los esfuerzos solicitados de corte producidos por los sismos. De esta manera, se busca una alternativa para reforzar la estructura.

En la búsqueda de un método de refuerzo para la estructura de tapial, se analiza la norma peruana E80, especificando el procedimiento constructivo de una vivienda de tapial reforzado, siendo muy similar al método usado en Colombia, con la salvedad del espesor de muro solicitado y un refuerzo de geomalla.

De la Norma E80 se extrae dicho procedimiento, llevándolo a un análisis empírico de acuerdo a las normas de cálculo exigidos en Chile, utilizando la Nch 433 y Decreto Supremo 61, donde fue necesario buscar informes de laboratorio que especificaran la resistencia del tapial reforzado con geomalla, ya que la Norma E80 no lo especifica. Esto permitió llegar a la conclusión de que este tipo de estructuras reforzadas con geomalla y posteriormente estucada, lograrían resistir los esfuerzos

sísmicos solicitados en la Región del Maule, cumpliendo las exigencias de las normas ya mencionadas.

Por último, se realizó una comparación entre presupuestos de la obra gruesa de viviendas tipo tapial vs una convencional (albañilería confinada), llegando a la conclusión de que resulta factible técnica y económicamente fabricar viviendas de tapial en la zona de estudio.

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

	PÁGINA
Ilustración 1 “Muralla Jiayuguan, China”.....	13
Ilustración 2 “Muro defensivo de Alhambra, España”.....	14
Ilustración 3 “Botadero de escombros de la construcción”.....	15
Ilustración 4 “Confección de tapia”	16
Ilustración 5 “Parte de una tapia”.....	17
Ilustración 6 “Intersección de muros de tapia”.....	18
Ilustración 7 “Esquina de muros de tapia”.....	18
Ilustración 8 “Dinteles en los vanos”	19
Ilustración 9 “Tabla comparativa de materiales de la construcción”.....	19
Ilustración 10 “Tabla granulométrica de suelos”.....	20
Ilustración 11 “Aplicación de la prueba del rollito”	21
Ilustración 12 “Prueba de presencia de arcilla”	22
Ilustración 13 “Prueba de contenido de humedad”	23
Ilustración 14 “Fallos producidos por esfuerzos de corte”	24
Ilustración 15 “Tabla de suelos por zonas”	26
Ilustración 16 “Artículo 16 (DS61)”	27
Ilustración 17 “Cálculo producido por corte basal”.....	27
Ilustración 18 “Zonificación sísmica”.....	28
Ilustración 19 “Zonificación sísmica”.....	29
Ilustración 20 “Valor de parámetros de suelo”.....	29
Ilustración 21 “Valores máximos de los factores de modificación”	30
Ilustración 22 “Valores de coeficiente sísmicos máximos”	31
Ilustración 23 “Categoría del coeficiente de importancia”	31
Ilustración 24 “Valor del coeficiente de importancia”.....	32
Ilustración 25 “Planta de arquitectura”.....	33
Ilustración 26 “Elevación eje 1”	34
Ilustración 27 “Elevación eje A”	34
Ilustración 28 “Elevación eje D y F”	34
Ilustración 29 “Elevación eje 3 y 5”	34
Ilustración 30 “Corte de fundación”	35
Ilustración 31 “Distribución de muros”.....	36

Ilustración 32 “Geomallas”	43
Ilustración 33 “Tabla de resistencia a la tracción”	44
Ilustración 34 “Viga collar en el muro de tapial”	45
Ilustración 35 “Instalación de geomallas”	46
Ilustración 36 “Traslape de geomalla”	47
Ilustración 37 “Traslape de geomalla para puertas y ventanas”	47
Ilustración 38 “Corte de fundación para muros de tapial en 40 cm”	49
Ilustración 39 “Muro de adobe reforzado con geomalla”	54
Ilustración 40 “Curvas comparativas de esfuerzos cortantes vs deformación angular”	55
Ilustración 41 “Corte de fundación”	57
Ilustración 42 “Costo directo de la Obra gruesa en albañilería confinada”	58
Ilustración 43 “Fuerzas horizontales de corte en muros de eje X e Y”	59

ÍNDICE DE TABLAS

	PÁGINA
Tabla 1 “Cálculo de peso en los muros del eje X”	37
Tabla 2 “Cálculo de peso en los muros del eje Y”	37
Tabla 3 “Cálculo de carga vertical”	38
Tabla 4 “Fuerza horizontal de corte en los muros del eje X”	41
Tabla 5 “Fuerza horizontal de corte en los muros del eje Y”	41
Tabla 6 “Cálculo de peso en los muros del eje X con refuerzos de geomalla”	50
Tabla 7 “Cálculo de peso en los muros del eje Y con refuerzos de geomalla”	50
Tabla 8 “Cálculo de carga vertical con refuerzos de geomalla”	50
Tabla 9 “Fuerza horizontal de corte en los muros del eje X con refuerzos de geomalla”	53
Tabla 10 “Fuerza horizontal de corte en los muros del eje Y con refuerzos de geomalla”	53
Tabla 11 “Costo directo de la Obra gruesa tipo tapial”	56
Tabla 12 “Costo directo la obra gruesa albañilería confinada”	58
Tabla 13 “Fuerzas horizontales de corte en muros de eje X e Y”	59
Tabla 14 “Fuerzas horizontales de corte en muros de eje X e Y reforzado con geomalla”	60

ÍNDICE

	PÁGINA
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	11
1.1. Introducción	11
1.2. Objetivos.....	12
1.2.1. Objetivo general.....	12
1.2.2. Objetivos específicos	12
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO	13
2.1. Historia del tapial.....	13
2.2. Impacto medio ambiental.....	14
2.3. ¿Qué es la tapia pisada?.....	16
2.4. Método constructivo de tapial.	17
2.4.1. Muros de tapia pisada.....	18
2.4.1.1. Aparejo de la tapia.....	18
2.4.1.2. Construcción de esquinas	18
2.4.2. Vanos de puertas y ventanas	19
2.4.2.1. Vano con dintel.....	19
2.5. Notas ambientales de la construcción con tierra.....	19
2.6. Características de la tierra a utilizar en la composición del tapial.	20
2.6.1. Pruebas para la selección del suelo.....	21
2.6.1.1. Pruebas para la selección del suelo.....	21
2.6.1.2. Prueba de “presencia de arcilla” o “resistencia seca”	22
2.6.1.3. Prueba de “contenido de humedad”.....	22
2.7. Preparación de suelos.....	23
2.8. Descripción del tipo de falla.	23
2.8.1. Fallo cortante basal.....	24
2.9. Normativa sísmica chilena (Decreto supremo 61).....	24
2.9.1. Análisis estático.....	27
2.9.1.1. Análisis estático Según la Nch 433.....	27
2.9.1.1.1. Coeficiente sísmico.....	28
2.9.1.1.2. Coeficiente de Importancia I.....	31
CAPÍTULO III: CASO DE ESTUDIO	33

3.1. Diseño de la vivienda unifamiliar a estudiar (basado según la Normas de la Asociación Colombiana).....	33
3.2. Métodos empíricos	35
3.2.1. Cálculo del esfuerzo vertical estático en los muros	36
3.2.2. Cálculo del esfuerzo sísmico de cada muro.....	40
CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE SOLUCIÓN	43
4.1. ¿Qué es la geomalla?	43
4.2. Refuerzo con geomalla en construcciones de tipo tapial	44
4.2.1. Consideraciones para construir bajo la Norma Peruana E80.....	44
4.2.1.1. Artículo 6.- Criterios de configuración de las edificaciones de tierra reforzada	44
4.2.1.2. Artículo 7.- Sistema estructural para edificaciones de tierra reforzada.	48
CAPÍTULO V: ANÁLISIS EMPÍRICO DE LA SOLUCIÓN.....	49
5.1. Método empírico	49
5.1.1. Cálculo del esfuerzo vertical estático en los muros con refuerzo de geomalla.....	49
5.1.2. Cálculo del esfuerzo sísmico de cada muro con refuerzo de geomalla.....	52
CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD ECONÓMICA	56
6.1. Costo directo de obra gruesa en vivienda tipo tapial.	56
6.2. Costo directo de obra gruesa vivienda tipo albañilería confinada.	57
CAPÍTULO VII: ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	59
7.1. Análisis de cálculos basados en la Nch 433 y DS61 utilizando el manual colombiano. 59	
7.2. Análisis de cálculos basados en la Nch 433 y DS61 utilizando como refuerzo geomalla en los muros.....	60
7.3. Análisis de los costos.....	61
CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES.....	62
BIBLIOGRAFÍA	64

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1. Introducción

La construcción sustentable es un área que ha adquirido una importancia ascendente en Chile y el mundo entero, debido a la gran cantidad de residuos y escombros que se generan en las edificaciones desde sus inicios hasta su demolición, surgiendo así la necesidad de encontrar sistemas constructivos amigables con el medio ambiente y con un bajo gasto energético en su construcción y operación. Esto ha hecho que se rescaten métodos y procedimientos muy antiguos.

No obstante, no todos los métodos constructivos sustentables se han mostrado adecuados a las particularidades de nuestro país, especialmente en lo concerniente a las sollicitaciones sísmicas. De este modo, aparece como una alternativa interesante el método de muros de tapial, ya que en otros países de la comarca andina ha presentado un buen comportamiento sísmico.

De esta manera, en el presente trabajo se pretende averiguar si el uso del tapial en viviendas rurales de la Región del Maule es factible técnica y económicamente. Para lograr lo anterior, se utilizará la información disponible respecto a la construcción con tapial en el mundo y en Latinoamérica. Se dará especial énfasis en el estudio del efecto de los sismos en viviendas de tapial.

La metodología a utilizar incluirá indagación bibliográfica, evaluación del comportamiento sísmico de viviendas de tapial y análisis económico de este.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Evaluar la factibilidad técnica y económica para la construcción de viviendas de tapial en zonas rurales de la Región del Maule.

1.2.2. Objetivos específicos

- a) Realizar un estudio técnico de la construcción de viviendas de tapial, basado en la experiencia de países de la comarca andina y aplicado a las condiciones nacionales.
- b) Hacer un estudio económico de los recursos y materiales a utilizar en viviendas de tapial.
- c) Analizar el comportamiento sísmico de una vivienda de tapial ubicada en una zona rural de la Región del Maule.
- d) Proponer mejoras en el proceso constructivo en caso de que no se cumpla con la normativa chilena.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Historia del tapial

La tierra ha sido un material utilizado desde la antigüedad en la construcción, desde la mitad del siglo XX el uso de los nuevos materiales asociados a la idea de modernidad ha dejado en segundo plano este tipo de construcciones.

El lugar y la época exacta en que se dio comienzo al tapial son desconocidos, aunque se sospecha que partió en el Neolítico como se evidencia en los sitios arqueológicos de las culturas Yangshao y de la Longshan del valle del río Amarillo hace unos 5000 años (ver ilustración 1).

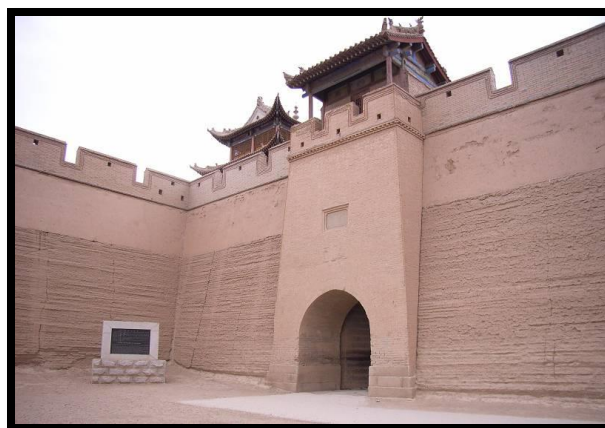


Ilustración 1: “Muralla ubicada en Jiayuguan, China, durante la dinastía Ming (1368-1644)”
Fuente: “<https://es.wikipedia.org/wiki/Tapial>”

Hace más de 2000 años las técnicas de tierra pisada para la construcción fueron muy comunes en China, algo muy notorio ya que gran parte de la gran muralla china está realizada con este método constructivo.

El tapial fue muy utilizado por los romanos; la forma romana está basada en la realización de paredes con barro arcilloso húmedo, mezclado con paja y crines (para evitar fisuraciones en la fase de secado), compactado por estratos con instrumentos apropiados (pisones y paletas). Prácticamente es el mismo método que el tapial moderno.

En la cultura hispana se encuentra el muro defensivo de Alhambra de Granada, ubicado en España (ver ilustración 2), edificada con tierra de la zona.



Ilustración 2: “Muro defensivo de Alhambra de Granada, España”

Fuente: “<http://porlascallesdegranada.blogspot.com/2011/03/el-tapial-metodo-constructivo-para-la.html>”

Durante el siglo XVII y en muchos pueblos aún durante el siglo XVIII, las construcciones se hacían de adobe o tapial. En el año 1714 la cultura jesuita en Sudamérica recomienda que los edificios debían levantar sus cimientos en piedra hasta una altura de 86 cm, separando la edificación del nivel de suelo natural, para continuar luego la construcción en tapial (Wikipedia, 2021).

2.2. Impacto medio ambiental

El impacto ambiental generado por la industria de la Construcción, tiene una deuda aún pendiente que han de afrontar las sociedades de este nuevo milenio. Esto supone un gran cambio en las técnicas empleadas en la producción de los materiales de construcción, dado que antes los materiales eran naturales, procedentes del entorno inmediato, de fabricación simple y se adaptaban a las condiciones climáticas del territorio donde se llevaba a cabo la edificación.

El resultado de este cambio se traduce, en primer lugar, en un gran aumento de la distancia entre el lugar de obtención de materias primas y la ubicación de su elaboración o construcción; en segundo lugar, en el agotamiento de los recursos naturales próximos, y finalmente en el aumento de la emisión de contaminantes derivados de la industria de la Construcción.

Por otra parte, el crecimiento poblacional y económico ha generado una presión significativa sobre los recursos naturales y el medioambiente, lo que origina un rápido agotamiento de los recursos naturales. De acuerdo a las últimas estimaciones disponibles, el área de la construcción se posiciona como el mayor generador de residuos sólidos industriales en el país, ya que cuenta con un 34 % de la

totalidad de residuos generados, lo que significa un incremento del 72 % desde el año 2000 (Glasinovic, Vladimir 2020).

Hoy en día la única fuente oficial en Chile que posee los datos de la cantidad de residuos sólidos no peligrosos generados en el área de la construcción es el RETC (Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes), presentando cifras muy por debajo de la realidad, ya que cuenta con solo el 9,5 % de los datos de residuos totales del país aproximadamente. Se estima que por cada 1 m² ejecutado en la construcción se generan 0.26 m³ de residuos, lo que significa que cada 9 pisos construidos en un edificio, un piso es solamente de escombros (Glasinovic, Vladimir 2020), (ver ilustración 3).



Ilustración 3: “Botadero de escombros de construcción”

Fuente: <https://www.economicos.cl/servicios/botadero-en-concepcion-codAALZPBI.html>

Estos resultados son elaborados en conjunto con los datos previos del Ministerio de Vivienda, donde se estiman que sólo en el año 2018 los residuos alcanzaron un volumen de 4.822.361 m³, equivalentes a más de 6,8 millones de toneladas anuales. Al realizar un análisis per cápita, se obtiene que se generarían un total de 365 kilos de residuos por habitante en Chile durante ese año. (Glasinovic, Vladimir 2020).

En el último año, la actividad de la construcción aumentó en un 2.6 % en Chile, según datos de Cámara Chilena de la Construcción (CChC). Se estima también, que al día de hoy el 35 % de los desechos del país provienen del sector de la construcción y se proyecta para el año 2025 estos alcancen los 7,4 millones de toneladas por año. A esto se suman las cifras del Instituto Nacional de Estadísticas donde la superficie total autorizada para edificación alcanzó 1.713.000 m², aumentando 29,1 % en el año 2018. (Construye 2025).

Debido a lo anterior, surge la necesidad de estudiar un sistema antiguo, como el tapial, que presenta una baja huella ecológica, con materiales fáciles de encontrar, económico y con buenas propiedades térmicas y acústicas.

2.3. ¿Qué es la tapia pisada?

El tapial consiste en una pared que se fabrica in situ, donde su principal materia prima es la tierra apisonada. Esto es mediante una antigua técnica que consiste en construir muros con tierra arcillosa húmeda y compactada con una secuencia de golpes (ver ilustración 4).

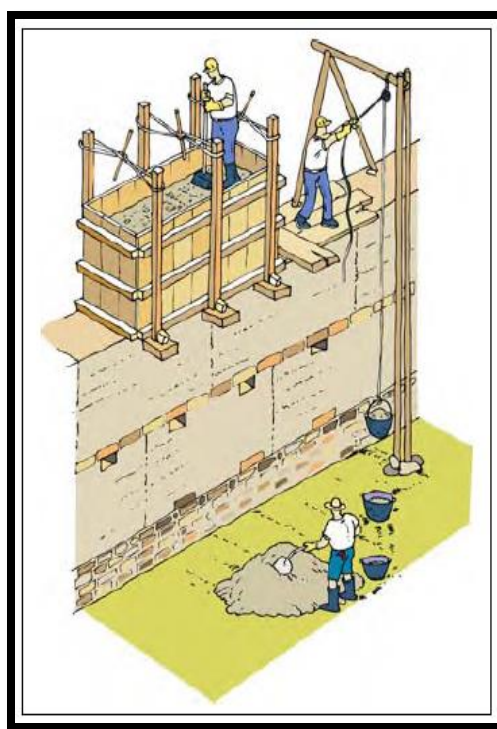


Ilustración 4: “Confección de tapia”

Fuente: Manual para la rehabilitación de viviendas construidas en adobe y tapia pisada.

2.4. Método constructivo de tapial.

La asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica indica que esta técnica se basa en compactar la tierra en capas de 10 cm; este método se realiza con una herramienta llamada “pisón”. La compactación se realiza dentro de un encofrado llamado tapia, que cuenta con dos tableros de madera de 2 metros de largo por 1 metro de alto (hojas de tapial) y dos compuertas del ancho del muro a realizar. Las hojas de tapial descansan sobre tres elementos horizontales denominados mechinales y en sus extremos se instalan los parales que son elementos verticales que ajustan las hojas del tapial para que no se abran con el continuo impacto del pisón (ver ilustración 5).

El equipo de trabajo para la confección del muro de tapial consta de un mínimo de 4 trabajadores:

- a) Pisón y compactación: 2 trabajadores que apisonan y compactan.
- b) El zurronero: 1 trabajador que provee la tierra al tapial.
- c) El preparador: 1 trabajador preparando la tierra.

Una vez finalizado el apisonado, se procede a descimbrar el tapial y se desplaza horizontalmente para fabricar una nueva tapia.

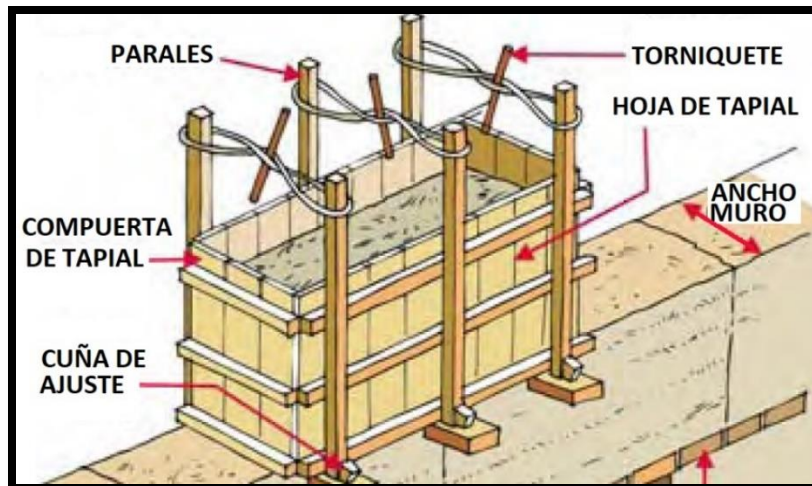


Ilustración 5: “Partes de una tapia”

Fuente: Manual para la rehabilitación de viviendas construidas en adobe y tapia pisada.

2.4.1. Muros de tapia pisada

2.4.1.1. Aparejo de la tapia.

En las juntas o intersecciones de muro se deberá escarificar con un punzón la superficie del muro que recibe la nueva hilada. En algunas ocasiones se instalan elementos en las juntas horizontales, como trozos de teja o de ladrillo cocido, todo con el fin de proporcionar una superficie de fricción entre las dos hiladas (ver ilustración 6).

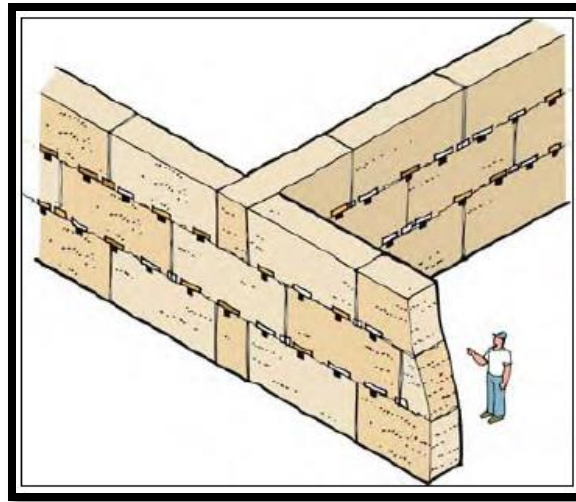


Ilustración 6: "Intersección de muros de tapia"

Fuente: Manual para la rehabilitación de viviendas construidas en adobe y tapia pisada.

2.4.1.2. Construcción de esquinas

En los encuentros de dos muros principales de tapia, se traslapará hilada con hilada, al igual que la albañilería, también se pueden instalar refuerzos de escuadra en las esquinas entre muros (ver ilustración 7).

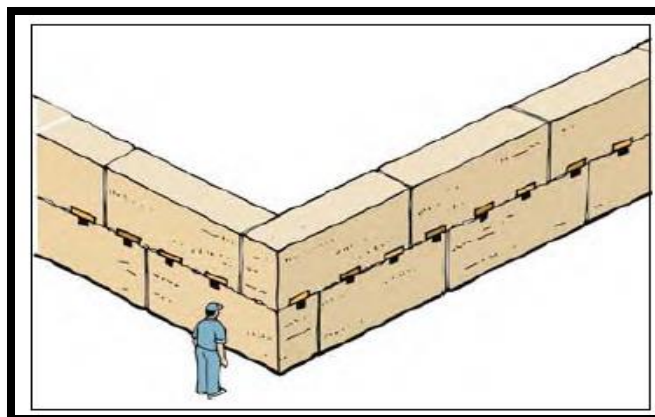


Ilustración 7: "Esquinas de muros de tapia"

Fuente: Manual para la rehabilitación de viviendas construidas en adobe y tapia pisada.

2.4.2. Vanos de puertas y ventanas

2.4.2.1. Vano con dintel

Los vanos de las puertas y ventanas se construyen mediante un gran dintel, constituido por dos o más vigas de madera las cuales se empotran en los muros de apoyo al menos 40 cm de traslape a cada lado del vano (ver ilustración 8).

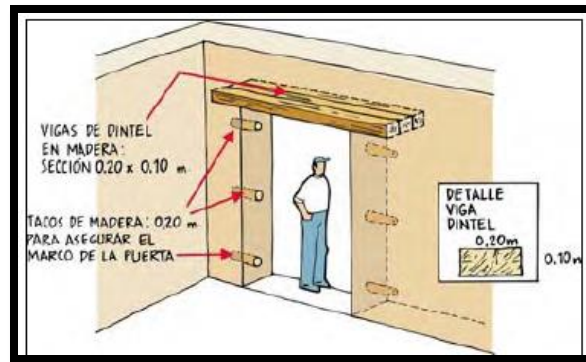


Ilustración 8: “Dinteles en los vanos”

Fuente: Manual para la rehabilitación de viviendas construidas en adobe y tapia pisada.

2.5. Notas ambientales de la construcción con tierra

La tierra como método constructivo tiene una importancia favorable hacia el medio ambiente. Como material posee ventajas como su comportamiento acústico, térmico y su resistencia al fuego, también se considera sostenible al medio ambiente, ya que se construye utilizando materiales localmente disponibles (Uso del tapial en la Construcción, 2019).

Otro dato a tomar en cuenta es el bajo consumo de agua, no produce emisiones tóxicas y puede ser reciclada o desechada. Se aprecia en el siguiente cuadro las condiciones de sustentabilidad que posee la tierra en tapial (ver ilustración 9).

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”

Ilustración 9: “Tabla comparativa de materiales de la Construcción”

Fuente: Libro “Uso de tapial en la Construcción”.

2.6. Características de la tierra a utilizar en la composición del tapial.

El suelo o tierra es el resultado de la erosión de las rocas con el transcurso de los años, siendo los principales agentes de este proceso el agua y el viento (Wikipedia, 2021), la composición de este material varía según el lugar donde se requiera analizar. A modo de ejemplo, los suelos del desierto son arenosos, siendo muy distintos a las tierras de las montañas en cordillera.

La composición de la tierra o suelo es una mezcla de arcillas, limos, arenas y gravas, las cuales se encuentran en cuatro grupos principales: las arcillas hasta los 0,002 mm, los limos entre 0,002 y 0,06 mm, las arenas entre los 0,06 y 2,00 mm y las gravas entre 2 mm 63 mm (geovirtual2, 2020). La arcilla actúa como aglomerante en las tapias (ver ilustración 10).

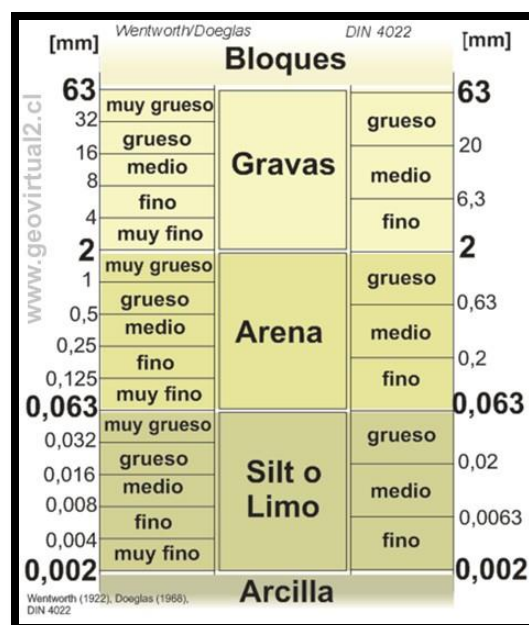


Ilustración 10: “Tabla granulométrica de suelos”
Fuente: <https://www.geovirtual2.cl/geologiageneral/ggcap05b-2.htm>.

Los estudios realizados por CRAterre (Doat et al, 1979), indican que los suelos aptos para la construcción con tierra deben de tener poco porcentaje de limos y baja cantidad de materia orgánica, ya que esta en el transcurso del tiempo se descompone y emana malos olores.

La proporción de arcilla debe estar entre el 15 % a 25 % del material, otorgando la característica de maleabilidad en estado húmedo, formando una masa dura en estado seco, con un 40 % a 65 % de arena para evitar fisuras de contracción. Las características de los limos, gravas y arenas no poseen la propiedad aglomerante, por lo que la resistencia de la estructura dependerá de la granulometría y proporciones adecuadas de arcilla, limo, arenas y gravas.

La densidad de la masa seca/volumen de un muro de tapial puede variar entre los 1500 a 2200 kg/m³, otra forma de medición es la “Superficie específica” (cm²/g), teniendo a la arena gruesa con 23 cm²/g, el limo con 450 cm²/g y por último las arcillas con 1.000 cm²/g. Cuanto mayor sea la superficie específica, mayor será la capacidad aglomerante y la resistencia a la compresión de la tierra; por otro lado, el agua cumple la función de activar la propiedad aglomerante de la arcilla.

2.6.1. Pruebas para la selección del suelo

En la selección de los suelos podemos encontrar pruebas a realizar en terreno, las cuales son efectivas y a la vez menos costosas que los ensayos hechos en laboratorio, aunque siempre será de mayor exactitud un ensayo de laboratorio. Estas pruebas están dentro de la tolerancia según la Norma peruana E.080 (2017). A continuación, se describen las pruebas que se realizan para el tapial:

2.6.1.1. Pruebas para la selección del suelo

Esta técnica es muy utilizada por los fabricantes de tapias para verificar en in situ si el suelo es el adecuado, esto consiste en tomar un puñado de suelo húmedo y formar con las manos un “rollito” de suelo húmedo con un espesor entre 0.5 a 1 cm.

Si se rompe entre los 5 a 15 cm de largo, el contenido de arena y de arcilla es el adecuado; sin embargo, si se alcanza una longitud mayor el contenido de arcilla es alto y no es adecuado. Asimismo, si se rompe antes de los 5 cm entonces se trata de un suelo muy arenoso y tampoco es adecuado (ver ilustración 11).

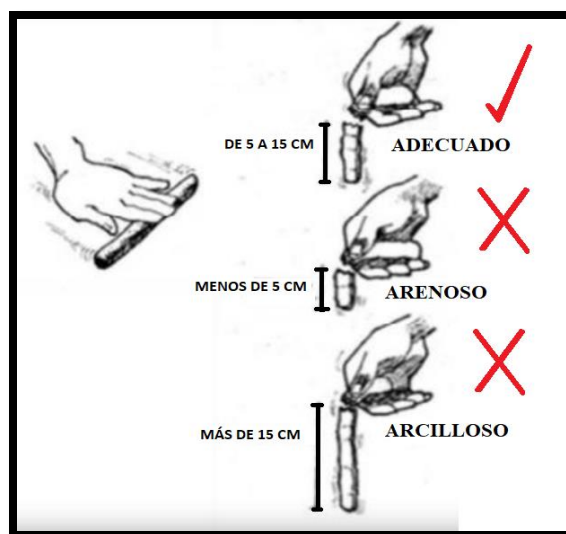


Ilustración 11: “Aplicación de la prueba del rollito”
Fuente: Libro: “Uso del tapial en la Construcción, 2019”.

2.6.1.2. Prueba de “presencia de arcilla” o “resistencia seca”

Este ensayo se realiza en obra, y consiste en fabricar 4 bolas de suelo húmedo de no más de 2 cm de diámetro y dejarlas secar por 2 días (48 horas) bajo techo y a temperatura ambiente. Posteriormente, se procede a presionarlas con los dedos pulgar e índice (ver ilustración 12); las bolas de tierra no se deben romper, agrietar o quebrar, en caso contrario se debe preparar la mezcla de tierra agregando arcilla para mejorar su resistencia y a continuación, repetir el ensayo.



Ilustración 12: “Prueba de presencia de arcilla o resistencia seca”
Fuente: Libro: “Uso del tapial en la Construcción, 2019”.

2.6.1.3. Prueba de “contenido de humedad”

Al compactar la tierra con un pisón, esta aumenta su densidad y resistencia a la compresión, con lo que para conocer el contenido de humedad se forma una bola de tierra ya compactada del tamaño de un puño y se comprime fuertemente con las manos; luego esta se suelta desde una altura aproximada de 1.10 m sobre una superficie sólida; si se pulveriza entonces el suelo se encuentra muy seco y no se podrá compactar, pero si al caer al suelo, la bola solo se parte, esta se encontrará muy húmeda y tampoco se logrará compactar adecuadamente. En cambio, si la bola se rompe en 5 fragmentos o más, la cantidad de humedad es la óptima y se obtendrá una buena compactación (ver ilustración 13). Según CRATerre (Doat et al., 1979), la humedad óptima para la compactación debe estar entre 9 % y 17 %.

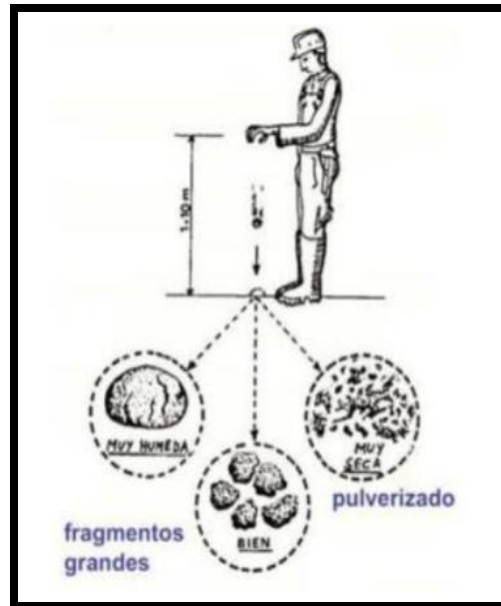


Ilustración 13: “Prueba de contenido de humedad”
Fuente: “Uso del tapial en la Construcción, 2019”.

2.7. Preparación de suelos

Una vez seleccionado el suelo, este se tamiza y se coloca en contenedores, luego se suministra agua en cantidad suficiente para que quede húmedo, permaneciendo en estas condiciones durante un mínimo de 48 horas hasta que toda la masa del suelo esté totalmente hidratada y así alcance su capacidad. En los suelos arcillosos se debe administrar “paja” de aproximadamente 50 mm de largo en proporción de 1 volumen de paja por 5 de tierra, para ayudar al control de fisuras. Asimismo, en ausencia de paja, para el control del agrietamiento se puede combinar el suelo con arena gruesa.

2.8. Descripción del tipo de falla.

Los muros de tapial disponen una buena resistencia a la compresión, lo que le permite soportar cargas de gravedad sin problemas, las dificultades se presentan cuando los muros deben soportar cargas horizontales de sismo.

Cuando esta carga actúa en el plano del muro, su resistencia depende principalmente en soportar las cargas de corte (Uso del tapial en la Construcción, 2019).

2.8.1. Fallo cortante basal.

Los terremotos originan movimientos del terreno, transmitiendo la energía por medio de ondas a la estructura a través del nivel basal, estas aceleraciones ingresan multiplicadas por la masa originando fuerzas laterales que, del punto de vista del diseño estructural, debemos preparar a la estructura para que las resista en forma adecuada.

Estos fallos de corte basal se producen por esfuerzos excesivos de fuerza cortante ejercida sobre el muro de tapial (ver ilustración 14).

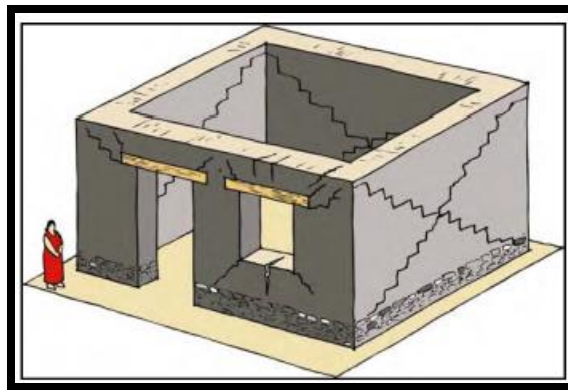


Ilustración 14: “Fallos producidos por esfuerzos de corte”

Fuente: “Evaluación del comportamiento sísmico de estructuras de tapial, 2014”.

2.9. Normativa sísmica chilena (Decreto supremo 61)

Para el terremoto del 27 de febrero del año 2010, la norma chilena de diseño sísmico de edificios (NCh 433 of.96 mod. 2009) sufrió una serie de modificaciones. Específicamente, en lo que respecta a la clasificación sísmica de suelos, el día 13 de diciembre del año 2011 fue promulgado el decreto supremo N.º 61 (DS61), el cual estableció nuevas categorías y requisitos para llevar a cabo esta tarea. Así, quedó establecido que el diseño sísmico de edificios deberá realizarse de conformidad a las exigencias establecidas en dicho decreto y en lo que no se contraponga con éstas, supletoriamente, por lo establecido en la Norma Técnica NCh 433.

El estudio de la mecánica de suelos busca determinar las propiedades geotécnicas del suelo de fundación, es decir, las propiedades del lugar donde será emplazado el proyecto.

Artículo 5º.- Exploración geotécnica asociada a la clasificación sísmica de suelos.

La respuesta sísmica en superficie de un depósito de suelo y la sollicitación sísmica que se desarrolla sobre una estructura emplazada en dicho depósito son principalmente dependiente de la

rigidez a bajas deformaciones de los estratos superiores del terreno de fundación, del período fundamental del depósito de suelos, del nivel de amortiguamiento desarrollado por los distintos suelos constituyentes del terreno y de la excitación sísmica propiamente tal. Teniendo en consideración la tecnología disponible a lo largo del país, la clasificación sísmica de suelos se ha optado por centrarla en el parámetro que se estima más relevante en una primera aproximación, éste es el parámetro de rigidez a bajas deformaciones de los estratos superiores, correspondiente a la velocidad de ondas de corte promedio de los 30 metros superiores del terreno, Vs30. Este parámetro se determina de acuerdo a la siguiente expresión:

$$V_{s30} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{V_{s-i}}}$$

Donde:

- Vs-i: velocidad de ondas de corte del estrato i, en m/s
- hi: espesor del estrato i, en metros
- n: número de estratos en los 30 metros superiores del terreno.

Sin embargo, en el caso particular de estructuras clasificadas de acuerdo a su uso como III o IV, que presentan un total menor a 500 metros cuadrados construidos, no sean superior a 2 niveles y/o pisos y tampoco presenten una altura total mayor a 8 metros, no es obligatorio justificar Vs30 con mediciones in-situ, ni tampoco es obligatorio justificar valores del Índice de Penetración o resistencia no-drenada en una profundidad de 30 metros. En estos casos, el estudio de Mecánica de Suelos realizado cumpliendo la norma NCh1508.Of 2008 (Esta norma establece los requisitos mínimos que deben cumplir los estudios de mecánica de suelos para un proyecto u obra de ingeniería), debe descartar que se está en presencia de suelo licuable, susceptible de densificación por vibración, colapsable, orgánico o turba. Además, el terreno no debe estar afecto a amplificación topográfica. Además, en estos casos, las estructuras deben ser diseñadas considerando la condición más desfavorable de tipo de suelo. Consecuentemente, el análisis sísmico se debe realizar mediante el método estático, utilizando el coeficiente sísmico máximo para el tipo de suelo más desfavorable, Suelo Tipo E.

Artículo 6°.- Clasificación Sísmica del Terreno

La experiencia empírica y la teoría indican que el mejor comportamiento sísmico se observa en terrenos de afloramiento rocoso y, por el contrario, el mayor daño se ha observado en terrenos de suelos finos blandos. Consecuentemente, la clasificación sísmica del terreno de fundación considera unidades, o niveles, que van desde el de mejor comportamiento (Roca: Suelo Tipo A) al de mayor exigencia sísmica (Suelo Tipo E: Suelo de compacidad o consistencia mediana) (ver ilustración 15).

Suelo Tipo		V_{s30} (m/s)	RQD	q_u (MPa)	(N_1) (golpes/pie)	S_u (MPa)
A	Roca, suelo cementado	≥ 900	$\geq 50\%$	≥ 10 ($\epsilon_{qu} \leq 2\%$)		
B	Roca blanda o fracturada, suelo muy denso o muy firme	≥ 500		$\geq 0,40$ ($\epsilon_{qu} \leq 2\%$)	≥ 50	
C	Suelo denso o firme	≥ 350		$\geq 0,30$ ($\epsilon_{qu} \leq 2\%$)	≥ 40	
D	Suelo medianamente denso, o firme	≥ 180			≥ 30	$\geq 0,05$
E	Suelo de compacidad, o consistencia mediana	< 180			≥ 20	$< 0,05$
F	Suelos Especiales	*	*	*	*	*

Ilustración 15: “Tipo de suelos por Zona”
Fuente: Libro: “Decreto supremo 61”

- N_1 : índice de penetración estándar normalizado por presión de confinamiento de 0,1 MPa. Aplicable solo a suelos que clasifican como arenas.
- RQD: Rock Quality Designation, según norma ASTM D 6032.
- q_u : Resistencia a la compresión simple del suelo.
- ϵ_{qu} : Deformación unitaria desarrollada cuando se alcanza la resistencia máxima en el ensayo de compresión simple.
- S_u : Resistencia al corte no-drenada del suelo.
- V_{s30} : Velocidad de onda de corte equivalente de los 30 metros superiores del terreno.

2.9.1. Análisis estático.

Respecto al análisis estático, el DS61 establece lo siguiente (ver ilustración 16):

Artículo 16.-

Toda referencia que se contenga en la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, aprobada por D.S. N° 47, (V. y U.), de 1992 y sus modificaciones, a la NCh 433, o al diseño sísmico de edificios, deberá entenderse efectuada al presente decreto.

Ilustración 16: “Artículo 16
Fuente: Libro: “Decreto supremo 61”

2.9.1.1. Análisis estático Según la Nch 433.

Para el análisis estático es necesario calcular el esfuerzo de corte basal (ver ilustración 17).

NCh433

6.2.3 El esfuerzo de corte basal está dado por:

$$Q_o = CIP \tag{6-1}$$

en que:

- C = es el coeficiente sísmico que se define en subpárrafos 6.2.3.1 y 6.2.7.
- I = es el coeficiente relativo al edificio, cuyos valores se especifican en la tabla 6.1 de acuerdo con la clasificación indicada en párrafo 4.3;
- P = es el peso total del edificio sobre el nivel basal, calculado en la forma indicada en subpárrafo 6.2.3.3.

Ilustración 17: Corte basal
Fuente del libro: “Decreto Supremo 61”

2.9.1.1.1. Coeficiente sísmico.

$$C = \frac{2,75 \cdot S \cdot A_0}{g \cdot R} \left(\frac{T'}{T^*} \right)^n$$

S, n, T' = Parámetros relativos al tipo de suelo.

A₀ = Aceleración máxima efectiva, función de la ubicación geográfica donde se emplazará la obra.

R = Factor de modificación de la respuesta de la estructura.

T* = Periodo de vibración del modo con mayor masa traslacional en cada una de las direcciones de la acción sísmica considerada.

- A₀ establece la aceleración sísmica respecto a la ubicación (ver ilustración 18 y 19).

Zonificación sísmica	
Zona	Aceleración sísmica (A ₀)
1	0,2·g
2	0,3·g
3	0,4·g

Ilustración 18: Zonificación sísmica
Fuente del libro: “Nch 433”

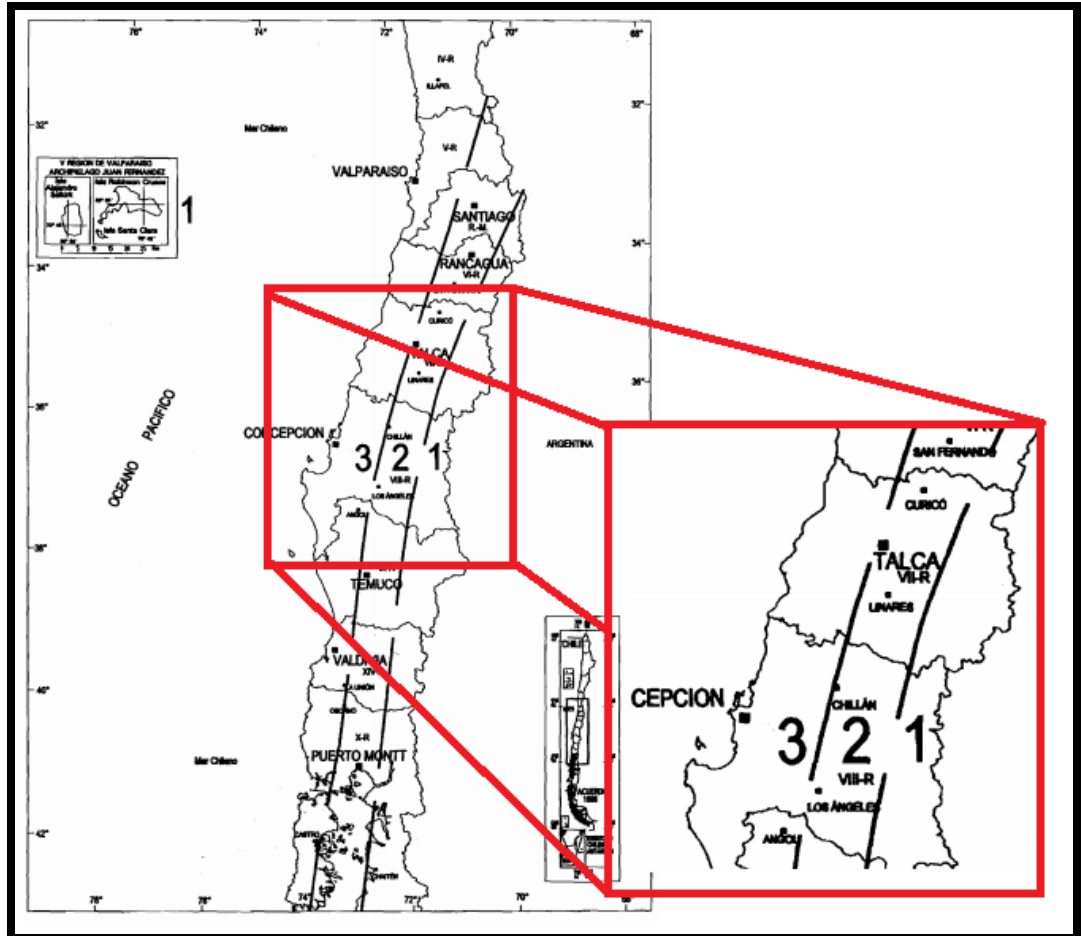


Ilustración 19: Zonificación sísmica
Fuente del libro: “Nch 433”

- S, n, T' y T₀ son los parámetros relativos al tipo de suelo, los que fueron modificados por el DS61 (ver ilustración 20).

Tipo de suelo	S	T ₀	T'	n
A	0,90	0,15	0,20	1,00
B	1,00	0,30	0,35	1,33
C	1,05	0,40	0,45	1,40
D	1,20	0,75	0,85	1,80
E	1,30	1,20	1,35	1,80
F				

Ilustración 20: Valor de parámetros de suelo
Fuente: “Decreto Supremo 61”

- R, es el factor de modificación de la respuesta de la estructura (ver ilustración 21).

Sistema Estructural	Material Estructural	R	R ₀
Pórticos	Acero estructural		
	a) Marcos corrientes (OMF)	4	5
	b) Marcos Intermedios (IMF)	5	6
	c) Marcos Especiales (SMF)	7	11
	d) Marco de vigas enrejadas	6	10
	Hormigón armado	7	11
Muros y sistemas arriostrados	Acero estructural		
	a) Marcos concéntricos corrientes (OCBF)	3	3
	b) Marcos concéntricos especiales (SCBF)	5.5	8
	c) Marcos excéntricos (EBF)	6	10
	Hormigón armado	7	11
	Hormigón armado y albañilería confinada		
	- Si se cumple el criterio A ²⁾	6	9
	- Si no se cumple el criterio A ²⁾	4	4
	Madera	5.5	7
	Albañilería confinada	4	4
	Albañilería armada		
-De bloques de hormigón o unidades de geometría similar en las que se llenan todos los huecos, y albañilería de muros doble chapa.	4	4	
-De ladrillos cerámicos tipo rejilla con y sin relleno de huecos y albañilería de bloques de hormigón o unidades de geometría similar en que no se llenan todos los huecos.	3	3	
Cualquier tipo de estructuración o material que no pueda ser clasificado en alguna de las categorías anteriores ³⁾		2	-
<p>1) Los valores indicados en esta tabla para acero estructural y hormigón armado suponen el cumplimiento de lo establecido en 5.3.3 y 5.3.4 respectivamente, NCh 433.</p> <p>2) Criterio A: los muros de hormigón armado deben tomar en cada piso, el 50% del esfuerzo de corte del piso, como mínimo.</p> <p>3) No procede el uso del análisis modal espectral para este tipo de estructuras o material. Por lo tanto, no se establece un valor para R₀.</p>			

Ilustración 21: Valores máximos de los factores de modificación
Fuente: "Nch 433"

- A su vez, también se puede calcular un coeficiente sísmico máximo (C_{max}) de acuerdo al “R” obtenido (ver ilustración 22).

R	C_{max}
2	$0,90 \cdot S \cdot A_o / g$
3	$0,60 \cdot S \cdot A_o / g$
4	$0,55 \cdot S \cdot A_o / g$
5,5	$0,40 \cdot S \cdot A_o / g$
6	$0,35 \cdot S \cdot A_o / g$
7	$0,35 \cdot S \cdot A_o / g$

Ilustración 22: Valores de coeficiente sísmico máximo
Fuente: “Nch 433”

2.9.1.1.2. Coeficiente de Importancia I

Para calcular el coeficiente sísmico, veremos el coeficiente de importancia del edificio (ver ilustración 17), este depende de la categoría en la que se encuentre a definir en la ilustración 23.

Categoría de ocupación de edificios y otras estructuras (NCh 433 of. 2010)	
Categoría	Descripción
I	Construcciones aisladas o provisionales no destinadas a habitación, no clasificables en ninguna de las categorías de ocupación II, III y IV que representan un bajo riesgo para la vida humana en el caso de falla.
II	Todos los edificios y otras estructuras destinados a la habitación privada o al uso público que no pertenecen a las Categorías de Ocupación I, III y IV, y edificios u otras estructuras cuya falla puede poner en peligro otras construcciones de las Categorías de Ocupación I, III y IV.
III	Edificios cuyo contenido es de gran valor. Edificios y otras estructuras donde existe frecuentemente aglomeración de personas. Edificios y otras estructuras no incluidas en la Categoría de Ocupación IV (incluyendo, pero no exclusivamente, instalaciones que manufacturan, procesan, manipulan, almacenan, usan o desechan sustancias tales como combustibles peligrosos, productos químicos peligrosos, residuos peligrosos o explosivos) que contienen cantidades suficientes de sustancias peligrosas para el público en caso que se liberen. Edificios y otras estructuras que contengan sustancias peligrosas deben ser clasificadas como estructuras de la Categoría de Ocupación II si se demuestra satisfactoriamente ante la Autoridad Competente mediante una estimación del riesgo, según NCh3171, que la liberación de la sustancia peligrosa no presenta una amenaza para el público.
IV	Edificios gubernamentales, municipales, de servicios públicos o de utilidad pública y aquéllos cuyo uso es de especial importancia en caso de catástrofe.

Ilustración 23: Categoría del Coeficiente de Importancia I
Fuente del libro: “Nch 433”

Ya encontrada la categoría, se debe buscar el valor del coeficiente (ver ilustración 24).

Categoría del edificio	I
I	0,6
II	1,0
III	1,2
IV	1,2

Ilustración 24: Valor del Coeficiente de Importancia I
Fuente del libro: "Nch 433"

CAPÍTULO III: CASO DE ESTUDIO

3.1. Diseño de la vivienda unifamiliar a estudiar (basado según la Normas de la Asociación Colombiana).

A continuación, el plano presentado para esta investigación está diseñado con muros de tapial no reforzados, presentando los parámetros otorgados por la Asociación Sísmica Colombiana.

El siguiente diseño contempla una vivienda unifamiliar de un piso, siendo de estructura tipo tapial. Se analizará su resistencia para cualquier lugar de la zona rural de la Región del Maule, ésta consta con una superficie de 52,23 m², con alturas de 2,4 mts. (ver ilustraciones de la 25 a la 30).

El un ancho del muro a considerar es de 28 cm de acuerdo al manual colombiano (Uso del tapial en la Construcción, 2019).

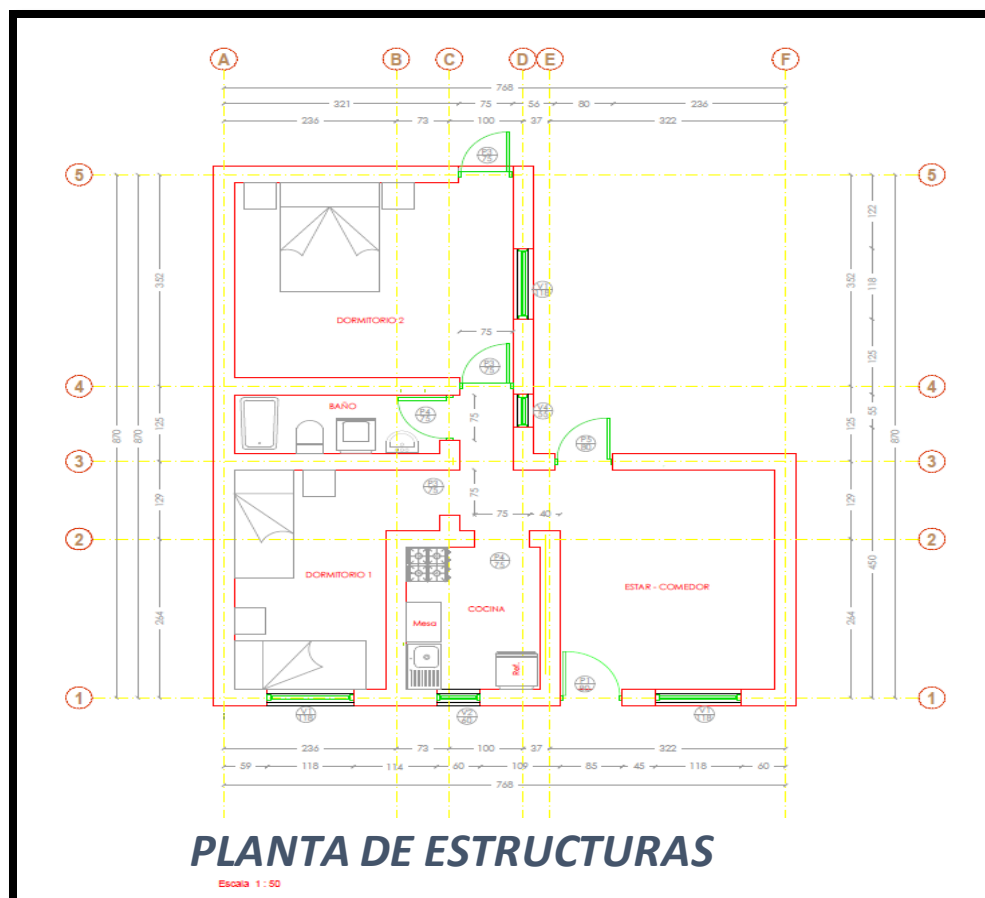


Ilustración 25: “Planta de Arquitectura”

Fuente: Elaboración propia.

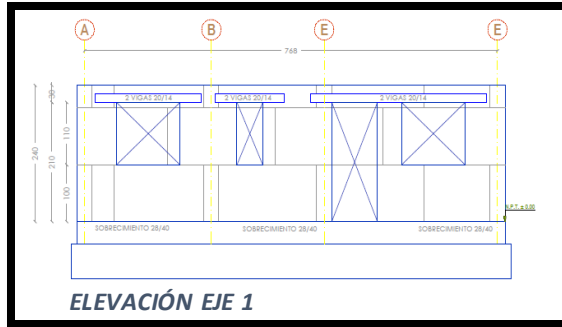


Ilustración 26: “Elevación EJE1”
Fuente: Elaboración propia.

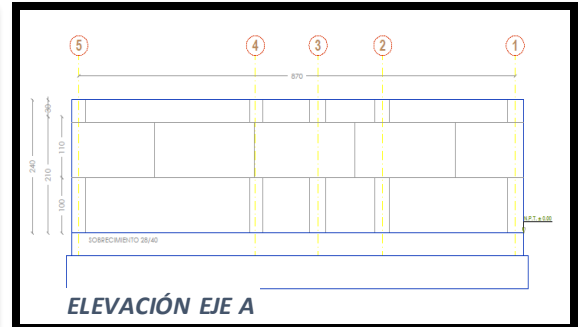


Ilustración 27: “Elevación EJE A”
Fuente: Elaboración propia.

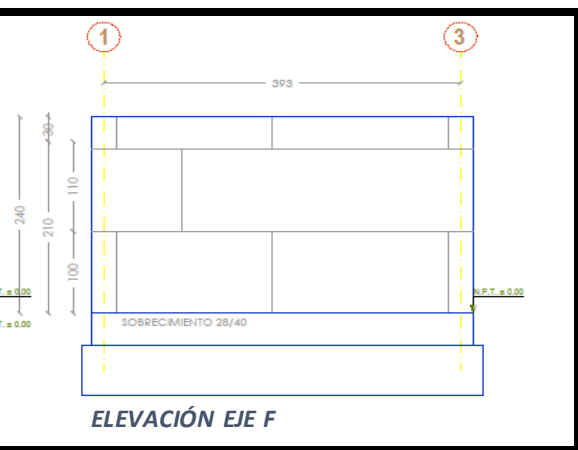
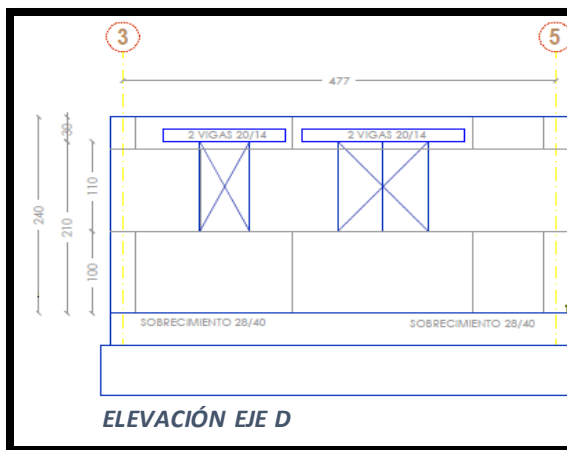


Ilustración 28: “Elevaciones EJE D y F”
Fuente: Elaboración propia.

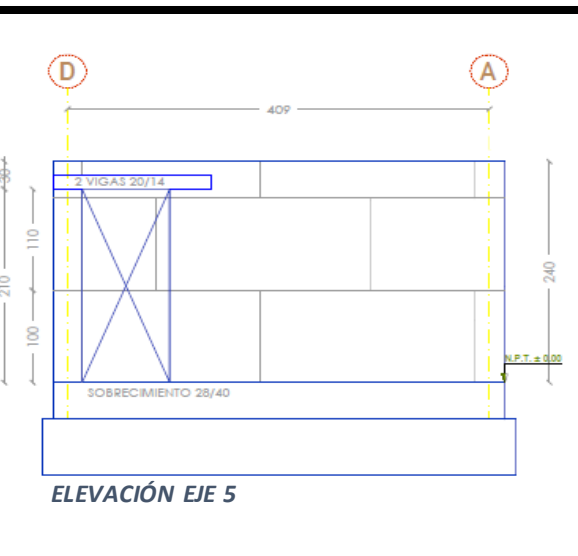
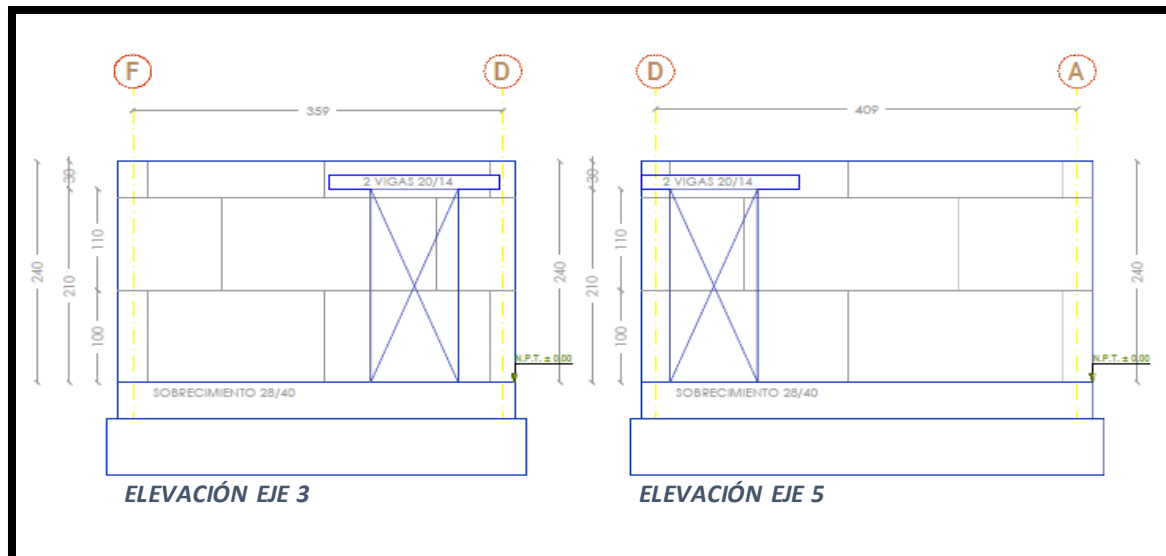


Ilustración 29: “Elevaciones EJE 3 y 5”
Fuente: Elaboración propia.



Ilustración 30: “Corte de fundación”
Fuente: Elaboración propia.

3.2. Métodos empíricos

Antes de analizar la forma numérica de los distintos parámetros de la resistencia del tapial, se debe tomar en cuenta la Nch 433 y el DS61, que es la normativa sísmica ya explicada en el capítulo 2.9.

3.2.1. Cálculo del esfuerzo vertical estático en los muros

Primero se busca el peso total de la estructura, para ello se distribuye la vivienda, considerando los muros horizontales al plano como X_n y los verticales al plano como Y_n (ver ilustración 31).

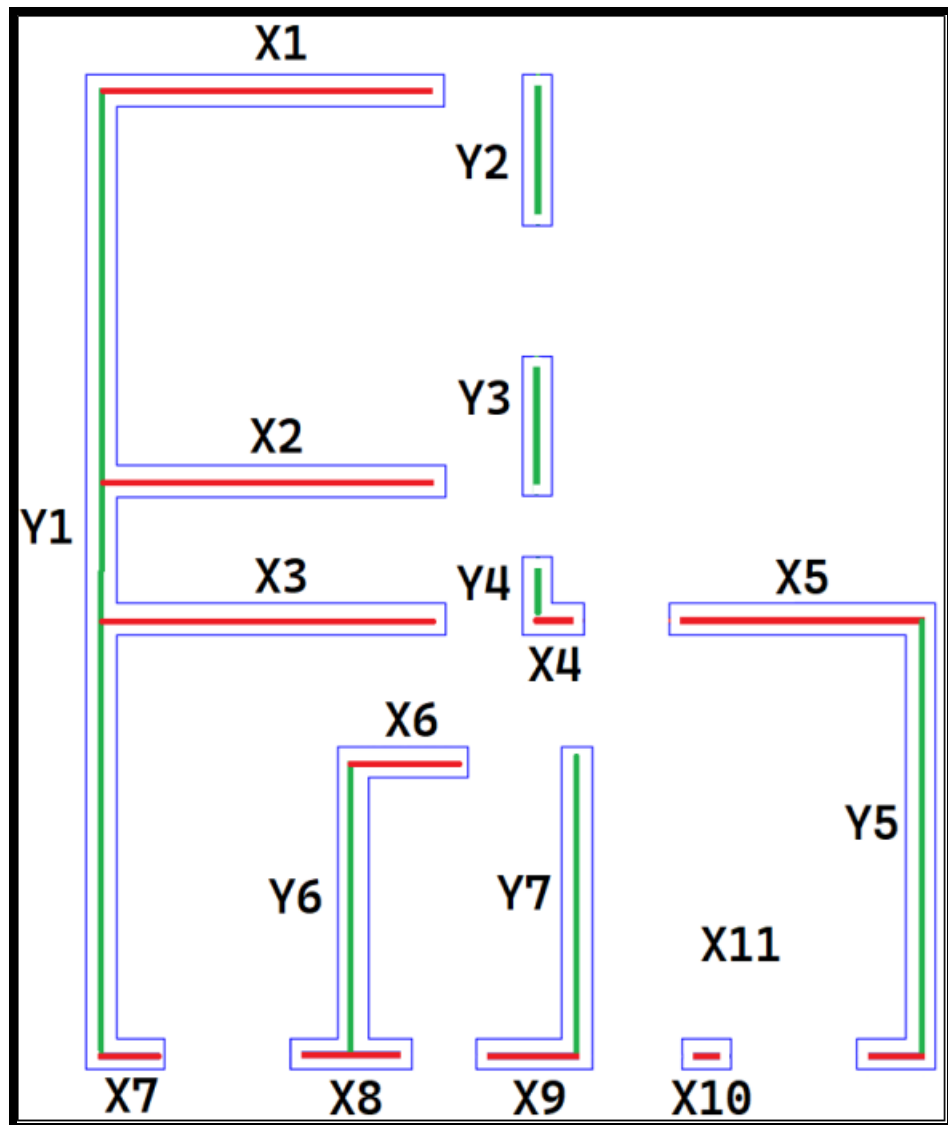


Ilustración 31: “Distribución de muros”
Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se desarrolla el cálculo numérico para cada muro, considerando una densidad del tapial de 1.900 Kg/m³ (ver tablas entre la 1 a la 3).

Dirección X					
Muro	Altura del muro (m)	Longitud muro (m)	Espesor muro (m)	DENSIDAD TAPIAL SECO (kg/m ³)	Peso muros (kg)
X1	2.40	3.34	0.28	1,900	4,265
X2	2.40	3.08	0.28	1900	3,933
X3	2.40	3.08	0.28	1900	3,933
X4	2.40	0.44	0.28	1900	562
X5	2.40	2.35	0.28	1900	3,000
X6	2.40	1.16	0.28	1900	1,481
X7	2.40	0.60	0.28	1900	766
X8	2.40	1.18	0.28	1900	1,507
X9	2.40	1.09	0.28	1900	1,392
X10	2.40	0.45	0.28	1900	575
X11	2.40	0.60	0.28	1900	766
TOTAL					22,178

Tabla 1: “Cálculo de peso en los muros del Eje X”
Fuente: Elaboración propia.

Dirección Y					
Muro	Altura del muro (m)	Longitud muro (m)	Espesor muro (m)	DENSIDAD TAPIAL SECO (kg/m ³)	Peso muros (kg)
Y1	2.40	8.70	0.28	1900	11,108
Y2	2.40	1.36	0.28	1900	1,736
Y3	2.40	1.25	0.28	1900	1,596
Y4	2.40	0.56	0.28	1900	715
Y5	2.40	3.90	0.28	1900	4,980
Y6	2.40	2.60	0.28	1900	3,320
Y7	2.40	2.60	0.28	1900	3,320
TOTAL					26,774

Tabla 2: “Cálculo de peso en los muros del Eje Y”
Fuente: Elaboración propia.

Carga vertical más la carga del techo

Muro	LARGO (m)	AREA TRIBUTARIA (m ²)	CARGA TRIBUTARIA (kg/m ²)	PESO TRIBUTARIO TECHUMBRE(kg)	Peso muros (kg)	PESO MUROS + PESO TECHUMBRE (KG)	Kg/cm ² DE MURO
X1	3.34	5.78	95	549	4,265	4813.61	0.515
X2	3.08	6.02	95	572	3,933	4504.44	0.522
X3	3.08	4.44	95	422	3,933	4354.34	0.505
X4	0.43	0.71	95	68	562	629.61	0.519
X5	2.36	3.89	95	369	3,000	3369.66	0.511
X6	1.16	2.10	95	200	1,481	1680.59	0.517
X7	0.59	0.94	95	89	766	855.21	0.515
X8	1.13	1.79	95	170	1,507	1677.06	0.528
X9	0.95	1.50	95	143	1,392	1534.50	0.577
X10	0.45	1.66	95	158	575	732.53	0.581
X11	0.65	2.40	95	228	766	994.26	0.546
Y1	8.70	10.08	95	958	11,108	12065.76	0.495
Y2	1.22	2.32	95	221	1,736	1956.97	0.571
Y3	1.25	2.37	95	225	1,596	1821.39	0.520
Y4	0.57	1.08	95	102	715	817.25	0.515
Y5	3.90	5.36	95	509	4,980	5488.72	0.503
Y6	2.60	4.49	95	427	3,320	3746.23	0.515
Y7	2.60	5.37	95	510	3,320	3829.83	0.526

MURO MAS SOLICITADO SIN SOBRE CARGA DEL TECHO →

Tabla 3: "Cálculo de carga vertical"

Fuente: Elaboración propia.

- Peso del techo y sobrecargas.

Carga	C. (kg/m ²)	A Total (m ²)	P Total (kg)
PP techo	95	62.13	5,902
SC techo	30	62.13	1,864

Carga	P Total (kg)
PP muros	48,953

Carga sobre la edificación (PP + SC)	PT	56,719
Peso total de la edificación + 25% SC (PP + 0,25SC)	PT + 0,25SC	55,321

- Ya se sabe que el muro más solicitado es el X10.

Carga	PP muro (kg)
PP muro X10	575
Total	575 kg

Cargas Tributarias:

Carga	C. (kg/m ²)	A Total (m ²)	P Total (kg)
PP techo	95	1.66	158
SC techo	30	1.66	50
		Total	208

Peso Total Muro: 782 kg

Muro	Carga vertical muros (kg)	Longitud muro (cm)	Espesor muro (cm)	Sección muro (cm ²)	Esfuerzo axial muro (kg/cm ²)
X10	782	45	28	1,260	0.621

- Esfuerzo axial de compresión Admisible (N_a) del tapial.

De la publicación del libro “Uso del tapial en la construcción”, se puede extraer los resultados de laboratorio que la densidad del tapial promedio es de 10,7 Kg/cm² (Uso del tapial en la Construcción, 2019).

Al compararse con el esfuerzo axial más desfavorable (muro X10), soporta muy bien la carga estática.

Muro	Carga vertical muros (kg)	Longitud muro (cm)	Espesor muro (cm)	Sección muro (cm ²)	Esfuerzo axial muro (kg/cm ²)
X10	782	45	28	1,260	0.621

3.2.2. Cálculo del esfuerzo sísmico de cada muro

Como ya se vio en el capítulo 2.9, hay que calcular el corte basal.

$$Q_o = CIP$$

- Donde:
 - C = Coeficiente Sísmico
 - I = Coeficiente de Importancia del Edificio
 - P = Peso Total de la estructura
- Cálculo de “C”:

Para calcular el Coeficiente Sísmico “C”, se estima el máximo valor que este podría tomar, para ello, según la Nch433 y de acuerdo al “R” (ver ilustración 22), se define lo siguiente:

$$R = 4, \text{ al ser } 4 \text{ el } C_{\max} \text{ es de } 0,55 * S * A_0/g$$

$$A_0/g = 0,3$$

$$S = 1,3$$

$$C_{\max} = 0,55 * 1,3 * 0,3 = 0,2145$$

- Cálculo de “I”:

El coeficiente de importancia del edificio es de 1, ya que se trata de una vivienda.

- Cálculo de P:

El peso total de toda la edificación es de 55.321 Kg.

Por lo tanto, el corte basal es de:

$$Q = 0,2145 * 1 * 55,321 = 11.866 \text{ Kg de corte basal}$$

Ahora se calcula el corte actuante en cada muro (ver tablas 4 y 5).

Dirección X								
Muro	Altura del muro (m)	Longitud muro (m)	Espesor muro (m)	Ki (kg/m ³)	Porcentaje de distr. de carga (%)	Fuerza horizontal corte (kg)	Fuerza horizontal corte (kg/cm ²)	
X1	2.40	3.34	0.28	0.004291	28.50	3382	0.362	
X2	2.40	3.08	0.28	0.003692	24.52	2910	0.337	
X3	2.40	3.08	0.28	0.003692	24.52	2910	0.337	
X4	2.40	0.44	0.28	0.000023	0.16	18	0.015	
X5	2.40	2.35	0.28	0.002132	14.16	1680	0.255	
X6	2.40	1.16	0.28	0.000375	2.49	296	0.091	
X7	2.40	0.60	0.28	0.000058	0.39	46	0.027	
X8	2.40	1.18	0.28	0.000393	2.61	310	0.094	
X9	2.40	1.09	0.28	0.000317	2.10	250	0.082	
X10	2.40	0.45	0.28	0.000025	0.17	20	0.016	
X11	2.40	0.60	0.28	0.000058	0.39	46	0.027	
Σ Ki =				0.0151	100	11866		

Tabla 4: “Fuerzas horizontales de corte en muros de eje X”

Fuente: Elaboración propia.

Dirección Y								
Muro	Altura del muro (m)	Longitud muro (m)	Espesor muro (m)	Ki (kg/m ³)	Porcentaje de distr. de carga (%)	Fuerza horizontal corte (kg)	Fuerza horizontal corte (kg/cm ²)	
Y1	2.40	8.70	0.28	0.017133	58.85	6983	0.287	
Y2	2.40	1.36	0.28	0.000573	1.97	233	0.061	
Y3	2.40	1.25	0.28	0.000458	1.57	187	0.053	
Y4	2.40	0.56	0.28	0.000048	0.16	19	0.012	
Y5	2.40	3.90	0.28	0.005621	19.31	2291	0.210	
Y6	2.40	2.60	0.28	0.002640	9.07	1076	0.148	
Y7	2.40	2.60	0.28	0.002640	9.07	1076	0.148	
Σ Ki =				0.0291	100	11866		

Tabla 5: “Fuerzas horizontales de corte en muros de eje Y”

Fuente: Elaboración propia.

Ahora se vuelve a tomar los cálculos de laboratorio de la publicación de la UPTC, otorgando resultados de corte de 0,022 MPa, que al transformarlo queda en 0.22 Kg/cm², siendo inferior a la fuerza de corte actuante de algunos muros de tapial del caso estudio.

Por lo tanto, el método convencional de Colombia no es aplicable en una zona rural de la Región del Maule.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE SOLUCIÓN

De acuerdo al caso propuesto en el capítulo 3, este no resulta factible constructivamente en la zona de estudio, por esta razón se decide implementar una solución de refuerzo, para aumentar la resistencia a los esfuerzos cortantes producidos por la estructura. Así, de acuerdo con las solicitaciones sísmicas de la zona proyectada, el material a implementar para compensar los esfuerzos más desfavorables de acuerdo a los cálculos obtenidos en el punto 3.2, sería una geomalla (ver ilustración 32), utilizada actualmente en otros países, reforzando los muros fabricados con el método constructivo del tapial.

4.1. ¿Qué es la geomalla?

La geomalla es un material que pertenece a los geosintéticos, fabricados de la transformación industrial de los polímeros, creados a partir de fibras, entre otros.

Los polímeros son macromoléculas compuestas por una o varias unidades químicas conocidas como monómeros, para este caso son partículas de polipropileno que se repiten a lo largo de toda la cadena, por ejemplo, un collar de perlas: cada una de las perlas sería un monómero de polipropileno mientras que el collar entero es lo que se conoce como un polímero (GeoSistemas, 2022).

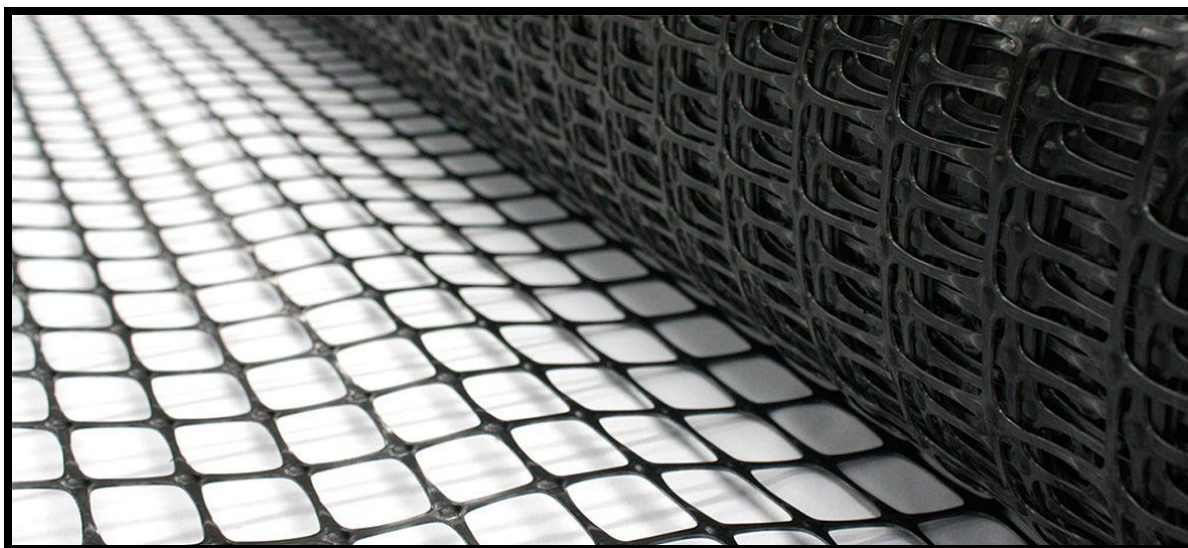


Ilustración 32: “Geomallas”
Fuente: <https://www.geosistemas.cl>

Es un material creado con la función principal de reforzar estructuras, las geomallas se utilizan en varios proyectos de la construcción en todo el mundo, como obras de pavimentación, proyectos de estabilización de suelo y reforzado de muros de contención (sub-bases o sub-suelos).

Perú posee la Norma E80, que se define como norma de diseño para este tipo de edificaciones, solicitando específicamente una capacidad mínima de tracción de 3,5 kN/m, (356.9 kgf/m) en ambas direcciones, para una elongación de 2 %. En la siguiente imagen se puede ver la resistencia a la tracción de la geomalla (ver ilustración 33).

Especificación de producto	Máxima resistencia a la tracción MD / CD kN / m \geq	Resistencia a la tracción @ 2% MD / CD kN / m \geq	Resistencia a la tracción @ 5% MD / CD kN / m \geq	Alargamiento a la máxima resistencia a la tracción MD / CD% \leq
TGSG1515	15	5	7	13.0 / 15.0
TGSG2020	20	7	14	
TGSG2525	25	9	17	
TGSG3030	30	10.5	21	
TGSG3535	35	12	24	
TGSG4040	40	14	28	
TGSG4545	45	dieciséis	32	
TGSG5050	50	17.5	35	

Ilustración 33: “Tabla de resistencia a la tracción”

Fuente: <https://www.geosistemas.cl>

4.2. Refuerzo con geomalla en construcciones de tipo tapial

En la búsqueda de un material de refuerzo, que aumente la resistencia de los esfuerzos cortantes solicitados en la zona de estudio, es muy conveniente la geomalla, ya que se emplea actualmente en otros países de la comarca andina. Perú es uno de estos estados que cuenta con la Norma E80, que especifica el diseño y procedimiento de construcción con tierra reforzada, utilizando la geomalla para su estabilidad.

4.2.1. Consideraciones para construir bajo la Norma Peruana E80.

Los artículos más relevantes para esta investigación son del artículo 6 al artículo 7 de la Norma.

4.2.1.1. Artículo 6.- Criterios de configuración de las edificaciones de tierra reforzada

- Muros anchos para su mayor resistencia y estabilidad frente al volteo. El espesor mínimo del muro es de 0.40 m.

- Tener como mínimo una viga collar en la parte superior como se indica en la ilustración 34.

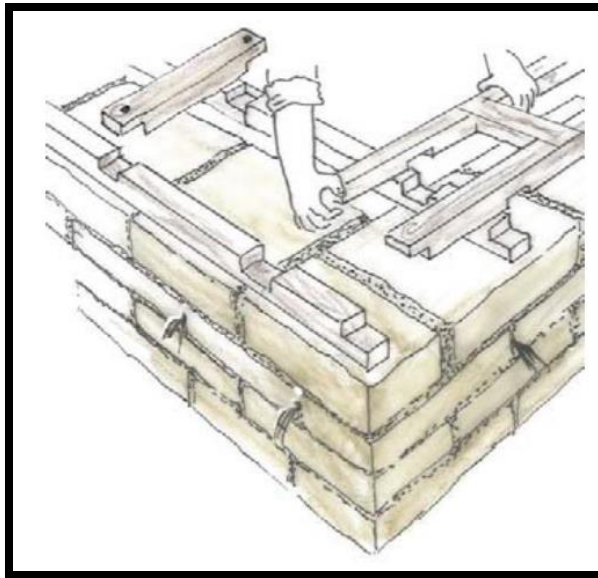


Ilustración 34: “Viga collar en el muro de tapial”
Fuente: Libro: Norma Peruana E80.

- Se debe evitar el deterioro de las edificaciones de tierra reforzada causadas por el viento, la lluvia y la humedad, protegiéndolas a través de:
 - a) Cimientos y sobrecimientos que eviten el humedecimiento del muro.
 - b) Recubrimientos, revestimientos o enlucidos, que protejan de la lluvia, humedad y viento, y que permitan la evaporación de la humedad del muro.
 - c) Aleros en el techo que protejan el muro de cualquier contacto con la lluvia.

- Para los refuerzos se debe tener en cuenta las consideraciones siguientes:
 - a) Los muros y contrafuertes de las edificaciones de tierra reforzada deben tener refuerzos.
 - b) En caso que los refuerzos sean externos a los muros o contrafuertes deben estar embutidos en el enlucido.
 - c) No deben usarse refuerzos en una sola dirección, pues no logran controlar los desplazamientos y pueden sufrir colapsos parciales. Deben usarse refuerzos en dos direcciones (horizontales y verticales).
 - d) En todos los casos, el refuerzo horizontal coincide con los niveles inferior y superior de los vanos.

- e) Los elementos que conforman los entresijos o techos de las edificaciones de tierra reforzada, deben estar adecuadamente fijados al muro mediante una viga collar. El refuerzo debe fijarse desde la base del sobrecimiento a la viga collar.
- f) En caso de utilizar refuerzos de mallas sintéticas de nudos integrados (geomallas), el refuerzo debe ser externo y embutido en el enlucido. La geomalla, constituida por material sintético, debe reunir las características necesarias para ser usada como refuerzo de edificaciones de tierra, tales como:
 - I. Capacidad mínima de tracción de 3,5 kN/m, (356.9 kgf/m) en ambas direcciones, para una elongación de 2 %.
 - II. Flexibilidad y durabilidad para su uso.
 - III. Los muros portantes y no portantes, incluyendo los vanos, deben envolverse con las geomallas, tensándolas uniformemente. Deben conectarse las geomallas de ambas caras de los muros con cuerdas sintéticas y una separación máxima de 0.30 m.
 - IV. La geomalla debe estar convenientemente anclada a la base del sobrecimiento y a la viga collar superior.
 - V. El uso de otro tipo de mallas sólo es permitido si acredita su capacidad sismorresistente en ensayos cíclicos a escala natural.

A continuación, se muestra entre las ilustraciones 35 a la 37 el modo de instalación de la geomalla.

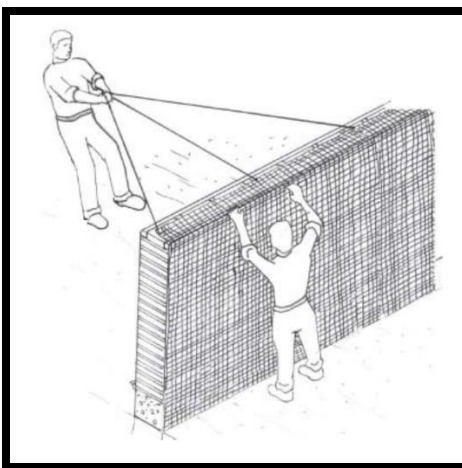


Ilustración 35: “Instalación de geomallas”

Fuente: Libro: Norma Peruana E80

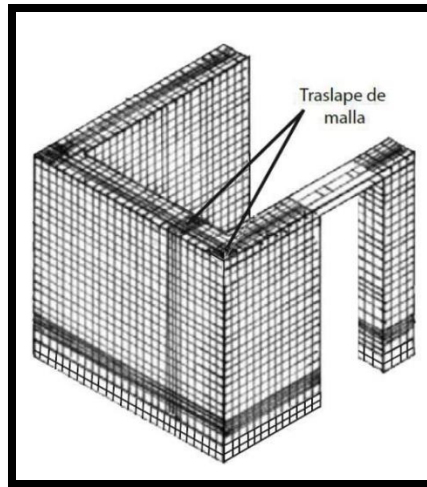


Ilustración 36: “Traslape de la geomalla”
Fuente: Libro: Norma Peruana E80

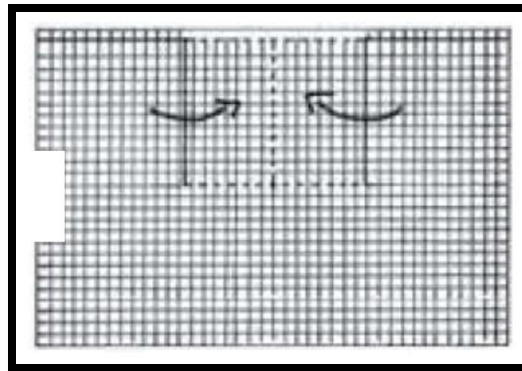


Ilustración 37: “Traslape de la geomalla para puertas y ventanas”
Fuente: Libro: Norma Peruana E80

4.2.1.2. Artículo 7.- Sistema estructural para edificaciones de tierra reforzada.

- El sistema estructural para las edificaciones de tierra debe comprender los siguientes componentes:
- Cimentación:
 - a) El cimiento debe cumplir dos condiciones:
 - I. Transmitir las cargas hasta un suelo firme de acuerdo a lo indicado por la Norma E.050 Suelos y Cimentaciones.
 - II. Evitar que la humedad ascienda hacia los muros de tierra.
 - b) Cumpliendo las condiciones anteriormente mencionadas, todo cimiento debe tener una profundidad mínima de 0.60 m. (medida a partir del terreno natural) y un ancho mínimo de 0.60 m.
 - c) Se puede utilizar los siguientes tipos de cimentaciones:
 - I. Piedra grande tipo pirca compactada, acomodada con piedras pequeñas.
 - II. Concreto Ciclópeo.
 - III. Albañilería de piedra con mortero de cemento o cal y arena gruesa.
- Sobrecimiento:
 - a) El sobrecimiento debe cumplir dos condiciones:
 - I. Debe transmitir las cargas hasta el cimiento.
 - II. Debe proteger el muro ante la acción de la erosión y la ascensión capilar.
 - b) Cumpliendo tales condiciones, todo sobrecimiento debe elevarse sobre el nivel del terreno no menos de 0.30 metros y tener un ancho mínimo de 0.40 metros.
 - c) Se pueden utilizar los tipos de sobrecimiento siguientes:
 - I. Albañilería de piedra con mortero de cemento o cal y arena gruesa.
 - II. Concreto ciclópeo

CAPÍTULO V: ANÁLISIS EMPÍRICO DE LA SOLUCIÓN

5.1. Método empírico

De acuerdo a lo presentado en el capítulo 3.2.1 (Cálculo del esfuerzo estático en los muros) y 3.2.2 (Cálculo del esfuerzo sísmico de cada muro) es necesario reforzar la estructura de tapial ya que colapsa por fuerzas de corte.

5.1.1. Cálculo del esfuerzo vertical estático en los muros con refuerzo de geomalla

Se aplicará el mismo método, cambiando el espesor del muro de tapial de 28 cm a 40 cm y el diseño de fundaciones (ver ilustración 38).

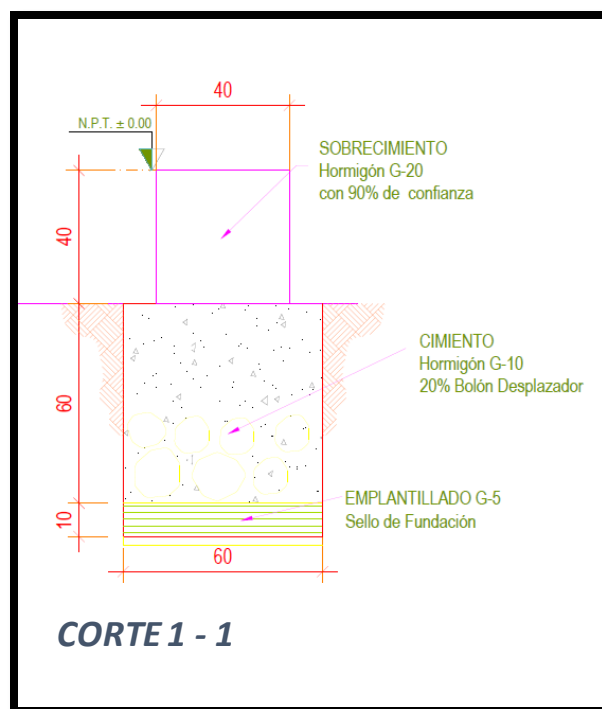


Ilustración 38: “Corte de fundación para muros de tapial en 40 cm”

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se desarrolla el cálculo numérico para cada muro, considerando una densidad del tapial de 1.900 Kg/m³ (ver tablas entre la 6 a la 8).

Dirección X							
Muro	Altura del muro (m)	Longitud muro (m)	Espesor muro (m)	DENSIDAD TAPIAL SECO (kg/m ³)	Peso muros (kg)		
X1	2,40	3,34	0,40	1.900	6.092		
X2	2,40	3,08	0,40	1900	5.618		
X3	2,40	3,08	0,40	1900	5.618		
X4	2,40	0,44	0,40	1900	803		
X5	2,40	2,35	0,40	1900	4.286		
X6	2,40	1,16	0,40	1900	2.116		
X7	2,40	0,60	0,40	1900	1.094		
X8	2,40	1,18	0,40	1900	2.152		
X9	2,40	1,09	0,40	1900	1.988		
X10	2,40	0,45	0,40	1900	821		
X11	2,40	0,60	0,40	1900	1.094		
					TOTAL	31.683	

Tabla 6: “Cálculo de peso en los muros del Eje X reforzado con geomalla”
Fuente: Elaboración propia.

Dirección Y							
Muro	Altura del muro (m)	Longitud muro (m)	Espesor muro (m)	DENSIDAD TAPIAL SECO (kg/m ³)	Peso muros (kg)		
Y1	2.40	8.70	0.40	1900	15,869		
Y2	2.40	1.36	0.40	1900	2,481		
Y3	2.40	1.25	0.40	1900	2,280		
Y4	2.40	0.56	0.40	1900	1,021		
Y5	2.40	3.90	0.40	1900	7,114		
Y6	2.40	2.60	0.40	1900	4,742		
Y7	2.40	2.60	0.40	1900	4,742		
					TOTAL	38,249	

Tabla 7: “Cálculo de peso en los muros del Eje Y reforzado con geomalla”
Fuente: Elaboración propia.

Muro	LARGO (m)	AREA TRIBUTARIA (m ²)	CARGA TRIBUTARIA (kg/m ²)	PESO TRIBUTARIO TECHUMBRE(kg)	Peso muros (kg)	PESO MUROS + PESO TECHUMBRE (KG)	Kg/cm ² DE MURO
X1	3,34	5,78	95	549	6.092	6641,26	0,710
X2	3,08	6,02	95	572	5.618	6189,82	0,718
X3	3,08	4,44	95	422	5.618	6039,72	0,700
X4	0,43	0,71	95	68	803	870,38	0,718
X5	2,36	3,89	95	369	4.286	4655,58	0,705
X6	1,16	2,10	95	200	2.116	2315,34	0,713
X7	0,59	0,94	95	89	1.094	1183,53	0,713
X8	1,13	1,79	95	170	2.152	2322,76	0,732
X9	0,95	1,50	95	143	1.988	2130,94	0,801
X10	0,45	1,66	95	158	821	978,77	0,777
X11	0,65	2,40	95	228	1.094	1322,58	0,727
Y1	8,70	10,08	95	958	15.869	16826,40	0,691
Y2	1,22	2,32	95	221	2.481	2701,16	0,789
Y3	1,25	2,37	95	225	2.280	2505,39	0,716
Y4	0,57	1,08	95	102	1.021	1123,68	0,708
Y5	3,90	5,36	95	509	7.114	7622,80	0,698
Y6	2,60	4,49	95	427	4.742	5168,95	0,710
Y7	2,60	5,37	95	510	4.742	5252,55	0,722

MURO MAS SOLICITADO SIN SOBRE CARGA DEL TECHO →

Tabla 8: “Cálculo de carga vertical reforzado con geomalla”
Fuente: Elaboración propia.

Se puede observar que ya no es el muro “X10” el más solicitado, si no que el muro “X9” (ver tablas de la 1 a la 8).

- Peso y sobre carga del techo.

Carga	C. (kg/m ²)	A Total (m ²)	P Total (kg)
PP techo	95	62,13	5.902
SC techo	30	62,13	1.864

Carga	P Total (kg)
PP muros	69.932

Carga sobre la edificación (PP + SC)	PT	77.698
total de la edificación + 25% SC (PP + 0,25SC)	PT + 0,25SC	76.300

- Como ya se mencionó el muro más solicitado es el “X9”.

Carga	PP muro (kg)
PP muro X9	1,988
Total	1,988 kg

Cargas Tributarias:

Carga	C. (kg/m ²)	A Total (m ²)	P Total (kg)
PP techo	95	1.50	143
SC techo	30	1.50	45
		Total	188

Peso Total Muro: 2,176 kg

Muro	Carga vertical muros (kg)	Longitud muro (cm)	Espesor muro (cm)	Sección muro (cm ²)	Esfuerzo axial muro (kg/cm ²)
X9	2,176	95	40	3,800	0.573

- Esfuerzo axial de compresión Admisible (N_a) del tapial.

De la publicación del libro “Uso del tapial en la construcción”, se puede extraer los resultados de laboratorio que la resistencia promedio a la compresión del tapial es de 10,7 Kg/cm² (Uso del tapial en la Construcción, 2019).

Al compararlo con el esfuerzo axial más desfavorable (muro “X10”), este soporta muy bien la carga estática.

Muro	Carga vertical muros (kg)	Longitud muro (cm)	Espesor muro (cm)	Sección muro (cm ²)	Esfuerzo axial muro (kg/cm ²)
X9	2,176	95	40	3,800	0.573

5.1.2. Cálculo del esfuerzo sísmico de cada muro con refuerzo de geomalla

Como ya se mencionó en el capítulo 2.9, hay que calcular el corte basal.

$$Q_o = CIP$$

- Donde:
 - C = Coeficiente Sísmico
 - I = Coeficiente de Importancia del Edificio
 - P = Peso Total de la estructura
- Se tomarán los datos capítulo 3.2.2 el coeficiente de importancia y el coeficiente sísmico, ya que estos no han variado.

$$C_{max} = 0,55 * 1,3 * 0,3 = 0,2145$$

- Por lo tanto
 - C = 0.2145
 - I = 1
 - P = 75.972 kg

$$Q = 0,2145 * 1 * 76.300 \text{ kg} = 16.366 \text{ Kg de corte basal}$$

Ahora se calcula el corte actuante en cada muro (ver tablas 9 y 10).

Dirección X							
Muro	Altura del muro (m)	Longitud muro (m)	Esesor muro (m)	Ki (kg/m ³)	Porcentaje de distr. de carga (%)	Fuerza horizontal corte (kg)	Fuerza horizontal corte (kg/cm ²)
X1	2,40	3,34	0,40	0,006130	28,50	4664	0,349
X2	2,40	3,08	0,40	0,005274	24,52	4013	0,326
X3	2,40	3,08	0,40	0,005274	24,52	4013	0,326
X4	2,40	0,44	0,40	0,000034	0,16	26	0,014
X5	2,40	2,35	0,40	0,003046	14,16	2318	0,247
X6	2,40	1,16	0,40	0,000536	2,49	408	0,088
X7	2,40	0,60	0,40	0,000083	0,39	63	0,026
X8	2,40	1,18	0,40	0,000561	2,61	427	0,090
X9	2,40	1,09	0,40	0,000453	2,10	344	0,079
X10	2,40	0,45	0,40	0,000036	0,17	27	0,015
X11	2,40	0,60	0,40	0,000083	0,39	63	0,026
Σ Ki =				0,0215	100	16366	

Tabla 9: “Fuerzas horizontales de corte en muros de eje X reforzado con geomalla”

Fuente: Elaboración propia.

Dirección Y							
Muro	Altura del muro (m)	Longitud muro (m)	Esesor muro (m)	Ki (kg/m ³)	Porcentaje de distr. de carga (%)	Fuerza horizontal corte (kg)	Fuerza horizontal corte (kg/cm ²)
Y1	2,40	8,70	0,40	0,024476	58,85	9632	0,277
Y2	2,40	1,36	0,40	0,000818	1,97	322	0,059
Y3	2,40	1,25	0,40	0,000655	1,57	258	0,052
Y4	2,40	0,56	0,40	0,000068	0,16	27	0,012
Y5	2,40	3,90	0,40	0,008031	19,31	3160	0,203
Y6	2,40	2,60	0,40	0,003772	9,07	1484	0,143
Y7	2,40	2,60	0,40	0,003772	9,07	1484	0,143
Σ Ki =				0,0416	100	16366	

Tabla 10: “Fuerzas horizontales de corte en muros de eje Y reforzado con geomalla”

Fuente: Elaboración propia.

Ahora se tomará los cálculos de laboratorio de la Pontificia Universidad Católica del Perú, respetando explícitamente la Norma E80 para refuerzos de muros de tierra, donde se puede extraer un ensayo realizado en muros de adobe reforzados con geomalla, expuestos a esfuerzos de corte basal, entregando los siguientes resultados (ver ilustración 39 y 40).



Ilustración 39: “Muro de adobe reforzado con geomalla”
Fuente: Libro: Diseño sísmico de muros de adobe reforzados con geomallas.

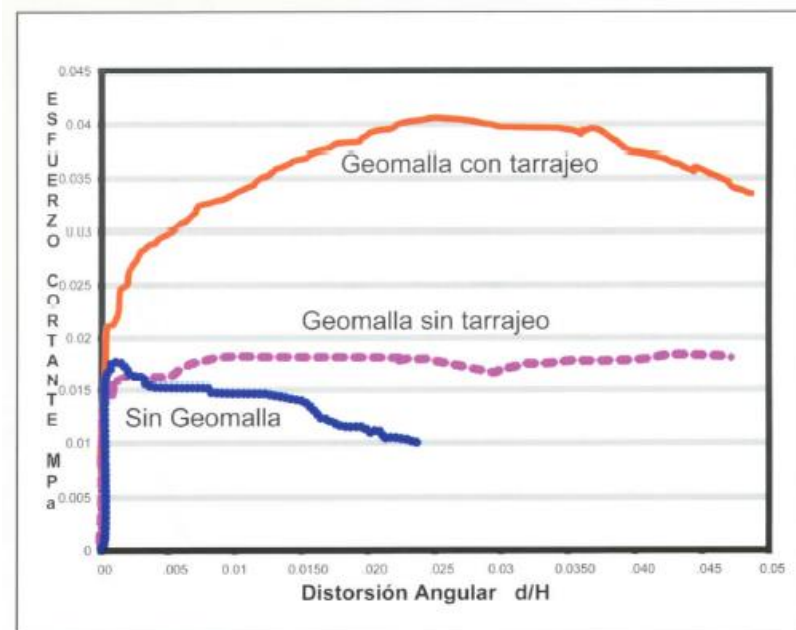


Ilustración 40: “Curvas comparativas de Esfuerzos cortantes vs. Deformación Angular”
 Fuente: Libro: Diseño sísmico de muros de adobe reforzados con geomallas.

Del siguiente gráfico se puede concluir que es necesario tarrajar el muro para cubrir el tapial. Con esto se adquiere mayor resistencia al corte, siendo de 0,04 MPa, que al transformarlo queda 0,40 Kg/cm², siendo mayor a todos los esfuerzos cortantes calculados anteriormente en el punto 5.1.2, aunque queda bastante ajustado en los muros X1, X2 y X3 (Ver tablas 9 y 10).

CAPÍTULO VI: ANÁLISIS DE FACTIBILIDAD ECONÓMICA

6.1. Costo directo de obra gruesa en vivienda tipo tapial.

A continuación, se detalla el costo directo de la obra gruesa sin radier en la vivienda ya calculada (ver tabla 11).

Item	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Valor total (\$)	
OBRAS DE CONSTRUCCIÓN, OBRA GRUESA					
1	Movimiento de tierra				
1.1	Despeje y Limpieza del Terreno 15 cm	m ³	7,83	\$1.850	\$14.494
1.2	Trazados y Niveles	m ²	52,23	\$2.000	\$104.460
1.3	Excavación de fundaciones (máquina 5 hrs)	m ³	21,36	\$4.500	\$96.125
2	Emplantillado				
2.1	Emplantillado G-5	m ³	3,05	\$65.000	\$198.356
3	Cimiento 60 X 70 CM				
3.1	Hormigón G-10	m ³	18,31	\$90.000	\$1.647.858
4	Sobrecimiento, G-20 40X40 CM				
4.1	Enfierradura	Kg	248,00	\$1.400	\$347.200
4.2	Moldaje	m ²	50,85	\$18.000	\$915.385
4.3	Hormigón	m ³	8,14	\$120.000	\$976.514
5	Muros				
5.1	Moldaje tapia (100x200) cm con 40 cm de esp	Unidad	6,00	\$81.600	\$489.600
5.2	Arcilla muros de tapial 40 cm (25 % arcilla)	m ²	12,21	\$7.500	\$91.548
5.3	Collar de madera 1"x4"	ml	50,86	\$8.143	\$414.153
5.4	Geomalla	m ²	244,11	\$7.661	\$1.870.162
5.5	Estuco 2,5 cm	m ²	244,13	\$1.850	\$451.641
SUBTOTAL (\$)					\$7.617.494

Tabla 11: "Costo directo de obra gruesa tipo tapial"

Fuente: Elaboración propia.

6.2. Costo directo de obra gruesa vivienda tipo albañilería confinada.

Para efectos de cálculo, la fundación requerida para muros de albañilería sería como se muestra en la ilustración 41:

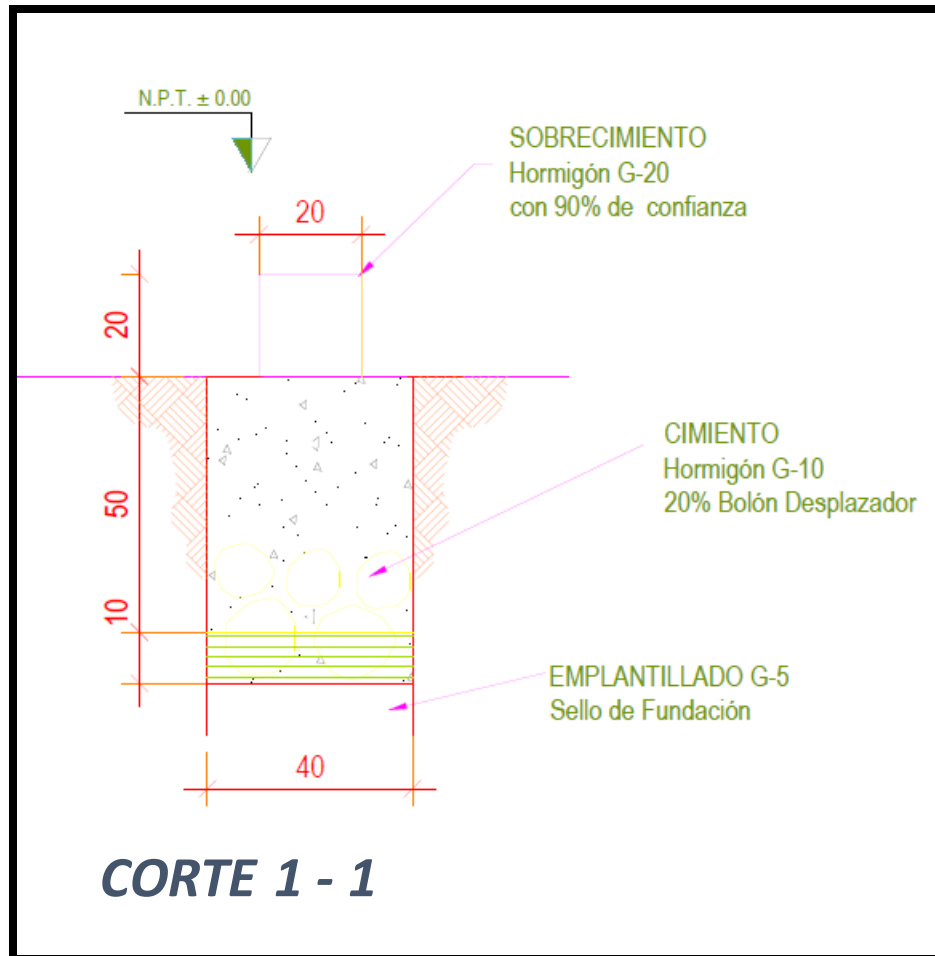


Ilustración 41 “Corte de fundación”

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se detalla el costo directo de la obra gruesa sin radier en la vivienda ya calculada en albañilería (ver tabla 12).

Item	Unidad	Cantidad	Precio Unitario (\$)	Valor total (\$)	
OBRAS DE CONSTRUCCIÓN, OBRA GRUESA					
1	Movimiento de tierra				
1.1	Despeje y Limpieza del Terreno 15 cm	m ³	7,83	\$1.850	\$14.494
1.2	Trazados y Niveles	m ²	52,23	\$2.000	\$104.460
1.3	Excavación de fundaciones	m ³	12,21	\$4.500	\$54.929
2	Emplantillado				
2.1	Emplantillado, G-5	m ³	2,03	\$65.000	\$132.237
3	Cimiento				
3.1	Hormigón G-10	m ³	10,17	\$90.000	\$915.477
4	Sobrecimiento, G-20				
4.1	Enfierradura	Kg	183	\$1.400	\$256.200
4.2	Moldaje	m ²	25,43	\$18.000	\$457.696
4.3	Hormigón	m ³	2,03	\$120.000	\$244.129
5	Muros				
5.1	Albañilería	m ²	109,20	\$12.000	\$1.310.400
5.2	Pilares G-15	m ³	14,98	\$120.000	\$1.797.120
5.3	Enfierradura de pilares	kg	506	\$1.400	\$708.400
5.4	Moldaje pilares	m ²	87,36	\$18.000	\$1.572.480
5.5	Cadena G-20	m ³	2,89	\$120.000	\$346.800
5.6	Enfierradura de cadenas	kg	146	\$1.400	\$203.840
5.7	Moldaje cadenas	m ²	19,44	\$18.000	\$349.920
5.8	Vigas G-20	m ³	0,75	\$120.000	\$90.000
5.9	Enfierradura de vigas	kg	37	\$1.400	\$52.402
5.10	Moldaje vigas	m ²	5,00	\$18.000	\$90.000
5.11	Estuco 2,5 cm	m ²	244,13	\$1.850	\$451.637
SUBTOTAL (\$)					\$9.152.620

Tabla 12: “Costo directo la obra gruesa albañilería confinada”

Fuente: Elaboración propia.

CAPÍTULO VII: ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1. Análisis de cálculos basados en la Nch 433 y DS61 utilizando el manual colombiano.

- Se calcula en primera instancia que el peso total de muros de 28 cm de espesor sumado a la techumbre y sobre cargas es de 55,32 Ton. También que el muro más solicitado a carga vertical fue el “X10” con 0.621 Kg/cm² siendo menor que la resistencia a la compresión promedio del tapial que es 10,7 Kg/cm².
- El valor del corte admisible del tapial es de 0.22 Kg/cm², en la tabla 13 se puede apreciar los muros que sobrepasan dicho esfuerzo admisible.

TAPIAL 0,22 kg/cm ² Corte admisible				
Muro	Longitud muro (m)	Espesor muro (m)	Área sección (cm ²)	Corte actuante (kg/cm ²)
X1	3,34	0,28	9.352	0,361595075
X2	3,08	0,28	8624	0,337389247
X3	3,08	0,28	8624	0,337389247
X4	0,44	0,28	1232	0,015012086
X5	2,35	0,28	6580	0,255380998
X6	1,16	0,28	3248	0,091022535
X7	0,60	0,28	1680	0,027337292
X8	1,18	0,28	3304	0,093702431
X9	1,09	0,28	3052	0,081795883
X10	0,45	0,28	1260	0,015684478
X11	0,60	0,28	1680	0,027337292
Y1	8,70	0,28	24360	0,286669204
Y2	1,36	0,28	3808	0,061285182
Y3	1,25	0,28	3500	0,053380533
Y4	0,56	0,28	1568	0,012387566
Y5	3,90	0,28	10920	0,209814626
Y6	2,60	0,28	7280	0,147819538
Y7	2,60	0,28	7280	0,147819538

Tabla 13: “Fuerzas horizontales de corte en muros de eje X e Y”

Fuente: Elaboración propia.

- Por último, la vivienda tipo tapial proyectada a 28 cm de espesor dio como resultado un excelente comportamiento a la compresión de 10,7 Kg/cm², siendo mayor a los esfuerzos de compresión que solicita la estructura, pero no así con los esfuerzos cortantes que poseen un valor promedio de 0.22 Kg/cm², los muros X1, X2, X3, X5, Y1 sobrepasan dicho valor, por todo lo anterior no es factible para edificar en la zona rural del Maule.

7.2. Análisis de cálculos basados en la Nch 433 y DS61 utilizando como refuerzo geomalla en los muros.

- Se calcula en primera instancia que el peso total de muros de 40 cm de espesor sumado a la techumbre y sobre cargas es de 76,23 Ton. También que el muro más solicitado a carga vertical fue el X9 con 0.801 Kg/cm². Siendo menor que la resistencia a la compresión promedio del tapial que es 10,7 Kg/cm².
- El valor del corte admisible del tapial reforzado es de 0.4 Kg/cm², en la tabla 14 se puede apreciar que ningún muro sobrepasa dicho esfuerzo admisible.

TAPIAL 0,4 kg/cm ² Corte admisible				
Muro	Longitud muro (m)	Espesor muro (m)	Área sección (cm ²)	Corte actuante (kg/cm ²)
X1	3,34	0,40	13.360	0,349107439
X2	3,08	0,40	12320	0,325737556
X3	3,08	0,40	12320	0,325737556
X4	0,44	0,40	1760	0,014493645
X5	2,35	0,40	9400	0,246561451
X6	1,16	0,40	4640	0,087879085
X7	0,60	0,40	2400	0,026393202
X8	1,18	0,40	4720	0,09046643
X9	1,09	0,40	4360	0,078971074
X10	0,45	0,40	1800	0,015142817
X11	0,60	0,40	2400	0,026393202
Y1	8,70	0,40	34800	0,276769123
Y2	1,36	0,40	5440	0,059168707
Y3	1,25	0,40	5000	0,051537043
Y4	0,56	0,40	2240	0,011959763
Y5	3,90	0,40	15600	0,202568706
Y6	2,60	0,40	10400	0,14271461
Y7	2,60	0,40	10400	0,14271461

Se comprueba que los muros no superan el corte admisible

Tabla 14: “Fuerzas horizontales de corte en muros de eje X e Y con refuerzo de geomalla”
Fuente: Elaboración propia.

- Finalmente, la vivienda tipo tapial proyectada a 40 cm de espesor con refuerzos de geomalla estucada entregó como resultado un excelente comportamiento a la compresión y también a los esfuerzos cortantes, siendo factible para edificar en la zona rural del Maule.
- Con la solución entregada, se observa que el muro con mayores solicitaciones de esfuerzos cortantes es el X1 con 0,349 Kg/cm², siendo menor que la resistencia de corte del tapial reforzado con geomalla (0,4 Kg/cm²).

7.3. Análisis de los costos.

- El costo directo de obra gruesa de una vivienda tipo albañilería confinada de 52,23 m² es de \$9.152.620, en comparación a la misma vivienda de tipo tapial de 40 cm de espesor que tendría un valor aproximado de \$7.617.494, de lo que se analiza que la obra gruesa de la vivienda construida en albañilería sería un 20 % más costosa que la de tipo tapial, sin embargo la vivienda tipo tapial podría ser más económica pero se encarece más en la fundación y los costos de hormigón, dado a que se aumenta un 74 % el volumen de excavación para la fundación, además aumenta un 300 % el volumen de sobrecimiento.
- También se debe tomar en cuenta que estos valores podrían cambiar a corto plazo, ya que el costo de los materiales se encarece continuamente, haciendo más grande la brecha entre estos dos presupuestos, dejando en ventaja la construcción de viviendas tipo tapial para las próximas décadas.

CAPÍTULO VIII: CONCLUSIONES

De acuerdo al análisis anterior se puede concluir lo siguiente:

- Dado el estudio técnico realizado para la construcción de viviendas de tapial utilizando la experiencia de Colombia a partir del manual para la rehabilitación de viviendas construidas en adobe y tapia pisada, creado por la Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica, al evaluar la vivienda tipo tapial de acuerdo a los procedimientos constructivos de Colombia en la zona rural del Maule, se puede concluir que esta resiste muy bien los esfuerzos axiales, teniendo en cuenta que se aplicó el manual en función de las condiciones y normas nacionales.
- De acuerdo al análisis del comportamiento sísmico de la vivienda tipo tapial, para la zona rural de la séptima región, se concluye que, con los 28 cm de espesor de muro que exige el manual colombiano, no es factible estructuralmente, por los grandes esfuerzos de cortantes producidos por los sismos, según indican los cálculos basados en el método empírico de la Norma Chilena 433 y el Decreto supremo 61, por lo tanto, es necesario reforzar la estructura para su factibilidad en la zona de estudio.
- La resistencia a esfuerzo cortante de un muro tipo tapial sin reforzar es de 0.22 Kg/cm^2 , y el muro más solicitado con 28 cm de espesor presenta esfuerzos cortantes de 0.36 Kg/cm^2 . Así, se propone en el capítulo 5 una solución a este tipo de estructuras, considerando la Norma Peruana E80, que exige incrementar el espesor de muro anterior a 40 cm y además instalar un refuerzo de geomalla por todo su contorno. De esta manera se concluye que al aumentar el espesor del muro y reforzarlo con geomalla, incrementa considerablemente la resistencia a los esfuerzos cortantes de la vivienda, la cual soportaría las cargas solicitadas.
- Se hizo un estudio económico de los recursos para una vivienda de tapial, donde se comparó con otra de estructura de albañilería confinada, considerando los mismos planos. Gracias a esto, se puede concluir que es un 17% más económico construir una casa unifamiliar de tipo tapial en comparación a una tradicional de la zona, esto se debe a que el material principal es más accesible, ya que se utilizaría la misma tierra del sitio para edificar los muros. Sin embargo, hay que considerar que usar tapial encarece la fundación y los costos

de hormigón, dado a que se aumenta un 74 % el volumen de excavación para la fundación, además aumenta un 300 % el volumen de sobrecimiento.

- De todo lo anterior, se puede apreciar que las viviendas proyectadas según el manual de Colombia poseen un buen comportamiento respecto a las cargas de compresión, con la excepción de las cargas sísmicas requeridas a soportar por normativa chilena. Por este motivo es prioritario buscar algún método de refuerzo, a partir de esta necesidad se toma en cuenta la norma peruana E80 y se analizan empíricamente con las exigencias nacionales, entregando una mayor resistencia a los esfuerzos de corte solicitados por la vivienda, determinando que es factible técnicamente. Sin embargo, la sollicitación es muy similar a la resistencia, por lo que convendría estudiar otras alternativas de refuerzo.
- Por otra parte, en el aspecto económico, no es tan significativo el ahorro en los costos directos, pero se tiene que tener en cuenta que en la actualidad no hay valores estables para los materiales de construcción, debido al alza de precios que afecta directamente al presupuesto de la vivienda de albañilería. Los precios asociados eventualmente podrían subir haciendo más extensa la brecha entre estos tipos constructivos.
- En general, se concluye que las viviendas de tapial son factibles técnica y económicamente en la zona rural de la Región del Maule, no solo por los aspectos ya mencionados, sino que también porque dejan una baja huella ecológica, generando una menor repercusión en el medio ambiente en comparación a otro tipo de estructuras utilizadas actualmente en la mayoría de las viviendas a lo largo de la Región del Maule.

BIBLIOGRAFÍA

1. Afanador, M. Carrascal (2013). Experimentación, comportamiento y modelación de la tapia pasada. *Revista facultad de Ingeniería UPTC*, 22, 35
2. Cáceres, Marcelo (2020). *Economía Circular en la Construcción*. Chile. Revista BIT.
3. Cardona, Omar (2001). *Manual para la rehabilitación de viviendas construidas en adobe y tapia pisada*. Colombia. Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica.
4. Glasinovic, Vladimir y Hirsch (2020). *Economía circular y sector construcción en Chile*. Chile: Fundación Chile.
5. Ignacio Arto (2014). *Evaluación del comportamiento sísmico de estructuras de tapial mediante análisis no-lineal*. España. Universidad de Granada.
6. Instituto Nacional de Normalización (2017). *Norma E80.Of2017*. Perú: Norma Peruana Oficial.
7. Instituto Nacional de Normalización (2009). *Nch433.Of1996, Mod 2009*. Chile: Norma Chilena Oficial.
8. Instituto Nacional de Normalización (2009). *Nch1508.Of2008*, Chile: Norma Chilena Oficial.
9. Schmidt, Urbano y Mendoza, Alan (2019). *Uso de tapial en la Construcción*. Perú. Sencico.
10. Tejada, Mendoza y Torrealva (no tengo el año). *Uso del Tapial en la construcción*. Perú: SENCO y Ministerio de vivienda, construcción y saneamiento.
11. Torrealva Daniel (2009) *Diseño sísmico de muros de adobe reforzados con geomallas*. Perú, Pontificia Universidad Católica del Perú.
12. (2020). Obtenido de www.construye2025.cl

13. (2022). Obtenido <https://www.geosistemas.cl/geo-productos/geogrilla-extruida-biaxial-egrid/>
14. (2020). Obtenido de <https://www.geovirtual2.cl/geologiageneral/ggcap05b-2.htm>
15. (2021). Obtenido de <https://es.wikipedia.org/wiki/Tapial>
16. (2021). Obtenido de https://es.wikipedia.org/wiki/Erosi%C3%B3n_en_el_suelo
17. (2022). Obtenido <https://www.zschimmer-schwarz.es/noticias/que-son-los-polimeros-y-como-se-clasifican/>