

INSTITUTO TECNOLÓGICO Y DE ESTUDIOS SUPERIORES DE OCCIDENTE

Reconocimiento de validez oficial de estudios de nivel superior según acuerdo secretarial
15018, publicado en el Diario Oficial de la Federación el 29 de noviembre de 1976.

Departamento del Hábitat y Desarrollo Urbano

MAESTRÍA EN PROYECTOS Y EDIFICACIÓN SUSTENTABLES



DISEÑO DE MUROS DE TEPETATE CON REVISIÓN SÍSMICA SIMPLIFICADA PARA VIVIENDA DEL ÁREA METROPOLITANA DE GUADALAJARA

Trabajo recepcional que para obtener el grado de
MAESTRA EN PROYECTOS Y EDIFICACIÓN SUSTENTABLES

Presentan: Arq. América Flores Rodríguez

Tutor: Dr. Adolfo Preciado Quiroz

San Pedro Tlaquepaque, Jalisco, julio de 2017



Índice

RESUMEN:	5
1. INTRODUCCIÓN.....	8
1.1 INTRODUCCIÓN	9
1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	10
1.3 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA Y SU RELACIÓN CON LA SUSTENTABILIDAD	11
1.4 DELIMITACIÓN DEL OBJETO DE DESARROLLO O INNOVACIÓN	12
1.4.1 <i>Ubicación en campos disciplinares</i>	12
1.5 DISEÑO METODOLÓGICO.....	13
1.5.1 <i>Hipótesis</i>	13
1.5.2 <i>Pregunta general de investigación</i>	13
1.5.3 <i>Objetivos</i>	14
1.5.3.1 <i>Objetivo general</i>	14
1.5.3.2 <i>Objetivos particulares</i>	14
1.6 CONTENIDO DEL TOG	14
2. EL SUELO COMO MATERIAL DE CONSTRUCCIÓN.....	16
2.1 INTRODUCCIÓN	17
2.2 ANTECEDENTES DE LA CONSTRUCCIÓN CON TIERRA.....	18
2.3 MEJORAMIENTO DEL SUELO POR ESTABILIZACIÓN	20
2.4 PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS DEL SUELO PARA LA CONSTRUCCIÓN	23



“Diseño de muros de tepetate con revisión sísmica simplificada para vivienda del Área Metropolitana de Guadalajara”

2.5	MODOS DE FALLA EN CONSTRUCCIONES DE TIERRA	28
2.6	REFUERZO SÍSMICO EN CONSTRUCCIONES CON TIERRA.....	31
2.7	RESUMEN DEL CAPÍTULO.....	37
3.	LA SUSTENTABILIDAD EN EL USO DE ARENAS PARA LA CONSTRUCCIÓN	38
3.1	INTRODUCCIÓN	39
3.2	REFERENCIAS CONCEPTUALES DEL TEMA	40
3.2.1	<i>Sustentabilidad</i>	40
3.2.2	<i>Construcción de vivienda</i>	40
3.2.3	<i>Suelos del Área Metropolitana de Guadalajara</i>	42
3.2.3.1	Las puzolanas	44
3.3	RESUMEN DEL CAPÍTULO.....	45
4.	OBTENCIÓN DE PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS EN TEPETATE ESTABILIZADO	47
4.1	INTRODUCCIÓN	48
4.2	DISEÑO DE EXPERIMENTACIÓN	49
4.2.1	<i>Pruebas a compresión uniaxial en especímenes de tepetate estabilizado con cemento blanco</i> 50	
4.2.1.1	Resultados de ensayos a compresión de tepetate estabilizado con cemento blanco	52
4.2.2	<i>Pruebas a compresión uniaxial en especímenes de tepetate estabilizado con cemento gris</i> 53	
4.2.2.1	Resultados de ensayos a compresión de tepetate estabilizado con cemento gris	56



“Diseño de muros de tepetate con revisión sísmica simplificada para vivienda del Área Metropolitana de Guadalajara”

4.2.3	<i>Pruebas a compresión diagonal en especímenes de tepetate estabilizado con cemento gris</i>	72
4.3	RESUMEN DE DESCUBRIMIENTOS.....	82
4.4	CONCLUSIONES	84
5.	VIVIENDA DE TEPETATE ESTABILIZADO CON REVISIÓN SÍSMICA SIMPLIFICADA	86
5.1	INTRODUCCIÓN	87
5.2	PROPUESTA ARQUITECTÓNICA DE VIVIENDA.....	88
5.3	ANÁLISIS DEL SISTEMA CONSTRUCTIVO Y DISTRIBUCIÓN DE CARGAS	92
5.4	REVISIÓN SÍSMICA DE VIVIENDA E ÍNDICE DE ÁREA RESISTENTE A SISMO	102
6.	SINOPSIS DEL TOG	105
6.1	RESUMEN DEL TOG	106
6.2	CONCLUSIONES GENERALES	108
6.3	RECOMENDACIONES Y PROPUESTAS DE INVESTIGACIÓN FUTURA	111
	REFERENCIAS	114



Palabras clave: arenas pumíticas, muros, propiedades mecánicas, revisión sísmica, sistema constructivo, tepetate.

Resumen:

En años atrás los materiales de construcción estaban ligados directamente a su entorno, por tanto se planteó la viabilidad de un sistema constructivo de muros de tepetate estabilizado para vivienda tradicional del Área Metropolitana de Guadalajara. La investigación llevó a cabo técnicas experimentales de laboratorio para las cuales se diseñaron cuatro tipos de mezclas de tepetate y cemento. Las primeras pruebas fueron a compresión axial para especímenes con cemento blanco como estabilizador; luego se procedió a reensayar los especímenes ahora con cemento gris. Al conocer las dos muestras con los valores de resistencia mayor, se hicieron más especímenes para probar a compresión diagonal. Una vez finalizados los procesos experimentales y conocido el espécimen ideal para el sistema de muros de tierra compactada; se diseñó una vivienda unifamiliar la cual fue sometida a una revisión simplificada de diseño ante sismos, pasando satisfactoriamente en ambas direcciones sobre los ejes X y Y.

Proyecto profesionalizante de desarrollo e innovación. Línea de Generación y Aplicación de Conocimiento: 05. Desarrollo de Tecnología Apropriada.



“Diseño de muros de tepetate con revisión sísmica simplificada
para vivienda del Área Metropolitana de Guadalajara”

Agradezco y dedico esta investigación **a Dios y a mis padres Victor Manuel y Lilia**; a Ángel y a O.B.

Gracias también a mi tutor el Dr. Adolfo Preciado;

Al Dr. David Vargas, a la Dra. Sarah A. Obregón y al CONACYT.



“Diseño de muros de tepetate con revisión sísmica simplificada para vivienda del Área Metropolitana de Guadalajara”

Diseño de muros de tepetate con revisión sísmica simplificada para vivienda del Área Metropolitana de Guadalajara



“La arquitectura moderna no significa el uso de nuevos materiales, sino utilizar los materiales existentes en una forma más humana.” Arq. Alvar Aalto (1898-1976).



1. Introducción



1.1 Introducción

El presente Trabajo de Obtención de Grado (TOG) toma como punto de partida el hecho de que hace algunos años, los materiales para la construcción estaban ligados directamente a su entorno inmediato. Las materias primas naturales se aprovechaban localmente y el consumo de energía era reducido. Por tanto, tomando la base de la construcción vernácula de construir con lo “que se tiene en casa”, se propone el uso de un sistema constructivo para muros hechos de tepetate debido a la disponibilidad de este suelo en el Área Metropolitana de Guadalajara (AMG) más cemento como estabilizador, bajo la técnica de tierra compactada.

Este sistema busca además abonar en la construcción de vivienda sustentable mediante el desarrollo de tecnología que emplee materiales locales, ya que es común que los sistemas constructivos de tierra son más amigables con el medio ambiente, son de bajo costo y pueden estar al alcance de cualquier usuario.

Sin embargo, es importante señalar que el suelo y en específico el tepetate, no es un material estándar; sus características y propiedades varían de acuerdo a su sitio de extracción y pese a dicha diversidad, se pretende que este estudio pueda ser tomado como base para conocer y emplear técnicas de construcción con suelos arenosos similares.

En resumen, hablando de tres términos de la sustentabilidad; en el aspecto social y económico, la gente que no cuenta con fondos para vivienda podría emplear este sistema por su accesibilidad y economía, y en el aspecto ambiental, el impacto que la construcción con materiales industrializados produce, se puede minimizar mediante tecnología o procesos de construcción con materiales abundantes.



1.2 Planteamiento del problema

Una de las actividades humanas que generan diversos daños al medio ambiente es la de la construcción, ya sea desde el impacto de extracción de materia prima, con la transportación desde su origen hasta su destino final, o con la contaminación derivada de la producción de más materiales. Podemos señalar que hace algunos años, los materiales de construcción estaban ligados directamente a su entorno inmediato, obtenerlos y procesarlos eran procedimientos sencillos de carácter particular; la materia prima natural se aprovechaba localmente y el consumo de energía era reducido.

Luego, con el inicio de la explotación de combustibles fósiles como fuente de energía, se permitió la utilización de los recursos minerales de la litosfera, a este consumo energético se añade el volumen de residuos que se vierten en una biosfera incapaz de metabolizarlos, ocasionando graves alteraciones en los ecosistemas. También, aunque las necesidades de construcción están cubiertas por los materiales industrializados actuales (Fig. 1.1), de acuerdo a pronósticos fundamentados en investigaciones significativas, en un futuro los recursos energéticos no renovables escasearán por lo que es importante desarrollar las capacidades de los materiales existentes, así como de los sistemas constructivos.



Fig. 1.1: Construcción de viviendas por sistemas de block de concreto en muros.

Por esto, tomando la base de la construcción vernácula de “construir con lo que se tiene en casa” a partir de recursos naturales de amplia disponibilidad como el tepetate (arena pumítica del AMG) se busca conocer la viabilidad del uso de este material en la construcción de muros



y generar un interés en la población de adoptar el sistema debido a sus características de fácil construcción, además de más económicas y menos contaminantes comparadas con otros sistemas constructivos convencionales.

1.3 Descripción del problema y su relación con la sustentabilidad

Para el año 2050, México tendrá aproximadamente 121 millones de habitantes, por lo que por este aumento demográfico se necesitan construir alrededor de 600,000 nuevas viviendas al año durante la próxima década para soportar dicho incremento. Por tanto, es importante la necesidad de acciones sustentables para mitigar la demanda de vivienda y la poca posibilidad de solventar el gasto para cierto tipo de usuarios de recursos económicos limitados, ya que la vivienda es considerada un derecho humano con el cual todo ser vivo debe contar. [Velásquez \(1991\)](#) dice que el derecho a la vivienda pretende dar satisfacción a la necesidad que tiene toda persona de tener un lugar adecuado para vivir. Es considerado como un derecho inalienable al individuo.

Así mismo, para satisfacer la gran demanda de materiales que se da hoy en día, las materias primas se extraen de lugares cada vez más lejanos de donde se les solicita. La distancia entre la obtención del material y el sitio de su producción es respuesta al agotamiento de los recursos próximos, lo que da como resultado el aumento de emisión de los contaminantes derivados de todas las actividades producto de la construcción.

Según [Arenas \(2007\)](#), los materiales de construcción ocasionan daños al entorno a lo largo de toda su vida, desde la fase de extracción y procesamiento de materias primas, luego en la fase de producción de materiales, donde “los problemas ambientales derivan de dos factores: de la gran cantidad de materiales que se emplean y del gran consumo de energía necesario para alcanzar el producto adecuado”, de la fase de uso racional y de la fase final de ciclo de vida. Así mismo, [Spiegel y Maystre \(2001\)](#) señalan que el uso cada vez más generalizado e intensivo de materiales y energía ha originado una creciente presión en la calidad de los ecosistemas locales, regionales y mundiales.



También, la construcción directa e indirectamente genera impactos considerables al planeta ya que el 60% de los materiales que se extraen de la litosfera tienen como destino la construcción, además el 50% de las emisiones de CO₂ emitidas a la atmósfera también tienen su origen en dicha actividad así como en el uso de los edificios, ya que se puede comprobar que el 40% de la energía primaria consumida en el planeta se destina a ellos. “En términos estadísticos, se puede decir que el sector de la construcción es responsable del 50% de los recursos naturales empleados, del 40% de la energía consumida (incluyendo la energía en uso) y del 50% del total de los residuos generados” (Anink *et al.*, 1996).

1.4 Delimitación del objeto de desarrollo o innovación

1.4.1 Ubicación en campos disciplinares

El tema de la investigación es el sistema constructivo de muros de tierra compactada hechos de tepetate estabilizado con cemento gris del Área Metropolitana de Guadalajara (AMG). Éste se ubica dentro de dos campos disciplinares: el de la ingeniería civil y de la arquitectura. En el campo de la ingeniería civil es importante conocer las propiedades físicas y mecánicas del tepetate a través de procesos de experimentación donde cada espécimen de material, es probado contra cargas verticales y diagonales para determinar su resistencia, modos de falla y puntos clave del sistema.

Respecto a la arquitectura, es importante recordar que la necesidad de habitabilidad del ser humano así como a la demanda de espacios para poder realizar sus actividades diarias es la que impulsa al desarrollo de sistemas constructivos que estén al alcance de cualquier usuario. Así, acotando el objeto de estudio se toman elementos de la arquitectura que pertenece a un sitio particular: la arquitectura vernácula. Este tipo de arquitectura es distinguida por ofrecer soluciones constructivas adaptadas al contexto mediante la utilización de materiales locales (Fig. 1.2).

Por ende, esta investigación busca implementar muros con tepetate el cual es una arena con características puzolánicas (así como el jal) abundante en el AMG para vivienda tradicional, ya que la pertinencia del uso de este material, es para darle un uso como protagonista en el



sistema constructivo donde el potencial usuario apoyado de conocimiento sencillo adquirido previamente, pueda tener bases y criterios para construir estos muros con la técnica de tierra compactada.



Fig. 1.2: Ejemplo de arquitectura vernácula hecha de adobe, San Andrés Cohamiata, Jal.

1.5 Diseño Metodológico

La metodología de esta investigación es de carácter cuantitativo debido a que la médula central de la misma emplea técnicas de experimentación para el diseño de mezclas de tepetate más cemento como estabilizador.

1.5.1 Hipótesis

Un sistema constructivo de muros de tierra compactada hechos de tepetate y cemento, tendrá mejores características mecánicas, con un menor espesor que los sistemas convencionales que se realizan solo con tierra.

1.5.2 Pregunta general de investigación

¿Cuál es la mezcla óptima de tepetate estabilizado con cemento gris, con las mejores propiedades mecánicas para su aplicación en muros para vivienda tradicional para el AMG?



1.5.3 Objetivos

1.5.3.1 Objetivo general

Investigar las propiedades mecánicas del tepetate (tipo de arena pumítica) del AMG para la construcción de muros de tierra compactada para vivienda tradicional.

1.5.3.2 Objetivos particulares

1. **Investigar** los tipos de construcción vernácula y construcción con tierra.
2. **Revisar** información recabada en la literatura para así construir conceptos que apoyarán a la investigación.
3. **Diseñar** mezclas de tepetate estabilizado
4. **Elaborar y probar** especímenes de tepetate para conocer aquel con las mejores propiedades mecánicas para su aplicación en muros para vivienda.
5. **Generar** bloques de tepetate estabilizado de 30x20x30 cm, con la mezcla óptima obtenida y someterlos a pruebas de laboratorio para conocer su comportamiento mecánico y modos de falla.
6. **Proponer** ejemplo de vivienda para el sistema constructivo.
7. **Analizar** las cargas y distribución de las mismas sobre muros.
8. **Evaluar** la capacidad ante cargas verticales y el desempeño sísmico del sistema a través de un análisis simplificado.
9. **Analizar** el sistema constructivo de tepetate estabilizado y posibles líneas de mejora del mismo.
10. **Señalar** líneas de investigación futura.

1.6 Contenido del TOG

Capítulo 1.- Introducción: Se inicia por describir de manera general el planteamiento del problema, así como su pertinencia y descripción en términos cualitativos y cuantitativos. También se presenta el diseño metodológico de la investigación, el cual responde a cómo



será resuelto el problema de investigación. También se presenta la hipótesis a demostrar, los objetivos (general y particulares) así como la pregunta central de investigación.

Capítulo 2.- El suelo como material de construcción: Contiene un panorama general del estado del arte del tema de construcción con tierra a lo largo de los años, partiendo de la tipología de arquitectura conocida como vernácula. También se describe el mejoramiento del suelo por estabilizaciones para su aplicación en la construcción; las propiedades físicas y mecánicas generales de algunos sistemas de construcción con tierra, así como modos de falla y ejemplos de refuerzo sísmico.

Capítulo 3.- La sustentabilidad en el uso de arenas para la construcción: Se explican las referencias conceptuales del tema; la sustentabilidad, la construcción de vivienda y los suelos del AMG.

Capítulo 4.- Obtención de propiedades físicas y mecánicas en tepetate estabilizado: este capítulo presenta la parte central del trabajo de investigación. En él se describe el proceso de experimentación en laboratorio el cual consistió en la realización de especímenes de tepetate estabilizado sometidos a cargas de compresión axial y a esfuerzo cortante para conocer las capacidades mecánicas del material y proponer el uso de la mejor muestra en el diseño del sistema constructivo de muros de arena compactada.

Capítulo 5.- Vivienda de tepetate estabilizado con revisión sísmica: Se presenta una propuesta arquitectónica de vivienda tradicional para el AMG, así como cálculos de su estructura la cual está diseñada con base en el sistema constructivo de muros de tepetate estabilizado. Se hace un análisis del sistema constructivo, así como distribución de sus cargas verticales para posteriormente hacer una revisión del diseño de la vivienda ante sismos y conocer su capacidad de resistencia.

Capítulo 6, Sinopsis del TOG: Por último, se presenta el resumen de la investigación, las conclusiones finales, recomendaciones obtenidas del proceso de la investigación y las líneas de investigación futura.



2. El Suelo Como Material De Construcción



2.1 Introducción

Este apartado menciona brevemente los antecedentes de la construcción con tierra a lo largo de la historia. Este uso parte de la necesidad de habitabilidad del ser humano por lo que se genera una solución sencilla al emplear materiales naturales disponibles en cada sitio. De todos los materiales disponibles nos enfocamos en el estudio particular de la tierra y en los sistemas constructivos derivados de la misma. Dichos sistemas analizados responden a una construcción utilizando arcillas debido a sus características plásticas y térmicas que las arenas no tienen; sin embargo, también se describen las posibilidades de mejora de estos suelos los cuales pueden ser mezclados con algunos tipos de estabilizadores como el cemento para el caso de su aplicación con tepetate.

También se presenta el estudio de los modos de falla en construcciones de tierra, ocasionados generalmente por movimientos sísmicos así como por errores en el diseño de la estructura. Para todos los sistemas constructivos de tierra se presenta un comportamiento estructural frágil ante diferentes tipos de esfuerzos, es decir en caso de falla de la estructura el elemento puede colapsar.

Luego de la presentación de estas fallas, se exponen criterios de refuerzo los cuales están enfocados en los muros, ya que éstos son los elementos de soporte del peso de la construcción los cuales cumplen con otras funciones estructurales como absorber empujes laterales como sismos y viento. Los ejemplos de las aplicaciones de refuerzo sísmico fueron desarrollados particularmente en las poblaciones de Perú y Chile debido a que su geografía indica que son zonas con alto potencial sísmico por lo que es importante conocer cuáles son los puntos a considerar o qué han hecho estas poblaciones para mejorar el desempeño ante éstos.

La **Tabla 2.1** del final del capítulo, expone las propiedades mecánicas de algunos sistemas constructivos con tierra de acuerdo a bibliografía consultada ya que es importante conocer indicadores de medición que posicionen al sistema constructivo de tierra compactada de tepetate estabilizado propuesto en esta investigación.

2.2 Antecedentes de la construcción con tierra

A lo largo del tiempo podemos observar distintas tipologías de edificio: edificios residenciales, arquitectura religiosa, además de centros urbanos, monumentos, etc., donde la tierra es el material por excelencia en los procesos constructivos. Podemos encontrar ejemplos de edificios construidos con tierra que en su mayoría son de bastante antigüedad, ya que en años anteriores no se contaban con materiales industrializados ni con el desarrollo de tecnología en el área de la construcción. Aún hoy en día, se calcula que la mitad de la humanidad vive en hábitats construidos con tierra en todos los continentes habitados según el departamento de Energía de Estados Unidos. (Fig. 2.1)



Fig. 2.1: Zonas de presencia de construcción con tierra en el mundo (Gandreau y Delboy, 2012)

De acuerdo a la RAE, *la tierra* (f.) es aquel material desmenuzable que principalmente se compone de suelo natural, también simplemente definido como “suelo o piso”. Su uso en la construcción, parte de la arquitectura vernácula donde se construye con el material más próximo de la zona, ligados directamente a su entorno inmediato.

Con el inicio de la explotación de los combustibles fósiles como fuente de energía, se permitió la utilización de los recursos minerales de la litosfera; a este consumo energético se añade el volumen de residuos que se vierten en una biosfera incapaz de metabolizarlos, ocasionando graves alteraciones en los ecosistemas, sucesos que no suceden cuando construyes de forma natural como con algún tipo de tierra.



La tierra es una mezcla de 4 tipos de suelo: Grava, arena, limo y arcilla; su proporción y características específicas dependen de la zona donde se extraigan, por lo que la **UNESCO (2012)**, dice que la arquitectura de tierra es una de las expresiones más originales y poderosas de la habilidad humana, de usar los recursos disponibles para crear edificios (**Fig. 2.2**).



Fig. 2.2: Construcción con tierra; a) vivienda hecha de adobe confinado, Jalisco y b) 1988 Djenné, Malí (UNESCO, 2012).

La tierra como material de construcción se utiliza en diversos sistemas en los cuales únicamente varía la disposición que se le da a través de diversos elementos. Sin embargo, los componentes de la mezcla son los mismos, variando únicamente en menor medida ciertos contenidos de humedad. Sus usos para los componentes del edificio van desde muros, morteros, aplanados, pisos y techos, siendo los primeros donde se presenta su mayor aplicación. Para el caso de la construcción de muros de tierra existen técnicas mediante el uso de bloques de adobes, bajareque, muros de tierra compactada o técnica de tapial, muros de tierra vertida y la técnica de cob (**Fig. 2.3**), dichas técnicas datan desde hace más de 9000 años en distintos tipos de edificios; un ejemplo en México es la Pirámide del Sol en Teotihuacán la cual está construida por 2 millones de toneladas de tierra apisonada.



Fig. 2.3: Técnicas de construcción con tierra; a) vivienda de tierra compactada (Joy, 2017); b) técnica de bajareque (TuTecho, 2015) y c) técnica de cob (S/F).



De acuerdo al Inventario de Arquitectura de Tierra del Programa de Arquitectura de Tierra de Patrimonio Mundial del año 2012; existen hasta 150 bienes construidos total o parcialmente con tierra inscritos en la lista de Patrimonio Mundial de la UNESCO, [Bestraten, et al. \(2011\)](#), donde se puntualiza que de todas las técnicas de construcción con tierra, el adobe es la más utilizada alrededor del mundo, sobretodo en regiones de Asia y el Pacífico en un 68%.

El adobe es una masa de barro frecuentemente mezclada con paja, moldeada de forma prismática de tamaño variable y secado al sol. La diferencia que tiene con la tierra compactada y el block de la misma técnica (BTC) es la cantidad de agua necesaria en su proceso de fabricación.

2.3 Mejoramiento del suelo por estabilización

Para mejorar el comportamiento mecánico de la tierra es habitual añadir otros componentes a la mezcla, ya sean estabilizadores o agregados. Según [Barros & Imhoff \(2010\)](#), el suelo natural siempre que reúna ciertas características granulométricas puede ser sometido al tratamiento denominado “estabilización”. [Arteaga et al. \(2011\)](#) menciona que estos procesos de mejoramiento de suelos se dividen en homogéneos y heterogéneos. Los primeros consisten en agregar el material faltante; es decir, si la tierra es poco cohesiva se agrega arcilla y si ya es muy cohesiva, se agrega arena. Para los procesos heterogéneos ocurre incorporación de materiales que cumplen con la función de brindar estabilidad al material natural, este proceso se divide en estabilizantes por consolidación, fricción e impermeabilizantes.

Los estabilizantes por consolidación se enlazan con los limos y las arenas. Uno de los mejores consolidantes es la cal ya que liga las partículas del suelo aumentando su resistencia a los esfuerzos de compresión y cortante; también disminuye la absorción del agua. La cal no modifica la porosidad y la tierra no pierde su adherencia. Para su aplicación, los suelos que responden mejor a su adición son los de grano fino como las arcillas de arena o suelos arcillosos. El cemento también es usado como consolidante, sin embargo, nunca debe ser agregado con cal para evitar que ambos compitan por el agua total de la mezcla.



Otros elementos que dan la función de aglutinantes, son las cactáceas, mientras que los estabilizantes como las fibras se agregan a la tierra formando redes para unirse las cuales controlan el comportamiento de dilatación o contracción durante el fraguado; las más comunes son la paja, viruta de madera, cáscaras de coco, aunque incluso según el conocimiento popular, en ciertas regiones andinas se agrega lana o pelo de llama.

Los impermeabilizantes como su nombre lo indica, son utilizados para aislar el exceso de agua por capilaridad. Algunos ejemplos son grasas de tipo vegetal o fósil como el aceite de recino o la baba de nopal y por último, los estabilizadores menos populares son los productos animales (grasas), productos vegetales (aceite de linaza, almidón cocido y jugos de plantas) y varios estabilizadores artificiales (resinas sintéticas, parafina y ceras).

El código de prácticas de estructuras de tierra apisonadas de África ([SADC ZW HS 983, 2014](#)), dice que los materiales aprobados para la estabilización son: cemento Portland ordinario, cal o cal hidratada, cal combinada con puzolanas tales como ceniza de combustible pulverizado y escoria de alto horno granulada molida.

Tomando el uso de cemento como estabilizador en mezclas de tierra apisonada, éste ha sido derivado de la necesidad de mejorar la resistencia en húmedo y la resistencia a la erosión en paredes demasiado expuestas a inclemencias del clima. Con la adición de cemento, la resistencia a la compresión mejora significativamente, por lo que aumenta el factor global de seguridad, la resistencia al deterioro por el agua y la durabilidad general. [Houben y Guillaud, \(1994\)](#) dicen que el uso de estabilizadores como el cemento se ha derivado de la necesidad de mejorar la resistencia en húmedo y la resistencia a la erosión en paredes muy expuestas. En aspectos favorables del uso del cemento se conoce que los altos niveles de estabilización con este material mejoran el revestimiento superficial y reducen la erosión, sin embargo, como desventaja se dice que la permeabilidad de la mayoría de los suelos se reduce, y por tanto, la capacidad natural de la tierra para permitir el paso de la humedad a través de la masa del suelo. La mayor eficacia del cemento en comparación con otros estabilizadores es cuando trabaja con suelos de bajo contenido de arcilla, como arenas, suelos arenosos-limosos y



suelos arcillosos de plasticidad baja a media. Estos suelos responden bien a la adición de un mínimo de 2 a 2.5% de cemento.

La tierra apisonada estabilizada por cemento tiende a tener un contenido proporcionalmente más alto de arena y grava y por consiguiente un contenido de finos inferior. Por ejemplo, un suelo adecuado para la estabilización del cemento debe tener un contenido significativo de arena. Para [Maniatidis \(2003\)](#), el cemento Portland es el agente estabilizante más común usado, típicamente proporcionado entre el 4% y el 15% de la mezcla, estando la mayoría de las mezclas estabilizadas entre 6% y 10% de cemento. De acuerdo a la calificación cualitativa “Suelos aptos para mezclas de suelo-cemento” diseñada por [Toirac \(2008\)](#), el porcentaje necesario de cemento en una arena bien graduada es de 2% a 4%, para una arena pobremente graduada y una arcilla arenosa de 4% a 6% y para una arcilla limosa de 6% a 8% de cemento.

Otra investigación realizada bajo el mismo principio de mezclar tierra más un cementante en Colombia ([Andrés & Mejía, 2015](#)), lograron obtener un cementante alternativo basado en puzolanas (suelos de cenizas volcánicas o materiales capaces de reaccionar con cal en presencia de agua para formar compuestos cementicios materiales) y escorias para la elaboración de concretos. Se incorporó una pasta basada en una puzolana natural y se evidencia la posibilidad de obtener resistencias a la compresión hasta de 60 MPa a los 7 días de curado (611.82 kgf/cm^2) ajustando la proporción de escoria. También el concreto “generó 15.8 N/mm^2 a los 7 días (161.11 kgf/cm^2) y 23.1 N/mm^2 (235.55 kgf/cm^2) a los 28 días de curado a temperatura ambiente con una reducción del potencial de calentamiento global del 40% al compararlo a un concreto equivalente basado en cemento portland. Aunque para este caso, no se aplicó la mezcla en algún sistema constructivo, los resultados muestran la viabilidad del uso de un sistema de fraguado activado alcalinamente como cementante alternativo para hacer concreto más “amigable” que con cemento tradicional.

También, investigaciones realizadas en conjunto por los países de Cuba, Canadá y Alemania en 2008 desarrollaron un concreto con cal-puzolana fina como material cementicio suplementario, [Dopico et al. \(2008\)](#). Se usó un aglomerante cal-puzolana en una mezcla de



20% de cal y 80% de puzolana en peso, mezclados y molidos de forma conjunta hasta ser fino polvo ya que a través del proceso de molienda la distribución por tamaño de partículas de la puzolana es mejorada y se alcanza una finura similar a la del Cemento Portland. Por lo que pudieron concluir que el uso de la adición cal-puzolana de alta finura activa puede disminuir el uso de cemento para concreto sin que se disminuya la resistencia.

Por otro lado, en un enfoque más local podemos referenciar la investigación “Arenas Pumíticas del Área Metropolitana para su uso en muros de tierra compactada” (Orozco, 2015). La investigación aborda el uso de las arenas pumíticas (jal y tepetate), cal y cemento para el desarrollo de un sistema de construcción en el AMG, donde en la discusión de experimentación podemos tomar que el tepetate alcanzó mejores resultados que el jal, donde se recomienda la continuación de procedimientos con mezclas de tepetate entre un 60% a 75%, con contenido de cal al 25% y también con cemento al 4%. En un sentido comercial también en el AMG, encontramos el desarrollo del jalcreto el cual es un concreto de bajo peso volumétrico, estratégico para disminución de cargas en las estructuras. Se utiliza para rellenos en general, nivelación de azoteas y pisos y casas prefabricadas. Una pieza sólida de jalcreto oscila para una resistencia a la compresión simple de 40 kg/cm².

Entonces, podemos concluir que la adición de un agente estabilizante como el cemento permite aprovechar mejor las cualidades además de añadir otras que algún material por sí solo no posee; por tanto, de acuerdo con los suelos de mayor abundancia en el AMG (jal y tepetate), se plantea el uso del último adicionando cemento para muros de vivienda.

2.4 Propiedades físicas y mecánicas del suelo para la construcción

Las propiedades físicas y mecánicas de la tierra dependen de su lugar de origen, composición y granulometría; según los límites de clasificación estándar británicos podemos referenciar que la grava tiene una granulometría de 2-60 mm.; la arena de 0.06-2.00 mm.; el limo de 0.002 -0.06 mm y la arcilla de menos de 0.002 mm (Maniatidis, 2003). Generalmente, aunque en la construcción con tierra la arcilla es el componente más importante por su plasticidad característica que es la que permite la cohesión de todos los elementos; la mezcla idónea



recomendada es aquella que contenga estas cuatro granulometrías. No obstante, para la técnica de tierra compactada el aumento del tamaño de la grava reduce la resistencia a la compresión, por lo que el suelo debe tener un alto contenido de arenas-grava con un poco de limo adicionando preferentemente, algún estabilizador.

También, la resistencia mecánica de un suelo depende de la proporción de vacíos del suelo después de la compresión, de la resistencia cohesiva del contenido de finos, de la resistencia del agregado y de la condición de humedad durante la prueba. Por lo tanto, según literatura consultada es imposible predecir un valor exacto para la resistencia mecánica de un suelo, por lo que es importante realizar siempre pruebas para obtener valores de comparación. Algunos valores de diseño recomendados para la resistencia a la compresión característica no confinada van desde los 0.4 N/mm^2 a los 0.7 N/mm^2 (4 a 7 Kg/cm^2). La normativa de Nueva Zelanda (NZS 4298:1998, 1998), la cual es una de las más conocidas del tema de construcción con tierra indica un valor de diseño de 0.5 N/mm^2 (5.09 kg/cm^2) mientras que estándares generales de Australia (2002) señalan valores de 0.4 a 0.6 N/mm^2 (4.07 a 6.11 kg/cm^2). Por otro lado, en África, la norma de estructuras de tierra apisonada previamente mencionada, SADC ZW HS 983: 2014 (2014) dice que la resistencia media a la compresión no debe ser inferior a 1.5 N/mm^2 (15.30 Kg/cm^2) en general o específicamente para muros de altura entre 3- 6 m. y a una edad mínima de 7 días, desde 2.0 N/mm^2 (20.39 Kg/cm^2).

En cuanto al sistema de adobe, sus resistencias a compresión son relativamente bajas, de entre 3 a 5 Kg/cm^2 por pieza cuando está seco, además de que pueden considerarse nulas a los esfuerzos laterales (Arndt y Calderón, 2015). La adición de paja reduce su contracción, por lo que las propiedades mecánicas pueden variar dependiendo de los demás elementos que se agreguen a la mezcla como estiércol u otro material orgánico que funcione como aglutinante. Según Meli (1998) la resistencia a compresión del adobe puede variar entre 5 y 20 Kg/cm^2 y la resistencia a tensión entre 0.25 y 1 Kg/cm^2 . De acuerdo a la norma para suelo-cemento, NTC 5324 del Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación (2004), para bloques de $14 \times 9.5 \times 29.5 \text{ cm}$, las resistencias varían de 20.39 Kg/cm^2 a 40.79 Kg/cm^2 .



Otro estudio ahora realizado por la Universidad de Bath ([Jayasinghe & Kamaladasa, 2007](#)) para el sistema de tierra compactada, indica que la resistencia a la compresión que se puede obtener con la mezcla estabilizada puede ser un poco superior a los 5 N/mm^2 (50.99 Kg/cm^2) con un rango de 0.5 N/mm^2 (5.09 Kg/cm^2) como valor del módulo de elasticidad (E). La tierra no estabilizada va desde aproximadamente 1 a 3 N/mm^2 (10 a 30 Kg/cm^2), mientras que agregando un estabilizador y de acuerdo a la proporción agregada, aumenta generalmente esta resistencia. Entonces, se pueden conseguir mejoras significativas en el rendimiento de los materiales con la estabilización.

De acuerdo a [Ciancio & Gibbings \(2012\)](#), complementando la mezcla típica de tierra con 5-8% de cemento, la resistencia a la compresión puede incrementarse hasta 5 N/mm^2 (50.98 Kg/cm^2). También, según ensayos de muretes de $30 \times 14 \times 45 \text{ cm}$. Hechos bajo la técnica de tierra compactada, [Arteaga et al. \(2011\)](#) obtuvieron resultados promedio de 1.17 N/mm^2 (11.93 Kg/cm^2) a esfuerzo de compresión, mientras que tres muretes más de $46 \times 14 \times 45 \text{ cm}$ probados a esfuerzo cortante, arrojaron como resultado 0.1926 N/mm^2 (1.96 Kg/cm^2) de resistencia. Luego de obtener su curva de esfuerzo-deformación, el esfuerzo máximo fue de 1.806 N/mm^2 (18.42 Kg/cm^2) y el promedio del módulo de elasticidad fue de 933.4 N/mm^2 (9518.03 Kg/cm^2), esto siguiendo la norma colombiana, NTC 5324.

Otra investigación ahora realizada por [Silva et al. \(2014\)](#) acerca del sistema de tierra compactada fue con muestras cilíndricas para obtener la curva de esfuerzo-deformación ([Fig. 2.4a](#)) las cuales arrojaron resultados de resistencia a la compresión de 1.26 N/mm^2 (12.85 kg/cm^2) en promedio, con un módulo de elasticidad (E) de 1034 N/mm^2 (10543.87 kg/cm^2). Después, al mejorar el suelo de las primeras pruebas se procedió a realizar muretes de $55 \times 55 \times 55 \text{ cm}$ para ensayarlos ahora a esfuerzo de tensión diagonal, teniendo como resultado 0.15 N/mm^2 (1.53 kg/cm^2) en promedio ([Fig. 2.4b](#)). Se señala que esta prueba consiste en someter a las probetas a una carga de compresión a lo largo de una de sus diagonales; durante el ensaye la carga vertical genera esfuerzos de tensión crecientes que se orientan perpendicularmente a la dirección de carga; este campo de esfuerzos de tensión conduce a la

falla del murete a lo largo de una grieta aproximadamente vertical entre las dos esquinas cargadas.

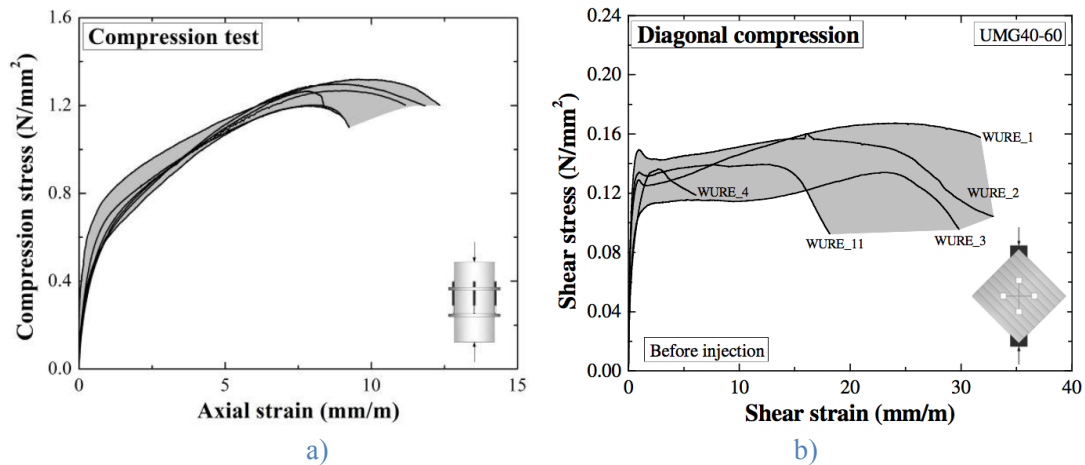


Fig. 2.4: Gráficas de propiedades mecánicas de tierra compactada; a) curva de esfuerzo-deformación de cilindro y b) gráfica de esfuerzo cortante de murete (Silva et al., 2014).

También, según literatura consultada algunos valores promedio de resistencia a la compresión diagonal de muretes fabricados con ladrillos de barro recocido normales sin refuerzo es de 3.91 Kg/cm². Para los mismos tipos de muro pero reforzados con malla electrosoldada y recubrimiento de mortero, el resultado fue de 13.20 Kg/cm²; para el caso de muretes fabricados con tabicones de cemento, jal y arena sin reforzar, según [Tejeda & Silva \(2002\)](#) la resistencia media fue de 4.93 Kg/cm², mientras que reforzados alcanzaron una resistencia de 9.52 Kg/cm².

Es importante señalar que los valores referenciados de adobes, ladrillos y tabicones, corresponden a unidades y los valores de tierra compactada y muretes, a una mampostería como conjunto, por lo que los resultados obtenidos en esta investigación deben compararse con una mampostería, como la de barro rojo recocido con mortero cemento-arena la cual, de acuerdo a las Normas Técnicas Complementarias de la Ciudad de México, tienen una resistencia de 15 kg/cm² a esfuerzos de compresión.



Para una mejor interpretación de los datos véase la **Tabla 2.1**, que engloba resultados de propiedades mecánicas de sistemas constructivos de tierra obtenidos de diferentes investigaciones.

Tabla 2.1: Tabla comparativa de propiedades mecánicas de sistemas constructivos de tierra

Tabla Comparativa Propiedades Mecánicas de Sistemas Constructivos de Tierra

Sistema constructivo	Aplicación	Referencia	Resistencia a la compresión (Kg/cm ²)	Resistencia a la tensión E (N/mm ²) (Kg/cm ²)		
Tierra natural		NZS 4298:1998	5.09			
		Estándares de Australia: 2002	4.07-6.11			
		SADC ZW HS 983: 2014	15.30- 20.39			
Adobe		Arndt & Calderón, 2015	3-5			
		Meli, 1998	5-20	0.25-1.00	5	
Adobe cocido (Tabique)			20-150	2	10	
	Sin refuerzo (Pza)	Tejeda & Silva, 2002	51.20			
Suelo-Cemento (SC)		NTC 5324 Colombia, 2004	20.39-40.79			
	Pza. Promedio		44.7			
	Bloque SC más arena sin refuerzo	Tejeda & Silva, 2002	4.93			
	Bloque SC más arena con refuerzo		9.52			
Tierra compactada no estabilizada		Jayasinghe & Kamaladasa, 2007	10-30			
		NZS 4298:1998	+11.63			
		Lacouture et al., 2007	5.61	0.40		
	Cilindros		12.85			
	Muertes de 55x55x20	Sin inyección de lodo sin fallas	Silva et al, 2014	-	1.53	
		Con inyección de lodo en fallas		-	1.02	
Tierra compactada estabilizada con cemento		Houben & Guillaud, 1994	20.39-51.00			
		Estándares de Australia: 2002	10-153			
		Jayasinghe & Kamaladasa, 2007	51.00	-	0.5	
		Arteaga et al, 2011	11.93	1.96		
	5-8% Cemento	Ciancio & Gibblings, 2012	50.98			



2.5 Modos de falla en construcciones de tierra

Existe una amplia gama de causas de problemas estructurales en sistemas constructivos de tierra, incluyendo movimiento en el suelo, falla o inadecuación de elementos de construcción, diseño incorrecto o carga excesiva. Los daños típicos en estas viviendas son producto de movimientos sísmicos así como de errores en el diseño de la estructura.

En general, las construcciones de tierra pueden presentar fallas en su comportamiento estructural por características externas como la sismicidad del sitio o características internas como la incorrecta aplicación del material o del sistema constructivo, esto provoca que estas estructuras sean altamente vulnerables ante fuerzas sísmicas por las bajas propiedades mecánicas de la tierra como la tracción casi nula y su resistencia a la compresión también reducida (Fig. 2.6). Su comportamiento estructural es frágil ante diferentes tipos de esfuerzos, lo cual en ingeniería estructural está prohibido porque en caso de sismo se busca que la estructura reciba la energía y la disipe de forma dúctil; es decir, en caso de falla de la estructura, lo adecuado es que sea posible detectar agrietamientos antes de que el elemento pueda colapsar; lo contrario a una falla frágil, la cual no da aviso de peligro.

El modo de falla en muros, depende del tipo de esfuerzo al que está sometido el elemento. El agrietamiento es uno de los signos más ilustrativos de este fenómeno por lo que las deficiencias mencionadas del material en presencia de fuerzas de inercia laterales producidas por sismos, pueden inducir fallas en el plano o fuera del plano.

Un tipo de mecanismo de falla en el plano es provocado por fuerzas laterales que se ven presentadas en el plano principal del elemento, mientras que la falla más común, es provocada por tensión diagonal, que se caracteriza como su nombre lo dice, por una diagonal en la estructura debido a la falta de resistencia a cortante. Las cargas laterales en los elementos inducen un estado de esfuerzo semejante al que es generado por cargas aplicadas a lo largo de la diagonal, esto produce un estado de tensión casi constante en dirección normal a la diagonal cargada, por la baja resistencia en tensión, la falla se produce por una grieta diagonal.

La falla fuera del plano induce un momento de volteo que conduce a la formación de un agrietamiento horizontal a lo largo de la parte inferior o parte superior de la pared, terminando con un colapso parcial cuando el agrietamiento ocurre en la parte superior de la pared y un colapso total de la pared para el caso del agrietamiento horizontal inferior. Estas fallas son producto de la falta de unión entre elementos estructurales sensibles ante fuerzas de inercia, las cuales son mencionadas por [Preciado *et al.* \(2017\)](#).

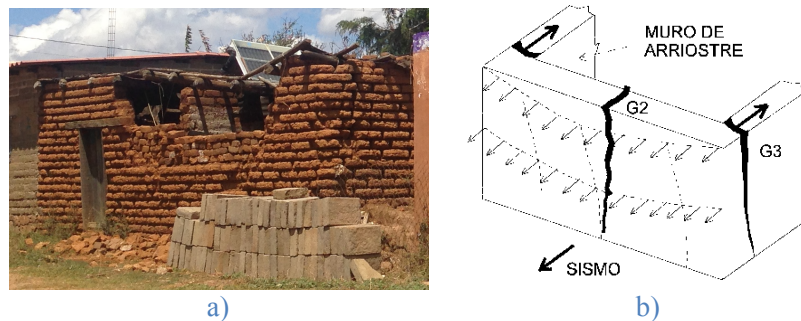


Fig. 2.6: Tipos de falla; a) falla fuera del plano (2016) y b) falla sísmica por acción perpendicular al plano, desgarramiento vertical en las esquinas y grieta vertical por flexión en la zona central del muro ([San Bartolomé *et al.*, 2015](#)).

Una de las fallas más importantes en estas construcciones se da sobre las esquinas en la unión de elementos, ocasionando grietas en las juntas. Estos bordes expuestos deben estar protegidos contra el desgaste producto del movimiento de la estructura, ya sea poniendo un relleno triangular en el encofrado (para producir una esquina achaflanada) o construyendo la esquina usando cuñas de hormigón o piedra con ladrillo.

Según [Blondet *et al.* \(2003\)](#), los modos típicos de falla durante terremotos son severos agrietamientos y desintegración del material, separación de muros en las esquinas y de techos de los muros, lo que en la mayoría de casos lleva al colapso ([Fig. 2.7](#)).

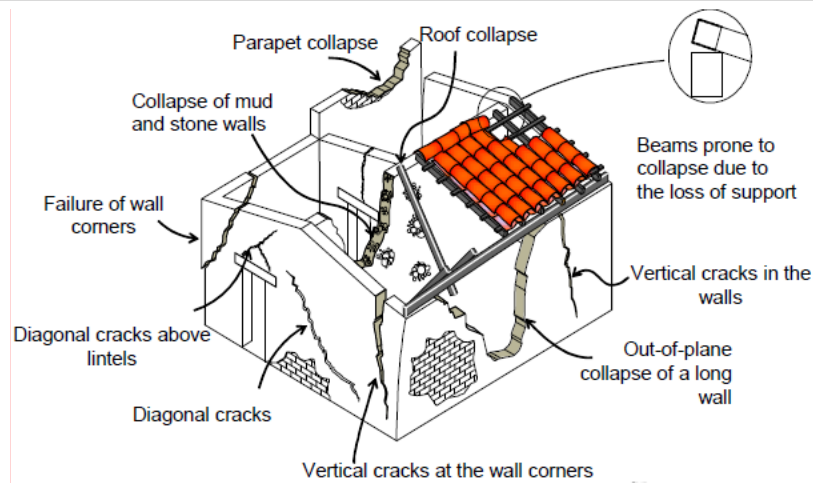


Fig. 2.7: Daños comunes en vivienda rural (Blondet, *et al.*, 2003).

El agrietamiento en edificios, se pueden dividir en agrietamientos estructurales, por asentamiento, térmicos y de fraguado. Los estructurales surgen por diseños defectuosos manifestados generalmente en zonas de esfuerzo cortante, momento o torsión máximos. Las grietas por asentamiento se originan por falta de sustentación del suelo de apoyo o por mal diseño de cimentación; los térmicos por la diferencia de temperatura del interior y exterior; y por último las grietas de fraguado son causadas por el proceso químico de endurecimiento del material (generalmente del concreto).

Para el caso de sistemas constructivos con tierra, se pueden presentar grietas de contracción las cuales pueden ser causadas por un alto contenido de arcilla en el suelo y se pueden tratar reduciendo el contenido de arcilla, aunque con suelos estabilizados, la estabilización también reducirá la contracción. También, [Jaquin *et al.* \(2013\)](#) mostró que un aumento en el contenido de agua de la tierra compactada reduce su resistencia y rigidez y aumenta su ductilidad. Esta fuerza y rigidez de la tierra reducen cuando el suelo se satura y la fuerza de atracción entre las partículas del suelo proporcionadas por los puentes líquidos se pierde.

Para muros de tierra compactada los modos de falla son los mismos que en el adobe, sin embargo, su masa generalmente es mayor por lo que es pertinente y fundamental el desarrollo de sistemas e investigaciones de refuerzo sísmico, como el presentado en poblaciones como



Chile o El Salvador; sitios con amplia presencia de arquitectura vernácula, ubicados en zonas potencialmente sísmicas. Entonces, para fines de cálculo de deformaciones así como para análisis estructural, es importante conocer las propiedades mecánicas del suelo, ya que sus construcciones generalmente son de espesores mayores a los 20 cm, lo que implica que a mayor masa, mayor fuerza producto del mismo peso de la estructura. Por lo que es ideal que cualquier elemento estructural hecho de tierra falle de manera dúctil y para asegurarlo es pertinente realizar pruebas de laboratorio con el suelo a utilizar.

2.6 Refuerzo sísmico en construcciones con tierra

Este apartado busca conocer y evidenciar las técnicas o estudios que se han aplicado referentes al refuerzo sísmico de construcciones hechas de tierra, ya que es importante señalar que aunque estas estructuras son generalmente autoconstruidas porque la técnica es simple, de fácil gestión y no requieren de un consumo agregado de energía; son vulnerables a los efectos de fenómenos naturales tales como lluvias e inundaciones así como a movimientos telúricos (Fig. 2.8).

Estas estructuras pueden sufrir daño estructural severo o inclusive llegando al colapso (falla frágil mencionada) cuando no cuentan con estrategias de refuerzo estructural, ya que por naturaleza el material no cuenta con resistencia a la tensión. Entonces, la deficiencia sísmica de las construcciones de tierra se debe al elevado peso de la estructura, a su baja resistencia y a su comportamiento frágil.

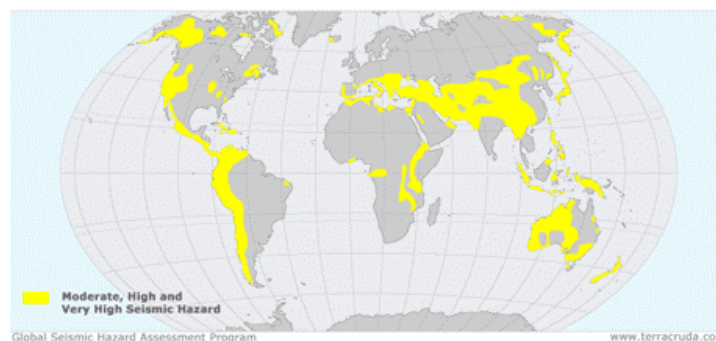


Fig. 2.8: Distribución mundial de riesgo sísmico alto y moderado (De Sensi, 2003).



Los principales factores que contribuyen a aumentar la vulnerabilidad sísmica de muros hechos de tierra son: Irregularidades en planta y en altura, distribución inadecuada de la planta (desfases), pérdida de la verticalidad, problemas de humedad, filtraciones, conexiones inadecuadas, pérdida de recubrimiento, uso de materiales no compatibles (como acero y tierra), entrepisos pesados y ausencia de diafragmas, apoyo y anclaje inadecuado de elementos de entrepiso y cubiertas sobre muros; también surgen fallas cuando los entrepisos son muy flexibles y cuando la estructuración de cubierta es deficiente.

Entonces, para los muros de tierra compactada es importante cuidar las juntas, que aunque se construyen de manera monolítica, el movimiento lateral del cajón o encofrado requiere juntas unidas similares a las paredes de mampostería de ladrillos; es decir se deben construir muros pensando en cada molde como un bloque. Estas paredes deben ser diseñadas de modo que las secciones individuales se unan con el resto del muro, escalonando juntas de no menos que el grosor de la pared, por tanto, el punto más débil estará en la esquina donde la superposición se limitará a este grosor, por lo que se recomienda que el encofrado permita que las esquinas sean construidas en una sola pieza.

Respecto a esta construcción, podemos definir que ya que éstos son los principales elementos portantes en una vivienda típica de tierra (ya sea adobe o tierra compactada), algunas acciones a realizar conocidas de forma empírica con el objetivo de mejorar su desempeño, son que la altura del muro no debe exceder ocho veces el espesor del muro en su base y en ningún caso debería ser mayor que 3.5 m. ni los vanos deben exceder de un tercio de la longitud total del muro. También, de acuerdo con [Minke \(2001\)](#), una solución para estabilizar muros de barro contra los impactos horizontales de un sismo es utilizar elementos verticales de madera o bambú dentro del muro, anclados con el sobrecimiento y fijados al encadenado; sin embargo, para la tierra compactada, son poco efectivos e incluso pueden ser peligrosos debido a que no se puede apisonar bien la tierra debajo de los mismos y ya que el elemento de refuerzo no tiene un anclaje, se debilita la sección en estos puntos y pueden aparecer quiebres horizontales durante el sismo.



En 1978 se desarrolló un sistema de paneles de tapial reforzados con bambú como parte de un proyecto de investigación implementado exitosamente en Guatemala con la Universidad de Francisco Marroquín y el Centro de Tecnología Apropiada (CEMAT). En este proyecto se construyeron elementos de 80 cm de largo y de un piso de altura de tierra compactada (tapial) reforzado con bambú utilizando un encofrado de metal en forma de T de 80 cm de largo, 40 cm de altura y 14 a 30 cm de espesor. La estabilidad de los elementos se obtuvo con 4 varillas de bambú de 2 a 3 cm de espesor y la sección T; estos elementos se fijaron en la base a un encadenado de bambú dentro de un zócalo de mampostería de piedra y en la parte superior a un encadenado de bambú rectangular (Fig. 2.9). Luego del secado de la tierra, es importante señalar que aparecieron grietas verticales de 2 cm de espesor entre los elementos verticales, las cuales se rellenaron posteriormente con barro y actúan como juntas de fallo prediseñadas permitiendo un movimiento independiente a cada elemento durante el sismo. Según los autores, esto significa que estas juntas pueden abrirse y que toda la estructura se deforma disipando la energía sísmica sin que la unidad del muro se quiebre o colapse.

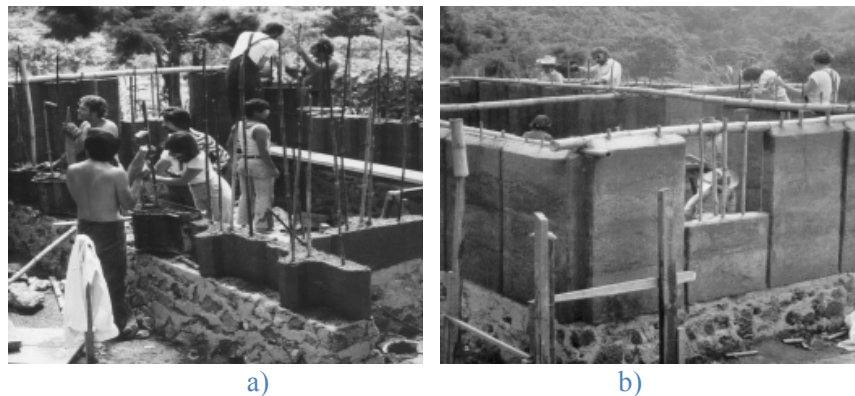


Fig. 2.9: Sistema de tierra compactada reforzada con bambú; a) construcción de paneles y b) encadenado de bambú (Minke, 2001).

Para el 2001, también Minke (2006) y el CEMAT, construyeron una vivienda antisísmica también de tierra compactada de 55m² (Fig. 2.10a), su diseño está regido por la idea de separar la estructura de la cubierta de la de los muros, por lo que la cubierta descansa sobre columnas independientes. Estos muros de 40 cm. tienen forma de L y U y en el ángulo recto

que se forma en estos elementos se sustituye por un ángulo de 45° justo en las esquinas. Como refuerzo vertical se utilizaron cañas de coligüe (bambú de Chile) fijadas al encadenado superior y anclados en el cimiento (Fig. 2.10b).

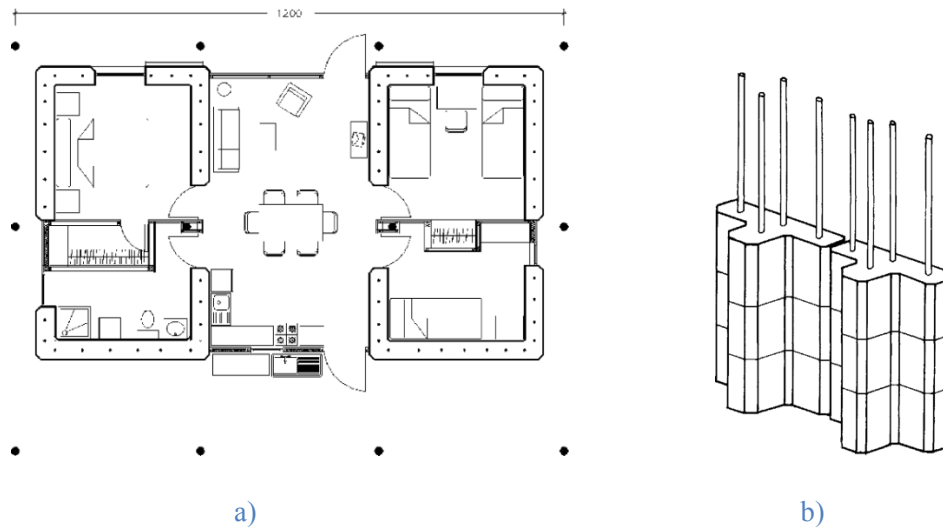


Fig. 2.10: Diseño de vivienda antisísmica; a) planta arquitectónica y b) detalle de refuerzo de bambú (Minke, 2001).

Otro método de construcción de la tierra compactada parecido es detallado por [Jaquin et al. \(2013\)](#), en el cual se producen bloques de tierra compactados independientes con juntas verticales añadidas. Donde se supone que hay movimiento estructural puede ocurrir la separación de estos bloques y posterior alteración de la estructura, lo cual corresponde a un potencial de fallo por corte, por lo que para evitar esto, se utilizan placas para extender la carga sobre un área mayor generalmente en la pared debajo de una viga transversal portadora de carga. También puede ocurrir un fallo fuera del plano cuando una viga que se une a una pared es insuficientemente rígida y se arquea bajo carga, esto provoca una mayor carga en la cara de la pared y puede conducir al desprendimiento del material en la cara.

En cuanto a normas que indiquen criterios de refuerzo sísmico podemos referenciar aquellas hechas para el sistema constructivo de adobe el cual es el más desarrollado. La primera norma independiente de la mampostería de adobe de Perú de 1985 ([ININVI, 1987](#)), dice que se deben incluir como refuerzos sísmicos en los muros, cañas ubicadas en forma vertical y

horizontal (Fig. 2.11). En la norma peruana de adobe (SENCICO, 2000) se incorporan tres tipos de refuerzo para estructuras de adobe: cañas, concreto armado y mallas de alambre; también en una investigación desarrollada por Torrealva (1986) se usó mallas de gallinero como refuerzo exterior a los muros, así como propuestas de refuerzo con malla electrosoldada recubierta con mortero.

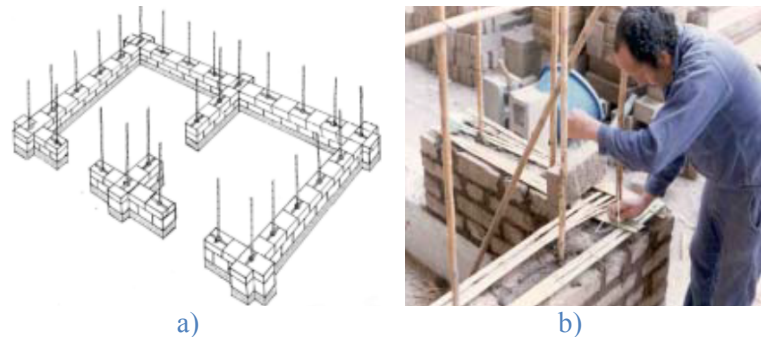


Fig. 2.11: Refuerzo vertical para adobes; a) refuerzo sísmico en esquinas y uniones de muros y b) elementos verticales de refuerzo (Blondet, *et al.*, 2003).

También en Perú se analizaron viviendas atacadas por sismos del 2001, donde mediante simulación se probaron una serie de refuerzos siendo la malla electrosoldada de alambre galvanizado de 1mm de diámetro la de mejor respuesta. Ésta se aplica en esquinas y en la parte superior de los muros; luego, para protegerla y aumentar la rigidez de la vivienda, se recubren con mortero de cemento-arena fina 1:5 (Zegarra *et al.*, 1999). Otro proyecto conocido como GTZ-CERESIS-PUCP también en Perú, optó por aplicar como refuerzo sísmico franjas de mallas de alambre electrosoldado simulando confinamientos sobre una serie de viviendas existentes de adobe en proyectos pilotos. Cabe mencionar que aunque la Norma Peruana E.080 de Adobe incluye como refuerzos especiales a cañas, maderas, también se permite el uso de mallas de alambre y columnas y vigas de concreto armado (SENCICO, 2000).

Para el caso de las mallas esquineras no se necesita anclar ni en la cimentación ni en el techo, por tanto para reforzar viviendas existentes no se necesita desmontar la cubierta. Las mallas longitudinales, se instalan en la parte interna y externa de los muros cubriendo el borde

superior de estos para unir las franjas de mallas verticales y simular una viga de confinamiento (Fig. 2.12). Las mallas se diseñan para controlar la grieta por flexión localizada en la parte central del muro, misma que se propaga desde arriba hacia abajo. Para que estas funcionen integralmente con el muro sin desprenderse durante el sismo, es necesario interconectarlas; por lo que en Perú se emplea alambre delgado. También se recomienda instalar la malla fijándola con chapas o retazos de madera o lata, clavándola al muro cada 0.25 m.

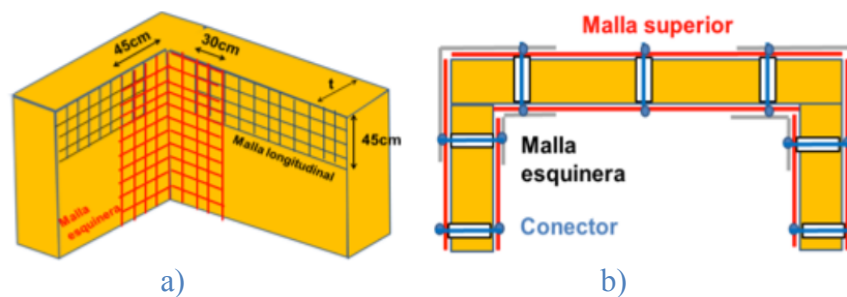


Fig. 2.12: Malla longitudinal y traslape con malla esquinera; a) detalle en alzado y b) vista en planta (San Bartolomé y Quinn, 2015).

También, uno de los principios esenciales del refuerzo sísmico para construcciones hechas de tierra es utilizar un diseño compacto de tipo caja o elementos de distribución en el diseño en una sola planta, utilizar una cubierta ligera, intersecciones de paredes a intervalos regulares en ambas direcciones o utilizar contrafuertes o pilastras en las partes críticas para aumentar la estabilidad y la resistencia ya que éstos pueden impedir el volteo de la pared en ambas direcciones, así como mejorar el empotramiento en la esquina.

Por último, otro elemento a considerar es la viga de anillo mencionada (también conocida como corona o banda sísmica) que une las paredes en una estructura en forma de caja. Éste es uno de los componentes esenciales de resistencia a sismos para la construcción de mampostería de carga. Para garantizar un buen comportamiento sísmico de un edificio, se necesita una viga de anillo continua como un cinturón, la cual debe ser fuerte y bien atada a las paredes para sostener el techo. [Blondet et al. \(2003\)](#) recomienda el uso de lazos de madera entre dinteles y esta viga.



2.7 Resumen del capítulo

Podemos observar distintas representaciones de arquitectura vernácula, donde la tierra es el material por excelencia en los procesos constructivos. Para el caso de la construcción exclusiva de elementos verticales como muros, existen diferentes sistemas como adobes, muros de tierra compactada o técnica de tapial, muros de tierra vertida, BTC, etc.; Las cuales son seleccionadas dependiendo de las necesidades, disponibilidad de mano de obra, volumen de materiales con los que se cuente e incluso del conocimiento popular para su ejecución.

Para el empleo de estos sistemas es importante conocer las propiedades mecánicas del suelo ya que éste es característico de cada zona, aunque en general para mejorar estas propiedades e incluso añadir otras, podemos agregar un estabilizador como el cemento el cual trabaja muy bien con arenas y limos.

Aunque las estructuras de tierras son generalmente autoconstruidas por su simplicidad y porque no requieren un alto consumo agregado de energía, son vulnerables ante los efectos de fenómenos naturales tales como terremotos, lluvias e inundaciones y ante movimientos telúricos; sufriendo daño estructural severo o inclusive llegando al colapso cuando no cuentan con un correcto diseño arquitectónico ni diseño de refuerzo estructural.

Podemos resumir que los principales factores de vulnerabilidad sísmica de viviendas de tierra son desde irregularidades en planta y en alturas, problemas de humedad por filtraciones, no dar un adecuado trato o mantenimiento a la estructura, etc. Sin embargo, se ofrecen soluciones como refuerzo con mallas e incluso confinamientos y aunque estos materiales (malla electrosoldada y tierra) son de naturaleza distinta y responden de manera diferente ante diversos eventos, algunos estudios demuestran que ambos pueden ser aplicados con resultados positivos. No obstante, es importante señalar que los factores clave a considerar en el diseño de refuerzo sísmico son las características de los suelos que tienen mayor influencia sobre la resistencia, como las relacionadas con el proceso de contracción por secado o con la resistencia en seco del material.



3. La Sustentabilidad En El Uso De Arenas Para La Construcción



3.1 Introducción

En este capítulo se presentan las referencias conceptuales del tema, es decir los conceptos regidores del proyecto, los cuales son: la sustentabilidad en tres ejes; ya que de acuerdo a diversos autores, existen seis dimensiones que ayudan a definir este concepto complejo, sin embargo, nos acatamos a tomar únicamente tres: la sustentabilidad social, sustentabilidad económica y sustentabilidad ambiental; la construcción de vivienda (tomando de nueva cuenta a la construcción vernácula) y por último a los suelos del AMG (jal y tepetate) los cuales se describen de manera general para justificar su uso y las propiedades que pueden aprovecharse de los mismos.

Primero definimos a la sustentabilidad y a partir de qué momento en la historia se empieza a incluir este término tan importante que hoy en día debe ser parte fundamental del pensamiento humano, ya que, aunque no es un término nuevo, últimamente ha surgido un interés respecto a él, sin embargo, sin considerar ni conocer la profundidad real del tema. También tomamos el concepto de vivienda y su construcción ya que el producto final esperado es el sistema constructivo de muros de tierra (tepetate) capaz de ser empleado para la construcción de una vivienda más sustentable en comparación de una tradicional hecha de materiales como mampostería, block de concreto, acero, etc.

Por último, presentamos a las arenas del AMG, las cuales son suelos de origen volcánico que en primer momento se describen de forma general, es decir cómo surgió su descubrimiento y usos y como han sido empleadas hasta nuestro tiempo, donde se caracteriza al tepetate, el cual es la tierra protagonista de esta investigación.



3.2 Referencias conceptuales del tema

3.2.1 Sustentabilidad

El término sustentabilidad surge a partir de 1972 en Estocolmo cuando se tocó por primera vez en conferencia internacional el tema de los problemas ambientales, destacando que éstos son reales y planteando una estrategia para enfrentarlos. Años después se amplió la misma estrategia para llamarse “Modelo Dominante de Desarrollo Sustentable” (MDDS) (Tetreault, 2004) el cual dice que las necesidades de los pobres deben ser resueltas mejorando la tecnología y organización social por medio del crecimiento económico, donde los protagonistas principales del desarrollo sustentable son las potencias mundiales.

Para 1987 la Comisión Mundial sobre Medio Ambiente y Desarrollo, presentó el informe “Nuestro Futuro Común” conocido simplemente como Informe *Brundtland* donde claramente se expone el término de desarrollo sostenible definido como “aquel que atiende a las necesidades de las generaciones actuales sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras de atender a sus necesidades y aspiraciones”. Así, la sustentabilidad comprende seis dimensiones que están estrechamente interrelacionadas con los procesos de desarrollo; éstas son la dimensión ecológica, la social, cultural, ética, política y económica.

Boff (2012) señala que “para ser sostenible, el desarrollo debe ser económicamente viable, socialmente justo y ambientalmente correcto.”; aplicando estos conceptos en la industria de la construcción, no se ha logrado ser totalmente viable, justa, ni ambientalmente correcta.

3.2.2 Construcción de vivienda

La arquitectura y la construcción tienen amplias posibilidades en el desarrollo de edificación sustentable; éstas pueden ser vías de mitigación de daños ambientales y sociales que necesitan ser reinterpretadas. En países con importante crecimiento y una buena disponibilidad de recursos, el despertar de la conciencia ecológica-sustentable ha permitido el empleo y desarrollo de tecnologías en la edificación; sin embargo, en países económicamente desfavorecidos ante la carencia de recursos, la importancia de construir de



forma eco-amigable pasa a segundo término, orillándonos a utilizar lo más económico y accesible. No obstante, no todo lo sustentable tiene porque ser costoso ni difícil de aplicar, ya que volviendo una mirada al pasado tenemos la respuesta de ese tiempo donde la falta de capital y la necesidad de habitabilidad dan como resultado el surgimiento de la arquitectura vernácula; la cual mencionada anteriormente, se presenta como una solución factible para satisfacer la demanda de vivienda de manera económica y respetuosa con el medio ambiente.

Actualmente, en el mundo globalizado en el que vivimos aún existen ejemplos de ésta arquitectura que demuestran que lo “natural” sigue estando presente, y puede ser una solución a los problemas de contaminación a los que la tierra está sometida. “La arquitectura vernácula es el testimonio material construido vinculado a un lugar, un pueblo y una tradición, que pretende definir la identidad de un territorio y sus factores de diferenciación cultural.” (Jiménez y Cirera, 2014).

La carta de Patrimonio Vernáculo construido muestra la siguiente definición de vernáculo: “el reconocible carácter local o regional ligado al territorio; una coherencia de estilo, forma y apariencia, así como el uso de tipos arquitectónicos tradicionalmente establecidos; la sabiduría tradicional en el diseño y la construcción, [...]; la respuesta directa a los requerimientos funcionales, sociales y ambientales y la aplicación de sistemas, oficios y técnicas tradicionales de construcción”. También según la RAE, vernáculo es aquello nativo o de la casa o país propios. Así, se entiende a la arquitectura vernácula y su construcción, a aquella tipología de edificación que nace del conocimiento popular y del empirismo con el empleo de materiales disponibles en la región, por lo que es una manifestación de arquitectura única e irrepetible de acuerdo a la distinción de cada sitio. En la construcción vernácula se emplean los siguientes criterios:

- Medio natural como eje rector en la función, formado por dos elementos: los recursos ecosistémicos que son los que condicionan la construcción, es decir “con lo que se encuentre se construye” y el clima de la región.



- Sistemas constructivos basados en el conocimiento popular y el empirismo. Resultado de la práctica y la manipulación de los materiales disponibles, así como de la cultura del lugar; generalmente las técnicas y los procedimientos pasan de generación en generación.
- Sentido de cuidado a la naturaleza y agradecimiento a la tierra.

Al retomar estas bases, se busca adoptar patrones culturales antiguos, con una perspectiva contemporánea, ya que la cuestión no es dejar de lado a la tecnología, sino, simplemente aprovechar el material accesible como el tepetate del AMG, para que con un enfoque más sustentable, sea considerado como una alternativa en procesos constructivos de edificación.

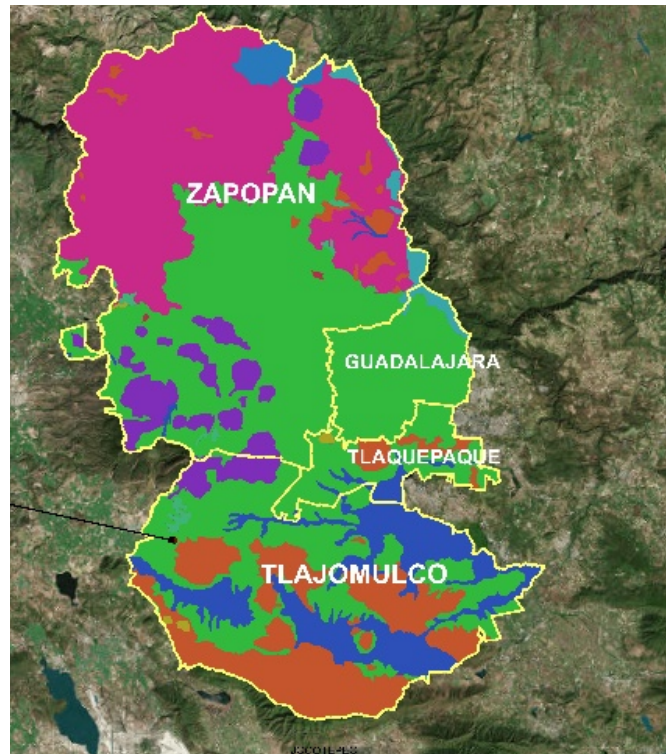
3.2.3 Suelos del Área Metropolitana de Guadalajara

Según lo que establece el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), las arenas son partículas de suelo cuyas dimensiones fluctúan entre 0.075mm (malla No. 200) y 4.75mm (malla No. 4). Partículas mayores a 4.75 mm pero menores de 75 mm se les llama gravas, y a las partículas menores de 0.075 mm se les llama suelos finos, y pueden ser arcillas o limos. El SUCS nombra a un suelo; arena cuando el 50% de sus partículas están comprendidas en el rango de 0.075 a 4.75 mm. Cuando las arenas tienen menos de 5% de finos se subdividen en bien graduadas (SW) y uniformes o mal graduadas (SP), dependiendo de sus curvas granulométricas. Cuando el contenido de finos es mayor a 12%, se les llama arenas arcillosas (SC) o limosas (SM), dependiendo de la plasticidad de los suelos finos.

Así, de acuerdo a las cartas de clasificación de suelos del INEGI, respecto a la Geología: Clasificación de las rocas del AMG, se puede notar ([Mapa 1, color verde](#)) que el tipo de roca abundante en el territorio es volcanoclástica; es decir, rocas ígneas extrusivas o también nombradas magmáticas, aquellas que se han formado por solidificación de un material rocoso, caliente y móvil denominado magma.

Este proceso llamado de cristalización, resulta del enfriamiento de los minerales y del entrelazamiento de sus partículas. A su vez estas rocas se dividen en ácidas, grupo de rocas fragmentales conocidas como piroclásticas, las cuales son producto de las erupciones

volcánicas explosivas y contienen fragmentos de roca de diferentes orígenes. Son formadas a partir del material proyectado violentamente al exterior durante eventos explosivos; este tipo de rocas se denominan en general tobas volcánicas.



Mapa 1: Tipos de roca del AMG según la clasificación de suelos del INEGI. En verde: volcanoclástica.

En general, el subsuelo del AMG está constituido por material volcánico fragmentado sin consolidar, denominado Toba Tala o “jal” compuesto por material vítreo poroso denominado pómez (>90 %), obsidiana (8-9 %), riolita (<1 %), y feldespatos (<0.5 %). De acuerdo con el SUCS, las granulometrías del subsuelo de Guadalajara se encuentran dentro de los siguientes rangos: 11.59–30.81% de gravas (25.4mm–4.75mm), 85-70% de arenas (4.75mm–0.075mm) y 13.80-3.05% de limos o fragmentos con tamaño menor a 0.075 mm. Por lo anterior, estos suelos suelen clasificarse como arenas pumíticas bien o mal graduadas, o bien, como arenas limosas (SW, SP o SM) (Vargas *et al.*, 2005). Estas rocas volcánicas suelen ser muy porosas y a veces muy permeables.



3.2.3.1 Las puzolanas

Las puzolanas se obtenían de *Pouzzoli*, en la bahía de Nápoles. Son materiales naturales de origen volcánico que reaccionan con la cal y se utilizan como adición al cemento debido a sus propiedades de generación de resistencia con menor peso. Mediante observación, los griegos y romanos pudieron notar “una nueva técnica consistente en mezclar materiales volcánicos como materiales activos con la cal, en polvo y seco; o en húmedo para dar lugar a los cementos y morteros romanos a base de cal y puzolana”, [Vargas \(2002\)](#). Su uso en la construcción data desde épocas ancestrales, donde este material “podría ser apto para reemplazar en algunas aplicaciones al concreto de cemento portland y contribuir positivamente a la reducción del impacto ambiental generado en su producción” ([Pacheco-Torgal et al., 2013](#)).

Puntualizando el objeto de estudio, el Estado de Jalisco es la zona de contacto entre la Sierra Madre Occidental, el Eje Neovolcánico, la Sierra Madre del Sur y la Mesa del Centro; por tanto, el AMG es una zona de diversos relieves volcánicos y formaciones únicas. Tanto su subsuelo como sus alrededores están formados por materiales puzolánicos como es el caso de la toba tala mejor conocida como jal; consecuencia de las erupciones que iniciaron hace 140,000 años, compuesto de cenizas volcánicas y fragmentos de roca como trozos de obsidiana y piedra pómez. Este material junto con el tepetate se presentan en gran extensión en el AMG pero su granulometría, absorción y otras características, varían depende su exactamente del sitio donde se halle por lo que se pretende utilizarlo como protagonista en mezclas para la construcción de muros para vivienda.

De acuerdo a [Gama y Castro \(2007\)](#) el tepetate es un material inerte, encontrado con amplia disponibilidad en los paisajes volcánicos del país. El mayor grado de generalización en su estudio, ha sido considerarlos como suelos volcánicos endurecidos. “Tepetate es el nombre común que se les da a las tobas pomosas o tobas calcáreas. Desde el punto de vista geológico, el tepetate es considerado como un suelo endurecido, ya sea compactado o cementado, de



características físicas y mecánicas tales como alta densidad, baja conductividad hidráulica y baja retención de la humedad”.

Según [Nimlos y Ortiz \(1987\)](#), el tepetate se clasifica mediante su color y dureza siendo el tepetate blanco ([Fig. 3.1](#)) el más duro, el rojo de dureza media y el amarillo el de dureza menor.

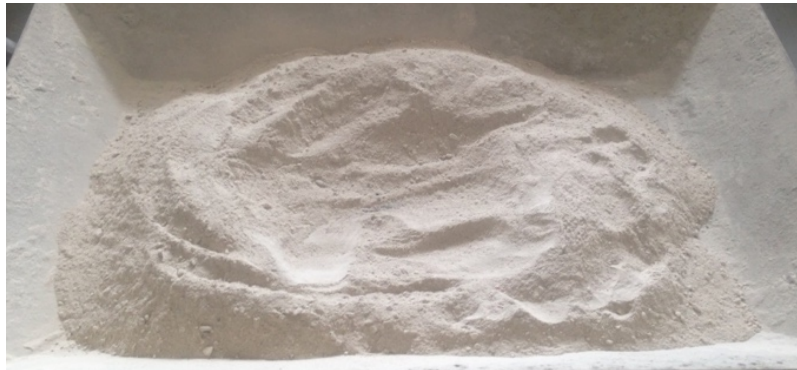


Fig. 3.1: Muestra de tepetate blanco del AMG.

3.3 Resumen del capítulo

Es importante mencionar que el aporte del estudio está enfocado en ofrecer un sistema de vivienda más sustentable en tres aspectos puntuales: medio ambiental, económico y social. Para esto, podemos resaltar que la industria de la construcción no ha logrado ser totalmente sostenible, ambientalmente correcta ni disponible para todos los niveles socioeconómicos. La arquitectura y la construcción tienen amplias posibilidades en el desarrollo de edificación sustentable, pero no solo en el aspecto ambiental sino también en el económico ya que no toda la gente tiene posibilidades económicas de solventar gastos por tecnologías sustentables alternativas; por tanto, necesitamos reinterpretar las necesidades de la sociedad actual no solo creando más materiales innovadores, sino buscando dar otro uso a los materiales existentes, que estén al alcance de todos.



Particularmente, la arquitectura vernácula es un testimonio de cultura y respeto, por lo que al querer retomar los principios de su construcción, se buscan patrones antiguos pero tomados con una perspectiva contemporánea, donde simplemente se aproveche un material con abundante disponibilidad en la zona como el tepetate del AMG, para que pueda ser considerado como una alternativa más en los procesos constructivos de edificación aunando criterios de economía y al alcance de cualquier usuario.

El subsuelo del AMG está constituido por material volcánico fragmentado y su uso actual es añadiéndolo al cemento para generar el cemento portland puzolánico, sin embargo, esta investigación puntualiza que dichas características del suelo vidrioso, pueden ser mejoradas con la aplicación de un estabilizador o cementante, como ha sido descrito y probado en capítulos anteriores, ya que “sus rasgos volcánicos permiten generar una amplia resistencia con un peso volumétrico más ligero” (Rodríguez *et al.*, 1999), por lo que a continuación se describe el proceso de la investigación enfocada en el desarrollo de nueva tecnología aplicada en el sistema constructivo de muros de tepetate estabilizado.



4. Obtención De Propiedades Físicas Y Mecánicas En Tepetate Estabilizado



4.1 Introducción

El proyecto pretende aportar a la industria de la construcción mediante un sistema constructivo hecho con arenas de la región; para esto, se optó por una selección de técnicas de recolección de información como revisión documental (estado del arte previamente referenciado), observación directa, así como un par de entrevistas a expertos. Sin embargo, la parte central y médula de la investigación es a través de la técnica experimental de laboratorio, misma que permitirá conocer las capacidades mecánicas del tepetate, mediante pruebas de compresión axial y a esfuerzo cortante aplicadas a diferentes tipos de muestras.

Primero se diseñarán cuatro tipos de mezclas con distintas proporciones. Luego se someterán a ensayo a compresión y se analizarán los resultados obtenidos.

Respecto a las demás técnicas de obtención de información, se puede referenciar primeramente que en la revisión documental se recopilaron datos los cuales sirvieron para ampliar el conocimiento relacionado a técnicas de construcción con tierra en su aplicación a edificios tipo vivienda. Dicha revisión incluyó consultar material científico (investigaciones, publicaciones, artículos científicos) hasta escritos basados en descripciones empíricas de conocimiento popular a nivel local y global. También de las técnicas de construcción con tierra podemos referirnos únicamente a la técnica de tierra compactada, ya que el proceso de experimentación fue realizado por dicho método.

En el tapial o técnica de tierra compactada, se van agregando las capas de mezcla de tierra en una medida no mayor a los 15 cm, entre 10 a 15 cm, y se va compactando cada capa con pisón las veces que sean necesarias de modo que al medir la compactación sea aproximadamente un tercio de la altura total, es decir, que una vez compactada, la capa mida 10 cm. “La tierra compactada a mano se puede dejar caer sobre una superficie firme desde una distancia de aproximadamente un metro. Si la bola se rompe, el contenido de humedad es adecuado, si no, hay demasiada humedad presente.” (Arteaga *et al.*, 2011). A este proceso se le pueden agregar distintos tipos de arcillas de diferente color o de distinta granulometría; también al agregar las capas, pueden ser de forma no lineal, sino, con cierto desnivel para



que al quitar la cimbra se puedan notar estos detalles en las capas. Una vez retirada la cimbra, se pueden hacer más detalles en el muro mediante pequeños golpes o incrustando piedras o conchas como parte del diseño.

4.2 Diseño de experimentación

Esta técnica tiene como objetivo conocer el tipo de mezcla ideal para la construcción de muros de tierra. Una vez terminado el tiempo previsto para el curado de acuerdo al diseño de mezcla, se procedió a evaluar la resistencia a la compresión simple de cada bloque a través de ensayos hechos en la prensa universal del laboratorio de la licenciatura de ingeniería civil del ITESO, sometiendo cada espécimen a cargas verticales hasta que se presentó una falla.

La primera fase del diseño de experimentos consideró lo siguiente: Cilindros de 15 cm de diámetro, $h = 30$ cm. $Vol. = 5,301.45 \text{ cm}^3$ a $2/3$ de su capacidad = 0.003534 m^3 , peso del pisón = $2.5 \text{ kg} = 24.4\text{N}$, altura de caída = 304.8mm y energía por golpe = $24.4\text{N} \times 0.3048 \text{ m} = 7.43712 \text{ N}\cdot\text{m}$.

Luego se diseñaron cuatro tipos de mezclas (A, B, C y D) con exactamente fuerza de compactación de $50 \text{ KN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$, $125 \text{ KN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$ y $200 \text{ KN}\cdot\text{m}/\text{m}^3$; mediante un despeje se obtuvieron los golpes por capa, es decir, tres capas con 8 golpes, 20 golpes y 32 golpes respectivamente (Tabla 4.1).

Para la realización de los especímenes se procedió a hacerlos de manera aleatoria, ya que aunque las variaciones en las probetas se diseñaron con una nomenclatura y numeración específica, parte del adecuado proceso de diseño de experimentación es la aleatorización del mismo, por tanto, las muestras se realizaron en corridas distintas.



Tabla 4.1: Diseño de especímenes de Tepetate- Cemento

Diseño de especímenes			
Mezcla	Composición	Apisonado	Curado
Tipo	100%	KN-m/m ³	Días
A	83% Tepetate- 17% cemento blanco	50	1
		50	28
		125	1
		125	28
		200	1
		200	28
B	88% Tepetate- 12% cemento blanco	50	1
		50	28
		125	1
		125	28
		200	1
		200	28
C	92% Tepetate- 8% cemento blanco	50	1
		50	28
		125	1
		125	28
		200	1
		200	28
D	97% Tepetate- 3% cemento blanco	50	1
		50	28
		125	1
		125	28
		200	1
		200	28

4.2.1 Pruebas a compresión uniaxial en especímenes de tepetate estabilizado con cemento blanco

Se seleccionó el material y la herramienta adecuada para el proceso (Fig. 4.1):

- Tepetate blanco
- Cemento blanco 1 costal
- Aceite multigrado para descimbrar.
- 24 cilindros de 15x30cm
- Pisón de 2.5 kg.
- Herramienta menor para mezclar
- Agua

El proceso de experimentación consistió en realizar cada mezcla A, B, C y D de la siguiente manera: se pesó el tepetate en seco para obtener la cantidad de material de acuerdo al

porcentaje requerido para cada muestra; A: 83% Tepetate-17% cemento, B: 88% Tepetate-12% cemento, C: 92% Tepetate- 8% cemento y D: 97% Tepetate-3% cemento. Después se cribó con una malla del #4 según los Tamices de la Norma [ASTM E - 11/95](#) para eliminar granos de 4.75mm., luego se procedió a mezclar los elementos secos: tepetate y cemento con el porcentaje correspondiente ([Fig. 4.2a](#)). Para la adición de cemento para cada mezcla se tomó como base la literatura consultada la cual señala que generalmente el cemento se utiliza en proporciones entre el 4% y el 15%.



Fig. 4.1: Proceso de experimentación; a) molde de cilindros; b) herramienta y equipo y c) tepetate.

Se agregó agua hasta obtener la humedad óptima mediante una prueba de campo de presionar una pequeña muestra que indica el no exceso de agua ni la ruptura del elemento por falta de la misma ([Fig. 4.2b](#)); una vez cumplido el objetivo se procede a engrasar los moldes con aceite multigrado para cuidar la estética del espécimen. Luego, se agregaron 3 capas de la mezcla compactadas con pisón usando distintos golpes de acuerdo al diseño de mezclas hasta llenar a 2/3 de su capacidad a cada cilindro ([Fig. 4.2c](#)). Por último se procedió a nombrar cada espécimen y guardar hasta ser probados a determinados días respectivamente.

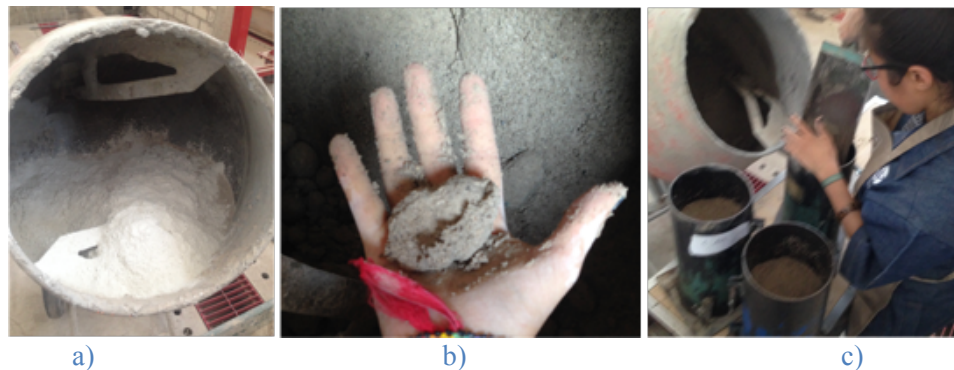


Fig. 4.2: Proceso de experimentación; a) mezcla en seco; b) humedad óptima y c) llenado de cilindros.



4.2.1.1 Resultados de ensayos a compresión de tepetate estabilizado con cemento blanco

Para los resultados de esta primera fase no se realizaron curvas de esfuerzo-deformación específicas, por tanto tampoco se obtuvieron datos como módulo de elasticidad (E) o límite elástico (σ_y) productos de dicha curva, sino, fueron obtenidos directamente del software Trapezium empleado; los cuales indicaron que la muestra Tipo A de 83% cemento y 17% cemento blanco hecho con compactación empírica y curado a 30 días tiene en promedio una resistencia de 10.72 kgf/cm². Los cilindros tipo A con 8 golpes de compactación presentaron una resistencia promedio de 24.05 kgf/cm². De las muestras tipo C las que presentaron una resistencia más alta fueron de 8 golpes con 44.94 kgf/cm² mientras que las de resistencia más crítica fueron las tipo D (97% Tepetate- 3% cemento blanco) con compactación a 8 golpes, probados a 7 días con una resistencia de 3.41 kgf/cm².

Debido al proceso de aleatorización de la experimentación, los ensayos resultantes fueron probados a 7 y 28 días para comparar si al igual que en las muestras de concreto; a mayor tiempo de curado, la resistencia también es mayor. También se puede mencionar que una variable no controlada fue la humedad del material, ya que se trabajó con él directamente proveniente desde el banco, solo con un secado al sol para imitar un proceso en sitio, donde no se realizan este tipo de procesos de control en la elaboración de mezclas. La [Tabla 4.2](#) suma los resultados obtenidos.



Tabla 4.2: Resultados de la primera fase de experimentación; cemento blanco y compactación controlada

Resultados							
Mezcla	%	Comp.	Agua	Prueba	Peso	Resistencia última	
Tipo	100%	# golpes pisón	ml	Días	kg	kgf/cm ²	
A	83%	8g	680	7		23.22	
	Tepetate-17% cemento blanco	8g	680	7		22.95	
		8g	680	7		25.98	
		Compactación empírica			30		11.42
					30		9.27
			30		10.63		
			30		11.58		
B	88%	20g	5250	7	5.40	25.96	
	Tepetate-12% cemento blanco	20g	5250	7	5.12	21.79	
		20g	5250	7	5.24	24.5	
		20g	5250	28	5.19	29.77	
		20g	5250	28	4.89	31.62	
C	92%	8g		28	5.77	44.94	
	Tepetate-8% cemento blanco	20g		28	4.75	21.83	
		32g		28	5.47	39.55	
D	97%	8g	5250	7	3.93	3.41	
	Tepetate-3% cemento blanco	20g	5250	7	4.55	5.38	
		32g	5250	7	4.75	7.64	
		8g	5250	28	3.68	31.24	
		20g	5250	28	4.38	30.94	

g: Número de golpes por cada capa

Todos se llenan con 3 capas, es decir "n" g por cada capa; capas totales= 3

100% de mezcla son 8 kg.

4.2.2 Pruebas a compresión uniaxial en especímenes de tepetate estabilizado con cemento gris

En esta fase de experimentación se planteó la repetición de todas las muestras con dos especímenes de cada una para ser probadas a 7 y 14 días y conocer su resistencia a la



compresión. Sin embargo, aunque las mezclas con cemento blanco mostraron resistencias importantes; se optó por realizar las pruebas con la inserción de cemento gris ya que el cemento gris es significativamente de menor costo que el cemento blanco y de acuerdo a información consultada en las fichas técnicas correspondientes de CEMEX (Cemento CPC 30 R B y Cemento CPC 30 R), el cemento blanco tiene las mismas características que cualquier cemento Portland; solo que éste además es usado para fines arquitectónicos o estéticos, el cual para el estudio no fue un aspecto a considerar en el diseño del sistema constructivo. También es importante mencionar que la razón por la cual no se consideró cal para la experimentación, fue debido a que luego de analizar estudios previos del uso de cal; el tepetate como arena limosa tiene una mejor reacción química con cemento como estabilizador.

Otra variable de estas pruebas, fue que en la primera fase de experimentación, los cilindros no estaban llenados totalmente por lo que al momento de someterlos a carga axial y para conseguir una distribución uniforme de la carga, se tenían que cabecear con cemento (generalmente los cilindros se cabecean con mortero de azufre, [ASTM C 617](#)) e incluso usando almohadillas de neopreno de acuerdo a la [ASTM C 123](#); así que con el fin de mejorar procesos y hacerlos más eficientes, se cambiaron los moldes de 30 cm de altura y 15 cm. de diámetro por los de 20 cm de altura y 10 cm de diámetro llenados al 100% de su capacidad a diferencia de los de la primera fase llenados a 2/3 del volumen total del cilindro, para que al someterlos a pruebas de compresión no fuera necesario ningún cabeceo y se pudiera medir correctamente la deformación natural del espécimen.

Otra variable importante fue el método de compactación; se omitió la compactación controlada con determinados golpes por capa (8 golpes, 20 golpes y 32 golpes) ahora golpeando con el mismo pisón de 2.5 kg, las veces que fueran necesarias. Este cambio parte de replicar un proceso más parecido al que usualmente ocurre en campo, por métodos artesanales donde se compacta con indeterminado número de golpes siempre que la altura de la capa de tierra se compacte a un tercio aproximadamente de la altura total agregada por capa.

El único cambio en los procesos constructivos de cada muestra fue la compactación, ya que el procedimiento fue el mismo que el de los especímenes con cemento blanco; se procedió a pesar el material previamente secado al sol (Fig. 4.3a). Después se cribó con la malla del #4 para eliminar granos mayores a 4.75 mm (Fig. 4.3b), se agregó el cemento para cada diseño de muestra de acuerdo a la proporción requerida y luego de mezclar estos secos, se añadió el agua necesaria hasta que se comprobara mediante la prueba de humedad óptima, que la mezcla estaba lista para proceder a rellenar los cilindros. Sin embargo, cabe señalar que para la muestra A de 83% Tepetate- 17% cemento y B de 88% Tepetate- 12% cemento, no se agregó más agua puesto que el tepetate contaba ya con la humedad necesaria que como se mencionó, fue comprobada realizando la prueba de campo de humedad demostrando que no se necesitaba más líquido. Para el caso de las muestras C y D, la humedad óptima se logró agregando 90 ml. de agua (Fig. 4.3c).

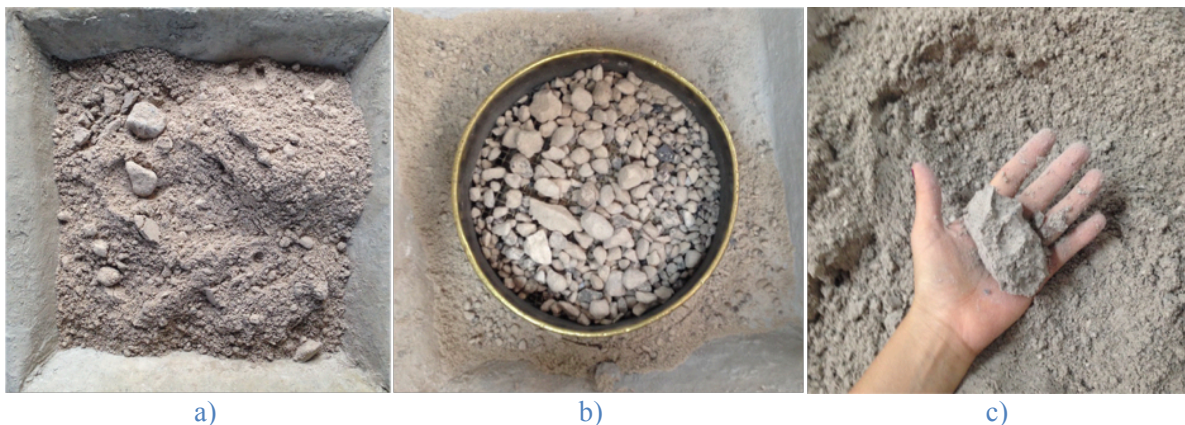


Fig. 4.3: Procedimiento de experimentación; a) tepetate en seco; b) granulometría de tepetate al cribar con tamiz #4; c) prueba de humedad óptima.

Luego de haber realizado los especímenes se resguardaron (Fig. 4.4a) para posteriormente realizar la prueba de resistencia a la compresión axial tomando como base la **norma ASTM C39**. Cada cilindro de 7 y 14 días de antigüedad fue sometido a carga vertical en la prensa universal del laboratorio de ingeniería civil del ITESO (Fig. 4.4b) con el fin de obtener información para fines de control y aceptación de la mezcla.



Fig. 4.4: Especímenes a probar a compresión axial; a) muestras A a D y b) prensa del laboratorio de ingeniería civil del ITESO.

4.2.2.1 Resultados de ensayos a compresión de tepetate estabilizado con cemento gris

Para medir las propiedades mecánicas más importantes del tepetate como material y las mezclas diseñadas con base en la [Norma ASTM C469](#), se probaron a compresión axial en la prensa universal ocho especímenes de cada muestra, 2 de cada tipo A, B, C y D con 7 y 14 días de antigüedad respectivamente. Luego del ensaye de las mismas, el software utilizado “Trapezium” arrojó datos de desplazamiento y fuerza los cuales se emplearon para realizar gráficas de esfuerzo (eje de las Y) y deformación (eje de las X) y describir un primer análisis de resultados. La deformación normal unitaria (ϵ) es la elongación por unidad de longitud, es decir: deformación total (δ) entre longitud (L); cuando se le sigue aplicando una carga, se llega a conocer la gráfica de esfuerzo-deformación, la cual es característica de cada material. El objetivo de esta fase fue seleccionar las dos muestras con mejores propiedades mecánicas para las siguientes pruebas donde se crearon bloques probados a resistencia al esfuerzo cortante.

Esfuerzo - Deformación

Muestra A- 7 días

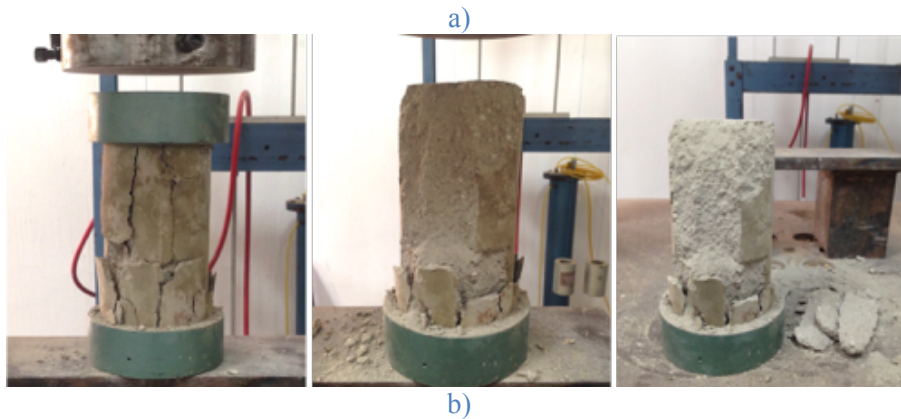
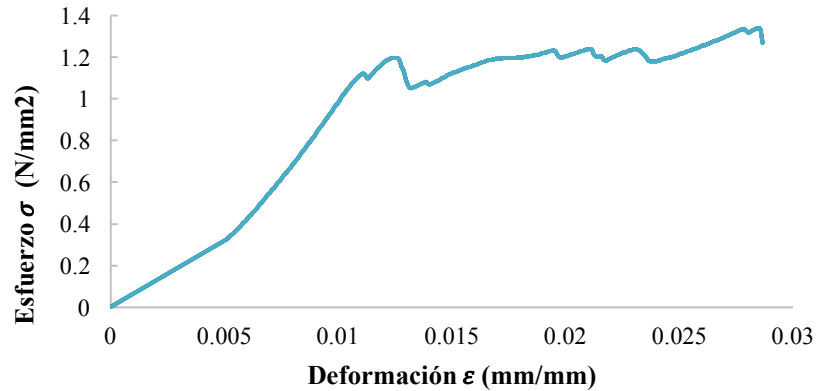


Fig. 4.5: Especimen tipo A probado a compresión axial a los 7 días; a) curva de esfuerzo-deformación y b) modo de falla observado.

Para los resultados de la muestra A (Fig. 4.5) correspondiente a la mezcla compuesta por 83% tepetate y 17% cemento gris, sometida a prueba de compresión axial a 7 días y con una velocidad de ensaye de 15 mm/min; se analizó su máximo esfuerzo a la compresión o resistencia última (F^*u) el cual fue de 13.38 kg/cm², la relación de esfuerzo entre deformación o módulo de elasticidad ($E = \sigma/\epsilon$) corresponde a 47.046 N/mm² (479.73 kg/cm²) obtenido con la resistencia última, ya que como el comportamiento del material no es lineal, no se puede tomar algún punto en la recta, como para el caso de una gráfica de esfuerzo-deformación del acero.



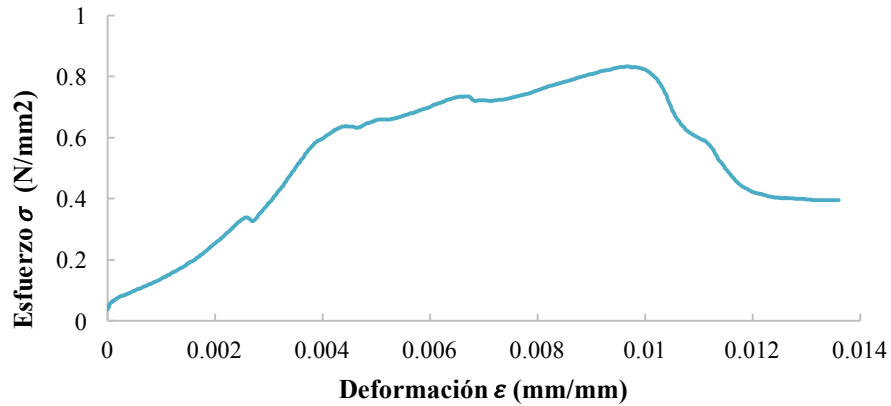
Otro dato importante que arroja la gráfica es el límite elástico (LE o σ_y) o compresión máxima antes de sufrir deformaciones plásticas o permanentes, el cual es el parámetro que caracteriza el comportamiento de un material. Debido a la dificultad para localizarlo exactamente, se considera como límite elástico la compresión a la cual el material tiene una deformación plástica del 0.2% o del $\epsilon=0.002$, entonces a partir de la misma gráfica, se obtuvo un valor de 1.1 N/mm^2 .

El material presentó un comportamiento plástico no lineal, es decir, cuando se superó el límite elástico y la muestra se agrietó, apareció un comportamiento plástico que cuando se dejó de aplicar la carga nos mostró que la deformación no vuelve a cero; o sea, se tienen deformaciones permanentes. También se puede notar que el tepetate es un material cuasi-frágil, ya que al señalar el área debajo de la curva del mismo diagrama de esfuerzo-deformación, desde donde se inicia la carga hasta la rotura de la curva, se indica la cantidad de energía que se puede absorber por unidad de volumen antes de romperse.

De acuerdo a la [Fig. 4.5b](#), el modo de falla indica que fue frágil con agrietamientos verticales y posteriores desmoronamientos en los bordes del elemento, también conocida como “falla normal a compresión”, denominación común para cilindros de concreto.

Esfuerzo - Deformación

Muestra B- 7 días



a)



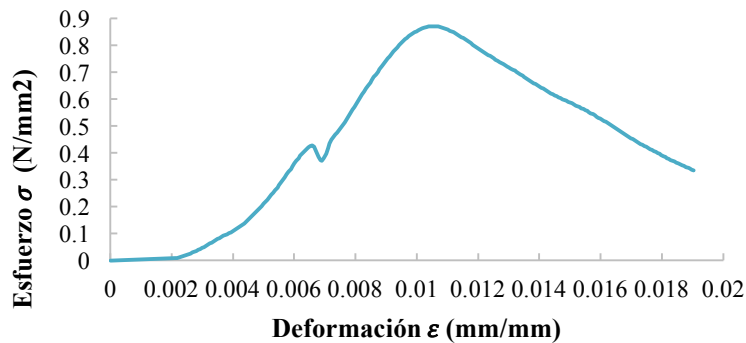
b)

Fig. 4.6: Especimen tipo B probado a compresión axial a los 7 días; a) curva de esfuerzo-deformación y b) modo de falla observado.

La muestra B correspondiente a 88% Tepetate- 12% cemento, sometida a prueba de compresión axial a 7 días y con una velocidad de ensaye de 15 mm/min (Fig. 4.6), obtuvo una resistencia última (F^*u) de 8.30 kg/cm². El módulo de elasticidad (E) corresponde a 85.216 N/mm². El límite elástico (LE o σ_y) o tensión máxima antes de sufrir deformaciones también fue considerado cuando el material tiene una deformación plástica del 0.2% o del $\epsilon=0.002$, entonces se obtuvo un valor de 0.75 N/mm². El material presentó un comportamiento plástico no lineal, con un modo de falla frágil con desmoronamientos en la

parte superior del elemento sin agrietamientos previos. Este tipo de falla se observa por deficiencias en el material de cabeceo o también por concavidad en una de las placas de carga.

Esfuerzo - Deformación Muestra C- 7 días



a)

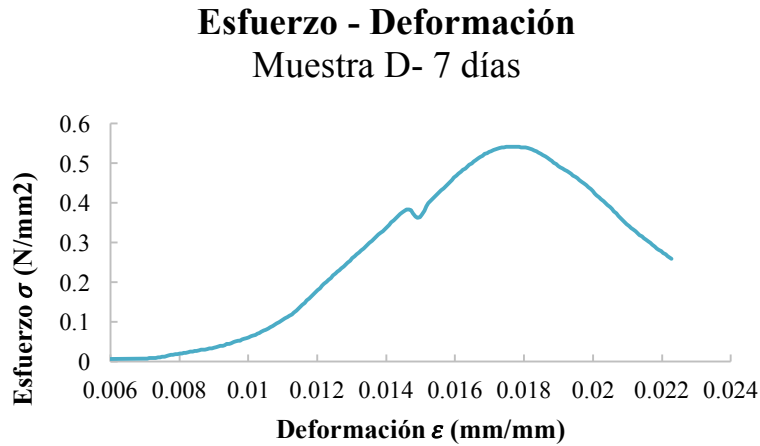


b)

Fig. 4.7: Especimen tipo C probado a compresión axial a los 7 días; a) curva de esfuerzo-deformación y b) modo de falla observado.

Para la muestra C correspondiente a la mezcla 92% Tepetate- 8% cemento y 90 ml de agua (Fig. 4.7), sometida a prueba de compresión axial con una velocidad de ensaye de 15mm/min; 7 días después de realizada, se obtuvo una resistencia última (F^*u) de 8.70 kg/cm². El módulo de elasticidad (E) corresponde a 82.778 N/mm². Su límite elástico (LE o σ_y) (0.2%=0.002) también fue obtenido mediante la paralela a la línea elástica, dando como valor un

0.825N/mm^2 . Su modo de falla fue cuasi frágil con ligeros agrietamientos en la parte superior del espécimen previos a desmoronamientos en la misma zona. Al igual que la muestra anterior, este tipo de falla se observa por deficiencias en el material de cabeceo o también por concavidad en una de las placas de carga.



a)



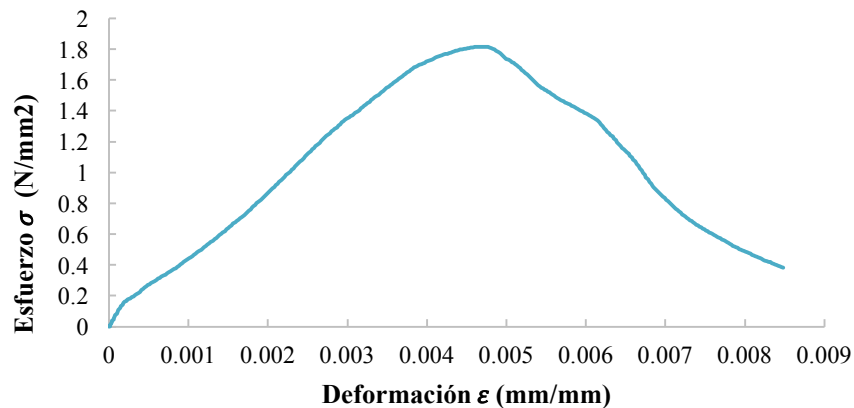
b)

Fig. 4.8: Especimen tipo D probado a compresión axial a los 7 días; a) curva de esfuerzo-deformación y b) modo de falla observado.

Para la muestra D correspondiente a la mezcla 97% Tepetate- 3% cemento y 73 ml de agua (Fig. 4.8), sometida a prueba de compresión axial con una velocidad de ensaye de 15 mm/min; se obtuvo una resistencia última (F^*u) de 5.41 kg/cm^2 . La relación de esfuerzo entre deformación o módulo de elasticidad (E) fue de 30.721 N/mm^2 . Su límite elástico (LE o σ_y)

($0.2\%=0.002$) obtenido mediante el trazado de la paralela a la línea elástica en la misma gráfica, tuvo un valor de 0.51 N/mm^2 y su modo de falla fue cuasi frágil con desmoronamientos y pequeñas grietas verticales en el área superior de la muestra.

Esfuerzo - Deformación Muestra A- 14 días



a)



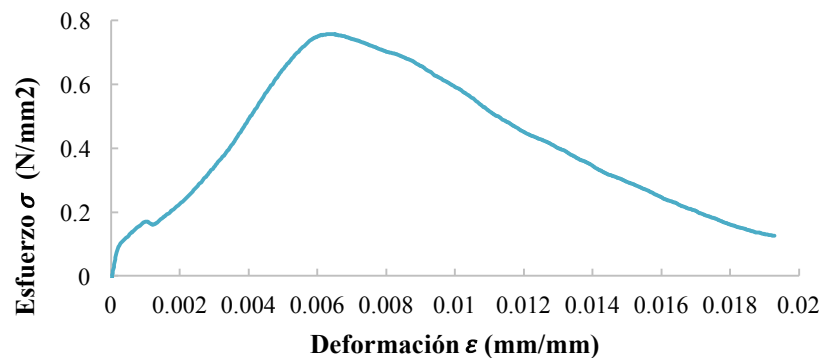
b)

Fig. 4.9: Especimen tipo A probado a compresión axial a los 14 días; a) curva de esfuerzo-deformación y b) modo de falla observado.

Para los resultados de la muestra A (83% Tepetate- 17% cemento) sometida a prueba de compresión axial a 14 días con una velocidad de ensaye de 5 mm/min (Fig. 4.9), se obtuvo una resistencia última ($F*u$) de 18.16 kg/cm^2 ; tomando ese valor se obtuvo su módulo de elasticidad (E) el cual corresponde a 386.383 N/mm^2 . Al igual que para las demás gráficas,

se obtuvo el límite elástico (σ_y) mediante el trazado de la paralela a la línea elástica, dando como resultado un valor de 1.55 N/mm^2 . Su modo de falla fue cuasi frágil con agrietamientos verticales desde la superficie inferior del espécimen y hasta su área central, sin embargo, no se presentaron desmoronamientos ni delaminaciones. Esta falla se observa en especímenes que presentan una superficie de carga convexa y/o deficiencia del material de cabeceo; también por convexidad en una de las placas de carga.

Esfuerzo - Deformación Muestra B- 14 días



a)



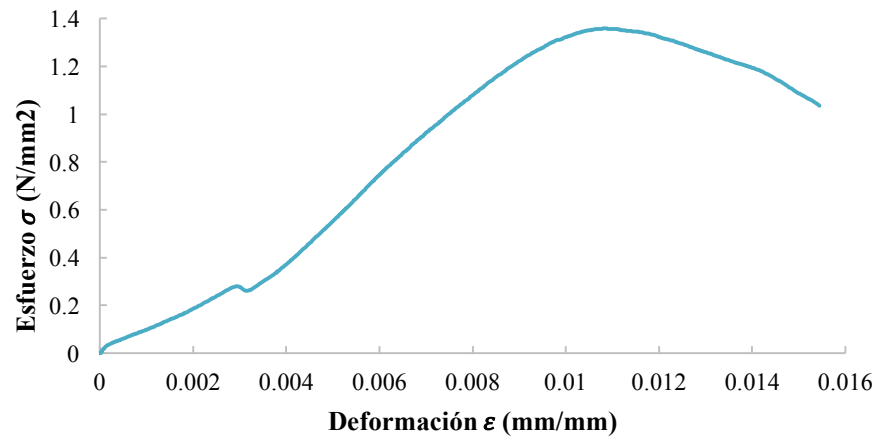
b)

Fig. 4.10: Especimen tipo B probado a compresión axial a los 14 días; a) curva de esfuerzo-deformación y b) modo de falla observado.

La muestra B (88% Tepetate- 12% cemento) con una antigüedad de 14 días (Fig. 4.10), fue sometida a prueba de compresión axial a una velocidad de ensaye de 5 mm/min. Obtuvo una

resistencia última (F^*u) de 7.57 kg/cm^2 , su módulo de elasticidad (E) fue de 120.97 N/mm^2 mientras que su límite elástico fue de 0.71 N/mm^2 . Podemos notar que su modo de falla fue cuasi frágil con pequeños desmoronamientos en el área superior del espécimen, así como grietas verticales y delaminaciones en su inferior y contorno.

Esfuerzo - Deformación Muestra C- 14 días



a)



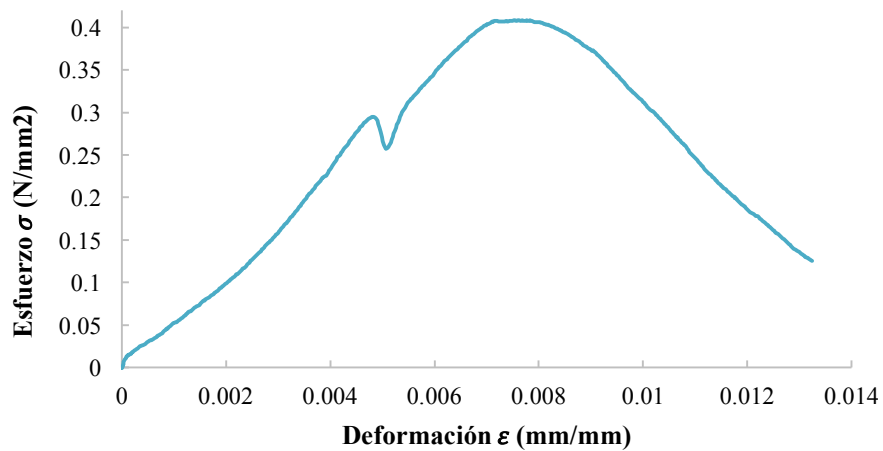
b)

Fig. 4.11: Especimen tipo C probado a compresión axial a los 14 días; a) curva de esfuerzo-deformación; b) modo de falla observado.

Para la muestra C (92% Tepetate- 8% cemento) sometida a prueba de compresión axial con una velocidad de ensaye de 5 mm/min , con 14 días de curado (Fig. 4.11), se obtuvo una

resistencia última (F^*u) de 13.58 kg/cm^2 . La relación de esfuerzo entre deformación (E) fue de 125.277 N/mm^2 , mientras que su límite elástico (σ_y) también obtenido mediante la paralela a la línea elástica desde el $0.2\% = 0.002 \text{ mm/mm}$, dio un valor de 1.31 N/mm^2 . Su modo de falla fue cuasi frágil con ligeros desmoronamientos posteriores a la aparición de pequeñas grietas en el inferior del espécimen.

Esfuerzo - Deformación Muestra D- 14 días



a)



b)

Fig. 4.12: Especimen tipo D probado a compresión axial a los 14 días; a) curva de esfuerzo-deformación y b) modo de falla observado.



La muestra D (97% Tepetate- 3% cemento) sometida a prueba de compresión axial con una velocidad de ensaye de 5 mm/min, a 14 días de antigüedad (Fig. 4.12), obtuvo una resistencia última (F^*u) de 4.08 kg/cm². Su relación de esfuerzo entre deformación o módulo de elasticidad (E) fue de 54.295 N/mm² y su límite elástico (0.2% = 0.002) fue de 0.39 N/mm². Se puede observar que su modo de falla fue frágil con grietas verticales que procedieron a una delaminación del elemento.

Entonces, podemos observar en la Fig. 4.13 los resultados de las curvas de esfuerzo-deformación de todos los especímenes A a D de 7 y 14 días de curado. Las mezclas con los valores más altos de resistencia son las del tipo A y C; las tipo A compuestas por un 83% de tepetate y 17% de cemento a 7 días de curado, tuvieron un módulo de elasticidad (E) de 47.046 N/mm² y como resistencia última (F^*u) 13.38 kg/cm², mientras que a 14 días presentaron un E= 386.383 N/mm² y F^*u =18.16 kg/cm². Para las muestras tipo C compuestas de 92% tepetate y 8% cemento a 7 días se obtuvo un E=82.778 N/mm² y F^*u =8.70 kg/cm², a 14 días, E= 125.277 N/mm² y F^*u =13.58 kg/cm².

También podemos notar según la Tabla 4.3, que para ambos casos de curado a 7 a 14 días, los especímenes con mayor carga máxima soportada fueron los del tipo A con 1,071.22 kg. y 1,453.91 kg., respectivamente. Cabe señalar que para la realización de la mezcla tipo A, según las prueba de campo de humedad óptima, el tepetate ya presentaba esta variable requerida desde el principio del proceso de experimentación; mientras que para la mezcla del tipo C se añadieron 90 ml de agua para la cantidad de 10.68 kg de compuesto.



“Diseño de muros de tepetate con revisión sísmica simplificada para vivienda del Área Metropolitana de Guadalajara”

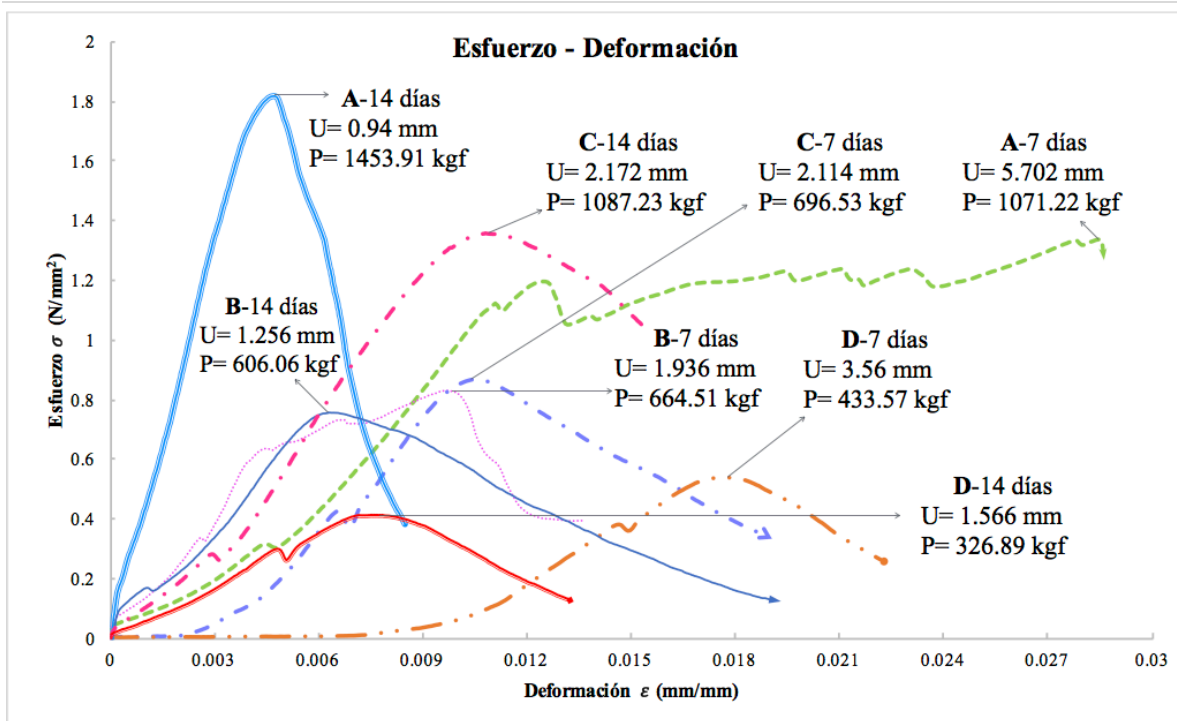


Fig. 4.13: Resumen de curvas de esfuerzo-deformación de especímenes A-D de 7 y 14 días de curado sometidos a compresión axial.

Tabla 4.3: Resultados globales de pruebas a compresión axial, especímenes A-D

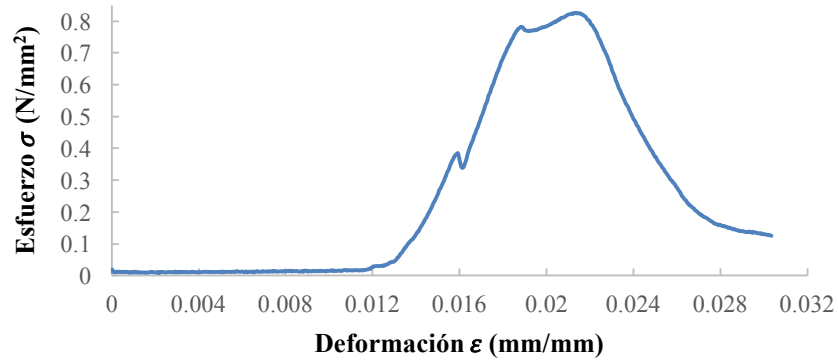
Resultados de pruebas a compresión axial en especímenes de tepetate estabilizado a 7 y 14 días

Mezcla	h	Diám.	Área	Masa	Volumen	Peso vol.	Límite elástico (E)	Resistencia última (σ_R)	Deformación u. (ϵ)	Fza. Axial (P)	σ Axial				
T	C	Especímen	m.	m.	mm ²	Kg	m ³	Kg/m ³	(N/mm ²)	σ_y (N/mm ²)	(N/mm ²)	Kg/cm ²	mm/mm	Kgf	(N/mm ²)
Resultados a los 7 días															
83%	17%	A	0.20	0.10	7853.982	2.062	0.00157	1312.7100	47.046	1.1	1.338	13.38	0.02844	1071.22	1.34
88%	12%	B	0.20	0.10	7853.982	2.061	0.00157	1312.0734	85.216	0.75	0.830	8.30	0.00974	664.51	0.83
92%	8%	C	0.20	0.10	7853.982	2.009	0.00157	1278.9691	82.778	0.825	0.870	8.70	0.01051	696.53	0.87
97%	3%	D	0.20	0.10	7853.982	2.032	0.00157	1293.6114	30.721	0.51	0.541	5.41	0.01761	433.13	0.54
Resultados a los 14 días															
83%	17%	A	0.20	0.10	7853.982	2.062	0.00157	1312.7100	386.383	1.55	1.816	18.16	0.0047	1453.91	1.82
88%	12%	B	0.19	0.10	7853.982	2.061	0.00150	1377.5048	120.927	0.71	0.757	7.57	0.00626	606.06	0.76
92%	8%	C	0.20	0.10	7853.982	2.009	0.00157	1278.9691	125.277	1.31	1.358	13.58	0.01084	1087.23	1.36
97%	3%	D	0.19	0.10	7853.982	2.032	0.00149	1361.6962	54.295	0.39	0.408	4.08	0.00752	326.89	0.41

Una vez conocidos los especímenes con las mejores propiedades mecánicas (A y C), se procedió a realizar más muestras, ahora para dos lotes, uno para rellenar bloques de tierra compactada y otro para dos especímenes cilíndricos para someterlos a ensaye a compresión

axial ahora a los 28 días con el fin de probar si con más tiempo de fraguado aumentan las capacidades del material.

Esfuerzo - Deformación Muestra A- 28 días



a)

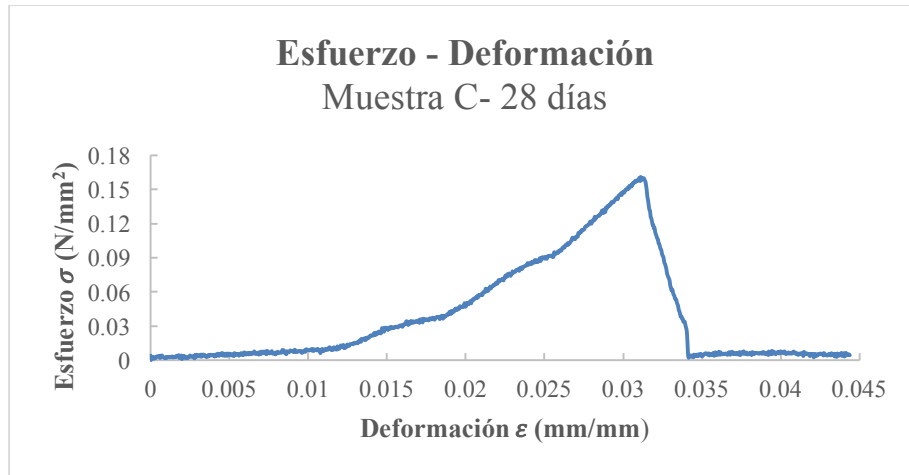


b)

Fig. 4.14: Especimen tipo A probado a compresión axial a los 28 días; a) curva de esfuerzo-deformación y b) modo de falla observado.

La muestra A (83% Tepetate- 17% cemento) sometida a prueba de compresión axial a 28 días (Fig. 4.14) y con una velocidad de ensaye de 5 mm/min, obtuvo una resistencia última (F^*u) de 8.25 kg/cm²; tomando ese valor se obtuvo su módulo de elasticidad ($E = \sigma/\epsilon$) el cual corresponde a 38.660 N/mm². Al igual que para las demás gráficas, se obtuvo el límite elástico (σ_y) mediante el trazado de la paralela a la línea elástica, partiendo del 0.2% = 0.002

dando como resultado un valor de 0.30 N/mm^2 . Su modo de falla fue cuasi frágil con agrietamientos verticales y desmoronamientos en el contorno inferior del espécimen.



a)



b)

Fig. 4.15: Espécimen tipo C probado a compresión axial a los 28 días; a) curva de esfuerzo-deformación y b) modo de falla observado.

Para la muestra C (92% Tepetate- 8% cemento) sometida a prueba de compresión axial con 28 días de curado (Fig. 4.15) y una velocidad de ensaye de 5 mm/min; se obtuvo un F^*u de 1.61 kg/cm^2 , su $E = 5.170 \text{ N/mm}^2$, mientras que su límite elástico (σ_y) también obtenido mediante la paralela a la línea elástica desde el $0.2\% = 0.002 \text{ mm/mm}$, arrojó un valor de 0.06 N/mm^2 . Su modo de falla fue por aplastamiento con una grieta vertical producto de la fuerza aplicada, misma que al ser sometida a rotura provocó el corte del elemento, así como ligeros desmoronamientos en la parte superior del espécimen.



Así, una vez más se compararon los resultados de todos los especímenes cilíndricos (Fig. 4.16) donde podemos observar que el espécimen tipo C curado a 28 días solo resistió una carga máxima de 128.82 kg. con un F^*u de 0.16 N/mm^2 . Para el espécimen del tipo A curado a 28 días, se obtuvo un F^*u de 0.83 N/mm^2 , mismo que para el espécimen tipo B con 7 días de curado aunque a que las muestras se realizaron en días distintos y cada una con una diferencia de 5% de sus componentes; también, se puede notar que la mezcla del tipo C la cual contiene mayor grado de tepetate (92% Tepetate- 8% cemento) a 14 días, tuvo una resistencia cercana a la muestra del tipo A (83% Tepetate- 17% cemento) de 7 días de curado, con un F^*u de 13.58 kg/cm^2 sobre un 13.38 kg/cm^2 para la muestra A. La similitud de estos resultados para ambos casos puede deberse a la humedad con la que contaba el material, misma que indica la importancia de controlar este factor, ya que las capacidades del estabilizador (cemento) reaccionan ante esta variable, más que sobre la cantidad del mismo que se haya empleado. Véase la Tabla 4.4, la cual resume los resultados únicamente de los especímenes A y C.

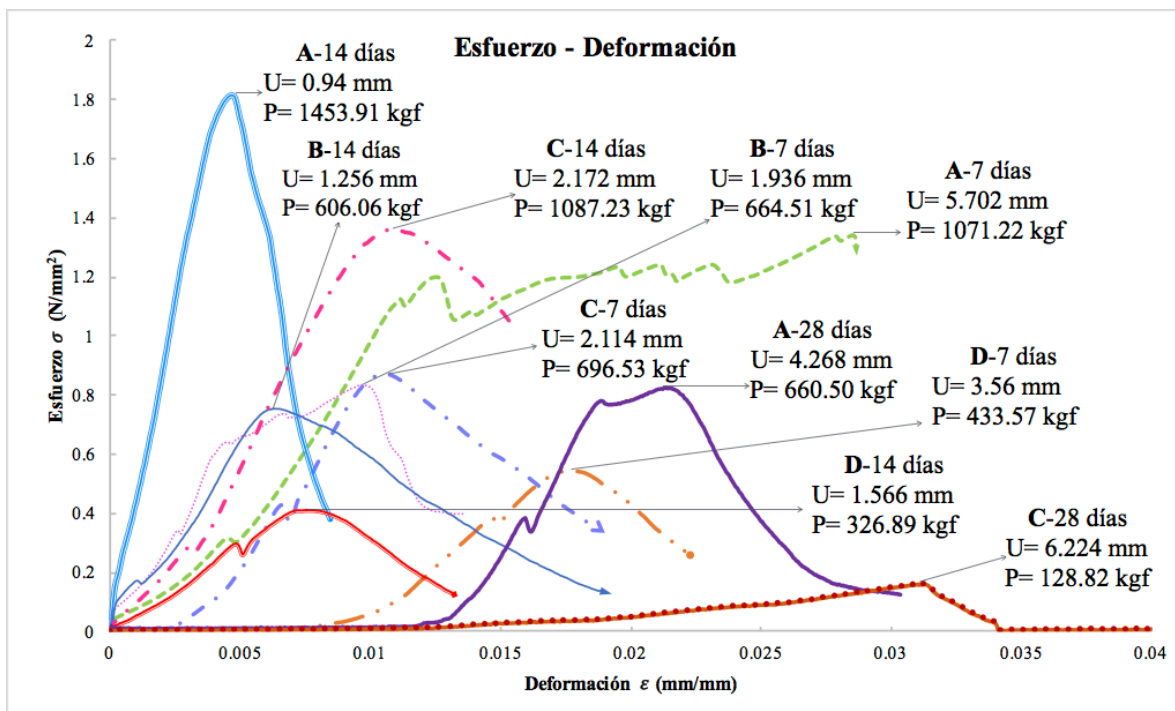


Fig. 4.16: Resumen de curvas de esfuerzo-deformación de especímenes A-D de 7, 14 y 28 días de curado, sometidos a compresión axial



Tabla 4.4: Resultados de pruebas a compresión axial de especímenes tipo A y C de 7, 14 y 28 días

Resultados de pruebas a compresión axial en especímenes A y C														
Mezcla			h	Diám.	Área	Masa	Peso vol.	(E)	Límite elástico	Resistencia última (σ_R)		Deformación u. (ϵ)	Fza. Axial (P)	σ Axial
T	C	Especimen	m.	m.	mm ²	Kg	Kg/m ³	(N/mm ²)	σ_y (N/mm ²)	(N/mm ²)	Kg/cm ²	mm/mm	Kgf	(N/mm ²)
Resultados a los 7 días														
83%	17%	A	0.20	0.10	7853.982	2.062	1312.7100	47.046	1.1	1.338	13.38	0.02844	1071.22	1.34
92%	8%	C	0.20	0.10	7853.982	2.009	1278.9691	82.778	0.825	0.870	8.70	0.01051	696.53	0.87
Resultados a los 14 días														
83%	17%	A	0.20	0.10	7853.982	2.062	1312.7100	386.383	1.55	1.816	18.16	0.0047	1453.91	1.82
92%	8%	C	0.20	0.10	7853.982	2.009	1278.9691	125.277	1.31	1.358	13.58	0.01084	1087.23	1.36
Resultados a los 28 días														
83%	17%	A	0.20	0.10	7853.982	1.96	1247.7748	38.660	0.30	0.825	8.25	0.02134	660.50	0.83
92%	8%	C	0.20	0.10	7853.982	1.92	1222.3100	5.170	0.06	0.161	1.61	0.03112	128.82	0.16

Por tanto, según valores de diseño recomendados para la resistencia a la compresión, los cuales indican que para la aceptación de la muestra se tiene que alcanzar un F^*u desde 4.07 a 6.11 kg/cm² o de 5.09 kg/cm² (NYS 4298:1998, 1998), así como ensayos a compresión en muretes de tierra compactada realizados por Arteaga *et al.* (2011) el cual tuvo un valor promedio de resistencia a la compresión de 1.17 N/mm² (11.93 kg/cm²); los resultados promedio obtenidos en los ensayos de esta investigación (considerando todos los especímenes descritos), fueron de 8.9 kg/cm² y 97.65 N/mm² como módulo de elasticidad; es decir, estos valores son superiores a los solicitados en las normas y favorables en comparación de sistemas de tierra con y sin estabilizar; sin embargo, como ejemplos adicionales para un acero de designación A36, el F^*u se encuentra entre 4077.81 kg/cm² y 5624.56 kg/cm² con un $E=210,000$ N/mm² en promedio, mientras que el concreto tiene un módulo de elasticidad (E) de entre 17,000 N/mm² y 31,000 N/mm², por lo que los valores resultantes del sistema constructivo de tepetate estabilizado propuesto son demasiado bajos a comparación con materiales industriales empleados en otros sistemas.

4.2.3 Pruebas a compresión diagonal en especímenes de tepetate estabilizado con cemento gris

Con base en los resultados de las muestras preliminares, se seleccionaron especímenes finales con las características mecánicas de mayor valor las cuales corresponden a la mezcla del tipo A compuesta por 83% de tepetate y 17% de cemento y la del tipo C de 92% tepetate y 8% cemento; se construyeron 6 bloques de tierra compactada, tres para cada tipo de mezcla ya que según la norma [NMX-C-159-ONNCCE-2004, Concreto- Elaboración y Curado de Especímenes en el Laboratorio](#), indica que la cantidad de especímenes y de mezclas de prueba depende de los objetivos establecidos y de la naturaleza del programa de pruebas. El objetivo de la construcción de estos bloques de tepetate estabilizado bajo la técnica de tapial o tierra compactada, consistió en someterlos a cargas de compresión diagonal en la prensa universal para determinar sus resistencias a esfuerzo cortante. Para realizarlos, se diseñó un molde de madera de cimbra de 30x20x30cm con un espesor de pared de 2 cm (Fig. 4.17).

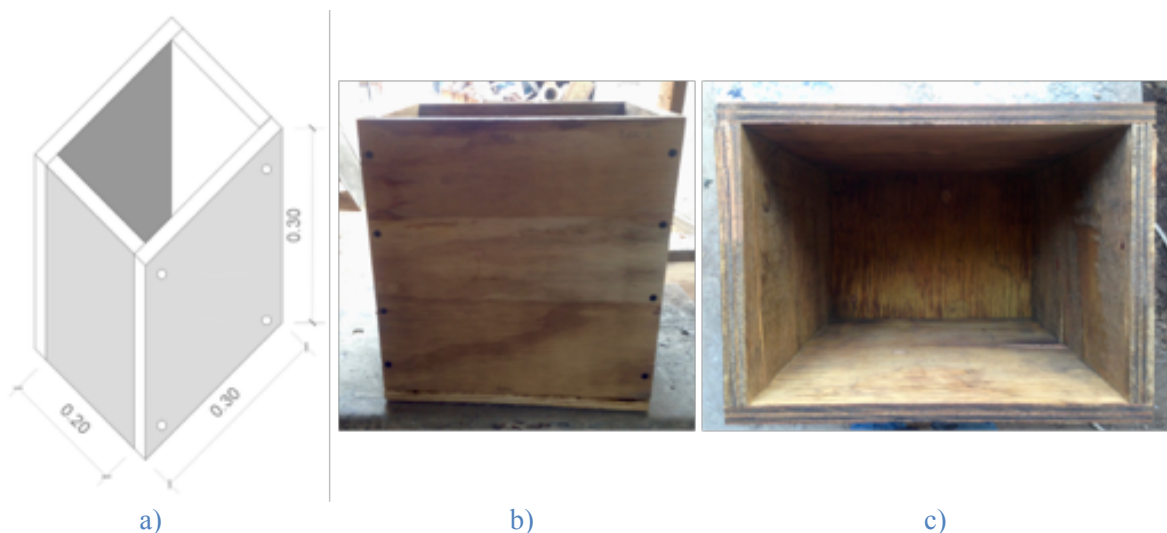


Fig. 4.17: Molde para bloques de tierra compactada; a) diseño de molde; b) vista frontal y c) vista interior.

Los bloques fueron sometidos a pruebas de compresión diagonal a 7, 14 y 28 días respectivamente, aunque estándares de normativa en Nueva Zelanda ([NZS 4298:1998, 1998](#)) así como la Norma Oficial Mexicana “[Determinación de la Resistencia a compresión](#)

diagonal y de la rigidez a cortante de muretes de mampostería de barro y de concreto” del CENAPRED (1997), recomiendan que deben ser curados al menos 28 días antes de someterlos a pruebas de laboratorio.

Su método de compactación fue manual con pisón de 2.5 kg. (el mismo usado para los especímenes cilíndricos) en diversas capas, dando indeterminado número golpes hasta lograr una compactación de $1/3$ de la altura de mezcla agregada para cada capa; es decir, por cada 15 cm de altura aproximada de mezcla agregada al molde, reducir esa altura 5 cm de compactación (Fig. 4.18), con el fin de probar que el procedimiento en laboratorio imita la autoconstrucción propuesta para el sistema.

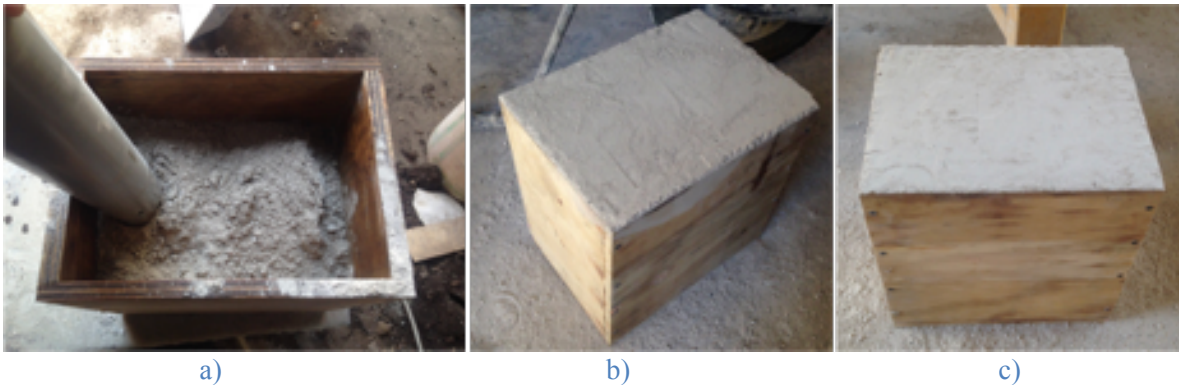


Fig. 4.18: Proceso de elaboración de especímenes; a) proceso de compactación por medios manuales; b) y c) bloque terminado.

Esfuerzo σ - Deformación ε Especimen A-1

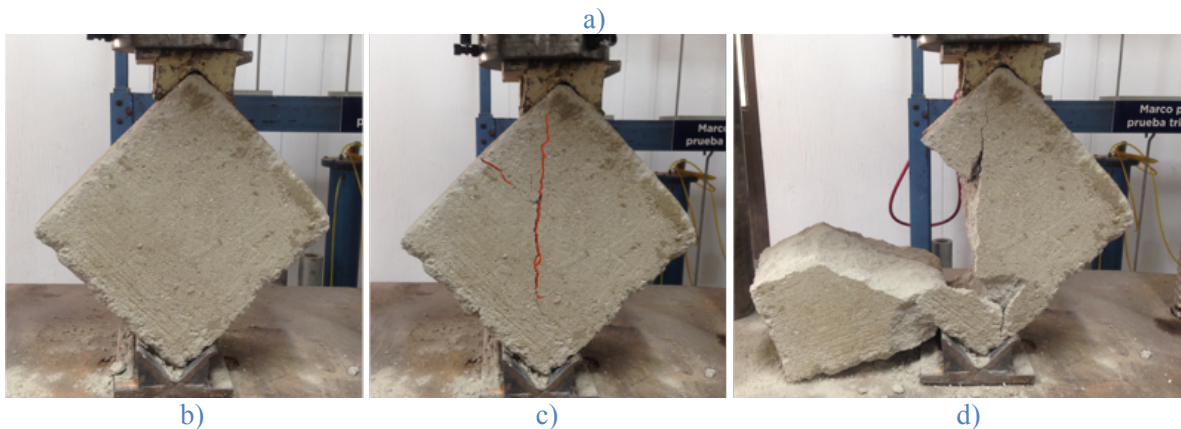
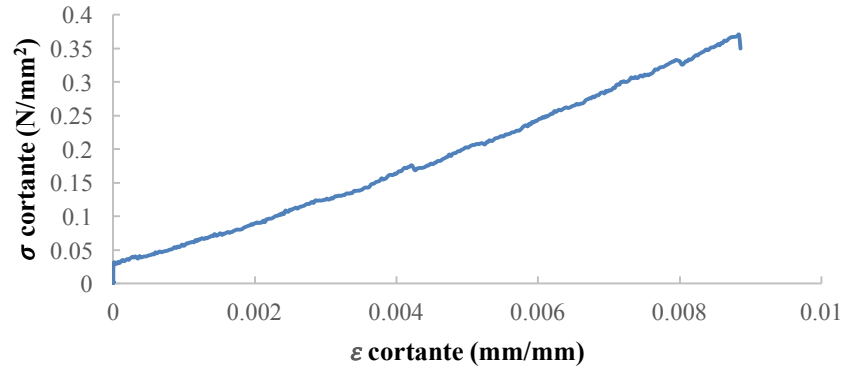


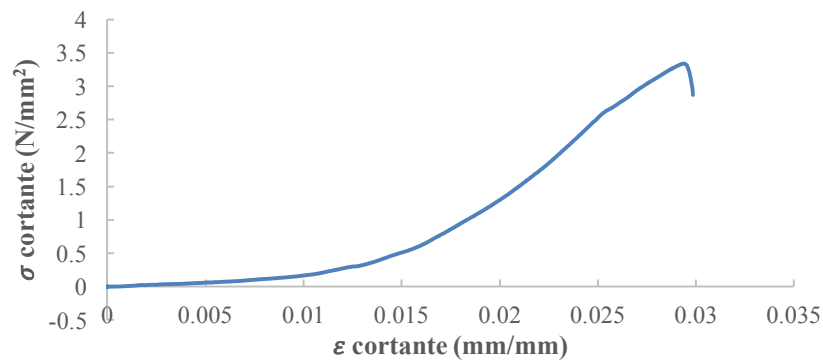
Fig. 4.19: Prueba a compresión diagonal; a) curva esfuerzo cortante-deformación cortante; b) espécimen A-1 curado a 7 días; c) modo de falla observado y d) falla llevada hasta rotura.

El espécimen A-1 (nomenclatura otorgada por el tipo de muestra y el número espécimen) de 21.66 kg. de masa fue ensayado a los 7 días de antigüedad (Fig. 4.19). Soportó una carga máxima aplicada ($P_{\text{máx}}$) de 301.836 kg y su índice de resistencia a compresión diagonal (V_m) fue de 0.377 kg/cm², esta resistencia de los bloques se obtuvo dividiendo la carga máxima soportada entre el área bruta del espécimen, medida sobre la diagonal de carga. Su modo de falla en el plano fue típico por cortante diagonal que atraviesa predominantemente al elemento; su trayectoria es aproximadamente recta.

Una vez alcanzada la resistencia máxima se continuó ejerciendo fuerza para llevar al espécimen hasta la falla y observar su comportamiento. Se presentaron desmoronamientos en la parte inferior de la diagonal debido a la pérdida de estabilidad geométrica del bloque, la cual es causada por el aplastamiento y la fragilidad del conjunto que permiten que éste presente rotaciones. El ensayo fue realizado exactamente como son realizados los ensayos de mampostería, tomando como referencia investigaciones como la de [Fernández *et al.* \(2009\)](#).

Para todos los especímenes, se evidencian con líneas en color rojo, las grietas producto de la prueba.

Esfuerzo σ - Deformación ε Especímen A-2



a)



b)

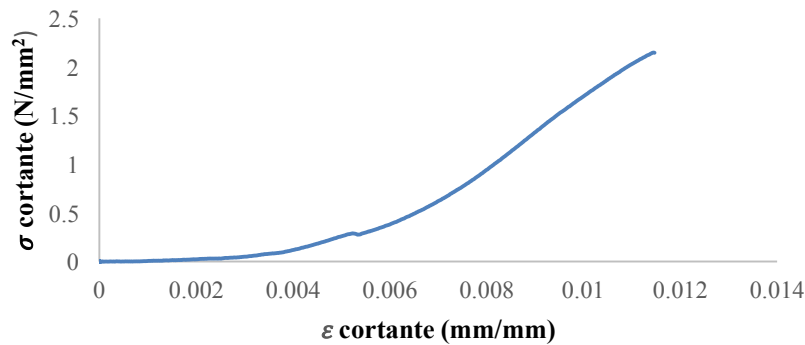
c)

d)

Fig. 4.20: Prueba a compresión diagonal; a) curva esfuerzo cortante-deformación cortante; b) espécimen A-2 curado a 14 días; c) modo de falla observado y d) falla llevada hasta rotura.

El espécimen A-2 de 14 días de antigüedad (Fig. 4.20) y de 16.68 kg. de masa, soportó una carga máxima aplicada ($P_{\text{máx}}$) de 2590.398 kg e índice de resistencia a compresión diagonal (V_m) de 3.408 kg/cm^2 . La falla fue en el plano, típica por cortante diagonal a la carga hasta $2/3$ de la longitud total con agrietamientos ligeros en el inferior de la misma producto del aplastamiento, ya que el refuerzo vertical a tensión fluye y el extremo a compresión se aplasta. El bloque fue sometido a mayor carga de la soportada para llevarlo hasta rotura donde se observó la separación de las secciones producto del esfuerzo cortante.

Esfuerzo σ - Deformación ε Especímen A-3



a)

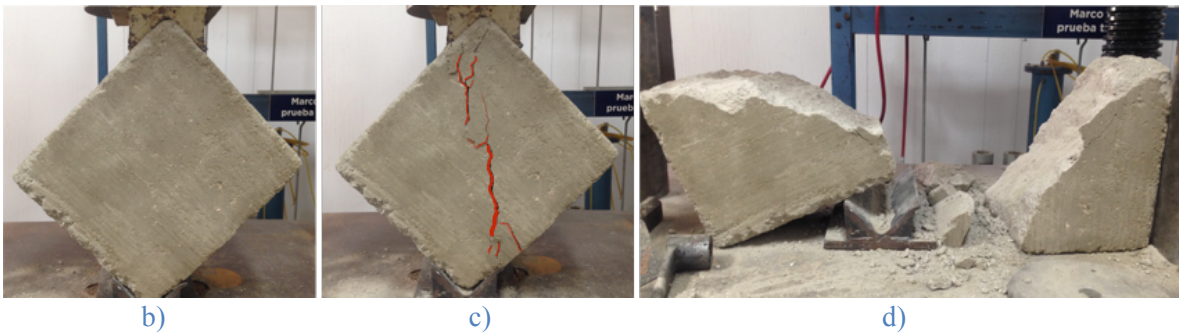
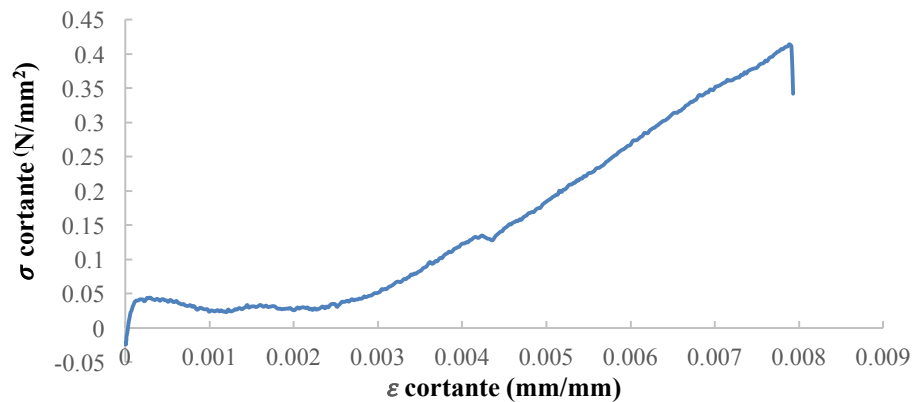


Fig. 4.21: Prueba a compresión diagonal; a) curva esfuerzo cortante-deformación cortante; b) espécimen A-3 curado a 28 días; c) modo de falla observado y d) falla llevada hasta rotura.

El espécimen A-3 ensayado a 28 días (Fig. 4.21), tuvo una masa de 21.48 kg., su carga máxima aplicada ($P_{\text{máx}}$) soportada fue de 1751.299 kg y su índice de resistencia a compresión

diagonal (V_m) fue de 2.189 kg/cm^2 . Su falla fue en el plano y al igual que para los demás especímenes se sometió a más carga de la soportada, llevándolo hasta rotura. Se presentaron ligeras grietas diagonales producto de la formación de la grieta principal con orientación diagonal predominante cruzando todo el espécimen, una falla típica por cortante diagonal.

Esfuerzo σ - Deformación ε Especímen C-1



a)

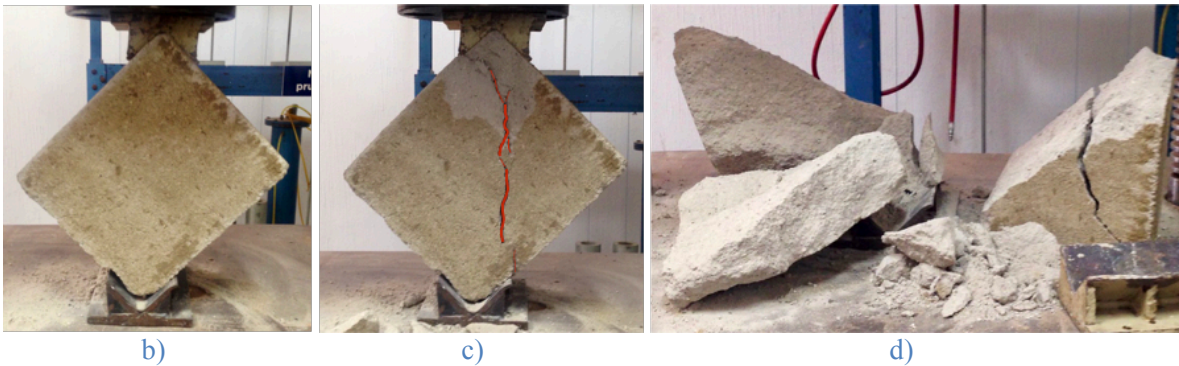
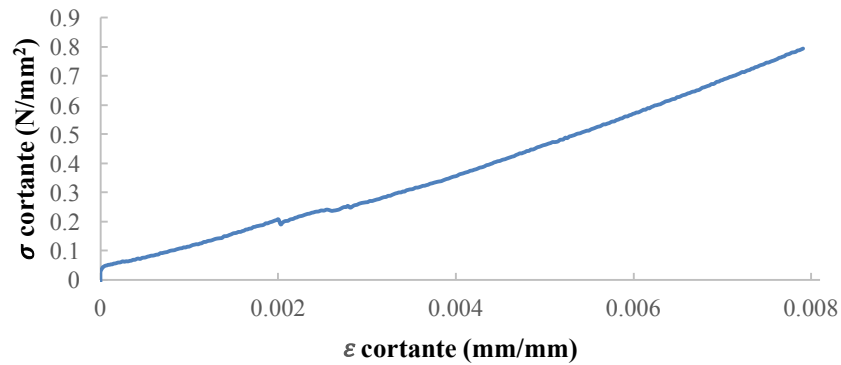


Fig. 4.22: Prueba a compresión diagonal; a) curva esfuerzo cortante-deformación cortante; b) espécimen C-1 curado a 7 días; c) modo de falla observado y d) falla llevada hasta rotura.

El espécimen C-1 de 7 días de curado (Fig. 4.22) tuvo una masa de 21.82 kg. y soportó una carga máxima aplicada ($P_{m\acute{a}x}$) de 343.6444 kg; su índice de resistencia a compresión diagonal (V_m) fue de 0.422 kg/cm^2 presentando un agrietamiento por cortante en la longitud de la diagonal desde el extremo superior y hasta $\frac{3}{4}$ partes de la altura perpendicular del espécimen.

También presentó una ligera delaminación en la parte superior de la grieta. Su falla fue frágil y cuando el bloque fue llevado hasta rotura, los agrietamientos producto de la diagonal de la carga provocaron el colapso del mismo, seccionándolo en cuatro elementos.

Esfuerzo σ - Deformación ε Especímen C-2



a)



b)

c)

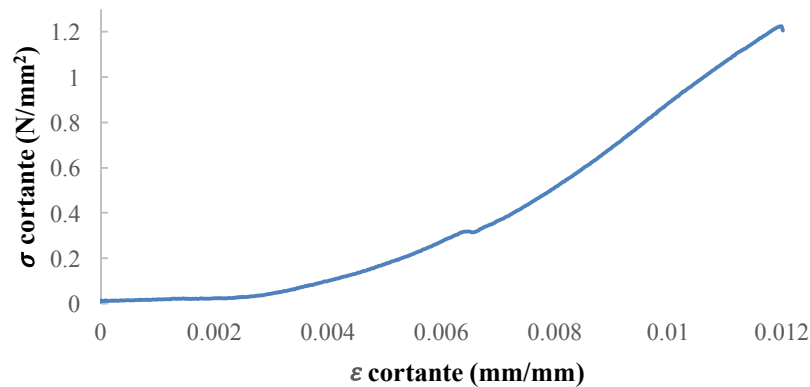
d)

Fig. 4.23: Prueba a compresión diagonal; a) curva esfuerzo cortante-deformación cortante; b) espécimen C-2 curado a 14 días; c) modo de falla observado y d) falla llevada hasta rotura.

El espécimen C-2 ensayado a 14 días (Fig. 4.23), de 20.92 kg. De masa, soportó una carga máxima aplicada ($P_{\text{máx}}$) de 666.0021 kg; su índice de resistencia a compresión diagonal (V_m) fue de 0.818 kg/cm² y presentó una falla en el plano por aplastamiento la cual es producto del efecto de puntal que se produce cuando se separa el cuerpo del muro de los elementos de confinamiento, situación que genera grandes esfuerzos de compresión en las esquinas del

muro. Se observó una grieta diagonal escalonada desde el extremo superior derecho del espécimen y hasta el extremo inferior izquierdo, es decir, una grieta que atraviesa al elemento. Después de someter a cargas mayores al espécimen, se produjo la rotura y al igual que para los demás ensayos, se produjo un colapso sobre la falla, ocasionando la rotura en dos secciones.

Esfuerzo σ - Deformación ε Especimen C-3



a)

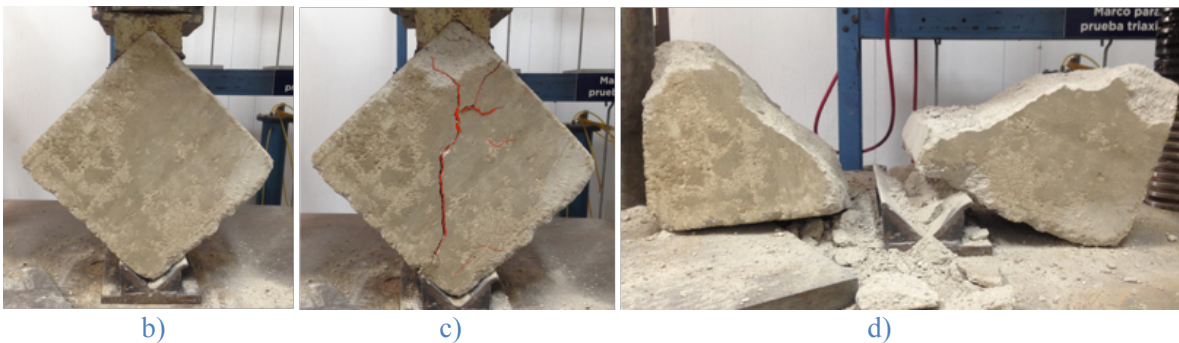


Fig. 4.24: Prueba a compresión diagonal; a) curva esfuerzo cortante-deformación cortante; b) espécimen C-3 curado a 28 días; c) modo de falla observado y d) falla llevada hasta rotura.

El espécimen C-3 ensayado a 28 días (Fig. 4.24) y constituido por una masa de 20.00 kg., soportó una carga máxima aplicada ($P_{\text{máx}}$) de 1016.275 kg; su índice de resistencia a



compresión diagonal (V_m) fue de 1.248 kg/cm^2 . El bloque presentó una falla típica por tensión en la longitud de la diagonal, misma que originó grietas menores en la parte superior de la misma, así como ligeros desmoronamientos en la zona de aplicación de la carga. Fue llevado hasta rotura para observar su comportamiento y se notó que al igual que los demás especímenes éste fue fracturado en dos secciones resultado de la carga diagonal a la que fue sometida.

Luego de los resultados obtenidos podemos concluir que estas pruebas a compresión diagonal en especímenes de tepetate estabilizado con cemento gris producto de los mejores tipos de muestras obtenidos en las pruebas de compresión (A y C mencionados), nos indican que los mejores valores son los del espécimen tipo A-2, mezcla compuesta por 83% tepetate y 17% cemento con un tiempo de curado de 14 días (Tabla 4.5 y Fig. 4.25). Este espécimen soportó una carga máxima aplicada ($P_{\text{máx}}$) de 2590.398 kg con un índice de resistencia a compresión diagonal (V_m) de 3.598 kg/cm^2 , mientras que el resultado menos favorable también de la misma mezcla pero ahora del tipo A-1 con un curado a 7 días el cual resistió 301.836 kg, con un índice de resistencia a compresión diagonal (V_m) de 0.377 kg/cm^2 . Para el caso de la mezcla tipo C de 92% tepetate y 8% cemento, el espécimen con las mejores propiedades mecánicas fue el C-3 curado a 28 días, con una carga máxima aplicada ($P_{\text{máx}}$) de 1016.275 kg. Y un índice de resistencia a compresión diagonal (V_m) de 1.248 kg/cm , el espécimen con menor capacidad mecánica fue el C-1 con 7 días de curado, ya que solo soportó 343.644 kg. Y su índice de resistencia a compresión diagonal (V_m) fue de 0.422 kg/cm^2 ; entonces a mayor tiempo de curado al igual que para el concreto, aumenta la resistencia del material.



Tabla 4.5: Resultados de pruebas a compresión diagonal a los 7, 14 y 28 días de curado.

Resistencia a compresión diagonal de bloques de tepetate estabilizado

T	C	Especimen	Curado	Masa	Dimensiones (cm)					Carga máx. (P _{máx})		V _m
					Días	Kg	l	t	h	L _c	A (cm ²)	
83%	17%	A-1	7	21.66	27.00	20.00	30.00	40.00	800.00	301.36	0.377	0.038
		A-2	14	16.68	28.00	20.00	25.00	38.00	760.00	2590.398	3.408	0.341
		A-3	28	21.48	27.00	20.00	30.00	40.00	800.00	1751.299	2.189	0.219
		Promedio									1547.686	1.991
92%	8%	C-1	7	21.82	27.50	20.00	30.00	40.70	814.00	343.644	0.422	0.042
		C-2	14	20.92	27.50	20.00	30.00	40.70	814.00	666.002	0.818	0.082
		C-3	28	20.00	27.50	20.00	29.00	40.70	814.00	1016.275	1.248	0.125
		Promedio									675.307	0.830

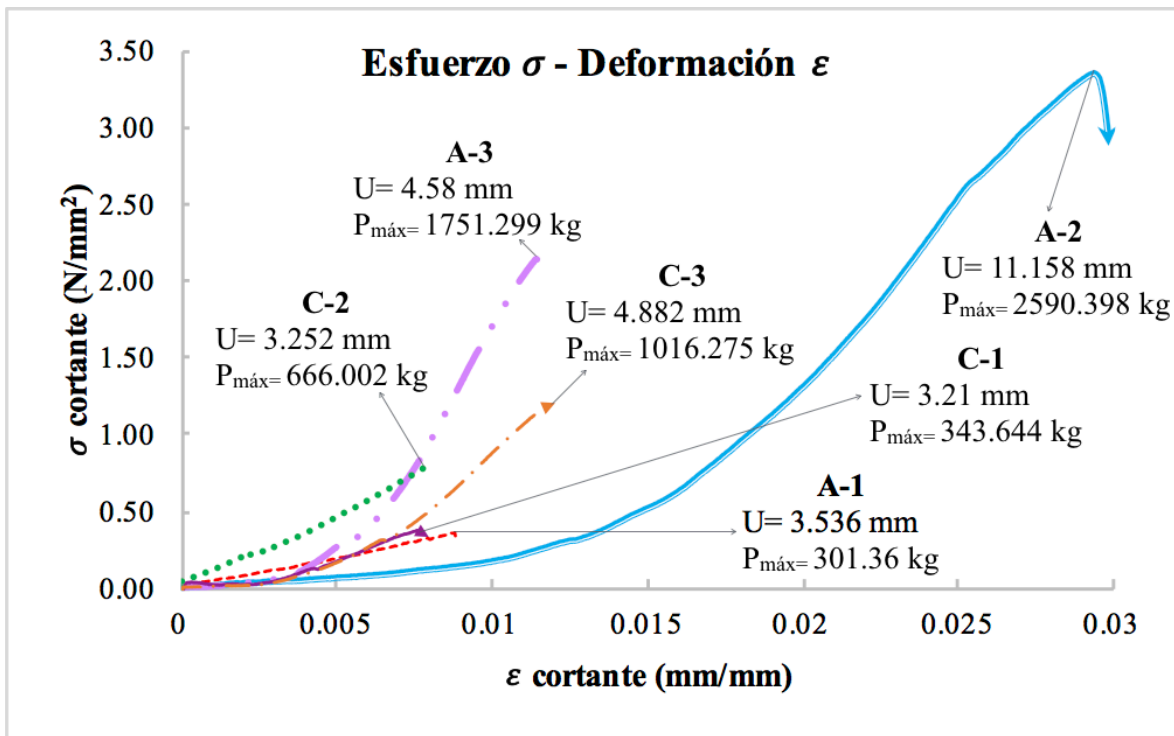


Fig. 4.25: Diagrama de esfuerzo cortante-deformación cortante de especímenes A y C de 7, 14 y 28 días.



4.3 Resumen de descubrimientos

Respecto a la compresión axial, luego de analizar los resultados globales obtenidos se puede concluir que el espécimen con la mejor respuesta ante esfuerzos verticales fue el del tipo A sometido a ensaye con 14 días de curado, el cual soportó una carga axial máxima (P) de 1453.91 kg/cm. Se puede notar que el espécimen aumentó 4.78 kg/cm² de resistencia última en una semana más de curado ya que la misma mezcla pero sometida a ensaye con 7 días de antigüedad, soportó una carga máxima (P) de 1071.22 kg/cm², lo que indica que a mayor tiempo de curado al igual que el cemento, aumentan sus propiedades de resistencia. También, al observar los resultados a 28 días de la muestra tipo A pero realizada en una corrida distinta a las anteriores, se obtuvieron valores 9.91 kg/cm² menores que para el mejor espécimen A de 14 días de curado. Ambos especímenes A y C a 28 días fueron los de menor resistencia con un f^*u de 8.25 kg/cm² y 1.61 kg/cm² respectivamente, siendo ésta última la de resultados más pobres de los 10 elementos probados; lo que indica que aunque el material de origen para todas las muestras fue el mismo, así como las condiciones que se emplearon para su almacenamiento, la humedad del ambiente y del material es un elemento clave para conocer las capacidades reales del sistema.

Después al haber seleccionado a las mejores muestras las cuales fueron de tipo A y C, se procedió a hacer nuevos especímenes pero ahora para probar a esfuerzos de compresión diagonal, por tanto ahora en bloques. Luego de realizar los respectivos cálculos con datos obtenidos de los ensayes a cortante a los cuales fueron sometidos los especímenes, la muestra con los mejores resultados fue la A-2, misma a la que se le adicionaron 1500 ml de agua hasta sobrepasar un poco la humedad óptima y obtener una mezcla pastosa. Este factor es importante ya que para la realización de los demás especímenes; al mezclar el material ya se contaba con esta variable requerida. Este factor hizo resaltar que los valores obtenidos de A no fueran uniformes ya que el espécimen A-2 fue el último en realizarse incluyendo de los especímenes tipo C. Por tanto y debido a los resultados obtenidos podemos señalar que la relación agua-cemento al igual que para las mezclas de concreto, influye de manera directa en la resistencia final del espécimen, ya que, para los demás especímenes al no ser saturados



de agua, la humedad que tenía el material no fue suficiente para la reacción química adecuada del cemento.

Así mismo, podemos observar que en las resistencias del tipo C se presenta un aumento ascendente de acuerdo al tiempo de ensaye; los resultados van desde 343.64 kg. (C-1) a 666.00 kg. (C-2), aumentando casi en un 100% entre ambos y en casi un 55% más entre C-2 y C- 3 de 1016.27 kg. Entonces, al aumentar el tiempo de fraguado del material aumentan sus capacidades mecánicas. Esta conclusión no se prueba en las muestras de tipo A ya que como se mencionó, el espécimen A-2 fue realizado con variables distintas, como el tiempo y el contenido de agua del mismo; siendo el que exalta positivamente con resultados mayores a los demás bloques, con una diferencia de 839.10 kg. De resistencia mayor al bloque A-3, el cual fue el segundo mejor espécimen probado. Entonces, respecto a ésta última variable de contenido de agua, se comprobó mediante la toma de un fragmento del bloque C-1 ensayado (fragmento aleatorio), que a mayor contenido de agua en la mezcla mayor la dureza del elemento, ya que por 14 días se ahogó totalmente dicho fragmento en una charola con agua (Fig. 4.26) y mediante una aplicación manual sencilla de fuerza al elemento se presentó un comportamiento como el de una roca, ya que la muestra se mantuvo completa y sólida, lo cual no ocurrió para los demás fragmentos sin ahogar, ya que éstos presentaban desmoronamientos y más fragmentaciones.

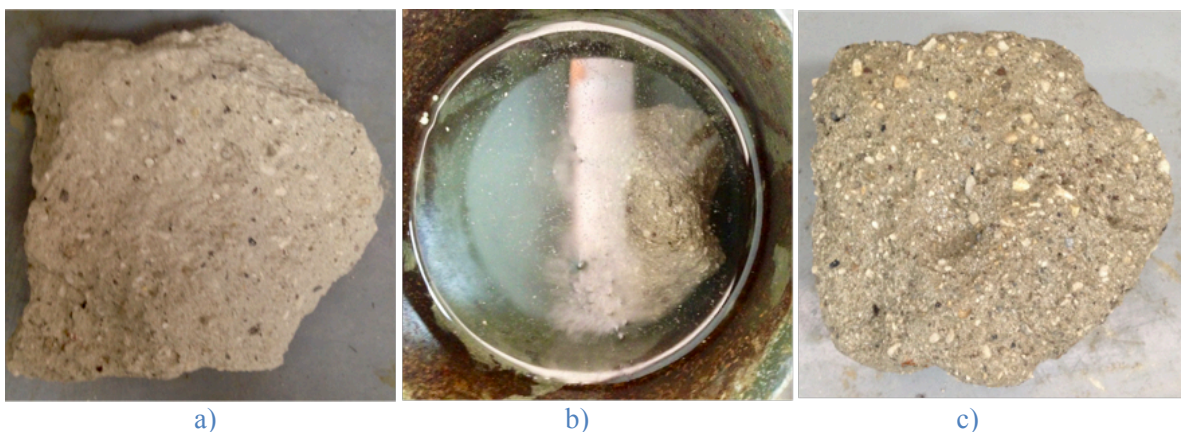


Fig. 4.26: Fragmento del espécimen C-1; a) fragmento seco recién obtenido de la prueba; b) saturación de agua; c) fragmento 14 días después de ahogado.



Finalmente y de acuerdo a bibliografía referenciada, los valores alcanzados para el sistema de tepetate estabilizado con cemento gris de esta investigación, tienen una resistencia a compresión axial y diagonal, mayor que la de los sistemas constructivos hechos con arcillas, por lo que teniendo una adecuada relación de líquidos y secos y a pesar de que las arenas no cuentan con propiedades plásticas, se pueden garantizar resultados aceptables de este sistema constructivo.

4.4 Conclusiones

Para el proceso de experimentación podemos referenciar tres fases para dos pruebas concretas; primero se realizaron pruebas de compresión uniaxial en especímenes de tepetate estabilizado con cemento blanco conocidos como tipo A de 83% Tepetate-17% cemento, B de 88% Tepetate-12% cemento, C de 92% Tepetate- 8% cemento y D 97% Tepetate-3% cemento en moldes cilíndricos, llenados a 2/3 de su capacidad con compactación controlada por distinto número de golpes de acuerdo al diseño de la muestra, en cada tres capas. Luego de realizar de manera aleatoria estos especímenes, fueron sometidos a cargas verticales en la prensa universal del laboratorio de Ingeniería civil del ITESO; sin embargo debido a que los resultados obtenidos fueron directos producto del software Trapezium y no de cálculos para obtener las respectivas curvas de esfuerzo-deformación; se procedió a realizar los mismos especímenes pero ahora con variables de mejora en el diseño del experimento.

Para las segundas pruebas a compresión uniaxial en especímenes de tepetate estabilizado se emplearon cilindros de 10cmx20cm. llenados al 100% de su capacidad, ya que en las pruebas anteriores al no tener un elemento totalmente uniforme por el llenado a 2/3, los especímenes no recibieron las cargas de manera uniformemente distribuida; también la compactación no fue controlada como en los primeros experimentos ya que ahora se realizó por el número de golpes necesarios hasta alcanzar la compactación deseada y por último se hizo un cambio de estabilizador sustituyendo el cemento blanco ahora por cemento gris. Estas muestras también fueron sometidas a pruebas de resistencia a la compresión axial a 7 y 14 días pero ahora no



fueron cabeceados ni se usó neopreno para el ensaye, ya que se buscó medir la deformación real del elemento.

Después, con base en los resultados de los especímenes preliminares se seleccionaron especímenes finales para realizar bloques de tierra compactada los cuales se reservaron a 7, 14 y 28 días, dos para cada tipo de mezcla A y C (6 en total) con el fin de someterlos a cargas de compresión diagonal y conocer su resistencia ante estos esfuerzos para así proponer la mezcla idónea a utilizar en el diseño de muros de la vivienda propuesta en el capítulo posterior.



5. Vivienda De Tepetate Estabilizado Con Revisión Sísmica Simplificada



5.1 Introducción

En este capítulo se presenta el diseño del prototipo de una vivienda unifamiliar la cual se construiría bajo el sistema constructivo de muros de tierra compactada hechos de tepetate estabilizado con el mejor desempeño mecánico, que como se pudo observar en el capítulo anterior corresponden a la mezcla del tipo A de 83% tepetate, 17% cemento y 1500 ml de agua, por lo que se procedió a diseñar una vivienda tradicional la cual según la clasificación de la vivienda por precio promedio del Código de Edificación de Vivienda (CONAVI, 2010), es de una superficie construida promedio de 62.50 m² y con un programa arquitectónico de estancia, comedor, dos a tres recámaras, cocina y baño.

Para el diseño de esta vivienda y de acuerdo a conocimiento de la zona, se seleccionó aleatoriamente una colonia del AMG con disponibilidad de lotes y viviendas construidas con características económicas similares tomando una referencia visual de la zona. Ésta se encuentra ubicada en el oeste del municipio de San Pedro Tlaquepaque, Jal. Conocida como “El Mante” (Fig. 5.1a) en cruce con Periférico Manuel Gómez Morín y Av. Adolfo López Mateos sur, a un costado izquierdo del ITESO.

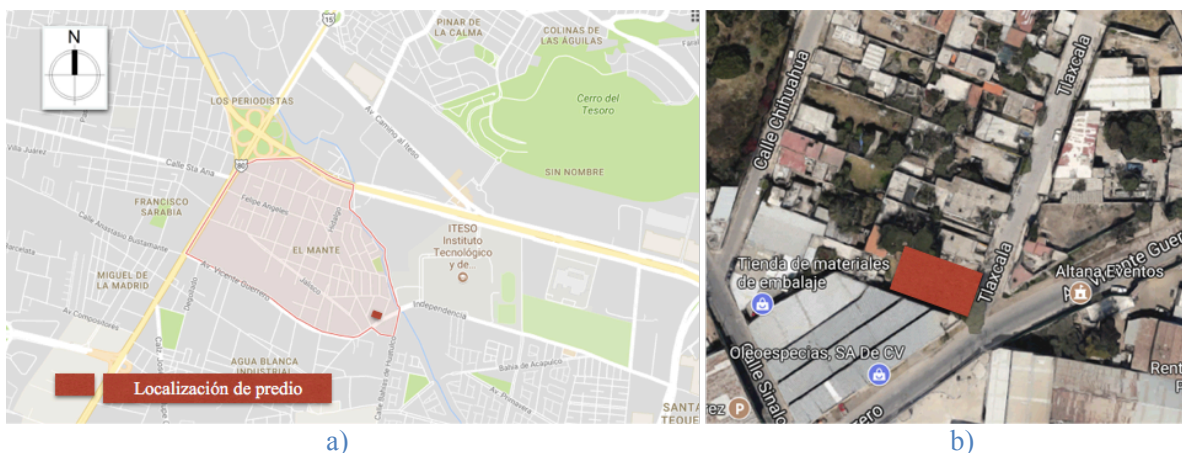
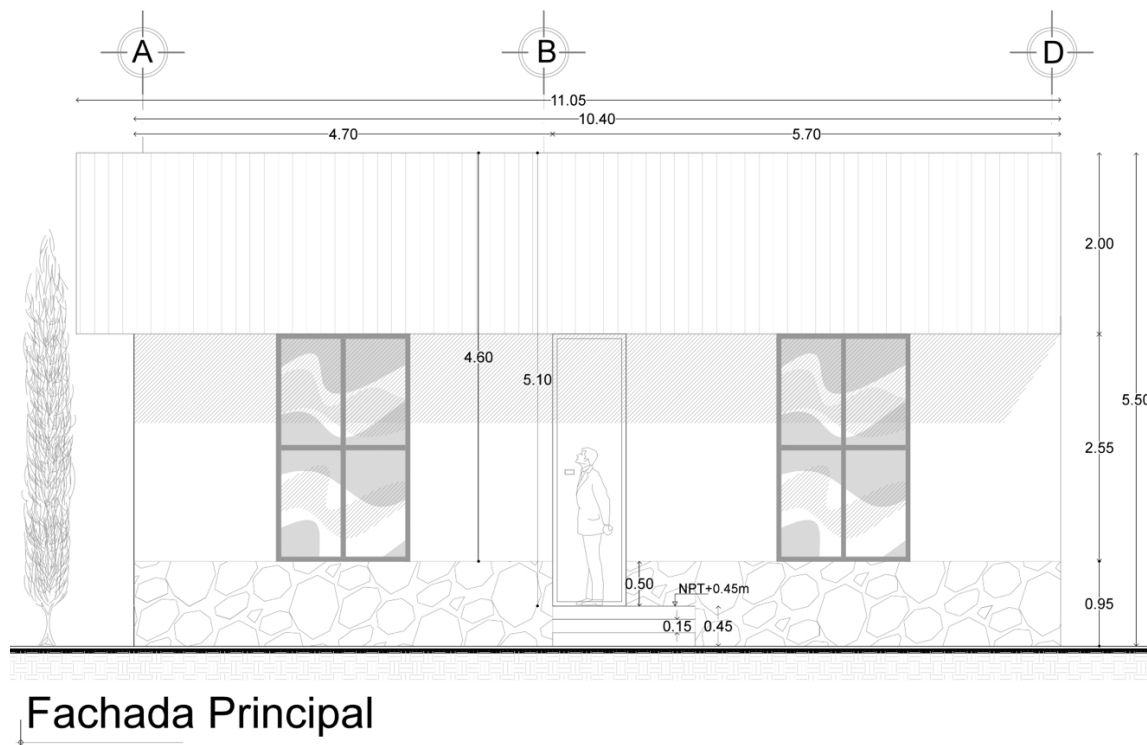


Fig. 5.1: Localización de la propuesta de vivienda; a) colonia El Mante; b) predio seleccionado (Google Maps, 2017).

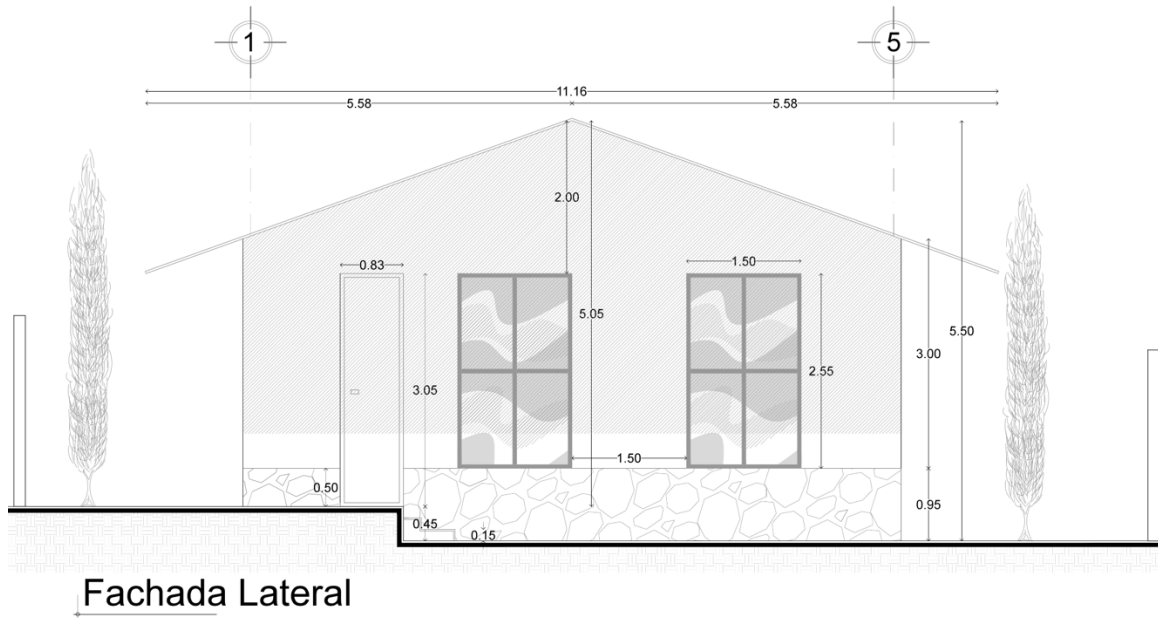
5.2 Propuesta arquitectónica de vivienda

El predio ubicado sobre la calle Tlaxcala en cruce con Av. Independencia (Fig. 5.1b), cuenta con tres colindancias y está orientado hacia el noroeste. Sus dimensiones son de 15.00 m. por 12.00 m. y un área de 180 m² de los cuales, para el diseño arquitectónico de la vivienda propuesta, 79.54 m² son de superficie construida. El programa arquitectónico es de una planta y comprende una estancia, comedor, cocina, dos recámaras con capacidad para una cama matrimonial o dos individuales, baño, cochera para un vehículo, patio de servicio y jardines (Fig. 5.3), diseñada para una familia de máximo cuatro personas: un matrimonio y dos hijos. La estructura de la vivienda es de madera de pino blanco y muros de tierra compactada hechos de tepetate estabilizado con cemento gris de 20 cm. de espesor. Se puede notar en las fachadas que en el desplante del muro se propone un sobrecimiento de 50 cm. de altura, hecho de mampostería ciclópea perimetral con el fin de proteger a los muros de la lluvia y humedad del suelo (Fig. 5.2a y b).



a)

Fig. 5.2: Fachadas de la vivienda propuesta; a) fachada principal (sur)



b)
Fig. 5.2 continuación: Fachadas de la vivienda propuesta; b) fachada lateral (oeste).

En cuanto a la distribución arquitectónica se tomó como referencia la orientación del predio, así como el asoleamiento, dando como preferencia a la zona privada de habitaciones hacia el noreste o salida del sol para que por las tardes, las áreas húmedas como cocina y baño reciban los rayos del atardecer, los cuales no son confortables para climas templados subhúmedos como el del AMG.

Como se puede observar (Fig. 5.2b), la cubierta es de dos losas inclinadas o también conocida como cubierta ligera a dos aguas, partiendo del eje 3 (ver planta de azotea, Fig. 5.4); la elección de este tipo de cubierta fue debido a la distribución de los espacios, así como para el mejor manejo del agua de lluvia, evitar encharcamientos comunes para cubiertas planas y sobre todo como protección de muros, ya que el agua y la humedad sobre éstos son un factor importante que cuidar desde el proceso de diseño. Además, se propone una cubierta ligera de fibrobitumen que permita la distribución perimetral de cargas hacia la estructura de madera.



“Diseño de muros de tepetate con revisión sísmica simplificada para vivienda del Área Metropolitana de Guadalajara”

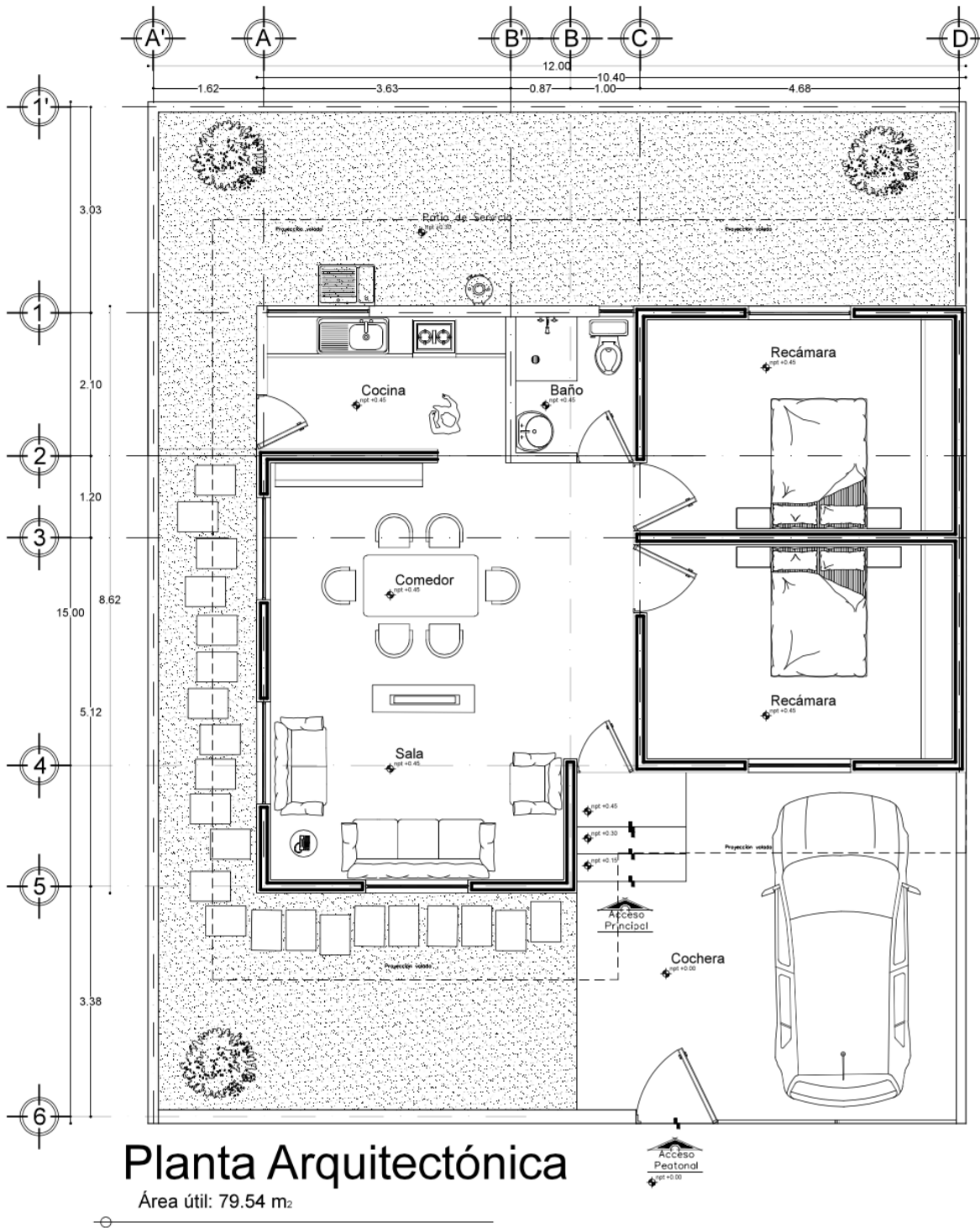
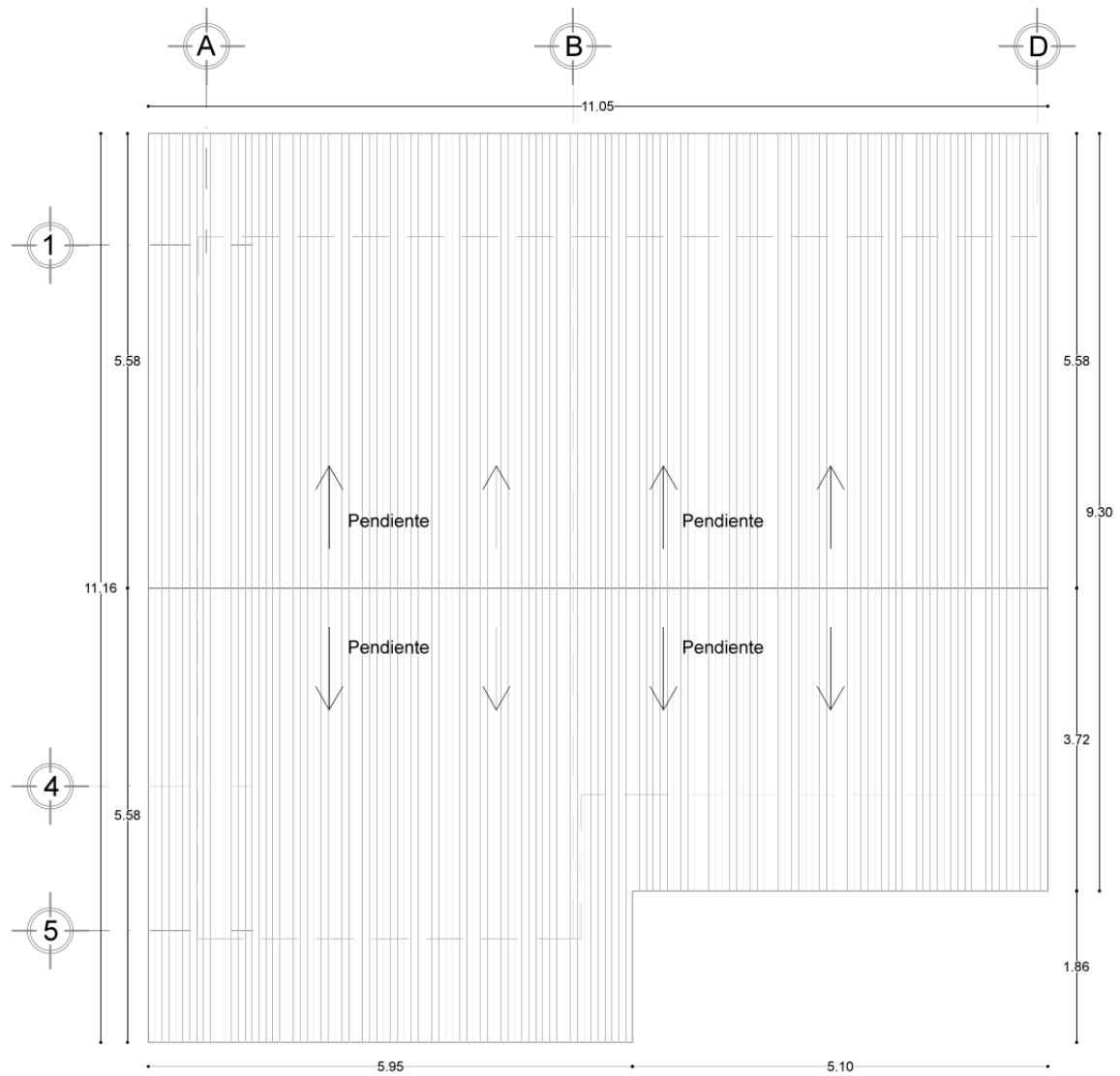


Fig. 5.3: Propuesta arquitectónica de vivienda



Planta de azotea

Área: 113.83 m²

Fig. 5.4: Planta de azotea.



5.3 Análisis del sistema constructivo y distribución de cargas

El sistema constructivo está compuesto principalmente por una estructura de polines de madera de pino y muros de tierra compactada de tepetate estabilizado con cemento gris (Fig. 5.5), mientras que para las áreas húmedas de la vivienda (cocina y baño) se recomienda el uso de tabique de barro recocido artesanal de 7x14x28cm y castillos de armex (K-1) de 15 por 15 cm con aplanado de 1.5 cm de mortero cemento-arena a dos caras, ya que el sistema de muros monolíticos de tepetate puede resultar enigmático al instalar tuberías hidrosanitarias internas, debido a que no se estudió la aplicación de impermeabilizantes adecuados al sistema que garanticen un comportamiento favorable para dichas zonas, por lo que este factor es mencionado posteriormente como una posible ampliación de la investigación en el Capítulo 6.

Para la estructura vertical se proponen polines de madera de pino (P-1) o también conocidos como pies derechos en la jerga habitual de la construcción, de sección 4”x4” *ahogados* en los muros de tierra compactada en intersecciones y cambios de dirección de muros y anclados en el sobrecimiento de mampostería de 0.50 m.,

Para el anclaje de la estructura, se propone una placa metálica que proteja a los polines de humedad que pueda recibir de la mampostería; también se recomienda que dichos polines deban ser protegidos previamente con algún impermeabilizante.

En el extremo superior del pie derecho, se debe colocar una viga de amarre, o cerramiento nombrada como viga collar (VC-1) para darle rigidez a la estructura. Otro detalle adicional es colocar polines de madera (P-2) de 2”x2” en los extremos laterales de los marcos de los vanos, para rigidizar nuevamente la estructura.



“Diseño de muros de tepetate con revisión sísmica simplificada para vivienda del Área Metropolitana de Guadalajara”

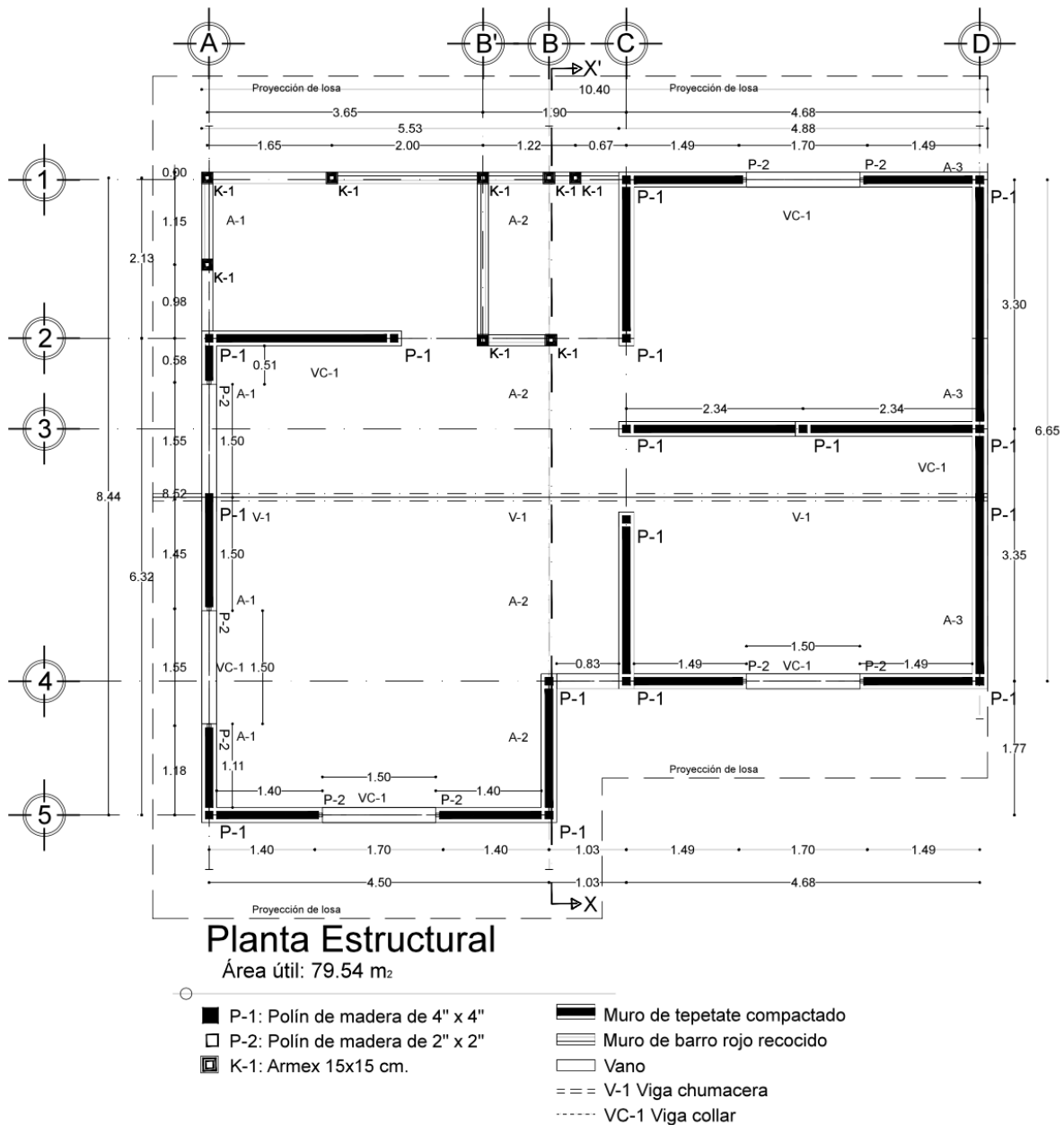
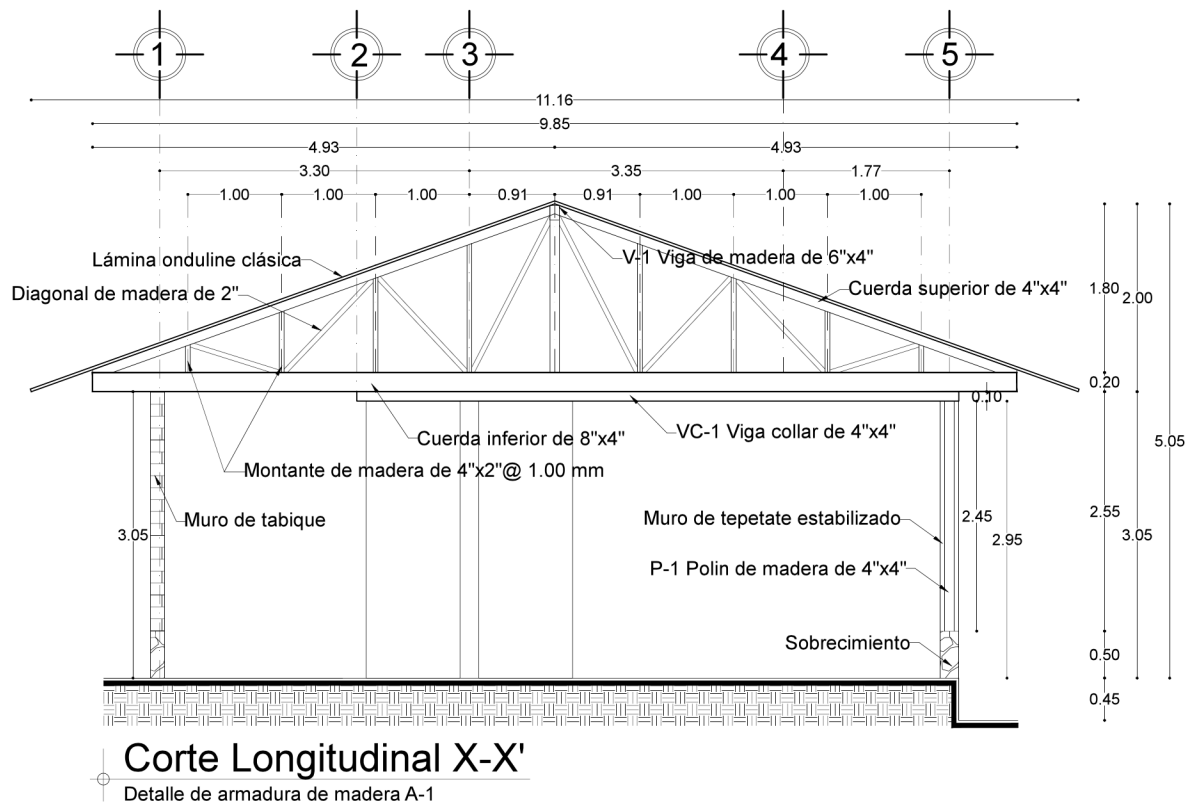


Fig. 5.5: Estructura de muros de tepetate estabilizado y madera.

Para los muros de tepetate estabilizado y debido a su naturaleza monolítica, se necesita una cimbra o molde de madera de rehúso de las dimensiones necesarias (1.50 m. de largo como mínimo), la cual se recomienda desmoldar 24 horas después de la construcción del muro, lo que a diferencia de los muros de tierra compactada con arcillas es que éstas pueden ser

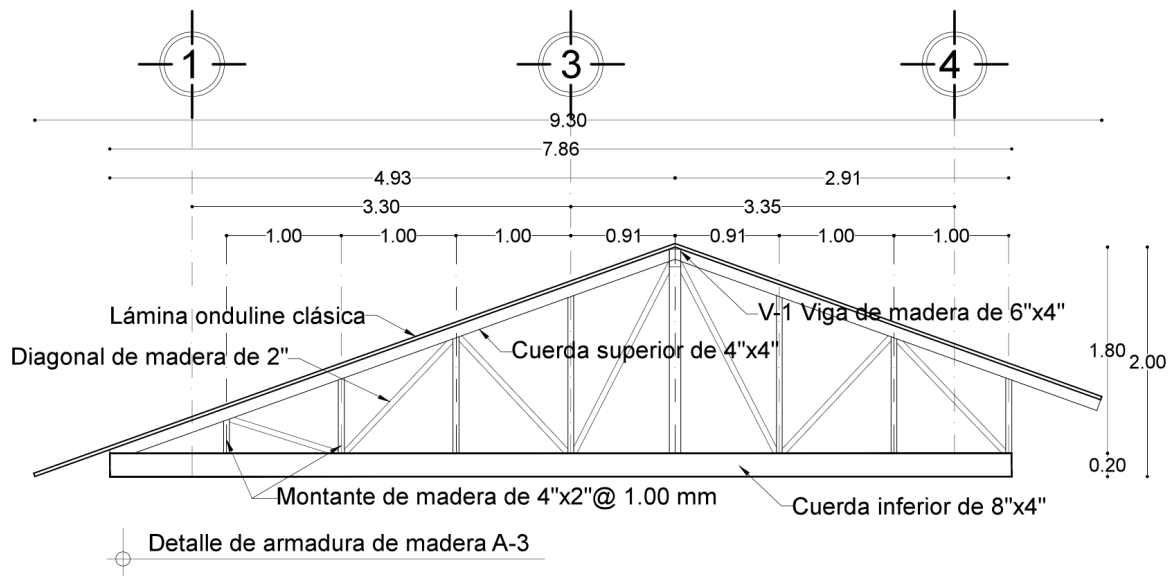
desmoldadas inmediatamente después de la compactación, inclusive con una cimbra móvil debido a su plasticidad característica.

El apisonado de las capas de tepetate puede ser realizado de manera artesanal con pisón manual como el utilizado para los especímenes hechos en laboratorio, o de manera mecánica con un pisón neumático para acelerar procesos constructivos. La altura de cada capa de tepetate deberá ser aproximadamente de 20 cm. Con un número de capas de compactación necesarias hasta reducir 8 cm. La altura agregada; así se repetirá el proceso para cada capa hasta alcanzar la altura deseada de muro.



a)

Fig. 5.6: Armadura de madera; a) armadura A-1 sobre ejes A y B



b)

Fig. 5.6 (continuación): Armadura de madera; b) armadura A-3 sobre eje D

Respecto a la cubierta, se propone una lámina conocida como “Onduline clásica”, de 2.00x0.95m. y 3.00 mm de espesor y 7.00 kg. por m² (Fig. 5.7) la cual es totalmente impermeable y altamente aislante de ruido y temperatura según sus especificaciones. Es sostenida por tres armaduras de madera de pino (A-1, A-2 y A-3) compuestas por una cuerda inferior de 8”x4”, una cuerda superior de 4”x4”, montantes de 4”x2” @ 1.00 m y diagonales de 2” (Ver cortes de armadura Fig. 5.6a y b), además de una viga chumacera (V-1) de 6”x4” y viguetas o travesaños de 4”x2” a los cuales se ancla la lámina.

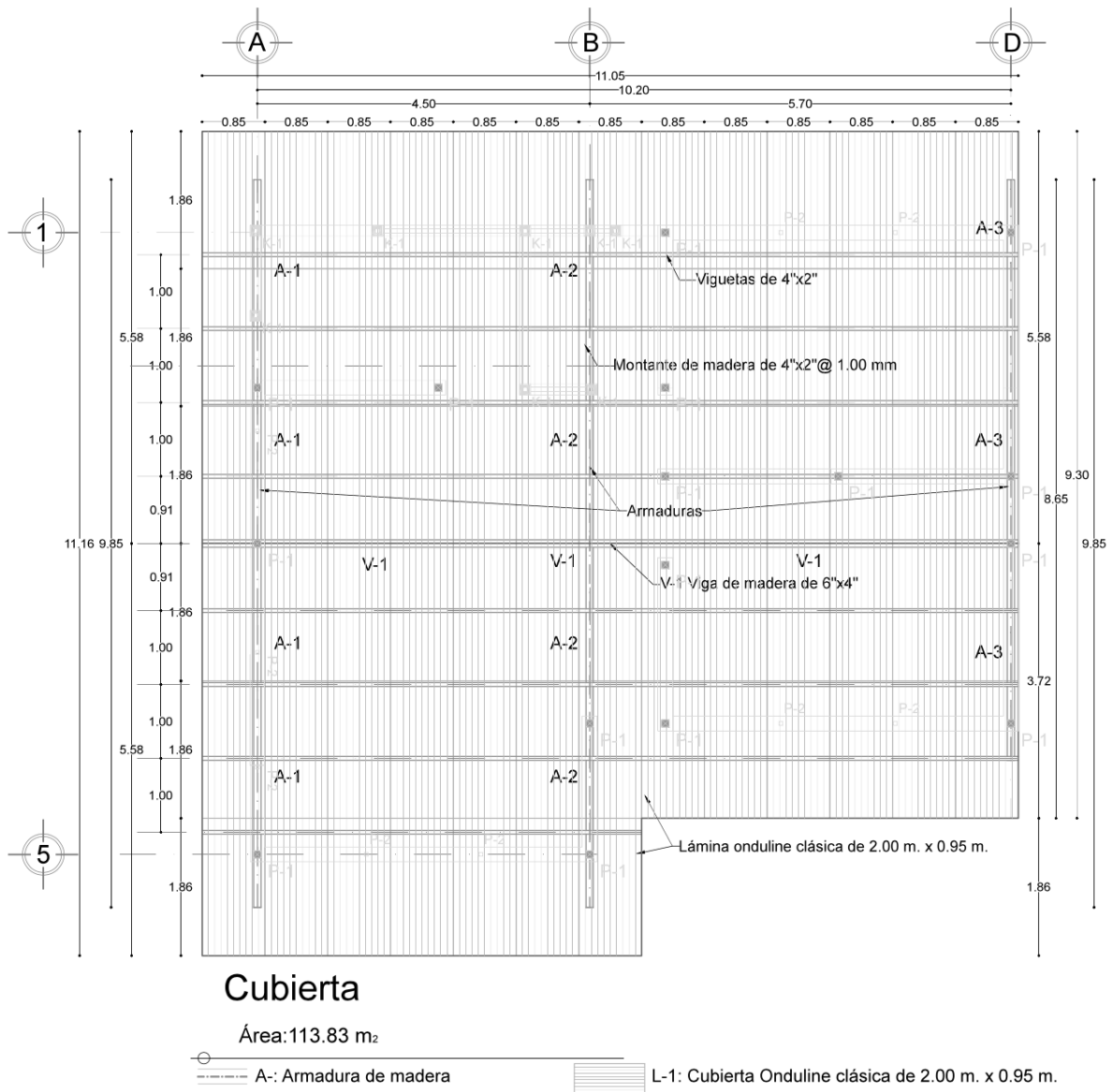


Fig. 5.7: Estructura de cubierta de lámina

Después del diseño de la vivienda, se calculó el peso total de la estructura con el fin de distribuir las cargas verticales recibidas, hacia los muros. El peso total de la estructura fue de 28,355.51 kg. para una cubierta de 113.83 m² y un área útil de 79.54 m² (Tabla 5.1).



“Diseño de muros de tepetate con revisión sísmica simplificada para vivienda del Área Metropolitana de Guadalajara”

Tabla 5.1: Peso total de la estructura

		Peso total de la estructura									
Nombre del elemento	Componente	ancho	h	Área	l	Piezas	ml.	Peso vol.	WPP	Peso total	
		cm.	cm.	cm ²	m ²	Ml	Unidad	Totales	Kg/m ³	Kg	
		Cubierta									
Losa	Lámina onduline	0.95		0.632	113.83	2.00	71.94		7.00	503.58	
	Pija galvanizada de 3”		Pza/ m ²	19.00			1366.87		0.02	27.34	
∑ cubierta										530.92	
		Elementos tipo barra									
Armadura A-1 y A-2	Cuerda inferior de 8” por 4”	10.16	20.32	206.45	0.0206	9.85	2.00	19.70	430.00	8.8774	174.88
	Cuerda superior de 4” por 4”	10.16	10.16	103.23	0.0103	5.01	4.00	20.04	430.00	4.4387	88.95
	Montante de 4” por 2”	5.08	10.16	51.61	0.0052	8.25	2.00	16.50	430.00	2.2194	36.62
	Diagonales de 2”	5.08	5.08	25.81	0.0026	11.20	2.00	22.40	430.00	1.1097	24.86
Total (A-1+A-2)										325.31	
Total (C/u)										162.66	
Armadura A-3	Cuerda inferior de 8” por 4”	10.16	20.32	206.45	0.0206	7.86	1.00	7.86	430.00	8.8774	69.78
	Cuerda superior de 4” por 4”	10.16	10.16	103.23	0.0103	8.96	1.00	8.96	430.00	4.4387	39.77
	Montante de 4” por 2”	5.08	10.16	51.61	0.0052	7.96	1.00	7.96	430.00	2.2194	17.67
	Diagonales de 2”	5.08	5.08	25.81	0.0026	10.20	1.00	10.20	430.00	1.1097	11.32
Total										138.53	
Viga chumacera V-1	Viga de 6” por 4”	10.16	15.24	154.84	0.0155	11.05	1.00	11.05	430.00	6.6581	73.57
Viga collar	Viga de 4” por 4”	10.16	10.16	103.23	0.0103	37.24	1.00	37.24	430.00	4.4387	165.30
Viguetas	Viguetas de 4” por 2”	5.08	10.16	51.61	0.0052	11.05	7.00	77.35	430.00	2.2194	171.67
		5.08	10.16	51.61	0.0052	5.95	1.00	5.95	430.00	2.2194	13.21
Estructura vertical	Polin de 4” por 4”	10.16	10.16	103.23	0.0103	2.45	15.00	36.75	430.00	4.4387	163.12
Refuerzo en vanos	Polin de 2” por 2”	5.08	5.08	25.81	0.0026	2.45	9.00	22.05	430.00	1.1097	24.47
Total										611.33	
Castillo K-1	Armex de 15 por 15 cm.	15	15	225	0.0225	3.05	8	24.4	7.92	0.1782	
∑ de elementos tipo barra										1075.18	
		Elementos tipo placa									
Muros	Muros de tepetate estabilizado	0.20	2.45	m.	80.68			32.93	1312.7100	262.54	21181.49
	Muros de tabique	0.14	2.45	m.	0.00			7.73	2100	294.00	5567.92
∑ de elementos tipo placa										26749.41	
Peso total de la estructura=										28355.51	

Así entonces, se procedió a seccionar la cubierta en tres áreas tributarias para conocer la carga total de cada una (Fig. 5.8).

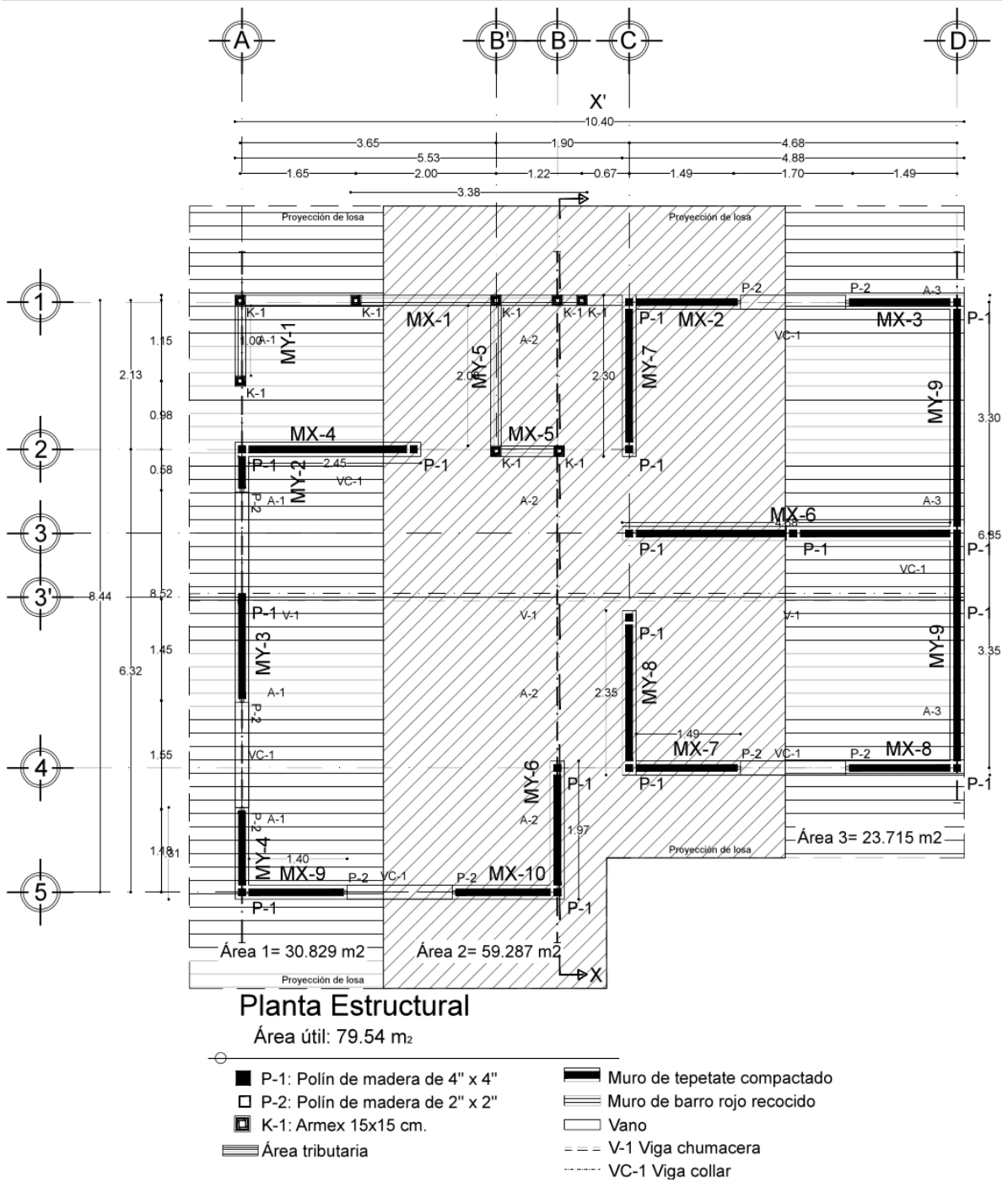


Fig. 5.8: Cargas por áreas tributarias; planta de estructura con nomenclatura de muros sobre ejes correspondientes.



Como primer paso, se calculó el peso total de la cubierta en la cual se incluye el peso de las láminas, el peso de las pijas de amarre y el peso de las viguetas a las que éstas van ancladas, dando como resultado 715.79 kg de peso total de cubierta; entonces dividiendo éste sobre el área total de 113.83 m² se obtuvo el peso por metro cuadrado del techo, el cual es de 6.288 kg. Así, al conocer el área de cada sección de cubierta se multiplicó el peso por metro cuadrado obtenido para así conocer el peso total de cada área. Una vez conocido este peso, se sumó toda la carga recibida por cada armadura; contando su peso propio más el peso de la cubierta (la armadura A-1 carga al área tributaria 1, la armadura A-2 al área tributaria 2 y la armadura A-3 al área 3) y más el peso de la viga V-1 (viga chumacera) de acuerdo a su longitud correspondiente. Entonces el área 1 de 30.829 m² obtuvo un peso de 193.861 kg., el área 2 de 59.287 m² obtuvo 327.812 kg de peso y el área 3 fue de 23.715 m² y 149.126 kg. (para mejor comprensión, véase la [Tabla 5.2](#))

Posteriormente, se nombraron los muros sobre sus respectivos ejes en X y Y (muro 1 sobre eje X: MX-1; muro 1 sobre eje Y: MY-1 y así sucesivamente) para identificarlos y conocer la carga total de cada uno, siendo ésta el resultado de la suma de la carga propia del muro más la carga de viga collar y la carga de cubierta, sin embargo como se puede observar en la [Tabla 5.3](#), así como en la [Fig. 5.9](#); de 19 muros totales incluyendo a los de tabique de barro, solo 9 son los que se distribuyen el peso total de la cubierta.



Fig. 5.9: Muros de carga



“Diseño de muros de tepetate con revisión sísmica simplificada para vivienda del Área Metropolitana de Guadalajara”

Tabla 5.2: Carga total en áreas tributarias

Nombre del elemento	Componente	ancho		h		Área		l	Piezas	Vol	Peso vol.	WPP	Peso total	
		in.	cm.	in.	cm.	cm ²	m ²							MI
Armadura A-1	Cuerda inferior de 8" por 4"	4	10.16	8	20.32	206.45	0.0206	9.85	1.00	9.85	0.20	430.00	8.8774	87.44
	Cuerda superior de 4" por 4"	4	10.16	4	10.16	103.23	0.0103	5.01	2.00	10.02	0.10	430.00	4.4387	44.48
	Montante de 4" por 2"	2	5.08	4	10.16	51.61	0.0052	8.25	1.00	8.25	0.04	430.00	2.2194	18.31
	Diagonales de 2"	2	5.08	2	5.08	25.81	0.0026	11.20	1.00	11.20	0.03	430.00	1.1097	12.43
Total													162.66	
Viga chumacera V-1	Viga de 6" por 4"	4	10.16	6	15.24	154.84	0.0155	2.76	1.00	2.76		430.00	6.6581	
	Área tributaria A-1						30.829	2.76					6.288	193.853
Peso de viga chumacera V-1													18.3762	
Carga total de armadura A-1 por área tributaria 1													374.89	
Armadura A-2	Cuerda inferior de 8" por 4"	4	10.16	8	20.32	206.45	0.0206	9.85	1.00	9.85	0.20	430.00	8.8774	87.44
	Cuerda superior de 4" por 4"	4	10.16	4	10.16	103.23	0.0103	5.01	2.00	10.02	0.10	430.00	4.4387	44.48
	Montante de 4" por 2"	2	5.08	4	10.16	51.61	0.0052	8.25	1.00	8.25	0.04	430.00	2.2194	18.31
	Diagonales de 2"	2	5.08	2	5.08	25.81	0.0026	11.20	1.00	11.20	0.03	430.00	1.1097	12.43
Total													162.66	
Viga chumacera V-1	Viga de 6" por 4"	4	10.16	6	15.24	154.84	0.0155	5.74	1.00	5.74	0.09	430.00	6.6581	
	Área tributaria A-2						59.287	5.74					6.288	372.797
Peso de viga chumacera V-1													38.2172	
Carga total de armadura A-2 por área tributaria 2													573.670	
Armadura A-3	Cuerda inferior de 8" por 4"	4	10.16	8	20.32	206.45	0.0206	7.86	1.00	7.86	0.16	430.00	8.8774	69.78
	Cuerda superior de 4" por 4"	4	10.16	4	10.16	103.23	0.0103	8.96	1.00	8.96	0.09	430.00	4.4387	39.77
	Montante de 4" por 2"	2	5.08	4	10.16	51.61	0.0052	7.96	1.00	7.96	0.04	430.00	2.2194	17.67
	Diagonales de 2"	2	5.08	2	5.08	25.81	0.0026	10.20	1.00	10.20	0.03	430.00	1.1097	11.32
Total													138.53	
Viga chumacera V-1	Viga de 6" por 4"	4	10.16	6	15.24	154.84	0.0155	2.55	1.00	2.55		430.00	6.6581	
	Área tributaria A-3						23.715	2.55					6.288	149.120
Peso de viga chumacera V-1													16.9780	
Carga total de armadura A-3 por área tributaria 3													304.630	
Σ Cargas totales de armaduras													1253.185	

Para esta distribución y debido a que ésta es una cubierta inclinada a dos aguas, cada carga total de la misma se repartió en dos puntos (uno para cada extremo de la armadura) y de acuerdo a los muros encontrados, se volvió a repartir la carga restante entre los elementos, según fue el caso (Véase Tabla 5.3).



“Diseño de muros de tepetate con revisión sísmica simplificada para vivienda del Área Metropolitana de Guadalajara”

Tabla 5.3: Distribución de cargas en muros y comprobación de carga total de la estructura

Distribución de cargas en muros												
Dirección	Nombre	Material	Longitud l (m)	Ancho t (m)	Altura H (m)	Área (m ²)	Área de sección (m ²)	Peso propio (Kg/m ²)	W / muro (Kg)	W/ viga collar (Kg)	W cubierta (Kg)	Carga total (Kg)
EJE X	MX-1	Tabique de barro	3.38	0.14	2.45	8.28	0.47	294.00	2434.61	0.00	286.84	2721.449
	MX-2	Tepetate	1.69	0.20	2.45	4.14	0.34	262.54	1087.06	7.50	0.00	1094.557
	MX-3	Tepetate	1.49	0.20	2.45	3.65	0.30	262.54	958.41	6.61	76.16	1041.181
	MX-4	Tepetate	2.65	0.20	2.45	6.49	0.53	262.54	1704.55	11.76	0.00	1716.316
	MX-5	Tabique de barro	0.90	0.14	2.45	2.21	0.13	294.00	648.27	3.99	0.00	652.265
	MX-6	Tepetate	4.68	0.20	2.45	11.47	0.94	262.54	3010.28	20.77	0.00	3031.057
	MX-7	Tepetate	1.49	0.20	2.45	3.65	0.30	262.54	958.40	6.61	0.00	965.016
	MX-8	Tepetate	1.49	0.20	2.45	3.65	0.30	262.54	958.40	6.61	76.16	1041.173
	MX-9	Tepetate	1.40	0.20	2.45	3.43	0.28	262.54	900.51	6.21	93.72	1000.448
	MX-10	Tepetate	1.40	0.20	2.45	3.43	0.28	262.54	900.51	6.21	143.42	1050.144
	Subtotal Muros X		20.57			Total=	3.86				Subtotal	14313.605
EJE Y	MY-1	Tabique de barro	1.30	0.14	2.45	3.19	0.18	294.00	936.39	0.00	187.44	1123.833
	MY-2	Tepetate	0.51	0.20	2.45	1.25	0.10	262.54	328.04	2.26	0.00	330.307
	MY-3	Tepetate	1.55	0.20	2.45	3.80	0.31	262.54	997.00	6.88	0.00	1003.876
	MY-4	Tepetate	1.31	0.20	2.45	3.21	0.26	262.54	842.62	5.81	93.72	942.158
	MY-5	Tabique de barro	2.15	0.14	2.45	5.27	0.30	294.00	1548.65	0.00	0.00	1548.645
	MY-6	Tepetate	1.97	0.20	2.45	4.83	0.39	262.54	1267.15	8.74	143.42	1419.311
	MY-7	Tepetate	2.10	0.20	2.45	5.15	0.42	262.54	1350.77	9.32	0.00	1360.090
	MY-8	Tepetate	2.35	0.20	2.45	5.76	0.47	262.54	1511.57	10.43	0.00	1522.005
	MY-9	Tepetate	6.85	0.20	2.45	16.78	1.37	262.54	4406.08	30.41	152.31	4588.798
		Subtotal Muros Y		20.09			Total=	3.81				Subtotal
Σ Carga total (Kg)=											28152.627	

Luego se procedió a revisar cada muro por carga vertical; primero se aplicó la revisión de la relación de esbeltez la cual indica que la altura entre el espesor debe ser menor de 20, este factor es muy importante en el diseño de mampostería ya que el efecto de la esbeltez está relacionado directamente con la resistencia en muros, así como su capacidad de deformación; al hacer esta sencilla operación se demostró que todos los muros pasaron esta revisión. Después a la carga total de cada muro, se aplicó el factor de seguridad (FS) de 1.4 indicado en las Normas Técnicas Complementarias de la Ciudad de México de diseño de mampostería para obtener la carga última (PU), mientras que para la carga resistente conocida como (PR) se multiplica el factor de resistencia (FR) de 0.6 para muros confinados por el factor FE de 0.7 para muros interiores y 0.6 para muros perimetrales; esto a su vez multiplicado por la suma de la resistencia a la compresión de la mampostería ($f \cdot m$) más 4 kg/cm^2 , todo



multiplicado por el área de la sección transversal (Lxt); es decir $PR=(FR \times FE (f^*m+ 4 \text{ kg/cm}^2) A_{transv})$. Al obtener esta carga resistente, se hace la comparación de ésta y la carga última (PU); si PU es menor a PR, el muro pasa satisfactoriamente por carga vertical. Entonces, podemos sintetizar los resultados en la **Tabla 5.4** la cual indica que todos los muros diseñados ya sean de tabique de barro de 14 cm de ancho y de tepetate estabilizado de 20 cm de ancho y de 2.45 metros de altura para ambos materiales, pasaron por resistencia a carga vertical.

Tabla 5.4: Revisión de resistencia de muros por carga vertical

Revisión de resistencia de muros por carga vertical													
Dirección	Nombre	Tipo de muro	Material	Longitud l (m)	Ancho t (m)	Altura H (m)	Área de sección (m ²)	Carga total (Kg)	Relación esbeltez H/t <20	Pasa revisión	Carga última PU (Kg)	Carga resistente PR (Kg)	Pasa carga vertical PU < PR
EJE X	MX-1	Perimetral	Tabique de barro	3.38	0.14	2.45	0.47	2721.449	17.50	Sí	3810.03	32366.88	Sí pasa
	MX-2	Perimetral	Tepetate	1.69	0.20	2.45	0.34	1094.557	12.25	Sí	1532.38	26964.29	Sí pasa
	MX-3	Perimetral	Tepetate	1.49	0.20	2.45	0.30	1041.181	12.25	Sí	1457.65	23773.25	Sí pasa
	MX-4	Interior	Tepetate	2.65	0.20	2.45	0.53	1716.316	12.25	Sí	2402.84	49328.16	Sí pasa
	MX-5	Interior	Tabique de barro	0.90	0.14	2.45	0.13	652.265	17.50	Sí	913.17	10054.80	Sí pasa
	MX-6	Interior	Tepetate	4.68	0.20	2.45	0.94	3031.057	12.25	Sí	4243.48	87115.392	Sí pasa
	MX-7	Perimetral	Tepetate	1.49	0.20	2.45	0.30	965.016	12.25	Sí	1351.02	23773.248	Sí pasa
	MX-8	Perimetral	Tepetate	1.49	0.20	2.45	0.30	1041.173	12.25	Sí	1457.64	23773.248	Sí pasa
	MX-9	Perimetral	Tepetate	1.40	0.20	2.45	0.28	1000.448	12.25	Sí	1400.63	22337.280	Sí pasa
	MX-10	Perimetral	Tepetate	1.40	0.20	2.45	0.28	1050.144	12.25	Sí	1470.20	22337.280	Sí pasa
EJE Y	MY-1	Perimetral	Tabique de barro	1.30	0.14	2.45	0.18	1123.833	17.50	Sí	1573.37	12448.80	Sí pasa
	MY-2	Perimetral	Tepetate	0.51	0.20	2.45	0.10	330.307	12.25	Sí	462.43	8137.15	Sí pasa
	MY-3	Perimetral	Tepetate	1.55	0.20	2.45	0.31	1003.876	12.25	Sí	1405.43	24730.56	Sí pasa
	MY-4	Perimetral	Tepetate	1.31	0.20	2.45	0.26	942.158	12.25	Sí	1319.02	20901.31	Sí pasa
	MY-5	Interior	Tabique de barro	2.15	0.14	2.45	0.30	1548.645	17.50	Sí	2168.10	24019.80	Sí pasa
	MY-6	Perimetral	Tepetate	1.97	0.20	2.45	0.39	1419.311	12.25	Sí	1987.04	31431.744	Sí pasa
	MY-7	Interior	Tepetate	2.10	0.20	2.45	0.42	1360.090	12.25	Sí	1904.13	39090.240	Sí pasa
	MY-8	Interior	Tepetate	2.35	0.20	2.45	0.47	1522.005	12.25	Sí	2130.81	43743.840	Sí pasa
	MY-9	Perimetral	Tepetate	6.85	0.20	2.45	1.37	4588.798	12.25	Sí	6424.32	109293.120	Sí pasa

5.4 Revisión sísmica de vivienda e índice de área resistente a sismo

Para este apartado se consideró el método simplificado de revisión sísmica e índice de área resistente a sismo desarrollado por **Meli (1998)**, el método se basa en comparar la fuerza lateral total impuesta por el sismo y la capacidad que tiene la estructura para resistirla. Este método arroja un panorama general de la resistencia ante sismos que presenta la construcción, así como la seguridad del mismo. Entonces, para conocer la fuerza sísmica total (V_A) se



puede considerar al peso total de la estructura (W) multiplicada por el coeficiente sísmico (c o c_s), $V_A=cW$; esta fuerza es igual para cada dirección del sismo, sin embargo la resistencia del edificio es distinta para sus ejes; así la fuerza sísmica resistente (V_R) es igual a la suma de las contribuciones de los muros alineados en la dirección en la que se revisa la capacidad sísmica por el área transversal del muro (A_m) y por el esfuerzo cortante resistente del sistema (V_m); es decir $V_R=\sum A_m V_m$.

Entonces, de acuerdo al manual de diseño por sismo de la [Comisión Federal de Electricidad](#) de 1993, (CFE, 1993) se obtiene el coeficiente sísmico a partir de la fórmula $C.S=C/Q$, donde C es un factor de diseño de 0.64 para estructuras del grupo B correspondientes a un suelo tipo II, como el del AMG; conocido como suelo de transición de suelo rocoso a suelo blando (El tipo I es suelo rocoso y el tipo III es suelo blando), localizado en una zona sísmica tipo C; Q tiene un valor de 1 para el material tepetate. Así el coeficiente sísmico c , es de 0.64. Por lo tanto, asumiendo que las fuerzas sísmicas actuantes son iguales en ambas direcciones (en el eje X y en el eje Y); la fuerza sísmica total (V_A) es de 18,147.526 kg. ($V_A=V_x=V_y= cW$; $V_x=V_y= 0.64*28,355.51$ kg).

Para el cálculo de las fuerzas sísmicas resistentes (V_R) en dirección al eje X, el resultado fue de 131,453.38 kg, obtenido del producto de la suma de las áreas de las secciones transversales de los muros sobre el eje X ($38,572.00$ cm²) por el esfuerzo cortante resistente del tepetate, el cual es de 3.41 kg/cm² obtenido a los 14 días de fraguado, obtenido previamente; así $V_{R_x}=(38,572.00$ cm²)(3.41 kg/cm²)= $131,453.38$ kg. En dirección al eje Y, se obtuvo un valor de $129,878.88$ kg, obtenido de la misma manera que para el eje X; donde $V_{R_y}=(38,110.00$ cm²)(3.41 kg/cm²).

De esta forma, y de acuerdo a la relación $V_A < V_R$; y como V_A es igual en X y en Y; V_A de $18,147.526$ Kg < a V_R de $131,453.38$ Kg, los muros sobre el eje X sí pasan por revisión sísmica simplificada. Se aplicó la misma relación para referenciar la revisión del eje Y; donde $V_A < V_R$, es decir, $18,147.526$ Kg < a V_{R_y} de $129,878.88$ Kg, así se demuestra que los muros sobre el eje Y también pasan la revisión sísmica. Por lo tanto, la vivienda de 79.54 m² de



superficie construida propuesta de un sistema constructivo de muros de tepetate estabilizado con cemento gris, sí pasa la revisión por sismo en ambas direcciones sobre X y Y, teniendo un F.S. de 7.244 sobre el eje X y de 7.16 para el eje Y.

Como resultados adicionales a esta revisión por sismo simplificada, se procedió a hacer los mismos cálculos pero ahora tomando escenarios distintos para explorar aún más la capacidad del sistema constructivo ante estos eventos. De esta forma al hacer la misma revisión pero ahora solo aplicada a muros de tierra (sin contar los muros de tabique de barro), se obtuvieron los siguientes resultados: la fuerza sísmica resistente sobre el eje X contando solo la sumatoria de las sección transversal de muros de tepetate, obtuvo un resultado de 111,032.64 kg; entonces si $V_A = 18,147.526 \text{ Kg} < V_{RX\text{Tepetate}} 111,032.64 \text{ Kg}$, los muros de tepetate sí pasan la revisión por sismo en este eje X, con un factor de seguridad (F.S) de 6.118 respecto al eje Y, el $V_{RY\text{Tepetate}}$ fue igual a 113,418.24 Kg, por lo que los muros sobre este eje también pasan la revisión con un F.S. de 6.250.



6. Sinopsis Del TOG



6.1 Resumen del TOG

Hace algunos años, los materiales de construcción estaban ligados directamente a su entorno, la materia prima natural se aprovechaba localmente y el consumo de energía era reducido. Aunado a esto y debido al esperado aumento demográfico que irá ocurriendo con los años, es necesario el desarrollo de tecnología que emplee materiales locales con un grado menor de impacto al medioambiente. Por tanto, el presente Trabajo de Obtención de Grado toma como primicia este hecho, por lo que debido a la disponibilidad del tepetate, suelo arenoso del AMG; se propone un sistema constructivo de muros de tierra compactada para su aplicación en vivienda tradicional, el cual tenga mejores características mecánicas respecto a otras técnicas de construcción con tierra.

Este sistema constructivo de tepetate estabilizado, en términos de sustentabilidad ambiental es más amigable con el medio ambiente que otros procesos porque el tepetate es un material natural que puede ser extraído del sitio e inmediatamente ser utilizado, no necesita de procesos industrializados ni agresivos para su obtención, así como de tratamientos. El cemento sí es un material industrializado pero como su función es de estabilizador, se utiliza con una proporción baja; y el agua se añade solo si el tepetate no cuenta ya con la humedad requerida, ya que en la tierra compactada no necesitas un alto contenido de ésta a diferencia de la técnica de tierra vertida.

En la sustentabilidad económica, los muros de tepetate son de menor costo también en comparación con otros sistemas como el de adobe o la mampostería de tabique de barro, ya que lo costoso del sistema puede ser la cimbra y no el material como tal. En términos sociales, el sistema propuesto puede estar al alcance de cualquier usuario mediante construcciones sencillas autoconstruibles, hasta con diseños más complejos y modernos que requieran cierto grado de especialización en el diseño o en la mano de obra. Así entonces, tomando la base de la construcción vernácula de construir con lo “que se tiene en casa” se busca abonar a la sustentabilidad, con un sistema constructivo de menor impacto ambiental, socialmente justo y económicamente viable.



La investigación llevó a cabo diversas técnicas de recolección de información, siendo la técnica experimental de laboratorio la de mayor jerarquía y grado de profundidad. Para este proceso se diseñaron cuatro tipos de mezclas: tipo A de 83% Tepetate-17% cemento, B de 88% Tepetate-12% cemento, C de 92% Tepetate- 8% cemento y D 97% Tepetate-3% cemento, las cuales se hicieron en moldes cilíndricos de 30cm de altura llenados a 2/3 de la misma. Luego fueron sometidos a cargas de compresión axial al cumplir una antigüedad de 7, 14 y 28 días, respectivamente. Para estos especímenes se utilizó cemento blanco y tepetate blanco con fines estéticos, considerándose a estos como parte de la primera fase de experimentación.

Sin embargo, ya que los resultados obtenidos fueron producto del software utilizado y no de cálculos para obtener sus respectivas curvas de esfuerzo- deformación; se procedió a realizar nuevamente los mismos especímenes considerándose como una segunda fase de experimentación pero ahora modificando algunas variables observadas como puntos de mejora y así conocer la respuesta del sistema ante dichos cambios.

Las variables fueron el cambio de los moldes, de estabilizador ahora usando cemento gris por cuestiones económicas, así como el número de capas de compactación y golpes controlados compactando ahora en diversas capas hasta alcanzar la altura total del molde, con diferentes golpes de compactación para cada una. La última variable fue que los componentes fueron mezclados a mano, en charolas a diferencia de la primera fase de experimentación con cemento blanco, los cuales fueron mezclados en olla.

Luego de realizar los ensayos respectivos a 7 y 14 días, así como la obtención de las curvas de esfuerzo-deformación correspondientes; los resultados arrojaron que las muestras con mejores propiedades mecánicas fueron las del tipo A y C, por lo que con base en dichos resultados, se procedió a la tercera fase de experimentación, donde se realizaron especímenes de bloques de tierra compactada del tipo A y C para probar ahora a compresión diagonal, así como dos especímenes cilíndricos más los cuales se ensayaron ahora a 28 días.



Una vez finalizados los procesos experimentales y conocido el espécimen ideal para el sistema de muros de tierra compactada correspondiente a 14 días de fraguado; se diseñó una vivienda unifamiliar de 79.54 m² de superficie construida, con un programa arquitectónico de una planta con estancia, comedor, cocina, dos recámaras, baño, cochera, patio de servicio y jardines. Su estructura está compuesta principalmente por polines de madera de pino y muros de tierra compactada de tepetate estabilizado y cubierta ligera de lámina de fibrobitumen. Al conocer estos componentes, se realizó un cálculo de cargas así como la distribución de las mismas sobre los muros, para posteriormente hacer una revisión simplificada de diseño ante sismos, misma que la vivienda pasó satisfactoriamente en ambas direcciones sobre X y Y, teniendo un Factor de Seguridad (F.S) de 7.244 sobre el eje X y de 7.16 para el eje Y.

6.2 Conclusiones generales

Para las mezclas de tepetate y cemento gris ensayados a compresión axial a 7 y 14 días; los resultados mayores obtenidos para ambos casos, fueron de la mezcla tipo A (83% tepetate-17% cemento). Es importante señalar, que para la realización de esta mezcla y de acuerdo a la prueba de campo de humedad óptima, el tepetate ya contaba con esta variable desde el principio del proceso de experimentación, entonces no se agregó más agua. También, al imitar procesos artesanales conocidos en las técnicas de construcción con tierra, éstos pueden ser realizados sin conocimiento específico o complejo por cualquier usuario, pero como desventaja observada del mismo punto, es que al imitar estos procesos no se midió la humedad del material, por lo que como punto de atención y recomendación, es importante realizar una prueba de contenido de la misma, para conocer dicho factor y presentar un proceso más controlado.

Como punto de atención, se observó que especímenes probados a compresión axial a 28 días de mezclas tipo A y C, tuvieron una resistencia más baja a comparación con los demás especímenes de 7 y 14 días. Esto indica que la humedad con la que contaba el tepetate desde



el origen es sumamente importante, debido a que los especímenes se realizaron con la misma proporción, pero en corridas distintas.

Después, se realizaron más mezclas del tipo A y C para someterlos a compresión diagonal, siendo el tipo A-2 el espécimen con la carga máxima soportada, curado a 14 días y compuesto por 83% tepetate y 17% cemento gris más 1500 ml de agua, misma que fue añadida hasta propasar un poco la humedad óptima y tener una mezcla pastosa como una mezcla típica de concreto.

Por tanto, la relación agua/cemento al igual que para las mezclas de concreto, influye de manera directa en la resistencia final del espécimen; sin embargo para el caso del tepetate estabilizado con cemento gris, a mayor contenido de agua, se produjo la reacción química del cemento que según los valores observados aumentó la resistencia del espécimen.

Como resumen de los resultados obtenidos en todo el proceso de experimentación y tomando como base las [NTCG-DM \(1997\)](#), se concluye que los valores de resistencia obtenidos para el sistema de muros monolíticos de tepetate estabilizado (18.16 kg/cm^2) probados a 14 días de fraguado; son mayores a los valores indicativos para mampostería confinada de tabique de barro recocido con un mortero tipo II, los cuales tienen una resistencia a la compresión de 15 kg/cm^2 .

También, de acuerdo a normativa de países especialistas en construcción con tierra como Nueva Zelanda, se indica un valor de diseño de 0.5 N/mm^2 (5.09 kg/cm^2) para tierra compactada, es decir, los resultados máximos obtenidos para pruebas de compresión axial de esta investigación, se encuentran dentro de los parámetros aceptados en normativa especializada para este tipo de sistemas constructivos.

Respecto a la compresión diagonal podemos notar que valores referenciados en las pruebas a esfuerzo cortante se encuentran desde 0.25 kg/cm^2 hasta 2 kg/cm^2 , por lo que los valores resultantes para el sistema de tepetate estabilizado, también se encuentran dentro de parámetros establecidos, aún cuando el tepetate no cuenta con las características plásticas



únicas de las arcillas, material protagonista en la construcción con tierra. No obstante, es importante realizar más espécimenes probados con distintos días de curado para la aplicación de fórmulas de corrección y tener promedios generales que corroboren o descarten los valores máximos de F^*_m y V^*_m , comparados en esta investigación.

Luego de diseñar la vivienda y hacer los respectivos cálculos de análisis de cargas, se procedió a revisar los muros ante carga vertical primero con una relación de esbeltez que indicó que todos los muros de tepetate de 20 cm. de espesor y los de tabique de barro de 15 cm. pasaron dicha revisión. Después al calcular la carga última (PU) y la carga resistente (PR) también se probó satisfactoriamente que todos los muros diseñados pasaron por resistencia a carga vertical. En cuanto a la revisión sísmica simplificada, donde $V_A < V_R$, se demostró que la vivienda de muros de tepetate sí pasó la revisión por sismo en ambas direcciones de X y Y.

El sistema es económico ya que el costo del tepetate es de \$20.00 por costal, es decir barato en relación a su volumen. También es fácil de elaborar sin necesidad de conocimiento previo en procesos constructivos, pero con un desgaste significativo de energía por persona ya que para lograr una adecuada compactación, el trabajo es cansado si la herramienta utilizada no es mecánica y si se trabaja de forma individual. Esta es la principal desventaja del procedimiento. Es ambientalmente de menor impacto comparándolo con otros sistemas ya que es una mezcla de dos componentes casi secos.

El tepetate presentó un buen desempeño mecánico añadiendo cemento gris como estabilizador, ya que al realizar una sencilla revisión por sismo para una vivienda unifamiliar de un nivel y cubierta ligera; se demostró que el sistema de muros de tierra compactada estabilizados con cemento gris, es seguro para el AMG aún con su alta vulnerabilidad sísmica.

Como conclusión general, el sistema constructivo de muros de tierra compactada hechos de tepetate y cemento de 20 cm de espesor; tiene mejores características mecánicas que los que se realizan solo con tierra en sistemas convencionales, resultando como afirmativa la



hipótesis a través de la mezcla óptima de 83% tepetate y 17% cemento gris, para muros para una vivienda tradicional de un nivel, con una estructura de madera y cubierta ligera para el AMG.

6.3 Recomendaciones y propuestas de investigación futura

Es pertinente que se realicen pruebas de caracterización de suelos para determinar la granulometría del tepetate a utilizar, como la prueba AASHTO estándar y/o AASHTO modificada para conocer la masa volumétrica seca máxima y el contenido de agua óptimo de los materiales para subrasante (uso principal que se le da al tepetate).

Para la compactación se recomienda el uso de un pisón neumático el cual aplique siempre la misma fuerza y cuente con una placa que se amolde mejor en las esquinas del molde si éste es ortogonal. Si es cilíndrico, el pisón de punta circular como el usado en las pruebas, es el adecuado.

Aunque se expone que el proceso del sistema constructivo es autoconstruible y su tratamiento fue lo más parecido a lo que se hace en campo con usuarios sin conocimiento especializado; para posterior experimentación en laboratorio, se recomienda medir la humedad del material antes de ser mezclado con cemento para que luego de agregar agua, se tenga un valor de contenido de humedad que se relacione directamente con parámetros de resistencia de compresión axial y diagonal producto de pruebas correspondientes.

También se recomienda generar una mezcla un poco más pastosa que la obtenida de dicha prueba de humedad, con el objetivo de comparar resultados de resistencias de mezclas con humedad óptima y sobrepasando a la misma.

Asimismo se recomienda realizar más pruebas de laboratorio de las muestras A de 83% Tepetate- 17% cemento y C de 92% Tepetate- 8% cemento, y ensayarlas a por lo menos 28 días, según lo indicado en la normas **NTCG-DM**, así como hacer por lo menos tres lotes cilíndricos para ser probados a compresión axial a 28 días de curado, aunque en general se



deben preparar los especímenes necesarios a consideración, para cada edad y para cada condición de prueba según la norma [NMX-C-159-ONNCCE-2004](#) de elaboración y curado de especímenes en laboratorio.

Se recomienda realizar de 3 a 5 especímenes de bloques de tierra compactada con la mejor mezcla resultante a compresión axial, para ser probados ahora a compresión diagonal por lo menos a 28 días como mínimo tiempo de curado. Luego de los ensayos correspondientes se debe calcular el esfuerzo medio obtenido calculado sobre el área bruta y se corregirá multiplicándolo por los factores indicados en la [Tabla 2.5](#) de “Factores correctivos para las resistencias de pilas con diferentes relaciones altura a espesor” de las [NTCG-DM \(1997\)](#).

Para acabados finales de recubrimiento se considera cribar el tepetate con un tamiz más fino que el #4, así como la adición de alguna arena como arena amarilla, que permita un toque más estético e interesante a los muros sin necesidad del uso de una pasta, colorante químico u otro tipo de recubrimiento.

Se recomienda el estudio de algún tipo de impermeabilizante para omitir el sobrecimiento propuesto y evitar el contacto directo del muro con el suelo, así como para proteger al mismo ante lluvias. Este punto puede ser derivado de la realización de especímenes los cuales pueden ser sometidos a condiciones de intemperie o similares y así observar el envejecimiento de los muros y su respuesta ante dicha exposición.

Otro punto abierto a investigación es el diseño de la cimbra o molde el cual puede ser diseñado con cimbra metálica o de madera. No se recomienda una cimbra movable para trabajar con las mezclas propuestas en esta investigación, a menos de que las capacidades de las mismas sean mejoradas y pueda realizarse dicho movimiento sin comprometer a la unidad; entonces pueden emplearse algunos diseños de moldes como los desarrollados en Francia o con algún material de rehúso que pueda contener la cantidad necesaria de tierra y soportar los golpes de su compactación.



Las conexiones o tratamientos en las esquinas son otro punto de importante atención ya que en los sistemas de tierra surgen fallas así como pérdidas de continuidad en los elementos; el estudio de diseño de cimbra mencionado o algún elemento de unión o refuerzo son también propuestas de investigación futura.

Aunque los resultados de la revisión por sismo simplificada para la vivienda tradicional de muros de tepetate propuesta fueron satisfactorios; se recomienda una revisión más detallada como por ejemplo utilizando el método estático o el análisis dinámico ya que los modos de falla observados en los espécimenes probados a carga axial y diagonal, mostraron fallas cuasi frágiles con algunos desmoronamientos, los cuales deben ser estudiados más a fondo. También se recomienda una revisión profunda de diseño por viento con un análisis estático.

La lámina de 7 kg/m^2 de peso propuesta para la vivienda, fue un tipo de cubierta ligera con una buena compatibilidad con los muros de tepetate, por lo que se recomienda la propuesta y el análisis de una cubierta pesada como de concreto reforzado o de bóveda catalana para evaluar las cargas y dicha compatibilidad con el sistema.

Se investigaron las propiedades mecánicas del tepetate y se presentó la viabilidad de utilizar muros hechos de tepetate más cemento gris como estabilizador con el sistema constructivo de tierra compactada.

Los resultados obtenidos fueron anómalos al no haber hecho más espécimenes de los necesarios en un solo lote, ya que de esta forma sí se observa un incremento de resistencia al aumentar los días de curado; sin embargo es interesante señalar que este comportamiento no se presentó al hacer el mismo tipo de mezcla ensayada a mayor tiempo, por lo que los valores de esta investigación sirven de referencia para posteriores usos y tratamientos con tepetate o con suelos arenosos similares, pero se propone continuar con la investigación con las mismas variables propuestas con el objetivo de conocer más a fondo las características, límites y potencialidades de este material.



Referencias

Andrés, R. & Mejía, R. (2015). *Alternative cement material based on natural pozzolan suitable for the production of concrete*. Conference: 57° Congresso Brasileiro do Concreto, IBRACON-2015, At Bonito, MS-Brasil.

Anink, D., Boonstra, C., & Mak, J. (1996). *Handbook of Sustainable Building. An Environmental Preference Method for Selection of Materials for Use in Construction and Refurbishment*, Londres, 1996.

Arenas, F. (2007). *El impacto ambiental en la Edificación*. Criterios para una construcción sostenible, Edisofer, 2007.

Arndt, P., & Calderón, K. (2015). *Características generales del adobe como material de construcción*. Obtenido de EcoSur: La red para el hábitat económico y ecológico.

Arteaga, K., Medina O., & Gutiérrez O. (2011) *Bloque de tierra comprimida como material constructivo*. Revista Facultad de Ingeniería, UPTC, Julio-diciembre de 2011, Vol. 20, No. 31.

Barros, L. & Imhoff, F. (2010). *Resistencia sísmica del suelo-cemento postensado en construcciones de baja complejidad geométrica*. Revista de la Construcción, vol. 9, núm. 2, diciembre, 2010, pp. 26-38 Pontificia Universidad Católica de Chile. Santiago, Chile.

Bestraten, S., Hormías, E., & Altemir, A. (2011) *Construcción con tierra en el siglo XXI*. Informes de la Construcción, vol. 63, 523, 5-20.

Blondet, M, García, G. & Brzev, S. (2003) *Earthquake-Resistant Construction of Adobe Buildings: A Tutorial*. EERI/IAEE World Housing Encyclopedia.

Boff, L. (2012), *La sostenibilidad. Qué es y qué no es*. Sal Terrae. Colección Presencia Social.

CENAPRED, (1997). *Proyecto de Norma Mexicana NMX. -Determinación de la resistencia a compresión diagonal y de la rigidez a cortante de muretes de mampostería de barro y de concreto*. México DF.

CFE (1993). *Manual de Diseño de Obras Civiles (Diseño por sismo)*. Comisión Federal de Electricidad (CFE). México.

Ciancio, D., & Gibbings, J. (2012). *Experimental investigation on the compressive strength of cored and molded cement-stabilized rammed earth samples*. Construction and Building Materials, 28(1), 294-304.



Comisión Nacional de Vivienda CONAVI (2010) *Código de edificación de vivienda 2010*, México.

De Sensi, (2003). Distribución mundial de riesgo sísmico alto y moderado. http://www.world-housing.net/wp-content/uploads/2011/06/Adobe_Tutorial_English_Blondet.pdf

Dopico, J., Martirena, F., Day, R., Middendorf, B., Gehrke, M., & Martinez, L. (2008). *Desarrollo de hormigones con aglomerante cal-puzolana fina como material cementicio suplementario*. Rev. Ing. constr. [online]. vol.23, n.3, pp. 171-178. ISSN 0718-5073.

Fernández Baqueiro, L., Marín Gómez, F., Varela Rivera, J. y Vargas Marín, G. (2009). *Determinación de la resistencia a compresión diagonal y el módulo de cortante de la mampostería de bloques huecos de concreto*. Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY, 13-2, pp. 41-50, ISSN: 1665-529X.

Gama-Castro, J., Solleiro, E., Flores, D., Sedov, S., Cabadas H. & J. Díaz J., (2007). *Los tepetates y su dinámica sobre la degradación y el riesgo ambiental: El caso del glacis de Buenavista, Morelos*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana 59:133-145.

Gandreau, D. & Delboy, L. (2012) *World heritage inventory of earthen architecture, 2012*. France: Grenoble, CRA Terre-ENSAG, 2012.

Google Maps, (2017) ubicación de predio Av. Vicente Guerrero 1251. El Mante, 45235 Zapopan, Jal. Coordenandas 20.604804, -103.420524.

Houben, H. & Guillaud, H. (1994). *Earth Construction: A Comprehensive Guide*. ITDG Publishing, London, UK.

ININVI (1987). Primera norma independiente de la mampostería de adobe de Perú de 1985.

Jaquin P., Gerrard, C., Ausgarde, C. & Canivell, J. (2013) *Damage in historic rammed earth structures: a case study at Ambel, Zaragoza, Spain*. digitAR, no. 1, 2013, pp. 32-41.

Jayasinghe, C., & Kamaladasa, N. (2007). *Compressive strength characteristics of cement stabilized rammed earth walls*. Construction and Building Materials, 21(11), 1971-1976.

Jiménez, P. & Cirera, A. (2014) *Arquitectura vernácula: entre lo local y lo global*. Anuario Jóvenes Investigadores, junio 2014, n° 1, 120-122 p. ISSN: 2386-3676.

Joy, R. (2017) *Vivienda de tierra compactada*. <http://www.rickjoy.com>, última vez visitado: 15 de agosto de 2017.

Maniatidis, V. (2003). *A review of rammed earth construction*. DTi partners in innovation project: developing rammed earth for UK housing.



Meli, R. (1998). *Structural engineering of the historical buildings*. Civil Engineers Association (ICA) Foundation, A. C., Mexico.

Minke, G. (2001). *Manual de construcción para viviendas antisísmicas de tierra*. Forschungslabor für Experimentelles Bauen Universidad de Kassel, Alemania.

Minke, G. (2006). *Building with Earth. Design and Technology of a Sustainable Architecture*. Birkhäuser. Publishers for Architecture. Basel, Berlin, Boston.

Nimlos, J. y Ortiz S. (1987) *Tepetate the rock mat*. *J. Soil Water Conservation* 42: 83-86.

Norma ASTM C 123- 98 (AASHTO T 113). Método estándar de Ensayo para partículas de peso ligero en los agregados.

Norma ASTM C 617. *Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimen*.

Norma ASTM C39. *Método estándar de prueba de resistencia a la compresión de probetas cilíndricas de concreto*.

Norma ASTM C469. *Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression*.

Norma ASTM E - 11/95. *Tabla de tamices*.

Norma Mexicana (2004). *NMX-C-159-ONNCCE-2004*. Industria de la Construcción-Concreto, Elaboración y Curado de Especímenes en el Laboratorio.

NTC 5324 (2004), *Normas Técnicas Colombianas*. Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación.

NTCG-DM (1997). *Normas Técnicas Complementarias de Guadalajara para Diseño de Mampostería*. Reglamento orgánico del Mpio. De Guadalajara, Título décimo tercero de la seguridad estructural de las construcciones.

NZS 4298:1998 (1998), *Engineering Design of Earth Buildings*. Standars New Zealand. Nueva Zelanda.

Orozco S. (2015). *Arenas Pumíticas de la Zona Metropolitana de Guadalajara en su Aplicación al Sistema Constructivo de Muros Monolíticos, enfocado a la Vivienda Urbana*. ITESO. Tlaquepaque, Jal. México.

Pacheco-Torgal F., Jalali, S., Labrincha J. & John V. (2013) *Eco-Efficient Concrete*. Publishing Series in Civil and Structural Engineering ISBN: 978-0-85709-424-7



Preciado, A., Ayala, K., Torres, S., Villareal, K., Gutiérrez, N., Flores, A. & Hernández V. (2017). *Performance of a self-build rammed earth house in a high seismic zone of Mexico. 3rd International. Conference on Protection of Historical Constructions*, Lisbon, Portugal, 12 – 15 July, 2017.

Rodríguez Tapia, Silvia; Gutiérrez C., Ma. del Carmen; Hidalgo M., Claudia; Ortiz S., C. A. (1999) *Intemperismo en tepetates y en cenizas volcánicas y su influencia en la formación de andisoles*. Terra Latinoamericana, vol. 17, núm. 2, abril-junio, 1999, pp. 97-108. Sociedad Mexicana de la Ciencia del Suelo, A.C. Chapingo, México.

SADC ZW HS 983 (2014). *Código de prácticas de estructuras de tierra apisonadas de África*. África.

San Bartolomé, Á., & Quiun, D. (2015). *Diseño de mallas electrosoldadas para el reforzamiento sísmico de viviendas de adobe típicas del Perú*. Revista de la Facultad de Ingeniería Universidad Central de Venezuela, 30(1), 71-80. Recuperado el 29 de enero de 2017, de http://www.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652015000100008&lng=es&tlng=es. Última vez visitado: 9 de Jul. de 17.

SENCICO (2000). *NORMA E.080 Adobe*. Reglamento Nacional de Edificaciones. Lima, primera edición.

Silva, R., Oliveira, D., Schueremans, L., Miranda, T. & Machado, J. (2014). *Shear behaviour of rammed earth walls repaired by means of grouting*. 9th International Masonry Conference, Guimarães 2014

Spiegel, J. & Maystre L., (2001). *Encyclopedia of Occupational health and Safety*, fourth edition.

Tejeda, J. & Silva, C. (2002). *Estudio de resistencias a compresión diagonal (cortante), de muretes de mampostería fabricados con materiales de la zona conurbada Colima- Villa de Álvarez*. Sociedad Mexicana de Ingeniería Estructural, A.C. XIII Congreso Nacional de Ingeniería Estructural Puebla, Pue., México 2002.

Tetreault D. (2004). *Una taxonomía de modelos de desarrollo sustentable*. Espiral, Estudios sobre Estado y Sociedad. Vol. X No. 29 # Enero / abril de 2004. Págs. 45-77.

Toirac (2008). *El suelo-cemento como material de construcción*. Ciencia y sociedad, Volumen XXXIII, Número 4 octubre-diciembre 2008.

Torrealva (1986) *Técnica Probada en el campo y laboratorio para reparar viviendas de adobe en áreas sísmicas.*, Ponencias VI Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Colegio de Ingenieros del Perú, Cajamarca, Perú.



TuTecho Mexicano de Occidente (2015) *Técnica de bajareque* <http://www.tutecho.org.mx/home/index.php/bajareque/49-bajareque>, última vez visitado: 15 de agosto de 2017.

UNESCO (2012). *Inventario de Arquitectura de Tierra*. Programa de Arquitectura de Tierra de Patrimonio Mundial del año 2012.

Vargas, D. (2002). *Caracterización de la Actividad Puzolánica de las Tobas Pumíticas de la Zona Metropolitana de Guadalajara*. Universidad de Guadalajara, Guadalajara. México.

Vargas, D., Zárate, P. & Gutiérrez H. (2005) *Actividad puzolánica de las tobas pumíticas de la zona metropolitana de Guadalajara*. e-Gnosis, núm. 3, p. 0. Universidad de Guadalajara, Guadalajara, México.

Velásquez, M., (1991). *El derecho a la vivienda, Aspectos jurídicos de la vivienda*, Cuadernos del Instituto de Investigaciones Jurídicas, México, UNAM, Año IV, No. 18. Sep.-Dic de 1991, p. 477.

Zegarra, L., San Bartolomé, A. & Quiun, D. (1999) *Reforzamiento de viviendas existentes de adobe. Proyecto CERESIS-GTZ-PUCP*. Ponencias, XII Congreso Nacional de Ingeniería Civil, Colegio de Ingenieros del Perú, Huánuco, Perú.