

# 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



## ***CARACTERIZACIÓN DE ARENAS PUMÍTICAS DEL ÁREA METROPOLITANA DE GUADALAJARA PARA SU USO EN MUROS DE TIERRA COMPACTADA***

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

Presenta: Samy Osvaldo Orozco Martín

Tutor: Dr. Nayar Cuitláhuac Gutiérrez Astudillo

Tlaquepaque, Jalisco. 7 de diciembre de 2015.



## Índice

<i>Resumen</i> -----	7
<i>Glosario</i> -----	9
<i>1. Introducción</i> -----	11
1.1 Antecedentes.....	11
1.1.1 Uso histórico de la tierra como material constructivo-----	11
1.1.2 Algunas tecnologías de construcción que utilizan tierra. -----	16
1.1.3 Sistema de tierra compactada-----	20
1.1.4 Ejemplos de sistemas de tierra compactada -----	27
1.1.5 Las puzolanas y sus características -----	32
1.2 Problemática.....	37
1.3 Justificación .....	41
<i>2. Marco Conceptual</i> -----	44
2.1 Conceptos Clave .....	44
2.1.1 Vivienda-----	44
2.1.2 Sostenibilidad y Construcción-----	47
2.1.3 Sistema de Muro Monolítico y las puzolanas-----	51
2.2 Construcción del Objeto .....	53
3. Hipótesis y preguntas de investigación .....	56
3.1 Hipótesis.....	56
3.2 Pregunta de Investigación .....	56
3.2.1 Preguntas subsidiarias-----	56
4. Objetivos.....	57

4.1 Objetivo general-----	57
4.1.1 Objetivos Particulares -----	57
4.1.2 Objetivos específicos -----	58
5. Metodología-----	59
5.1 Elección Metodológica.....	59
5.2 Materiales y Métodos.....	60
5.2.1 Investigación documental -----	60
5.2.2 Entrevista profunda a experto local-----	60
5.2.3 Primera fase de Diseño de experimento y muestreo-----	62
5.2.4 Segunda fase de Diseño de experimento y muestreo -----	67
6. Experimentación-----	71
6.1 Recolección de Información .....	71
6.1.1 Análisis Granulométrico -----	71
6.1.2 Resultados de resistencia 1ra fase -----	72
6.1.3 Fallas Típicas 1ra fase -----	74
6.1.2 Resultados de resistencia 2da fase-----	75
6.1.3 Fallas Típicas 1ra fase -----	77
6.2 Análisis e Interpretación de datos.....	78
6.2.1 Análisis en Statgraphics 1ra fase-----	78
6.2.2 Conclusión del análisis estadístico de la primera fase-----	84
6.2.3 <i>Análisis sobre la plasticidad de la muestra 1ra fase</i> -----	85
6.2.4 Análisis en Statgraphics 2da fase-----	87
6.2.5 Conclusión del análisis estadístico de la 2da fase -----	90
6.2.6 <i>Análisis sobre la plasticidad de la muestra 1ra fase</i> -----	91

7. <i>Discusión de Resultados</i> .....	92
8. <i>Recomendaciones, aportes y conclusiones</i> .....	95
8.1 Recomendaciones .....	95
8.2 Conclusiones y aportes .....	97
9. <i>Literatura Citada</i> .....	99
10. <i>Anexos</i> .....	103
10.1 Anexo 1: Entrevista a Profundidad. ....	103
10.2 Anexo 2: Especificación de la cal Hidratada .....	115
10.3 Anexo 3: Granulometría.....	116
10.4 Anexo 4: Diseño de experimento en el software Statgraphics.....	118
10.5 Anexo 5: Mezclas para experimento. Primera Fase .....	122
10.6 Anexo 6: Mezclas para experimento. Segunda Fase .....	123
10.7 Anexo 7: Datos Obtenidos de Statgraphics. ....	124



## **Resumen**

En la actualidad, los materiales tradicionales que se utilizan en los sistemas para la construcción son uno de los principales contaminantes a nivel mundial, esto debido a su producción, costos, traslados y residuos. En consecuencia, para lograr una construcción sustentable en la ZMG (Zona Metropolitana de Guadalajara), se tienen que buscar alternativas, utilizando materiales locales y naturales para su utilización en sistemas constructivos a base de éstos. Con esto en mente, en este escrito se plantea un sistema constructivo de muros monolíticos con base en arenas pumíticas, como son el Jal y el Tepetate, de la ZMG, debido a que la tierra es y ha sido una materia prima a lo largo de la historia para la vivienda del hombre, alrededor del mundo.

Se busca conocer a detalle, también, las características del sistema de tierra compactada, tanto físicas como mecánicas y trasladarlo a su uso con arenas pumíticas.

Es por eso que se han ensayado probetas con las arenas pumíticas, cribándolas por medio de una malla #16 (abertura de 1.19mm) , mezclado con cal hidratada, en proporciones medianas, y cemento, en proporciones pequeñas para conocer su resistencia a la compresión; después se hizo, un análisis, y discusión de resultados, para obtener las mezclas óptimas, y conocer la cantidad de agua adecuada, para su posterior aplicación a un sistema de muros monolíticos.

### **Palabras clave:**

Sistema Constructivo, Arenas Pumíticas, Jal, Tepetate, Muros Monolíticos, Vivienda Urbana, Zona Metropolitana de Guadalajara.

## **Abstract**

At present, the traditional materials used in building systems are one of the main pollutants in the world, this is because of its production costs, transportation and waste. Consequently, to achieve a sustainable construction in the GMA (Guadalajara Metropolitan Area), you have to look for alternatives, using local and natural materials for use in construction based on these systems. Constructive monolithic wall system based on pumiceous sands, such as the Jal and Tepetate, native of the GMA, the soil is and has been a raw material, along the housing history of man, worldwide.

Wanted to know in detail, the characteristics of Rammed earth system, both physical and mechanical and use it with pumiceous sands.

That's why, specimens were tested with, mixed with hydrated lime in medium proportions, and cement, in small proportions, to know its compressive strength; then did an analysis and discussion of results, for the optimal mixtures, and know the amount of water, for subsequent application to a system of monolithic walls.

That's why specimens were tested with pumiceous sands, sieving through # 16 mesh (opening 1.19mm), mixed with hydrated lime in medium proportions, and cement, in small proportions to know its compressive strength ; then did an analysis and discussion of results, for the optimal mixtures, and know the amount of water, for subsequent application to a system of monolithic walls.

## **Key Words**

Construction System, Pumiceous Sands, Jal, Tepetate, Monolithic walls, Urban Housing, Guadalajara Metropolitan Area.

## Glosario

- Jal: es el nombre que se le da localmente, en la construcción al subsuelo de la ZMG, que está constituido por material volcánico, denominado Toba Tala. Es una Arena pumítica
- Tepetate: Deriva del náhuatl *tepétlatl*, vocablo compuesto por las raíces *tetl* que significa piedra y *pétlatl*, petate se refiere a un horizonte endurecido, ya sea compactado o cementado, que se encuentra comúnmente en los paisajes volcánicos de México, subyaciendo a suelos o bien aflorando en superficie. Es una Arena pumítica.
- Puzolanas: Se definen como “materiales silíceos o silíceo-aluminosos”, que por sí mismos poseen poco o ningún valor cementante, pero que finamente divididos y en presencia de humedad e hidróxido de calcio, reaccionan químicamente a temperaturas ordinarias para formar compuestos cementantes de baja solubilidad.
- Arenas pumíticas: Son suelos de origen volcánico, con características puzolánicas.
- Cementante: Son aquellos productos que, mezclados con agua y con otros elementos que le dan personalidad al material resultante, experimentan una reacción química que los endurece, y son por tanto el alma de toda obra civil.

- Muro Monolítico: Se define como tierra amasada y apisonada, con posibilidades de agregar algún estabilizante, en una cimbra, para formar muros monolíticos, es conocido como tierra apisonada o compactada en Latinoamérica, en España como tapial, y en la lengua inglesa como "Rammed Earth".

## **1. Introducción**

### **1.1 Antecedentes**

#### **1.1.1 Uso histórico de la tierra como material constructivo**

Minke (2005) menciona que las técnicas de construcción con tierra, datan de hace más de 9000 años, y que la tierra es el material de construcción más abundante en la mayoría de las regiones del mundo, esto nos da referencia de qué tan importante ha sido la tierra como material de construcción. Minke es un especialista en este tipo de técnicas, ha llevado a cabo más de 20 proyectos de investigación en el campo de las construcciones ecológicas, viviendas de bajo costo y especialmente en el campo de la construcción con tierra. Con amplia experiencia como experto internacional, ha diseñado numerosas edificaciones donde el barro es el material predominante, presentado ponencias en más de 60 conferencias internacionales, publicado libros y artículos en revistas especializadas sobre la construcción con tierra (Font & Hidalgo, 2011)

A lo largo del tiempo, se han edificado incontables muestras arquitectónicas, con sistemas constructivos con base en tierras, por ejemplo el complejo de la Alhambra de Granada y la ciudad de Shibam, en Yemen, (véase imagen 1) de ahí la necesidad de revalorizar las técnicas y materiales autóctonos como vía para la carencia de viviendas en el Tercer Mundo. (Font & Hidalgo, 2011)



Imagen 1: Ciudad Shibam, Yemen. Recuperado de : (Clarín Arq, 2015)

Con Minke (2005) se puede entender por qué es tan importante la tierra como material:

- Regula la humedad ambiental.
- Ofrece mejores condiciones en la vivienda en cuanto a salud del habitante.
- Almacena calor.
- Equilibra el clima interior.
- Ahorra energía.
- Disminuye la contaminación ambiental.
- Es reutilizable.
- Y si se extrae de lugar, se convierte en un material económico.

Font & Hidalgo (2011) señalan que la tierra, tal y como ocurre desde hace siglos, es un material que nuevamente empieza a formar parte de la vida real, la que

respira, pero que en muchas ocasiones sucumbe ante las exigencias legales, a pesar de las bondades que este material ofrece: "su carácter saludable e inofensivo para el ocupante de la vivienda, su amplia disponibilidad, su excelente comportamiento térmico, su indiscutible adaptación al paisaje, sus posibilidades formales y estéticas de gran fuerza visual o su reciclabilidad indefinida".

Resulta interesante mencionar que para Pacheco Torgal & Jalali (2011), actualmente casi un 50 % de la población mundial vive en casas hechas con tierra (Véase Figura 1), donde la mayoría de este tipo de construcciones se encuentra en países menos desarrollados, aunque , también se pueden encontrar en Alemania, Francia, Gran Bretaña, Nueva Zelanda, Australia. (González Blanco, 2011) En lugares y países menos desarrollados la tierra continuó siendo el principal material utilizado cuando su disponibilidad local lo permitía, por ser un recurso de bajo coste, fácil manejo y suficientemente sencilla como para posibilitar la autoconstrucción.



Figura 1: Sitios de construcción con tierra. Recuperado de: (Neves & Borges Faria, 2011)

Conforme se ha investigado para esta tesis, se ha descubierto que autores como Maniatidis & Walker(2003) mencionan que en varias partes del mundo se ha estado regulando las construcciones con tierra, por ejemplo en Australia ya

existe el manual australiano de construcción con tierra, y Pacheco Torgal (2011) señala que Nueva Zelanda tiene uno de los sistemas legales más avanzados en la construcción con tierra que se estructura en 3 diferentes normas: NZS 4297:1998- habla sobre la parte ingenieril y diseño sobre los edificios de tierra, NZS 4298:1998- sobre los materiales y mano de obra, y la NZS 4299:1998- las construcciones con tierra que no requieren un diseño específico, y vienen soluciones acerca de los muros, cimentaciones y vigas.

Pero aun con estos avances, las normativas con respecto a construcción con tierra siguen siendo muy pocas, además de que las que existen están elaboradas para los suelos que existen en determinado lugar, y esto hace muy difícil su uso en otros lugares. Uno de los obstáculos para lograr un impulso de la construcción con tierra sin cocer es la ausencia de soporte normativo como afirman Font & Hidalgo(2011).

La tierra es uno de los materiales más antiguos usados por el hombre para construir su vivienda pero, después de la llegada de los materiales industriales, pasó a un segundo plano en la construcción. esto genero que las normativas sean muy deficientes, ya que las normativas actuales favorecen el uso de los materiales industriales.

La construcción con tierra tomó una tendencia a desaparecer como indica González Blanco (2011) a favor de la copia desenfadada de los estereotipos tecnológicos y arquitectónicos de Occidente importados en masa por las élites locales, modelos de dudosa sostenibilidad en muchos lugares que se convirtieron en el objetivo a alcanzar por la población de todas las clases sociales al constituir un símbolo de progreso y riqueza.

Actualmente en México, este tipo de construcciones por lo general solo se sigue aplicando en áreas rurales continuamente, pero de una forma muy rudimentaria. Una de las desventajas como lo menciona Fernández Carcedo (2012), es que siempre ha existido un rechazo cultural hacia la construcción con tierra debido a

que la sociedad la relaciona con la pobreza; y el acero y el concreto se consideran materiales de mayor prestigio, como se había mencionado anteriormente.

Es por eso que tenemos que adaptarnos a la construcción “moderna” con tierra, que necesita tener una serie de características para llamarla como tal. Una es aprender de las técnicas del pasado, con los beneficios y las mejoras que se tienen con la innovación de la tecnología y los beneficios que acarrea, tener una excelente calidad, tolerancia dimensional, precisión, compatibilidad y cumplir con los reglamentos actuales en cuanto al diseño estándar, y como describe Minke (2005) la composición de la tierra depende del lugar que se extrae, así sus características pueden variar de lugar a lugar, además se deben de tener ciertos cuidados ya que la tierra se contrae al secarse, debe de estar protegida contra la lluvia, ya sea con barreras físicas o tratamiento en la superficie.

Berstraten, Hormias, & Altemir (2011) nos hablan sobre esta adaptación a la modernidad, en la construcción con tierra, donde se ha dado un paso adelante en los procesos de fabricación. Esta industrialización de los materiales de tierra, sirvió para que se mejoran las características naturales del material y se garantizan unas calidades óptimas para su empleo y puesta en obra, reduciendo los tiempos de ejecución y mejorando su calidad.

Berstraten, Hormias, & Altemir (2011) afirman que el futuro próximo de la construcción con tierra pasa también por el establecimiento de una normativa, como ya se había mencionado y así como de controles pertinentes de calidad, no solo del material sino también de su proceso ejecución, que permita finalmente incorporar este material, la tierra, en la docencia universitaria y en la práctica constructiva habitual de cualquier profesional.

### **1.1.2 Algunas tecnologías de construcción que utilizan tierra.**

Existen muchos sistemas de construcción de muros con tierra, los más comunes son el adobe, el BTC (block de tierra compactada), tierra compactada, tierra vertida, sacos de tierra, entre otros, cada sistema, tiene sus pros y contras.

El adobe es un material que ha sido utilizado tanto en México como en diversas partes del mundo desde tiempos inmemorables. Aún en la actualidad existen ciudades enteras hechas con este tipo de material, tales como el Cairo y Jerusalén (Roux Gutierrez, 2010). El adobe en tiempos de construcción es muy tardado debido a la elaboración de éste, sobre todo en zonas urbanas, a causa del tiempo de producción y a la mano de obra para hacerlos. Por otro lado, su uso en la auto construcción es barato, esto se debe a que la producción del adobe no es algo difícil y permite al usuario poder crear este tipo de material. Se elabora con moldes de madera o de metal, donde se coloca la tierra, solamente se le agrega agua y se deja secar al sol. Es necesario hacer especial hincapié en que no con todos los tipos de tierra se puede lograr debido a sus diferentes propiedades.

El adobe se basa en una masa de barro, frecuentemente mezclada con paja, moldeada con forma prismática, de tamaño variable y secada al aire para formar muros de fabrica. La gran diferencia con el tapial y el BTC- Block de tierra compactada- es la cantidad de agua necesaria en el proceso de fabricación. Esta elevada cantidad de agua que se evapora en su proceso de secado requiere de la presencia de fibras vegetales que evite las fisuraciones por retracción. (Berstraten, Hormias, & Altemir, 2011)

González Blanco (2011) señala en forma de comparativa que la fabricación del ladrillo común consume en relación a la fabricación del adobe 15 veces más energía y 3 veces más agua, emitiendo 228,8 Kg/Ton de CO<sub>2</sub> en relación a las 0 Kg/Ton de CO<sub>2</sub> del adobe.

Sus resistencias a la compresión son bajas, de 3 a 5 Kg. por cm<sup>2</sup> cuando está seco, y pueden considerarse nulas a los esfuerzos de tracción. Por esas mismas características su manipulación se vuelve más difícil, los adobes se quiebran al no haber sido “curados” de manera que puedan resistir su manejo para colocación en su lugar (Arndt & Calderón, 2015).

El bloque de tierra comprimido se caracteriza por ser un paralelepípedo de tierra que se prensa mecánicamente, suele llevar una pequeña proporción de cal o cemento y se deja secar al aire para formar muros de fábrica (Berstraten, Hormias, & Altemir, 2011).

Rubén Gutiérrez (2010), menciona que el BTC- Block de tierra compactada. es una mezcla de tierra húmeda con algún estabilizante, como cal, cemento o algún componente natural como el mucilago de nopal o el acíbar de sábila, se utiliza una máquina, existen mecánicas y electrónicas, para compactar la tierra en un molde, y de aquí salen los bloques, y a este sistema se le considera la evolución del adobe.

La técnica del cob consiste en una masa de barro y abundante paja que se apila y moldea a mano para formar muros monolíticos. La composición del material es parecida al adobe, pero el moldeado se realiza directamente en el muro sin previo confinamiento en un paralelepípedo (Berstraten, Hormias, & Altemir, 2011).

Cada sistema tiene sus ventajas, es por esto que es importante conocer sobre los sistemas híbridos, Kasal (2013) nos establece que, como se conforma, tiene que ser por al menos dos materiales en piezas estructurales, o en la estructura misma, donde para que funcionen tienen que entenderse sus propiedades tanto físicas como químicas, los efectos del medio ambiente sobre estos materiales y donde la compatibilidad de estos es lo que puede hacer posible un sistema híbrido. Ésto nos sirve para ver la combinación que se podrían hacer con los sistemas ya explicados anteriormente, y mezclarlos con otro tipo de sistemas constructivos.

Estos sistemas pueden conformarse por un material estabilizado con cemento o cal, la proporción del estabilizante (5-10%) es suficientemente baja como para no suponer ningún riesgo para ningún entorno natural. Ello permite la regeneración de la masa vegetal. Una de las variables habituales en el análisis de la sostenibilidad de los materiales de construcción consiste en el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub>. como se muestra en la siguiente tabla (1), y que es notorio como las emisiones de CO<sub>2</sub> son bajas con este tipo de sistemas en comparación a los sistemas tradicionales.

material	densidad	emisiones por kg	emisiones por m <sup>3</sup>
tapial (sin estabilizar)	2.200 kg/m <sup>3</sup>	0,004 kg CO <sub>2</sub> /Kg	9,7 kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
adobe	1.200 kg/m <sup>3</sup>	0,06 kg CO <sub>2</sub> /Kg	74 kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
hormigón en masa in situ	2.360 kg/m <sup>3</sup>	0,14 kg CO <sub>2</sub> /Kg	320 kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
hormigón prefabricado, 2% de acero	2.500 kg/m <sup>3</sup>	0,18 kg CO <sub>2</sub> /Kg	455 kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
pared de ladrillo macizo	1.600 kg/m <sup>3</sup>	0,19 kg CO <sub>2</sub> /Kg	301 kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
pared de ladrillo hueco	670 kg/m <sup>3</sup>	0,14 kg CO <sub>2</sub> /Kg	95 kg CO <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>

tabla 1: Emisiones CO<sub>2</sub>. Recuperado de: (Berstraten, Hormias, & Altemir, 2011)

La Inercia térmica es una característica de estas tecnologías, como cita Cedeño Valdiviezo (2010) a Deffis, la inercia termica: “indica el tiempo que tarda en fluir el calor almacenado en un muro o en una techumbre”.

Depende de la masa, del calor específico de sus materiales y del coeficiente de conductividad térmica de éstos la principal ventaja de los muros de estas tecnologías, frente a los sistemas de construcción basados en menores espesores y muros ligeros. Un retraso térmico óptimo produce un leve refrescamiento con una reducida disminución en la temperatura del interior en aquellos momentos en que la temperatura exterior alcanza su límite máximo.

Arenas Cabello (2014) define producto de construcción como "cualquier producto fabricado para su incorporación con carácter permanente a las obras de construcción, incluyendo tanto las de edificación como las de ingeniería civil".

Asimismo, se establecen los requisitos que deberán cumplir durante un período de vida económicamente razonable, y son los siguientes:

1. Resistencia mecánica y estabilidad.
2. Seguridad en caso de incendio.
3. Higiene, salud y medio ambiente.

### 1.1.3 Sistema de tierra compactada

Pacheco Torgal (2011) indica que la tierra compactada funciona a través de la compactación de la tierra húmeda dentro de una cimbra de madera. Este tipo de sistema requiere muy poco agua, haciendo viable su construcción en lugares donde ésta escasea, se van compactando capas de tierra cada 10cm, y conforme se va avanzando, la misma cimbra se va moviendo hasta llegar a la altura requerida. Anteriormente la compactación era en forma manual, pero ya el sistema moderno de la tierra compactada utiliza compactadores neumáticos y cimbras metálicas. Sobre el ancho de los muros se menciona que hay un mínimo de 30cm para hacer este tipo de sistema. En la siguiente figura se puede visualizar cómo funciona este sistema:

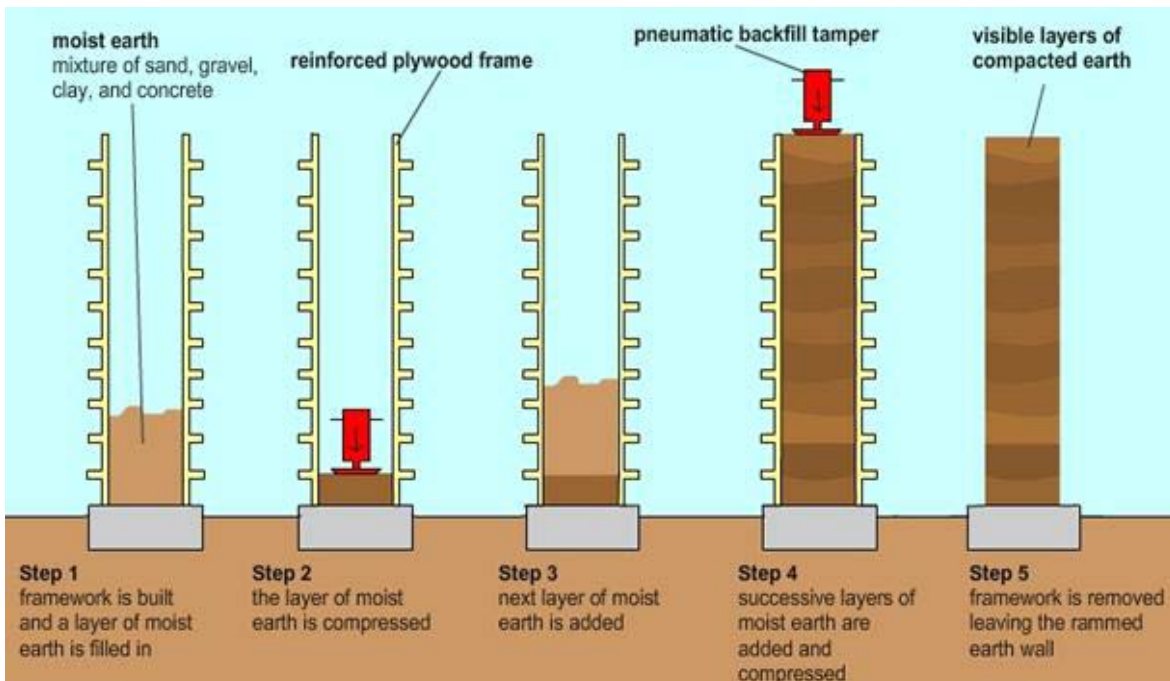


Figura 2- Esquema de un muro de tierra compactada. Recuperado de: (Niroumand & Jamil, 2013)

Del material que se extrae del suelo no se utiliza la capa superior, si no de capas que están debajo del material orgánico del mismo, por lo tanto, no contribuye a la pérdida de capacidad de la agricultura. La ventaja de estabilizar el suelo con cemento y puzolanas, es que permite el uso de más tipos de suelo para el sistema de tierra compactada. Por lo regular se necesita la mezcla de dos o más componentes de suelo para tener la distribución adecuada de partículas para el sistema de tierra apisonada. La energía embebida para un muro monolítico es favorable en comparación con un muro de ladrillo de lama en un aproximado de 15 a 25% (Windstorm & Schmidt, 2013).

En este sistema, el suelo es debidamente preparado y compactado (véase imagen 1). El proceso de producción del muro, en pocas palabras, consiste en pulverizar el suelo, secar, cribar, añadir aglomerante, según sea necesario, añadir agua hasta el contenido óptimo de humedad, colocarlo dentro de un molde y finalmente, compactar hasta obtener la densidad máxima mediante el uso de pisones manuales o mecánicos (Neves & Borges Faria, 2011)



Imagen 2. Ejecución del sistema de tierra apisonada. Recuperado de: (Neves & Borges Faria, 2011)

Por otro lado, podemos encontrarnos que Hall Matthew (2012) dice que los primeros ejemplos del uso del sistema de tierra compactado fueron compactando

la tierra en capas de cimbras de madera, donde lo único que se requería era tiempo, un encofrado o cimbra, y una herramienta para compactar la tierra.

Este tipo de construcción con tierra normalmente se piensa en arcillas como estabilizantes, pero que Guadalajara tiene sobre todo arenas pumíticas que tienen propiedades puzolánicas, que es la capacidad de dar lugar a compuestos cementantes cuando se mezclan con el hidróxido de calcio. Se trata del cemento de puzolana que utilizaron griegos y romanos en la antigüedad.

El método de tierra compactada, en la actualidad, es una fusión de la tecnología moderna, los conocimientos de su uso en el pasado, y las innovaciones en las técnicas de construcción actual, donde su fuerza y durabilidad son el resultado de la densificación de la mezcla de arcilla, arena y grava. En la actualidad se utilizan aditivos como la cal, el cemento o asfalto como estabilizantes. No necesita de recubrimientos, ahorrando dinero y energía a la hora de construir y es un excelente regulador de la temperatura, (Niroumand, 2013).

Las estructuras portantes de tierra trabajan prácticamente en su totalidad sometidas a esfuerzos de compresión. Su resistencia característica varía según la tecnología, densidad y estabilizantes añadidos (Berstraten, Hormias, & Altemir, 2011).

Las resistencias a compresión, aunque bajas, son suficientes para un sector amplio del patrimonio construido, siempre que se tenga en cuenta el grosor de los muros por condicionantes constructivos y que las cargas se transmiten de forma repartida (Berstraten, Hormias, & Altemir, 2011)

Se caracteriza principalmente como elemento estructural moldeado *in situ* con elevada resistencia a la compresión y baja resistencia a la tracción. Su diseño tiene que tener ciertos parámetros como se muestra en la figura 3.

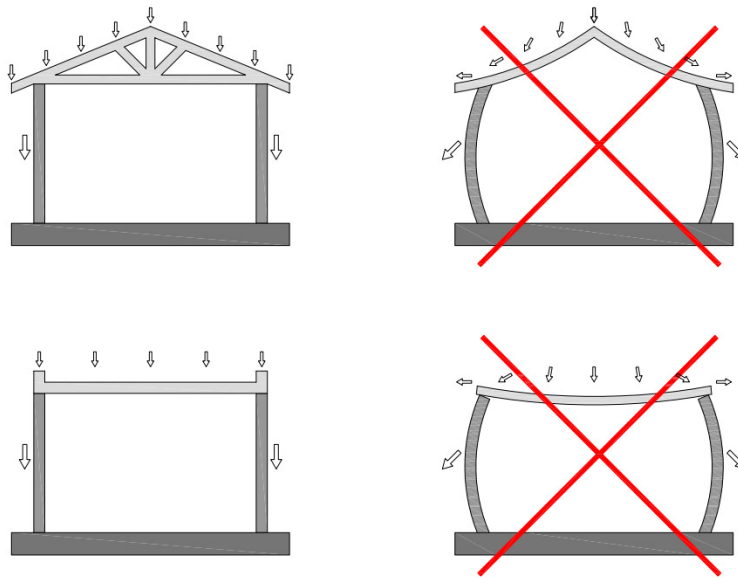


Figura 3 – Transmisión de cargas en las estructuras. Recuperado de: (Neves & Borges Faria, 2011)

Gracias a una entrevista realizada al Mtro. Arq. Antonio Penagos (Anexo 2). Experto local en Arquitectura de tierra, se pudo profundizar más en el tema del sistema de tierra compactada y en características fundamentales para la construcción con tierra:

Donde menciona que *"dentro de las técnicas de construcción con tierra, la tierra apisonada tiene más amplia gama de aplicación en cuanto al material. Puede ser con suelos más finos, arcillosos, limosos o arenas finas. Esta técnica se puede adaptar a la tierra que te encuentres. Para que una construcción con tierra se defina como tal, la estabilización con cal, cemento o chapopote, debe de ser entre un 2% a 8% máximo del peso total de la muestra, mas del 8% ya no es construcción con tierra"*, esto es lo que convierte a estos sistemas más sustentables que los tradicionales.

Como mencionamos en el apartado de tecnologías, lo complicado de estos sistemas es la falta de normativas, y la aplicación e introducción a lugares donde

se desconoce de este sistema (Windstorm & Schmidt, 2013). Esta es una de las complicaciones para hacer su caracterización en la ZMG.

Penagos menciona que para hacerlo industrializado es necesario un pisón neumático, porque si se utiliza por ejemplo, una bailarina u otro tipo de pisón que no sea el adecuado, es demasiada fuerza que se somete al muro en resonancia y entonces se empieza a fragmentar por capas, y en este caso lo que no sirvió fue la técnica utilizada. De ahí podemos continuar en que es necesario conocer todas sus características para su desarrollo.

Hay parámetros y límites para construir manualmente, existen técnicas para hacer el apisonado, Penagos señala que hay que empezar por las orillas del muro, después por el centro para que quede bien confinado las orillas y no se degrade tan fácilmente. Los pisonos tienen que tener cierto peso, normalmente van de acuerdo a la cultura y cuestiones físicas del lugar donde se está apisonando, además de características físicas de las personas, hay pisonos de madera, de metal, cuadrados, curvos, cónicos, esquineros, medianeros, etc.

Una de las grandes ventajas que menciona Penagos es que de la tierra compactada, el acabado queda al natural, y no daña al medioambiente.

Para la cimbra de este sistema, un modelo muy común es el que se emplea tableros de madera tricapa con un conjunto de correas horizontales y verticales conectadas mediante varillas y tuercas, atirantándose el conjunto con varillas roscadas tipo espadas, con tuercas y aceros lisos de 8 mm tensados y sujetos con ranas (Font & Hidalgo, 2011), como la muestra la imagen 2:



Imagen 3. Muro de tierra compactada con la utilización de una cimbra de madera.

Recuperado de : (Font & Hidalgo, 2011)

Penagos (anexo 2) concuerda con los autores sobre las características de la arquitectura de tierra: es bastante buena a la compresión, pero al cortante no lo es. Por lo cual la manera de diseñarla, tiene que seguir ciertas reglas para que pueda resistir, y su humedad, depende de la técnica que va de un 6% a 15%. Por ultimo menciona que el agua óptima va a provocar que a la hora que se seque aguante mas a la compresión, por eso es necesario e importante encontrar el contenido de agua optima.

La mayoría de los estudios indican que los suelos apropiados para la tierra compactada deben tener baja cantidad de limo, poca materia orgánica y contenido alrededor del 30% de arcilla y 70% de arena esto significa que se debe buscar un tipo de tierra con cantidades bien distribuidas de arena gruesa, arena media, arena fina, limo y arcilla para obtener, cuando se compacta, el menor volumen de

vacíos y, por consiguiente, una densidad más elevada. Este concepto se denomina continuidad granulométrica. eso no significa que haya necesidad de análisis complejos o un gran desarrollo tecnológico. Cabe señalar, sin embargo, que para la tierra compactada, el principal responsable de la estabilización de la tierra es la energía de compactación (Neves & Borges Faria, 2011)

El pisón no ha de tener mucho peso, pues la compactación no se produce por la fuerza de los impactos, sino por la frecuencia de éstos, que hacen que las partículas del suelo se acomoden eliminándose los vacíos. El pisón mecánico más recomendado para la tapia es el neumático tipo aguja (Neves & Borges Faria, 2011)

El sistema de tierra compactada que se estabiliza con cemento se debe mantener húmeda al menos durante los tres días sucesivos, mojando la pared tres veces al día, como mínimo. Cuando se utiliza la cal es importante que no se aplique ningún tipo de material que selle la superficie de la pared durante los treinta días posteriores a la compactación. (Neves & Borges Faria, 2011)

La humedad óptima para la compactación se controla mediante una prueba rápida muy sencilla, conocida como *drop test*, que consiste en tomar una porción de la mezcla, ya húmeda, y comprimirla con la mano: al abrir la mano, la bola formada debe tener la marca de los dedos, y cuando esa bola se deja caer desde una altura de 1 metro, se tiene que romper. Si no es posible hacer la bola con la mano, la humedad es insuficiente, si ésta cae y se mantiene entera, la humedad es excesiva. (Neves & Borges Faria, 2011)

Aunque tradicionalmente los muros de tierra han formado parte de la estructura portante de los edificios, el uso actual de paredes de tierra no tiene porque ser exclusivamente con finalidad estructural. (Berstraten, Hormias, & Altemir, 2011)

#### 1.1.4 Ejemplos de sistemas de tierra compactada



2000 Capilla de la Reconciliación. Berlín, Alemania. Arquitectos: Reiterman y Sassenroth. Construcción del tapial: Lehm Ton Erde, Martin Rauch.

Imagen 4. Recuperado de (Berstraten, Hormias, & Altemir, 2011)

En enero de 1999, se realizaron ensayos de diversas muestras de mezclas para averiguar su resistencia a compresión, tracción y cortante. La mezcla que obtuvo los mejores resultados, como se muestra en la siguiente tabla (Tabla 2), fue seleccionada para construir la capilla. Se trata de una mezcla de arcilla y gravas de diversas granulometrías con un pequeño porcentaje de fibras de lino añadidas.

Características del material	
Contenido inicial de humedad	8.20%
Retracción	0.15%
Resistencia a compresión	3.2 N/mm <sup>2</sup> (32.63kg/cm <sup>2</sup> )
Modulo de elasticidad	650 N/mm <sup>2</sup>
Resistencia a Flexión	0.63 N/mm <sup>2</sup>
Resistencia a cortante	0.79 N/mm <sup>2</sup>

Tabla 2 : Características del sistema de tierra compactada (Berstraten, Hormias, & Altemir, 2011)

Berstraten, Hormias, & Altemir (2011) mencionan que la Capilla de la Reconciliación de Berlín es un referente a nivel europeo, dado que se trata del primer edificio público con estructura portante de tierra construido en los últimos 150 años en Alemania.

Barros & Imhoff (2010), citan al Ingeniero peruano Julio Vargas (1993), especialista en construcción con tierra: "vale la pena mencionar estudios de resistencia de materiales realizados en años recientes, que han demostrado que los muros de tapia soportan en promedio un 40% más esfuerzos de compresión, tensión y corte que aquellos edificados con base en mampostería de adobe, los cuales, a pesar de su frecuente uso y difusión en todo el mundo, llegan a desarrollar fallas estructurales debido a la falta de homogeneidad entre las piezas y el mortero que las une".

Esta demostrada la solvencia del material aplicado a cerramientos de edificios con estructura independiente, como es el caso del siguiente proyecto:



Imagen 5. Recuperado de: (Berstraten, Hormias, & Altemir, 2011)

2001 Centro de Visitantes en Eden Project, Cornwall, Reino Unido. Arquitecto: Grimshaw Architects. Construcción del tapial: RamCast, Rowland Keable.

El Proyecto Eden ocupa una vieja cantera de caolín cerca de St Austell en Cornualles en el sudoeste de Inglaterra. Los muros de tierra no tienen función portante, sino únicamente de cerramiento; aunque por su resistencia podrían haber soportado correctamente las cargas. La tierra utilizada estaba formada por arcillas de baja expansividad y un alto contenido en áridos. Esta tierra estaba situada a una profundidad de entre 2 y 3 metros, sobre la capa de arcillas de caolín que era el material principal de extracción de la cantera.

Los muros se construyeron a un ritmo de 7,5 m<sup>2</sup> por día, equivalente 4 m<sup>3</sup> o 10 toneladas de tierra por día. (Berstraten, Hormias, & Altemir, 2011)



Imagen 6. Recuperado de : (Berstraten, Hormias, & Altemir, 2011).

2008 Biblioteca Sublette County , Pinedale, Wyoming, EE. UU. Arquitectos: Carney Architects Construcción del tapial: Terra Firma Builders.

Este edificio consta, según sus arquitectos, como el primer edificio público moderno de Estados Unidos en usar tapial con aislante como material de construcción.

La tierra apisonada fue seleccionada por sus cualidades térmicas, el uso de materiales locales y por su calidad táctil, para lograr la máxima eficiencia energética en un clima extremo de gran altitud.

El sistema de tapial utilizado se denomina Sirewall, (tapial estabilizado y con aislamiento), una patente de Terra Firma Builders. Este sistema en sándwich tiene

la particularidad de incluir barras de refuerzo de acero corrugado para fijar el aislamiento de poliestireno extruido de 10 cm de ancho en el interior del tapial, recubierto por una hoja exterior de tierra de 17,5 cm de ancho y otra interior de 25 cm.

La transmitancia térmica del aislamiento interior es de 0,03 W/m<sup>2</sup>oC, lo que sumado a la inercia térmica de la tierra garantiza el confort necesario para la biblioteca. La mezcla de la tierra utilizada está formada por una selección de tierras con una buena granulometría. Contení un 10% de cemento portland y oxido de hierro para realzar el color ocre. La mezcla se compacto mediante un pisón neumático con una cabeza de 10 cm de diámetro y el contenido de humedad se controlaba mediante el *drop test*. Después la mezcla se compacta por capas de 15 cm de altura hasta completar los muros de 4 metros de altura media.

Berstraten, Hormias, & Altemir (2011) indican que según datos del constructor, el promedio de valores de resistencia a la compresión es de 2,9 N/mm<sup>2</sup> (29.57 kg/cm<sup>2</sup>), con algunos resultados superiores a 4,1 N/mm<sup>2</sup> (41.81kg/cm<sup>2</sup>). (2011)

### 1.1.5 Las puzolanas y sus características

En el subsuelo del Área Metropolitana de Guadalajara -AMG- existen materiales de origen volcánico, siendo materiales con características pumíticas, que localmente se conocen como jal y tepetate.

Esto nos da la posibilidad de aprovechar la propiedad puzolánica de los suelos del AMG.

La cal y la piedra caliza son materiales que han sido utilizados por la humanidad con fines constructivos desde tiempos prehistóricos. Los griegos y romanos hábiles en la utilización de “la cal” como material cementante, pudieron mezclarla con materiales naturales de origen volcánico que tenían a la mano, surgió entonces una nueva técnica consistente en mezclar los materiales volcánicos como materiales activos con la cal, para dar lugar a “cementos y morteros romanos” a base de cal y puzolana (Vargas del Río, 2002).

La puzolana es llamada así por el lugar en el que fue descubierta, es un sedimento de cenizas volcánicas con un 40-60 por ciento de silicatos y un 15-25 por ciento de cal, y esto dio como resultado un extraordinario material de unión. Esto dio como resultado el hormigón romano que es un material monolítico, donde su durabilidad dependía totalmente de la calidad de la puzolana (Sigfried, 1971)

La denominación de puzolanas se refirió originalmente a los materiales naturales de origen volcánico que reaccionan con la cal. Las puzolanas dan por lo tanto propiedades cementantes a un conglomerante no hidráulico como es la cal (Vargas 2002).

Guerrero Baca, Roux Gutiérrez, & Soria López (2010) recalcan que el uso de la cal como estabilizante de la tierra ha sido probado en diferentes tipos de obras

civiles, especialmente las de consolidación de terrenos para el desarrollo de infraestructura e ingeniería de caminos. Sin embargo, en el ámbito de la arquitectura térrea, los estudios y normas para su aplicación en nuestro país se encuentran todavía en una etapa experimental.

Ventajas de las puzolanas en los cementos y concretos puzolánicos	
En las resistencias mecánicas	D. En la plasticidad
1 A largo plazo, al prolongar el periodo de endurecimiento;	D.1. Rebajando la relación a/c;
1.1. Mayor resistencia a tensión;	D.2. Reduciendo la sedimentación en el concreto;
1.2. Mayor resistencia a compresión;	D.3. Evitando el “sangrado”,
1.3. Mejor relación tensión/compresión;	E. En la impermeabilidad
Mayor estabilidad	E.1. Reduciendo la porosidad;
B.1.Frente a la expansión por cal libre;	E.2. Evitando la formación de eflorescencias;
B.2. Frente a la expansión por sulfatos;	E.3. Produciendo mayor cantidad de tobermorita;
B.3. Frente a la expansión por reacción alcalina agregado;	F. En la adherencia
B.4. Frente a la retracción térmica por enfriamiento;	F.1. Del agregado a la pasta;
B.5. Frente a la contracción térmica por enfriamiento;	F.2. Del mortero a los armados;
B.6. Frente a la figuración;	G. En el comportamiento térmico
Mayor durabilidad	G.1. Al desprender menor calor de hidratación;
C.1. Frente a ataques por aguas muy puras o ácidas;	G.2. Al producir menor elevación de temperatura;
C.2. Frente a ataques por aguas y suelos selenitosos	H. En el rendimiento y la economía
C.3. Frente a ataques por agua de	H.1. Al corresponder a los cementos

mar;	puzolánicos mayor volumen que a otros conglomerantes a igualdad de peso;
C.4. Frente a ataques por gases de descomposición y fermentación de materias orgánicas;	H.2 Al ser los cementos puzolánicos en general conglomerantes más baratos.
C.5. Frente a la desintegración por reacción álcalina-agregado;	

Tabla 3: Ventajas de las puzolanas en los cementos y concretos puzolánicos.

Recuperado de: (Vargas 2002).

Estas ventajas que se ven en la tabla 3, nos dan pautas de cómo funcionan las puzolanas de la ZMG fundamentalmente en la resistencia a la compresión.

Tanto el subsuelo de casi toda la ZMG como los alrededores de la LP están constituidos por la Toba Tala la cual está constituida por material vítreo o africano, representados granulométricamente según el sistema unificado de clasificación de suelos (SUCS) por: limos (diámetro  $<0.75$  mm), arenas ( $4.75 >$  diámetro  $> 0.075$ mm) y gravas ( $25.4$  mm  $>$  diámetro  $> 4.75$  mm) de pómez dominante ( $> 90\%$ ) y en menor proporción por clastos de tamaño de arena y grava llamados líticos de roca y por material cristalino fragmentado o roto. (Vargas del Río, Zarate del Valle, & Gutiérrez Pulido, 2005).

El trabajo combinado de la cal y la tierra ha sido ampliamente estudiado y en la actualidad se sabe que existen cuatro procesos de interacción de ambos materiales. Guerrero Baca, Roux Gutiérrez, & Soria López (2010) citan a Oliveira:

1. *Intercambio iónico*. Las arcillas suelen tener cationes de sodio, potasio y magnesio que atraen con fuerza al agua como resultado de un desequilibrio en sus cargas superficiales. Si se le incorpora cal a la tierra, se integran iones de calcio que remueven a los de sodio, potasio y magnesio, con lo que se compensan las cargas superficiales y se controla la atracción de agua.

2. *Floculación*. Después de algunas horas de haber agregado un poco de cal a un suelo, las partículas de arcilla pierden agua, se agrupan y se comportan como

componentes de mayor tamaño con lo que se desplaza la curva granulométrica hacia la zona gruesa y se consigue un comportamiento más estable del conjunto.

3. *Acción puzolánica.* Proceso lento en el que reacciona la cal con los óxidos presentes en las arcillas generando silicatos y aluminatos de calcio que tienen un alto poder cementante.

4. *Carbonatación.* Reacción todavía más lenta en la que el hidróxido de calcio se combina con el bióxido de carbono del aire y forma cristales que atrapan a los minerales a su alrededor aumentando la cohesión del conjunto. Esta reacción sólo se presenta en las zonas superficiales del material que son las que están en contacto con la atmósfera.

Por lo tanto la actividad puzolánica se exhibe cuando reaccionan la puzolana y el hidróxido de calcio en presencia de humedad.

La reacción química de una puzolana con el hidróxido de calcio presente en la cal hidratada o el que se genera como un subproducto en la hidratación del cemento portland, es un fenómeno que depende en alto grado de la naturaleza de los componentes primarios (puzolana y/o cal hidratada y/o cemento pórtland), de la proporción relativa de éstos, así como de otros factores como son: la cantidad de agua de mezclado necesaria para dar lugar a una cierta consistencia; la presión, la temperatura y la humedad circundantes (condiciones de curado); y la duración total de la reacción en sí. (Vargas 2002)

Es obvio que la cal es un material que tiene un impacto sobre el medio ambiente, pero este es mucho menor que el de otros productos industriales utilizados en la construcción, además de que la bajísima proporción que necesita para estabilizar la tierra minimiza radicalmente este impacto. (Guerrero Baca, Roux Gutiérrez, & Soria López, 2010)

Vargas, (2002) obtuvo altas resistencias a la compresión, logrando resultados de mezclas de cal (33%) con puzolanas (66%) de hasta 160kg/cm<sup>2</sup> a los 90 días, la

diferencia a esta investigación es que esas pruebas fueron concebidas para una producción de tipo industrial que no sería accesible a la población en general. Por lo que la propuesta de esta investigación es aprovechar esta propiedad puzolánica de una forma más modesta, pero con la posibilidad de extenderse a un segmento de la población muy amplio.

También, es importante conocer las características de las puzolanas para su aplicación en el sistema de muros monolíticos, esto porque, este sistema su principal componente es la arcilla que funciona como el aglomerante, pero debido a su escasez en la AMG, y sus costos para transportar las arcillas de otro lugar, esa es la razón para el uso de las arenas pumíticas que podemos encontrar como ya se menciono anteriormente en gran parte del AMG.

## 1.2 Problemática

Los materiales industrializados están impactando negativamente el medio ambiente y la calidad de vida en el ser humano. Los métodos actuales para la construcción en vivienda no voltean a ver a la sustentabilidad como algo real o algo que se pueda hacer de forma sencilla y económica. De acuerdo con Mari (2000), una de las características del actual proceso de globalización es el incremento exponencial de la explotación de recursos naturales, el consumo exacerbado de materiales, componentes y sistemas en los países más ricos y su carencia en los más pobres. Otro rasgo del mismo fenómeno, es el desperdicio de materiales considerados descartables una vez cumplida su vida útil y su dispersión contaminante en la corteza terrestre.

Según Cortes Delgado (2001), uno de los problemas de la vivienda en México, es el problema del desarrollo tecnológico, donde los materiales de construcción que se ofrecen en el mercado en muchas ocasiones no son los más apropiados para la construcción de la vivienda. Algunos son altamente contaminantes, no son térmicos, no tienen características de protección acústica, ni resistentes, no son durables, son costosos y no han evolucionado en su diseño por representar para la industria una manera fácil de hacer dinero.

Cortes Delgado (2001) nos da cifras donde en México, de los 25 millones de habitantes que había en 1950, alrededor de 70% vivía en el medio rural y el restante, en el urbano. Para 2000 el fenómeno se invirtió: más de 70% de la población es urbana y menos de 30% vive en el medio rural. Esto significa que el núcleo urbano pasó en 50 años de 7.5 millones a casi 75 millones de personas, es decir, creció 10 veces.

Roux Gutierrez (2010) aborda a la vivienda como un problema grave a nivel mundial y esto se acrecienta en los países del tercer mundo. El mayor problema

es la falta de recursos económicos de los propietarios, la iniciativa privada y el sector público.

En los últimos años la vivienda en México ha generado diversos problemas, uno de ellos se relaciona de manera importante con la utilización de los materiales con los que se edifica, los cuales son traídos desde lugares lejanos, factor que eleva el costo de adquisición del material, y por ende de la vivienda.

A nivel mundial, durante el siglo XX se incrementó notablemente el consumo de la energía -al menos seis veces-, disminuyendo el consumo de carbón y aumentando el del petróleo. Este gran consumo se produce en los países desarrollados -casi dos terceras partes de la energía producida en el mundo-.

Aunado a estos problemas, tenemos que la fabricación de materiales de construcción colabora en la contaminación del medio ambiente. La quema de combustible para la producción de estos materiales es una de las mayores consumidoras de energía; Se afirma que la industria de la construcción absorbe la mayor parte de la energía que se produce, además de procesar la mayor cantidad de materias primas. En muchos países sus desechos ocupan un alto porcentaje del total de los que se generan (Cedeño Valdiviez, Enero-Diciembre 2010).

En consecuencia, la selección de los materiales y los componentes de un edificio influye directamente en el diseño y el rendimiento del edificio, los residuos de la construcción constituyen un problema cada vez más urgente, ya que una proporción considerable de los residuos que llegan a los vertederos son escombros procedentes de la construcción y demolición de edificios, diversos estudios cifran en un casi 40 % del total de la energía consumida para la construcción y el uso de los edificios y las viviendas, causando a su vez un 30% de las emisiones de CO<sub>2</sub> del planeta. (Borsani, 2011).

A nivel mundial, durante el siglo XX se incrementó notablemente el consumo de la energía, disminuyendo el consumo de carbón y aumentando el del petróleo. Este

gran consumo se produce en los países desarrollados (casi dos terceras partes de la energía producida en el mundo) (Cedeño Valdiviezo A. , 2010)

Entre las industrias que se identifican como las mayores consumidoras de energía, de acuerdo al Sistema de Clasificación Industrial de América del Norte son, la industria básica del hierro y acero, y la fabricación de cemento y productos a base de cemento en plantas integradas, la industria del hierro y del acero, en la figura 4 tenemos que represento el 13.6 % del consumo industrial en el 2012, y la industria del cemento fu la segunda consumidora de energía más importante, con una participación del 9.1% también en el 2012 (Secretaria de energía, 2012, p 39-41).

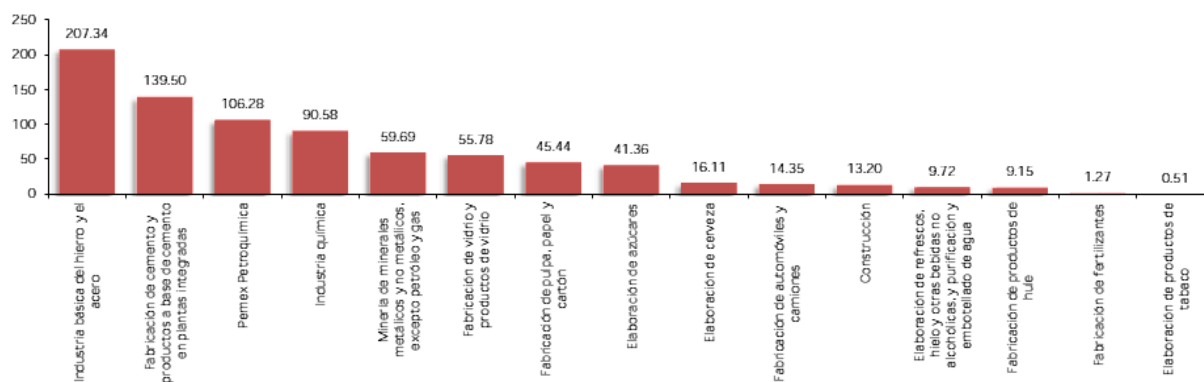


Figura 4 :Consumo energético de las principales ramas industriales y estructura por tipo energético  
Recuperado de: (Secretaria de energía, 2012, p 42).

En Europa la mitad de los materiales empleados en la industria de la construcción proceden de la corteza terrestre, produciendo anualmente en el ámbito de la Unión Europea 450 millones de toneladas de residuos de la construcción y demolición -RCD-; esto es más de una cuarta parte de todos los residuos generados. Este volumen de RCD aumenta constantemente, siendo su naturaleza cada vez más compleja a medida que se diversifican los materiales utilizados. Este hecho limita las posibilidades de reutilización y reciclado de los residuos, que en la actualidad es sólo de un 28%, lo que aumenta la necesidad de crear vertederos y de

intensificar la extracción de materias primas. 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 (Arenas Cabello, 2014).

Además de que el modelo de vivienda actual está demasiado arraigado en todas las esferas sociales, donde existen materiales y técnicas de construcción sostenible, no les logra satisfacer sus necesidades, muchas veces debido al desconocimiento o a la desconfianza que existe en los tipos de construcción sustentable; así que tenemos parámetros culturales, sociales y además constructivos, que nos impiden llegar a hacer del uso de los materiales naturales y reciclados una forma de hacer eficiente y sustentable la construcción.

### 1.3 Justificación

Se puede lograr un impacto a través de la construcción con materiales naturales, ya que ofrecen la capacidad de construir con materiales locales, además de que presentan un costo bajo de energía y donde estos materiales naturales ofrecen grandes capacidades a temperaturas extremas, reducen la contaminación y el impacto sobre el medio ambiente y el material mismo provee esas capacidades térmicas donde hoy en día se suplen con aire acondicionado y otros medio que gastan energía (Chiras, 2004).

La vivienda actual urbana tiene que hacer cambios en la forma en que se concibe, ya que como se sabe, se empieza a perder la batalla contra los problemas que afectan el medio ambiente, y la construcción tiene mucha parte en estos problemas, además de que los esquemas que tiene la gente hoy en día va por otro camino que el de la sustentabilidad, es por eso que se tiene que enlazar los elementos que existen en la construcción hoy en día y entrelazarlos con la arquitectura sostenible, además de encontrar un balance económico. Que le haga entender a la gente que está bien construir de forma sustentable y de que no hay que tenerle miedo o desconfianza a los materiales y construcción sustentable, además de que si se encuentran estos elementos económicos se pueda ofrecer a todo tipo de vivienda para que el beneficio vaya en todas las escalas sociales.

Y se utilizaran suelos como la jal y el tepetate, para la generación de este sistema constructivo; En el subsuelo de la ZMG existen materiales de origen volcánico en particular la Toba Tala, que es un material pumítico que localmente se conoce como jal (Vargas 2002), y se estima que el tepetate se encuentra aproximadamente en un 30% en territorio mexicano, donde al igual que el jal tiene características puzolanicas por ser una arena pumitica y un suelo volcánico.

Se le tiene que dar un enfoque "verde" o ecológico, en arquitectura y construcción es visto no sólo como un planteamiento a favor de la tierra, sino como una propuesta que cubre las necesidades habitacionales de los seres humanos en una forma más completa que la vivienda tradicional, a través de la creación de espacios más saludables y menos costosos.(Chiras, 2004)

Como respuesta a este enfoque verde, tenemos la tierra o suelo; este es el material de construcción natural más importante y abundante en la mayoría de las regiones del mundo. Se obtiene directamente del sitio cuando se excava, las técnicas de construcción con tierra datan de hace más de 9000 años, además viene en miles de composiciones diferentes que pueden ser procesadas de varias maneras.(Minke, 2005).

Las condiciones climáticas a las que se está sometiendo nuestro planeta por la contaminación obligaran a que se deba de cambiar de manera drástica la mentalidad sobre los materiales de construcción, y es aquí donde entra la tierra como material por su bajo contenido energético, (Cedeño Valdiviezo, Enero-Diciembre 2010). Por lo tanto, la elección de materiales con menor contenido energético, tanto en su fabricación como en su puesta en obra, tiene que ser una meta del diseño sustentable, además de la elaboración de formas, sistemas y elementos constructivos que requieran menos energía para su construcción y acondicionamiento

Entonces es necesario impulsar materiales y procedimientos de construcción que garanticen la conservación del medio ambiente y las mejores condiciones de habitabilidad en cada tipo de clima, además de que preserven la imagen tradicional de los poblados. Los materiales que se debieran utilizar por su bajo contenido energético son las rocas naturales y adobes (Cedeño Valdiviezo A. , 2010)

Además los materiales generan residuos de construcción y demolición (RCD), que representa, en peso promedio el 17.5% de los Residuos Sólidos Urbanos (en lo consecutivo RSU). En Jalisco, al 2008, se generaban aproximadamente 1,172 toneladas diarias de RCD (SEMARNAT & INECC, 2012). En la ZMG, incluyendo sus ocho municipios (Guadalajara, Zapopan, San Pedro Tlaquepaque, Tonalá, Tlajomulco de Zúñiga, El Salto, Ixtlahuacán de los Membrillos y Juanacatlán), según Bernache (2006), se generan 5,324 toneladas diarias de RSU. Aplicando el porcentaje promedio mencionado anteriormente y con datos de 2012, podríamos asumir que se producen entre 900 y 1120 toneladas diarias de RCD en la ZMG.

En Jalisco en un estudio realizado en el 2015 por la Sociedad Hipotecaria Federal (2015), la demanda de vivienda, se presenta a nivel de adquisición de 33,315 viviendas al año, de mejoramiento 15,540 viviendas y de autoproducción la cantidad de 3,190, esto nos da un total de 52,045 viviendas al año. Estos datos nos da lugar para repensar la forma de construir la vivienda, debido a la demanda actual que se genera para su construcción.

Utilizando el sistema de tierra estabilizada, le daremos un lugar a los materiales naturales, como la tierra, que como punto principal es y será un material local y reutilizable, esto generara menos costes en energía, tanto de transporte, como de producción, y menos desechos en la construcción y la vivienda y el usuario será el principal beneficiado, donde como ventaja es que se puede lograr desde un proceso natural o no industrializado hasta la industrialización del sistema, se evita y quita fuentes contaminantes, generando ese desarrollo sustentable en la construcción.

## **2. Marco Conceptual**

### **2.1 Conceptos Clave**

#### **2.1.1 Vivienda**

Ferrandio Nicolau (1992) habla de la vivienda como el refugio natural del hombre, en el que este habita de modo temporal o permanente, y que es un derecho tener una vivienda digna y adecuada, en el que la vivienda es una parte esencial en la calidad de vida del hombre, Costa (2010) refuerza este concepto, y menciona que la vivienda no debe de servir solo como cobijo, sino que también debe de ser un lugar confortable y saludable, la vivienda, su objetivo principal es crear una vida agradable y cómoda .

En cuanto a que signifique que sea digna podría entenderse que es digna aquella vivienda que da cumplimiento a las más básicas necesidades del hombre, como pueden ser una cierta privacidad -intimidad- y un elemental equipamiento sería adecuada aquella vivienda adaptada al ambiente físico, social, cultural e histórico en el que surge también el concepto de intimidad

Ferrandio Nicolau (1992) nos explica que el motivo de que los hombres construyan casas no es sólo defenderse del clima o de los animales: el hombre construye casas porque necesita proyectar especialmente su intimidad. Esta necesidad de intimidad personal y familiar supone además una concreción de la dignidad humana, puesto que la morada es prolongación y condición espacial de la seguridad personal y de la dignidad de la persona humana, que exige el respeto del lugar donde se desarrolla la mayor parte de la vida y de la intimidad personal y familiar el derecho a la vivienda digna y adecuada podría definirse como el derecho de toda persona a tener un espacio íntimo, adaptado al entorno y a la sociedad en que se encuentra, donde puedan verse satisfechas las necesidades básicas de una vida digna.

Además, la amenaza sobre la vivienda vernácula aún existente crecía día a día, influyendo en la mentalidad de sus usuarios y tratando de convencerlos de sustituirla por otras con materiales “modernos”. (Cedeño Valdiviezo A. , 2010)

Para Gatti (2012), hoy día una sola evaluación sobre la base de criterios estándar, tales como la estabilidad estructural, la seguridad contra incendios y el ruido y el comportamiento térmico no es suficiente. La higiene y los aspectos humanos son cada vez más importante."Con la reducción de las tasas de cambio de aire en los edificios contemporáneos muy bien aislados y sellados, el papel desempeñado por las superficies que encierran las habitaciones se vuelve más importante. Esto se aplica particularmente con respecto a la humedad del aire interior. Para evitar los niveles de humedad ampliamente fluctuantes en áreas críticas, es importante que las superficies más exteriores de la pared sean capaces de adaptarse y absorber a las fluctuaciones del grado de humedad del aire, causada por ejemplo por ducharse, cocinar y calentar".

El exceso de humedad puede ser liberado más tarde y puede regresar a la habitación cuando se ventile. A la inversa, cuando el aire interior está demasiado seco, la humedad se puede liberar dentro de la habitación. Esta propiedad del material tierra, es conocida como la capacidad de absorción, que no reemplaza la necesidad de ventilación, pero que mejora las condiciones de los espacios interiores, sobre todo cuando hay una tasa de cambio de aire bajo. Los materiales de construcción con tierra son por lo tanto, ideales para mejorar el clima de los ambientes interiores.

Haramoto (1998) se refiere a la vivienda no sólo como la unidad que acoge a la familia, sino que es un sistema integrado además por el terreno, la infraestructura de urbanización y de servicios, y el equipamiento social-comunitario dentro de un contexto cultural, socio-económico, político, físico-ambiental. Al mismo tiempo tiene su manifestación en diversas escalas y lugares, esto es: localización urbana o rural, barrio y vecindario, conjunto habitacional, entorno y unidades de vivienda.

Sus diversos atributos se expresan en aspectos funcionales, espaciales, formales -estéticas y significativas-, materiales y ambientales. Desde un enfoque como proceso habitacional, incluye todas las fases, entre ellas la prospección, la planificación, la programación, el diseño, la construcción, la asignación y transferencia, el alojamiento y mantención, el seguimiento y evaluación. En dicho proceso participan como actores las personas y entidades de los sistemas público, privado, técnico-profesional y poblacional.

La vivienda como objeto, no significa que sea un producto terminado e invariable, siendo comparable a un organismo vivo en cuanto a que está en continuo proceso de evolución, pero manteniendo una identidad. La vinculación inseparable entre objeto real y sujeto humano en un determinado medio, establece una relación ecológica y su manifestación se da mediante el concepto de lugar.

Cortes Delgado (2001) señala que la responsabilidad y el desafío durante la primera mitad del siglo XXI se circunscribe a cuidar el mejor aprovechamiento de los recursos, arreglar el desorden causado en los últimos decenios y ordenar los contextos urbanos, para lograr una mejor calidad de sus infraestructuras, equipamientos y servicios, y de vivienda, tratando de enfrentar el problema actual sin acrecentar los errores del pasado.

Por lo tanto, los proyectistas para Cedeño Valdiviezo A.(2010) debieran tener como meta del diseño bioambiental:

1. La sustitución de fuentes no renovables por fuentes renovables.
2. La elección de materiales con menor contenido energético, tanto en su fabricación como en su puesta en obra.
3. La elaboración de formas, tipologías edilicias y elementos constructivos que requieran menos energía para su construcción y acondicionamiento.

## 2.1.2 Sostenibilidad y Construcción

La sustentabilidad, su principal objetivo es garantizar la vida del ser humano, satisfaciendo sus necesidades básicas, donde se debe luchar contra la desigualdad, los diferentes poderes, político, económico, social, cultural y como poder controlar el crecimiento poblacional, y la vivienda actual sufre un gran impacto por estos factores, así, el uso del proceso constructivo de tierra compactada, podría generar un menor impacto ambiental y a la vez cumplir con las necesidades básicas de vivienda, donde al volver a construir con tierra en su estado natural, al menos se le da esa equidad en cuanto a la vivienda urbana.

Además tiene que cumplir en términos como el confort, salud, y habitabilidad. Todo esto tiene que lograrse cumpliendo con objetivos primordiales como reducir las emisiones de Carbono, los costos de energía requerida en cuando a demolición y residuos(Hall Matthew R, 2012).

Criterios de sostenibilidad que ofrece la tierra según Berstraten, Hormias, & Altemir (2011)

- La fuente de abastecimiento del material es ilimitada.
- Analizando los tipos de tierra se pueden incorporar mejoras a nivel granulométrico y de composición.
- permite incorporar la posibilidad de utilizar tierra de las propias excavaciones, favoreciendo la reducción de residuos de la obra y los gastos de transporte de material.
- Los procesos de producción son sencillos, sin necesidad de cocciones que generan combustiones con un alto consumo energético. A diferencia de los ladrillos o el hormigón, la energía utilizada en la producción es muy baja.

no se producen emisiones tóxicas durante el proceso de transformación ni durante su vida útil.

- El lugar de extracción puede ser el mismo emplazamiento de la obra, de forma que el impacto ambiental durante el transporte y el impacto paisajístico en la producción se reduce a cero.
- El consumo de agua en la producción y en la obra es especialmente bajo en el tapial y BTC donde la tierra se trabaja con una humedad cercana al 10%.
- Los restos de material desechados se pueden reintegrar en el mismo emplazamiento
- La demolición de un elemento de tierra se puede realizar con medios mecánicos, aunque sin precisar de energía excesiva.

En el caso de la construcción y de la arquitectura de tierra, el concepto significa mejorar los parámetros estructurales, principalmente la resistencia y la durabilidad del edificio (Neves & Borges Faria, 2011)

Se reconoce que el sector de la construcción civil es uno de los que causan mayores impactos sobre el ambiente. Además del uso de gran cantidad de recursos naturales utilizados como materia prima, el sector consume gran parte de la energía disponible en el procesamiento y en el transporte de estos materiales. (Neves & Borges Faria, 2011)

México requiere balancear el desarrollo de tecnologías para los asentamientos humanos, con la protección y conservación del medio ambiente y el desarrollo sustentable. México necesita que sus viviendas y sus ciudades tengan alta calidad y conserven su identidad para poder ser competitivas en el escenario internacional (Cortes Delgado, 2001)

La construcción con tierra durante la primera década del siglo XXI ha resurgido en todo el mundo como un material con propiedades sostenibles, de bajo impacto ambiental y de gran capacidad expresiva (Berstraten, Hormias, & Altemir, 2011)

A las puertas de la actual visión de la arquitectura sostenible, es obligado recuperar la tierra cruda como material de construcción; tan conocido y validado por la historia como también casi olvidado por el progreso del siglo XX. (Berstraten, Hormias, & Altemir, 2011)

La construcción con tierra en el siglo XXI se apoya en los criterios de sostenibilidad. La tierra ofrece una gran oportunidad de reducir el impacto ambiental de la edificación, y por tanto creemos conveniente enumerar sus cualidades para potenciar su valor. La fuente de abastecimiento del material es ilimitada. Analizando los tipos de tierra se pueden incorporar mejoras a nivel granulométrico y de composición. También permite incorporar la posibilidad de utilizar tierra de las propias excavaciones, favoreciendo la reducción de residuos de la obra y los gastos de transporte de material.

Los procesos de producción son sencillos, sin necesidad de cocciones que generan combustiones con un alto consumo energético. A diferencia de los ladrillos o el hormigón, la energía utilizada en la producción es muy baja. Además no se producen emisiones tóxicas durante el proceso de transformación ni durante su vida útil. El lugar de extracción puede ser el mismo emplazamiento de la obra, de forma que el impacto ambiental durante el transporte y el impacto paisajístico en la producción se reduce a cero. El consumo de agua en la producción y en la obra es especialmente bajo en el tapial y BTC donde la tierra se trabaja con una humedad cercana al 10% (Berstraten, Hormias, & Altemir, 2011).

Cedeño Valdiviezo A. (2010) menciona que para avanzar hacia la sustentabilidad del medioambiente construido es necesario tener en cuenta cuatro principios básicos y esenciales a partir de los cuales se deriven los enfoques y las acciones:

- No consumir recursos renovables a mayor velocidad que su generación natural.
- No consumir recursos no renovables sin prever soluciones alternativas para cuando se agoten.
- No generar más cantidad de residuos que los que el medio puede absorber o inertizar.
- En cualquier acción por desarrollar, involucrar totalmente a la población desde el inicio

Así, el diseño de un edificio deberá considerar la elección de los materiales teniendo en cuenta sus efectos micro ambientales, su larga durabilidad, su flexibilidad y su fácil mantenimiento, logrando así su conservación y sus bajas emisiones (Cedeño Valdiviezo A. , 2010)

Arenas Cabello,( 2014) indica que se tienen que lograr los siguientes objetivos:

- La reducción y la gestión de los residuos generados por los materiales de construcción
- La innovación del producto verde, incluyendo su desarrollo tecnológico e investigación y la difusión de la información sobre las mejores prácticas
- La creación de mercados para productos verdes con instrumentos fiscales
- La transmisión de la información de arriba hacia abajo en la cadena del producto

### **2.1.3 Sistema de Muro Monolítico y las puzolanas**

Barros & Imhoff (2010) afirman que la tierra es el material de construcción con menor huella ecológica y puede manipularse sin una capacitación sofisticada de mano de obra, lo que implica que puede ser aplicada básicamente para la solución de demandas habitacionales.

La diversidad y singularidad de los sistemas constructivos de muros monolíticos supone un campo de amplia difusión temporal y geográfica con un repertorio variado de técnicas y materiales. Una alternativa viable desde el punto de vista ecológico, sino también económico, especialmente en aquellos países donde por razones climáticas no hay grandes requerimientos de aislamiento térmico (Barros & Imhoff, 2010).

El suelo natural, siempre que reúna ciertas características granulométricas, puede ser sometido al tratamiento denominado “estabilización”. La adición de un agente estabilizante, como el cemento, permite aprovechar mejor sus cualidades y añadir otras que por sí solo no posee. Este procedimiento de estabilización consiste en extraer el suelo natural del terreno, pulverizarlo, agregarle una cantidad determinada y reducida de cemento, adicionarle agua hasta el humedecimiento óptimo de la mezcla y compactarlo razonablemente, con lo que se obtiene una masa de gran resistencia al terminar el endurecimiento. De esta manera se consigue que el material soporte cargas de trabajo muy superiores a las que podría resistir el suelo sin cemento, obteniéndose, además, una buena durabilidad ante la acción de agentes atmosféricos (Barros & Imhoff, 2010).

Es importante desarrollar y mejorar las técnicas de construcción con tierra para equiparar su eficiencia a los sistemas de construcción establecidos hoy en día en el mercado.

El campo de la sustentabilidad están revalorando su uso se encuentra la abundancia de su materia prima; la facilidad de su extracción, transformación, edificación y reparación; el bajo consumo energético requerido para su elaboración; la nula emisión de contaminantes al medio ambiente; el confort térmico que se obtiene en sus espacios; su posibilidad de reciclaje y su integración final al medio natural cuando se ha cumplido su ciclo de vida útil (Guerrero Baca, Roux Gutiérrez, & Soria López, 2010).

Guerrero Baca, Roux Gutiérrez, & Soria López(2010) señalan que la cal es una substancia que presenta muchas cualidades desde el punto de vista ecológico e higiénico. Se trata de un producto que tiene una alta compatibilidad con el resto de los materiales constructivos y que, gracias a diferentes procesos químicos, modifica las condiciones naturales de los suelos, en este caso, teniendo una acción puzolánica como ya se menciona para su uso en los muros monolíticos

## 2.2 Construcción del Objeto

Chiras (2004) como ya se menciona Se le tiene que dar un enfoque "verde" o ecológico, en arquitectura y construcción es visto no sólo como un planteamiento a favor de la tierra, sino como una propuesta que cubre las necesidades habitacionales de los seres humanos en una forma más completa que la vivienda tradicional, a través de la creación de espacios más saludables y menos costosos.

Un ambiente sano colabora a mantener y preservar la salud del ser humano. Por lo tanto es fundamental incorporar el concepto de que la contaminación ambiental no sólo causa desequilibrio en ecosistemas naturales o urbanos, se introduce en los espacios interiores de todo edificio u obra construida, y es aquí donde la interacción del sistema constructivo y sus ventajas pueden lograr las condiciones ambientales necesarias para la vivienda urbana actual.

Estas condiciones ambientales básicas podrían resumirse en la necesidad de un medio ambiente: sano, puro y decente, donde la vivienda se inserta en un marco humano y natural que afectará directamente a lo que se ha entendido por el derecho a una vivienda digna y adecuada. (Ferrandio Nicolau, 1992)

La utilización de materiales adecuados, que signifiquen un menor costo energético en su producción, que provengan preferiblemente de fuentes renovables, con posibilidad de reciclaje y que además no afecten a la salud, son los requisitos para hacer de las construcciones un lugar ambientalmente sensible, económicamente sustentable y humanamente habitable. En este sistema de muros monolíticos es importante este apartad, ya que esa investigación es una caracterización de este sistema pero con otros componentes para lograr estos beneficios tanto a la vivienda como al ser que la habita.

El papel de los constructores es muy importante en empezar a cambiar el modo de pensar de los usuarios, y desechar mitos en el sentido de que estos materiales

son de categoría inferior y que las obras que se pueden lograr con los mismos son estéticamente desagradables (Cedeño Valdiviezo A. , 2010)

Entonces porque no empezar a construir con tierra de nuevo, los datos nos muestran que construir con tierra, tiene grandes beneficios y donde aquí en México varios sistemas de construcción con tierra podrían aplicarse, porque si existen países donde están regulando el uso de estos sistemas de construcción con tierra desde hace ya varios años, sea el caso de Nueva Zelanda, Australia, Inglaterra etc., porque no aplicarlo en la ZMG,

Claro que se tienen que checar los sistemas de tierra innovadores para que el uso de estos sistemas se pueda lograr de una forma más sencilla en la ciudad, y además la tierra tiene un impacto positivo tanto para el hombre y el medio ambiente, donde si su uso es correcto se puede aplicar en la edificación urbana, si la tierra en la ZMG ofrece características para el uso de estos sistemas, porque no buscar estas innovaciones tecnológicas o crearlas, y así el uso de la tierra, servirá, para crear edificaciones sustentables, innovadoras y sobre todo mejorando la calidad de vida del hombre

Los materiales que se debieran utilizar para construir, si es que se desea contribuir a la protección del medio ambiente, deben ser piedras o rocas naturales, adobes y agregados como gravas, arenas, tierra, y como aglutinante, el mínimo de cemento que fuese posible. (Cedeño Valdiviezo A. , 2010)

Debe cambiarse la mentalidad de la industria y de las estrategias económicas con la finalidad de que den prioridad al reciclaje ante la tendencia tradicional de la extracción de materias naturales. Debe fomentarse la utilización de sistemas constructivos y energéticos en base a productos y energías renovables. Se deben evitar los materiales de construcción potencialmente peligrosos para la salud o el medio ambiente y, especialmente, todos aquellos que, además, generan residuos tóxicos o contaminantes

Para una adecuada selección de los materiales a emplear en la Edificación es necesario conocer y establecer, además de sus propias características o propiedades, las posibles uniones y combinaciones entre ellas, el concepto estructural y la tecnología constructiva, sin menospreciar el factor económico, si tenemos en consideración que la cuantía del coste de los materiales en una obra representa el 50% del coste total de una edificación; y finalmente, el *factor ambiental*. (Arenas Cabello, 2014)

Por cuestiones de sostenibilidad ambiental, económica y social, disponibilidad, seguridad y accesibilidad a una vivienda digna, existe una necesidad de romper con las creencias y prejuicios que existen sobre la construcción con tierra frente al “material noble”, nomenclatura del hormigón y del ladrillo en América Latina que resulta muy simbólica en su connotación. (González Blanco, 2011)

*"Porque evolucionar en una técnica no significa necesariamente olvidar la tradición sino superarla". (Font & Hidalgo, 2011)*

### **3. Hipótesis y preguntas de investigación**

#### **3.1 Hipótesis**

Un sistema constructivo sostenible ha de tener ciertas características: a) la optimización de los recursos; b) la disminución del consumo energético y de sus residuos y emisiones; c) el aumento de la calidad de vida de los habitantes, y; d) una disminución del mantenimiento y del costo. Por lo tanto al evaluar la potencial aplicación de las arenas pumíticas del Área metropolitana de Guadalajara, caracterizando su poder cementante y resistencia física para su uso en un sistema de muros de tierra compactada, se pueden lograr aplicaciones sostenibles con materiales locales en la construcción de la vivienda urbana.

#### **3.2 Pregunta de Investigación**

¿Qué particularidades se requieren para la caracterización de las arenas pumíticas para su uso en el sistema constructivo de tierra compactada ?

##### **3.2.1 Preguntas subsidiarias**

- ¿Cuáles serían sus ventajas en comparación a sistemas tradicionales?
- ¿Cuáles serían las características y especificaciones del sistema constructivo de muros monolíticos en base a puzolanas como la jal y tepetate?

- ¿Qué parámetros o limitantes físicos tiene la jal y el tepetate para su aplicación en este sistema?
- ¿Cómo sería el funcionamiento de este sistema constructivo en sus variantes de sistema industrial y de autoconstrucción?

## **4. Objetivos**

### **4.1 Objetivo general**

Evaluar la potencial aplicación de las arenas pumíticas del Área metropolitana de Guadalajara, caracterizando su poder cementante y resistencia física para su uso en un sistema de muros de tierra compactada.

#### **4.1.1 Objetivos Particulares**

- Conocer sus ventajas y desventajas en el uso de este sistema de muros monolíticos.
- Identificar las ventajas de la cal al combinarla con arenas pumíticas.
- Conocer las características y especificaciones del sistema constructivo de muros monolíticos en base a puzolanas como el jal y tepetate.
- Identificar los parámetros y/o limitantes físicas que tiene la jal y el tepetate para su aplicación en este sistema.
- Evaluar las arenas pumíticas a base de datos estadísticos a base de las pruebas realizadas para conocer sus alcances y potencial uso en sistemas constructivos .

#### **4.1.2 Objetivos específicos**

- Hacer un experimento con puzolanas del AMG y valorar su poder cementante al mezclarse con cal y cemento.
- Evaluar el uso de las arenas pumíticas como componente principal para su posible uso en el sistema de muros monolíticos.
- Tener un análisis de las granulometrías y resistencias del jal y del tepetate, para su posterior uso en los sistemas constructivos de tierra.
- Caracterizar sus limitantes para su uso en la autoconstrucción e industrializado.

## **5. Metodología**

### **5.1 Elección Metodológica**

La presente investigación está basada en el modelo descriptivo, pues contempla datos estadísticos, numéricos y cuantificables, teniendo un enfoque meramente cuantitativo.

Esta metodología se planteo, de acuerdo a los alcances que se querían lograr con la investigación, para tener los pasos concretos para obtener los resultados esperados, esto para poder comprobar la hipótesis de esta investigación.

Se obtuvo la información comprobable a través del diseño y aplicación de experimentos y pruebas, donde se hicieron análisis de su resistencia, durabilidad y factibilidad de los materiales para su posterior uso en el sistema constructivo propuesto.

La investigación denominada “Arenas pumíticas de la Zona Metropolitana de Guadalajara en su Aplicación al Sistema Constructivo de Muros Monolíticos, enfocado a la Vivienda Urbana”, se realizo en la ZMG en el Instituto Tecnológico de Estudios Superiores de Occidente en el laboratorio de ingeniería civil.

## **5.2 Materiales y Métodos**

### **5.2.1 Investigación documental**

Esto fue a través de libros, revistas científicas, sitios confiables de internet, la información que se encontró fue:

- Antecedentes
- Sostenibilidad
- Características de los materiales y sistemas
- Normativas existentes
- Ventajas y desventajas, entre otros puntos.

### **5.2.2 Entrevista profunda a experto local**

La técnica de entrevista permitió obtener información de primera mano de un experto local, sobre el tema de construcción con tierra, y específicamente sobre el sistema de tierra compactada. El resultado de esta entrevista nos dio información de los parámetros, ventajas y desventajas, que tiene este sistema y que se puede hacer para adaptarlo en su uso con las arenas pumíticas.

Se realizó una entrevista a fondo no estructurada para dejar que el sujeto a entrevistar aportara información de una forma fluida, donde la información principal que se buscó fue la siguiente:

- Ventajas de la construcción con tierra
- Limitantes
- Sistema constructivo de tierra apisonada

- Materiales con los que construye
- Elaboración del sistema: Mano de obra, Herramientas

Sujeto que se entrevistó: Mtro. Arq. Antonio Penagos. Experto local de la ZMG en construcción con tierra.

Razón por la que se entrevistó: Es la conexión de la teoría con el uso del sistema de tierra apisonada en la ZMG.

Que representa el entrevistado: Fuente de información primaria

La entrevista completa se encuentra en el Anexo 1.

### **5.2.3 Primera fase de Diseño de experimento y muestreo**

Se realizo un muestreo con los tipos de suelo: Jal, Tepetate, que se obtuvieron de una construcción local, ubicada en la colonia la Calma, Zapopan, Jalisco, y se agrego: Cemento, Cal hidratada y Agua. Se realizo en el software Statgraphics: ver anexo 4

#### Factores controlados:

- Tipo de suelo: Jal, Tepetate.
- Cal Hidratada
- Cemento portland como estabilizante.
- Tiempo de curado.

#### Factores fijos:

- Cantidad de agua de mezclado.
- Finura de los suelos.

#### Variables de respuesta:

- Resistencia a la compresión simple.

#### Tratamiento experimental:

Los suelos se cribaron a través de la malla #16, (véase Fotografía 1 y 2), esta malla se utilizo porque es la que se consigue en cualquier punto de venta de materiales para la construcción, facilitando su uso para a la autoconstrucción.



Fotografía 1 y 2: Proceso de cribado en malla#16, abertura de 1.19mm. Elaboración Propia.

Después se prepararon mezclas con diferentes tipos y proporciones de puzolanas (véase Anexo 5), estabilizados con cemento portland y/o cal hidratada, se utilizó una cal con el 97% de hidróxido de calcio (ver Anexo 2), esto para obtener datos más certeros en la experimentación y que no hubiera conflicto por lo agregados que ya tiene la cal que se utiliza comúnmente para la construcción, también se trato de conseguir CPO-cemento portland ordinario-por la misma razón, pero debido a su poco uso en la industria de la construcción, no se consiguió y se hicieron las pruebas con cemento portland compuesto -CPC30- marca Comex.

Se peso el material y se puso en bolsas cada mezcla para después agregarle el agua. Fotografía 3 y 4.



Fotografía 3 y 4. Proceso de pesado y separación del muestreo. Elaboración propia.

Se mezcló de una forma manual donde se le fue agregando el agua, esta se mantuvo fija, y la cantidad de agua fue de 70% con base en la fluidez de la mezcla, se definió por norma de la mesa de fluidez Vargas del Río, (2002) esto utilizando en probetas de 5cm\*5cm\*5cm. Ver Fotografías 5 y 6



Fotografía 5: Mesa de Fluidez. Elaboración propia



Fotografía 6: elaboración de la mezcla y probetas.

Luego, se dejaron curar a 7, 28 y 90 días, el procedimiento de curado fue dejar las probetas por 24 hrs en el molde ,después se descimbro y las probetas se metieron en bolsas de plástico por el tiempo previamente definido.



Fotografía 7: Probetas terminadas antes de ponerse en la fase de curado. Elaboración propia.

Después fueron ensayados a compresión, en la prensa universal, ubicada en el laboratorio de ingeniería civil del ITESO.



Fotografía 8: Prensa universal. Elaboración propia.

En concreto, se realizó un experimento multifactorial con cuatro factores y tres niveles en cada factor. Con base en el experimento, se analizará y se seleccionará las mejores mezclas para su posterior desarrollo en probetas con diferentes porcentajes de humedad para probar su resistencia a compresión y encontrar la humedad óptima.

La resistencia a la compresión está expresada en kilogramos por centímetro cuadrado.

En el caso de la cal y el cemento, cuando se usan juntos, se deben mezclar ellos a la tierra en distintos momentos, en primer lugar la cal y después el cemento, para evitar que compitan por el agua de mezcla. (Neves & Borges Faria, 2011)

#### Análisis estadístico:

Se estudiaron y analizaron los datos, utilizando el software Statgraphics, para los experimentos multifactoriales, a partir de los resultados que se hicieron en pruebas de compresión, que se realizara en una prensa universal, para obtener datos estadísticos y numéricos, con la ayuda del software de Excel para generar gráficas, todo esto se documentará con fotografías y mapas visuales.

#### **5.2.4 Segunda fase de Diseño de experimento y muestreo**

En esta segunda fase se realizo un muestreo con los mismos materiales, después de haber obtenido las mezclas optimas de la primera fase de experimentos, se agrego arena de rio por la necesidad de tener un agregado con una granulometría mayor, y la ventaja de ser un material local y de fácil acceso.

##### Factores controlados:

- Humedad: 6% y 12%.
- Tiempo de curado.

##### Factores fijos:

- Tipo de suelo: Jal, Tepetate.
- Arena de rio.
- Cemento portland como estabilizante.
- Cal Hidratada.
- Finura de los suelos.

##### Variables de respuesta:

- Resistencia a la compresión simple.

### Tratamiento experimental:

El tepetate se cribó a través de la malla #16, (véase Fotografía 1 y 2), esta malla se utilizó porque es la que se consigue en cualquier punto de venta de materiales para la construcción, facilitando su uso para a la autoconstrucción. Y el jal y la arena de río con la malla #4 (ver anexo 6 para la mezcla que se utilizó)



Fotografía 9:Arenas que se utilizaron. Elaboración propia.

Después se prepararon mezclas con diferentes tipos y proporciones de puzolanas, estabilizados con cemento portland y/o cal hidratada, se utilizó una cal con el 97% de hidróxido de calcio (ver Anexo 2), esto para obtener datos más certeros en la experimentación y que no hubiera conflicto por lo agregados que ya tiene la cal que se utiliza comúnmente para la construcción y se hicieron las pruebas con cemento portland compuesto -CPC30- marca Comex.

Se utilizaron cubos como probetas de 7x7x10cm conocidos por su utilización en la prueba de valor cementante, se le dieron 4 golpes con el pisón de 3 libras, a una altura de 15 cm después con el pisón para pruebas mortero rectangular se le dio 16 golpes laterales, 4 de cada lado para terminar con un golpe del pisón de 3 libras a la placa metálica, esto se hizo por 4 capas para dejar al ras la probeta, en la siguiente fotografía se pueden ver las herramientas que se utilizaron.



Fotografía 10- Herramientas para la compactación de la probeta. Elaboración propia

Se dejaron en bolsas de plástico, las probetas que contenían cemento, las que solo contenían cal se dejaron de una forma aérea, esto durante los tiempos de curado previamente definidos.

Se descimbraron al cumplir su tiempo de curado, como se muestra en las siguientes fotografías, para su posterior prueba a compresión simple donde se obtuvieron datos de la resistencia del muestreo.



Fotografía 11 y 12: Probeta antes de probarla en la prensa. Elaboración propia.

En esta etapa se realizó un experimento multifactorial con 2 factores controlados y 2 niveles en cada factor. Con base en el experimento, se analizó para ver la relación de la humedad en cuanto a su resistencia y si el proceso de compactación fue el adecuado para lograr una buena resistencia.

#### Análisis estadístico:

Al igual que en la fase anterior se estudiaron y analizaron los datos, utilizando el software Statgraphics, para los experimentos multifactoriales, a partir de los resultados que se hicieron en pruebas de compresión, que se realizara en una prensa universal, para obtener datos estadísticos y numéricos, con la ayuda del software de Excel para generar gráficas, todo esto se documentara con fotografías y mapas visuales.

## **6. Experimentación**

### **6.1 Recolección de Información**

#### **6.1.1 Análisis Granulométrico**

El análisis fue realizado por alumnos del PAP "Geotecnia para la mitigación de Riesgos", lo dirige el Ing. Pablo Zamudio, y el Ing. Audomaro Marquez (Ver Anexo 3).

Para entender un poco para hacer un análisis se empezó por el cribado, que es un método de separación de una mezcla de granos o partículas en 2 o más fracciones de tamaño, los materiales de gran tamaño son atrapados por encima una malla, mientras que los materiales de tamaño menor pueden pasar a través esta y retenidos por otras mallas inferiores.

Esto nos da como resultados los porcentajes de gravas, arenas y finos.

y con esto se pudo entender las diferencias físicas de las arenas pumíticas que se utilizan para esta investigación:

Como resultado es que el jal contienen mas grava y arenas que el tepetate, esto en una forma empírica se noto al momento de cribar para hacer las mezclas, ya que se desperdiciaba mucho jal en comparación con el tepetate.

## 6.1.2 Resultados de resistencia 1ra fase

En el anexo 5 se muestra los porcentajes que se utilizaron para hacer 12 diferentes mezclas, para su posterior prueba de compresión. de ahí obtuvimos los siguientes resultados. donde lo que esta resaltado con amarillo fueron los mejores resultados (vease tabla 5 y tabla 6), clasificados por tiempo de curado, se utilizo para su análisis estadístico su versión de curado final de 90 días, donde tenemos la mezcla de jal, T2 y T4 con las mejores resistencias.

7 DÍAS	JAL	J1	J2	J3	J4	J5	J6
MAX CARGA	MUESTRA 1	30.0179	9.6873	52.3242	35.6263	56.9766	75.8414
Kgf	MUESTRA 2	33.1408	20.3943	58.6974	25.6841	38.4306	63.0312
MAX ESFUERZO	MUESTRA 1	1.2007	0.3874	2.0929	1.425	2.279	3.0336
Kgf/cm2	MUESTRA 2	1.3256	0.8157	2.3479	1.0273	1.5372	2.5212
28 DÍAS	JAL	J1	J2	J3	J4	J5	J6
MAX CARGA	MUESTRA 1	41.426	36.5186	79.9203	78.0083	105.349	123.258
Kgf	MUESTRA 2	49.1376	33.4594	94.6424	74.2481	109.237	130.014
MAX ESFUERZO	MUESTRA 1	1.657	1.4607	3.1968	3.1203	4.2139	4.9303
Kgf/cm2	MUESTRA 2	1.9655	1.3383	3.7857	2.9699	4.3694	5.2005
90 DIAS	JAL	J1	J2	J3	J4	J5	J6
Max Carga	MUESTRA 1	106.56	153.021	131.99	181.637	201.776	173.543
Kgf	MUESTRA 2	89.3526	103.055	159.012	158.375	181.127	154.869
Max Esfuerzo	MUESTRA 1	4.2624	6.1208	5.2795	7.2654	8.071	6.9417
Kgf/cm2	MUESTRA 2	3.5741	4.1222	6.3604	6.3349	7.245	6.1947

Tabla 5: Resultados de Resistencia a Compresión. Jal: Elaboración Propia

7 DÍAS	TEPETATE	T1	T2	T3	T4	T5	T6
MAX CARGA	MUESTRA 1	76.415	67.6199	134.794	100.824	161.306	190.05
Kgf	MUESTRA 2	59.9083	78.4544	127.082	121.155	167.297	162.645
MAX ESFUERZO	MUESTRA 1	3.0566	2.7048	5.3917	4.0329	6.4522	7.6019
Kgf/cm2	MUESTRA 2	2.3963	3.1381	5.0832	4.8462	6.6918	6.5057
28 DÍAS	TEPETATE	T1	T2	T3	T4	T5	T6
MAX CARGA	MUESTRA 1	183.676	269.014	315.985	244.35	275.897	296.992
Kgf	MUESTRA 2	156.781	277.936	373.917	301.135	255.63	295.973
MAX ESFUERZO	MUESTRA 1	7.347	10.7606	12.6394	9.7739	11.0359	11.8797
Kgf/cm2	MUESTRA 2	6.2712	11.1175	14.9567	12.0454	10.2252	11.8389
90 DIAS	TEPETATE	T1	T2	T3	T4	T5	T6
Max Carga	MUESTRA 1	647.711	769.248	633.945	735.343	509.539	658.609
Kgf	MUESTRA 2	756.629	803.919	632.925	714.184	556.701	772.18
Max Esfuerzo	MUESTRA 1	25.9084	30.7699	25.3578	29.4137	20.3816	26.344
Kgf/cm2	MUESTRA 2	30.2652	32.1567	25.317	28.5674	22.2681	30.8872

Tabla 6: Resultados de Resistencia a Compresión. Tepetate: Elaboración Propia

### 6.1.3 Fallas Típicas 1ra fase

En las siguiente fotografías podemos notar las fallas típicas que le sucedieron a las probetas despues de la prueba a compresión simple, donde podemos notar que de una cara siempre, la falla iba casi en la parte central, lo interesante es que esta falla sucedió tanto en las probetas de Jal como de tepetate, donde se evidencio en los diferentes tiempos de curado.



Fotografía 13: Fallas típicas en las pruebas de Resistencia a Compresión: Elaboración Propia.



Fotografía 14 y 15: Fallas típicas en las pruebas de Resistencia a Compresión: Elaboración Propia.

## 6.1.2 Resultados de resistencia 2da fase

En el anexo 6 se muestra los porcentajes que se utilizaron para hacer 3 diferentes mezclas, la característica de esta segunda fase es el contenido de agua que en 3 mezclas es del 6 % y se repiten las mismas mezclas pero con un 12% de contenido de agua, para su posterior prueba de compresión. de ahí obtuvimos los siguientes resultados. lo que esta resaltado con amarillo fueron los mejores resultados (vease tabla 7 y tabla 8), clasificados por tiempo de curado, se utilizo para su análisis estadístico su versión de curado final de 40 días, donde tenemos la mezcla de TJ, con los mejores resultados con los dos diferentes contenidos de humedad, donde no hubo cambios significativos en cuanto al contenido de agua que se utilizo.

14 DÍAS	HUMEDAD 12%	T1	T2	TJ
MAX CARGA	MUESTRA 1	54.55	142.56	94.64
KGF	MUESTRA 2	61.05	89.6	118.09
MAX ESFUERZO	MUESTRA 1	0.96	2.53	1.68
KGF/CM2	MUESTRA 2	1.08	1.59	2.09
14 DÍAS	HUMEDAD 6%	T1	T2	TJ
MAX CARGA	MUESTRA 1	26.06	104.64	187.43
KGF	MUESTRA 2	38.62	119.17	169.14
MAX ESFUERZO	MUESTRA 1	0.46	1.86	3.33
KGF/CM2	MUESTRA 2	0.69	2.12	3.01

tabla 7: Resultados de Resistencia a Compresión: Elaboración Propia

40 DÍAS	HUMEDAD 12%	T1	T2	TJ
MAX CARGA	MUESTRA 1	193.42	276.47	292.59
KGF	MUESTRA 2	123.44	268.05	321.65
MAX ESFUERZO	MUESTRA 1	3.43	4.91	5.2
KGF/CM2	MUESTRA 2	2.19	4.76	5.71
40 DÍAS	HUMEDAD 6%	T1	T2	TJ
MAX CARGA	MUESTRA 1	101.07	206.23	255.94
KGF	MUESTRA 2	74.24	215.67	311.14
MAX ESFUERZO	MUESTRA 1	1.80	3.67	4.55
KGF/CM2	MUESTRA 2	1.32	3.83	5.53

tabla 8: Resultados de Resistencia a Compresión: Elaboración Propia

### 6.1.3 Fallas Típicas 1ra fase

En las siguiente fotografías podemos notar las fallas típicas que le sucedieron a las probetas despues de la prueba a compresión simple, lo interesante es que las fallas fueron similares a las probetas de la primera fase, a pesar que se utilizaron otros contenidos de aguam, y que el metodo fue por compactacion, y donde estas fallas típicas se mostraron en los contenidos del 6% y del 12 %



Fotografía 16, 17 y 18: Fallas típicas en las pruebas de Resistencia a Compresión: Elaboración Propia.

## 6.2 Análisis e Interpretación de datos

### 6.2.1 Análisis en Statgraphics 1ra fase

En la siguiente tabla (véase tabla 6) nos da las interacciones de todos los factores, donde por métodos estadísticos podemos interpretar que todas las interacciones tienen un intervalo de confianza del 95%, esto nos asegura que cada factor es importante en el muestreo:

- A, B, C y D influyen, pero A siendo el material y D el curado son los que tienen más peso en el F.ratio, esto significa que son los más relevantes en el resultado a la compresión, B que es la cal y C el cemento, también influyen pero de una forma menos significativa.
- El tiempo de curado (D) es el factor que más influye en la resistencia a la compresión, en el anexo 6 podemos constatar como aumenta de manera significativa de 7 a 90 días.
- La relación de material con tiempo de curado (AD) es la interacción mas significativa de todo el análisis, esto era de esperarse, ya que como ya se había mencionado una de las ventajas de las puzolanas es su mayor resistencia conforme pase más tiempo.
- La interacción del material y la cal (AB), mejora mas la resistencia que la relación del material y el cemento (AC)
- La interacción con menos peso en el F-ratio entre dos valores, es la mezcla entre cal y cemento (BC).
- La interacción entre material, cemento y tiempo de curado (ACD), tiene un poco mas de relevancia que el de material, cal y tiempo de curado (ABD), pero las dos tiene un p-value menor a 0.05 lo que significa que para términos de uso en la construcción es mejor la cal que el cemento por su menor impacto ambiental.

- Solo la interacción de (BCD) que es de Cal, Cemento y curado ,es la única que falló el intervalo de confianza. esto es importante porque aquí es donde el material por tener características puzolanicas todas sus interacciones tienen resultados positivos mientras que en la que no interactuó, el resultado no fue favorable.

<i>Source</i>	<i>Sum of Squares</i>	<i>Df</i>	<i>Mean Square</i>	<i>F-Ratio</i>	<i>P-Value</i>
MAIN EFFECTS					
A:Material	2063.56	1	2063.56	2107.78	0.0000
B:Cal	15.8532	1	15.8532	16.19	0.0003
C:Cemento	28.3483	2	14.1741	14.48	0.0000
D:Curado	2291.84	2	1145.92	1170.48	0.0000
INTERACTIONS					
AB	15.0273	1	15.0273	15.35	0.0004
AC	11.0348	2	5.51742	5.64	0.0074
AD	1074.34	2	537.171	548.68	0.0000
BC	9.62391	2	4.81195	4.92	0.0130
BD	24.8318	2	12.4159	12.68	0.0001
CD	43.2684	4	10.8171	11.05	0.0000
ABC	6.4527	2	3.22635	3.30	0.0485
ABD	15.2918	2	7.6459	7.81	0.0015
ACD	57.7694	4	14.4423	14.75	0.0000
BCD	7.24254	4	1.81063	1.85	0.1408
ABCD	18.1394	4	4.53484	4.63	0.0040
RESIDUAL	35.2447	36	0.97902		
TOTAL (CORRECTED)	5717.87	71			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Tabla 9: Analysis of Variance for Resistencia - Type III Sums of Squares. Elaboración propia con el software statgraphics.

En el gráfico 1 se muestra como el material conocido como Tepetate, tuvo mejores resultados en las pruebas a compresión en comparación a él Jal. a pesar de que los dos son arenas pumíticas su granulometría y composición física y química, difieren y nos da como conclusión que para una elaboración de un sistema de una forma accesible y autoconstruible, el tepetate es mejor opción.

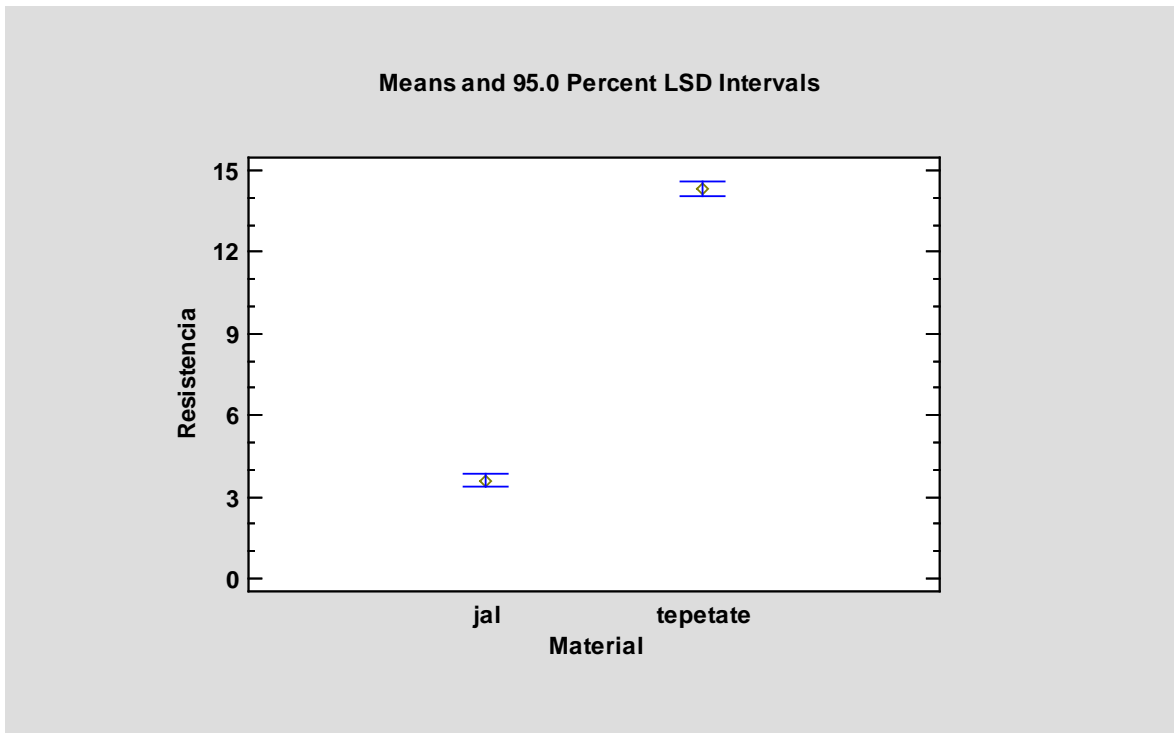


Gráfico 1 Multiple Range Tests for Resistencia by Material. Elaboración propia con el software statgraphics.

En el gráfico 2: la cal en una proporción del 25 % alcanzo mejores resultados que en la proporción del 30%, esto nos dio dato importante para la realización de la segunda fase, donde se utilizo el 25% de cal.

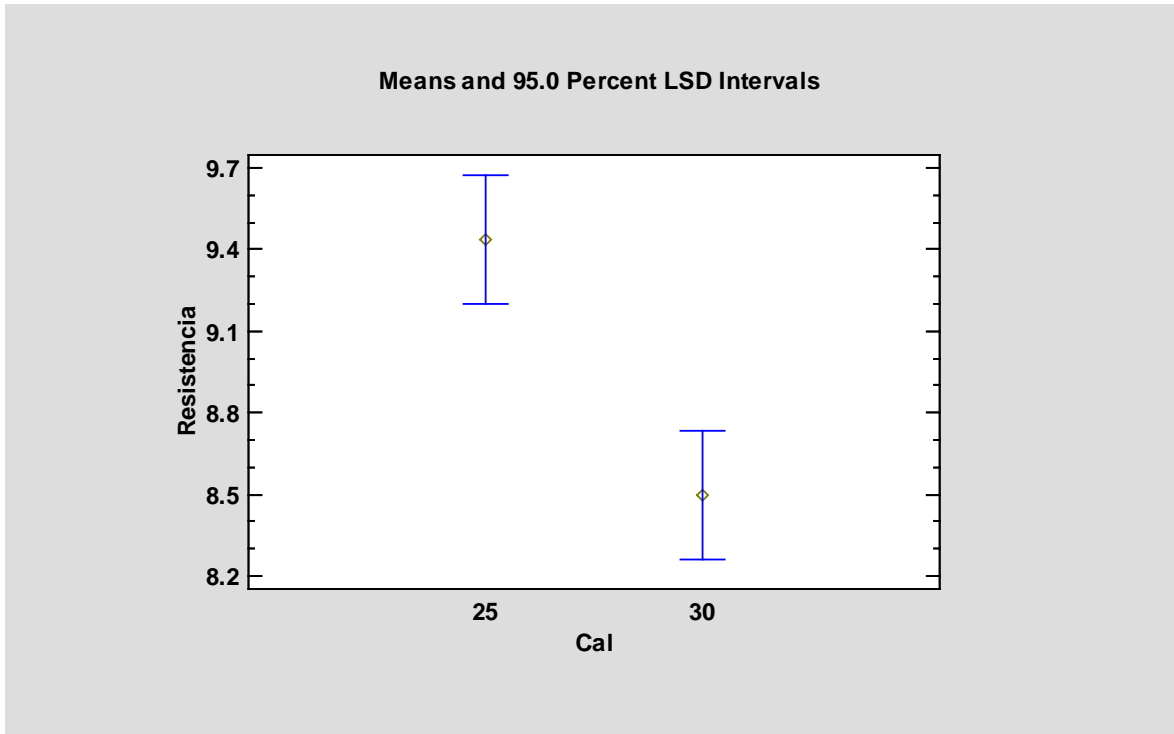


Gráfico 2 Multiple Range Tests for Resistencia by Cal. . Elaboración propia con el software statgraphics.

En el gráfico 3 si influye el cemento en la mezcla, el efecto que se nota es que si es necesario el uso del cemento, aunque al 4% y 8% funciono casi igual, por conclusión se puede utilizar el cemento a una proporción del 4% para bajar el impacto ambiental en el uso del cemento para su aplicación al sistema de muros monolíticos.

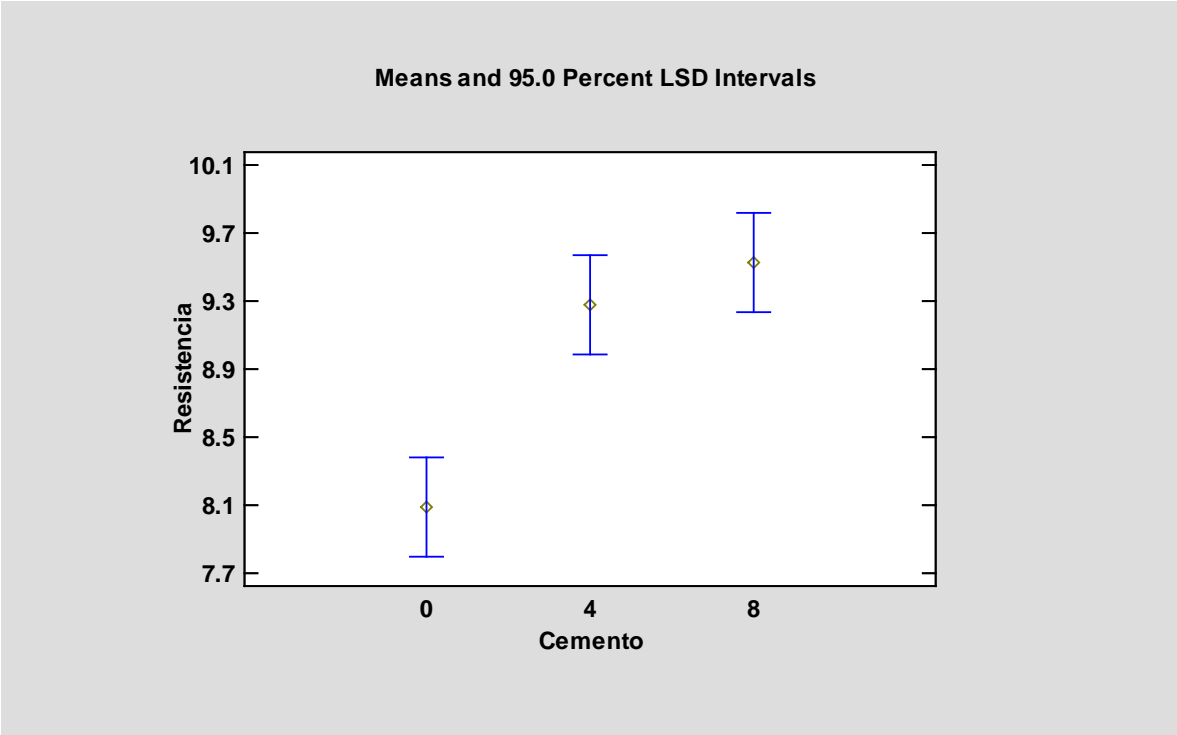


Gráfico 3: Multiple Range Tests for Resistencia by Cemento. . Elaboración propia con el software statgraphics.

En el gráfico 4 se representa de una forma muy clara, como el tiempo de curado mejora notablemente sus características de endurecimiento. Este resultado respalda la teoría de las puzolanas y nos da como producto que el tiempo es el factor más importante en las puzolanas.

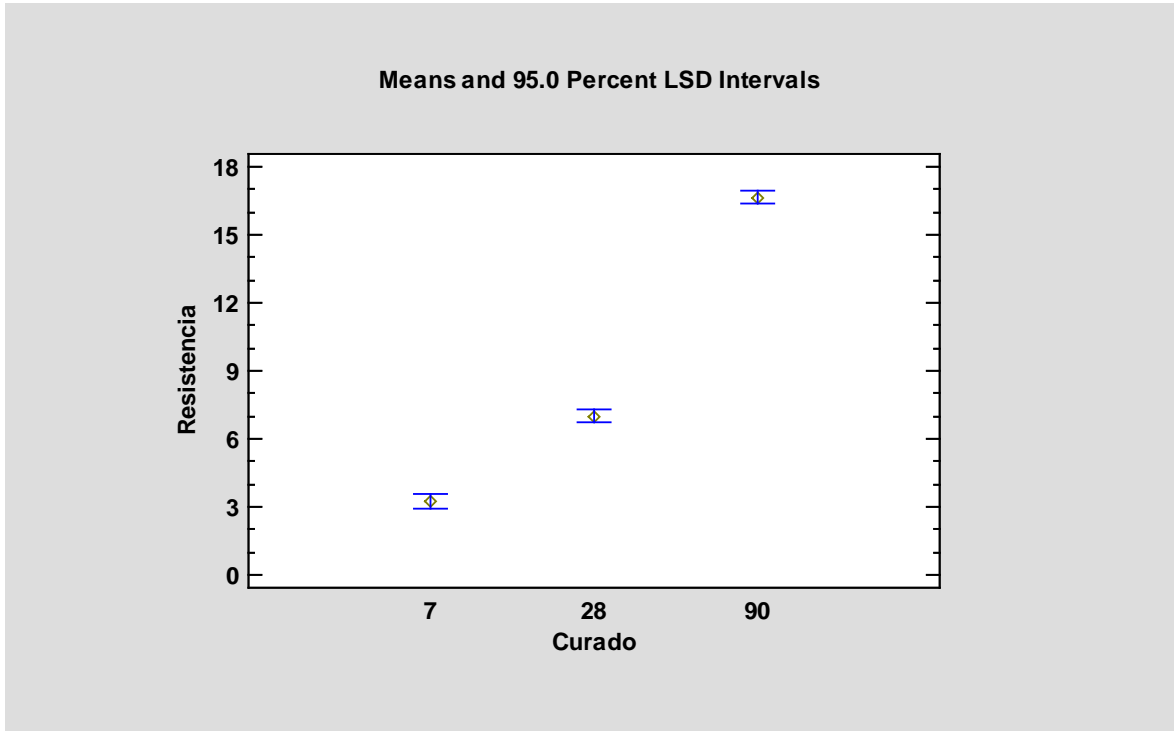


Gráfico 4: Multiple Range Tests for Resistencia by Curado . Elaboración propia con el software statgraphics.

### **6.2.2 Conclusión del análisis estadístico de la primera fase**

El análisis estadístico me permitió encontrar las mejores mezclas y así poder seguir con el proceso de experimentación en la segunda fase, como resultado la mezcla T2 y T4 (ver anexo 5) fueron las mezclas optimas ya que cumplen con las condiciones que arrojó el análisis estadístico, como el uso de la cal en un 25 %, el uso del material tepetate, y la mezcla T4 el uso del cemento a un 4%, aunque fue interesante notar que T2 aunque no contiene cemento, sus resultados a los 90 días igualaron a la mezcla de T4, comprobando la teoría de que las puzolanas endurecen con el paso del tiempo.

### 6.2.3 Análisis sobre la plasticidad de la muestra 1ra fase

En base a las pruebas hechas en la prensa universal se obtuvieron los siguientes datos que se muestran en las graficas 5 y 6, estas datos son de las pruebas a 90 días de curado, donde podemos observar que las probetas tienen un cierto grado de elasticidad, esto ayudaría para su diseño en el sistema constructivo de tierra compactada para obtener una mayor seguridad en el diseño y en su construcción.

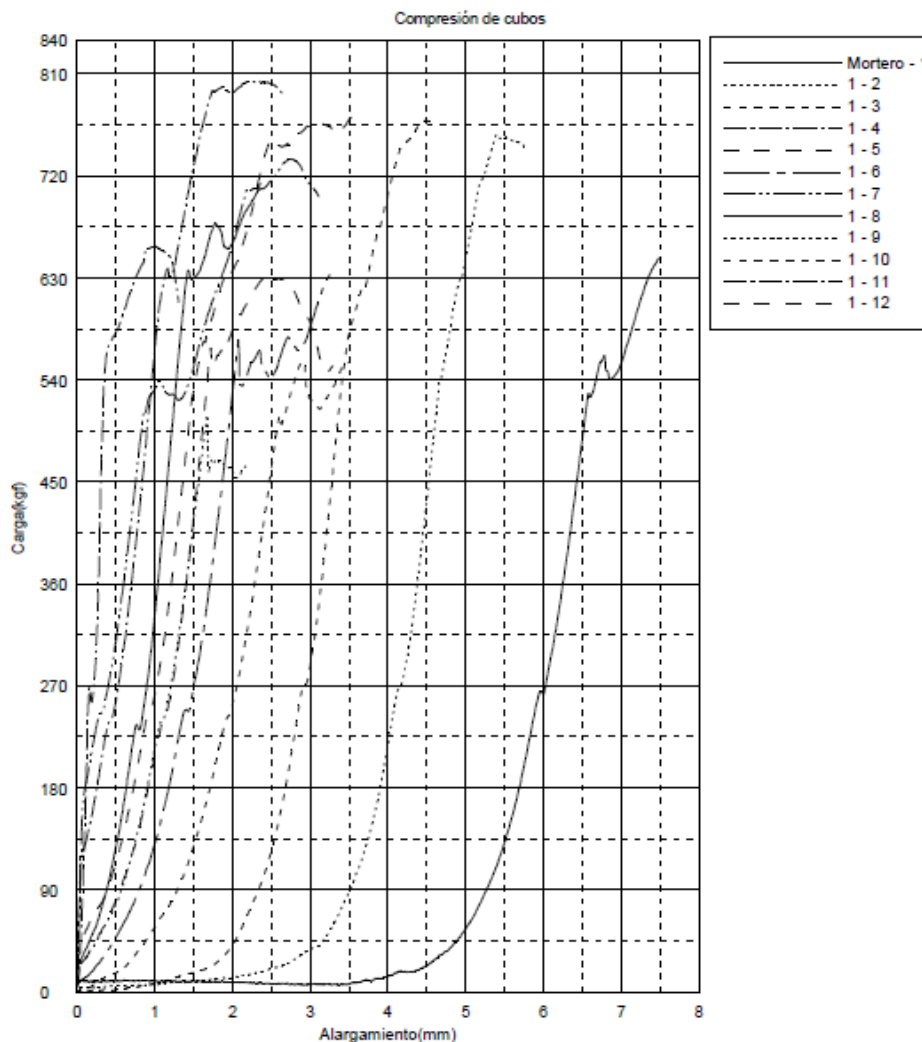


Gráfico 5: Resultados de las pruebas a compresión y su relación carga y alargamiento . Obtenido del software de la prensa universal .

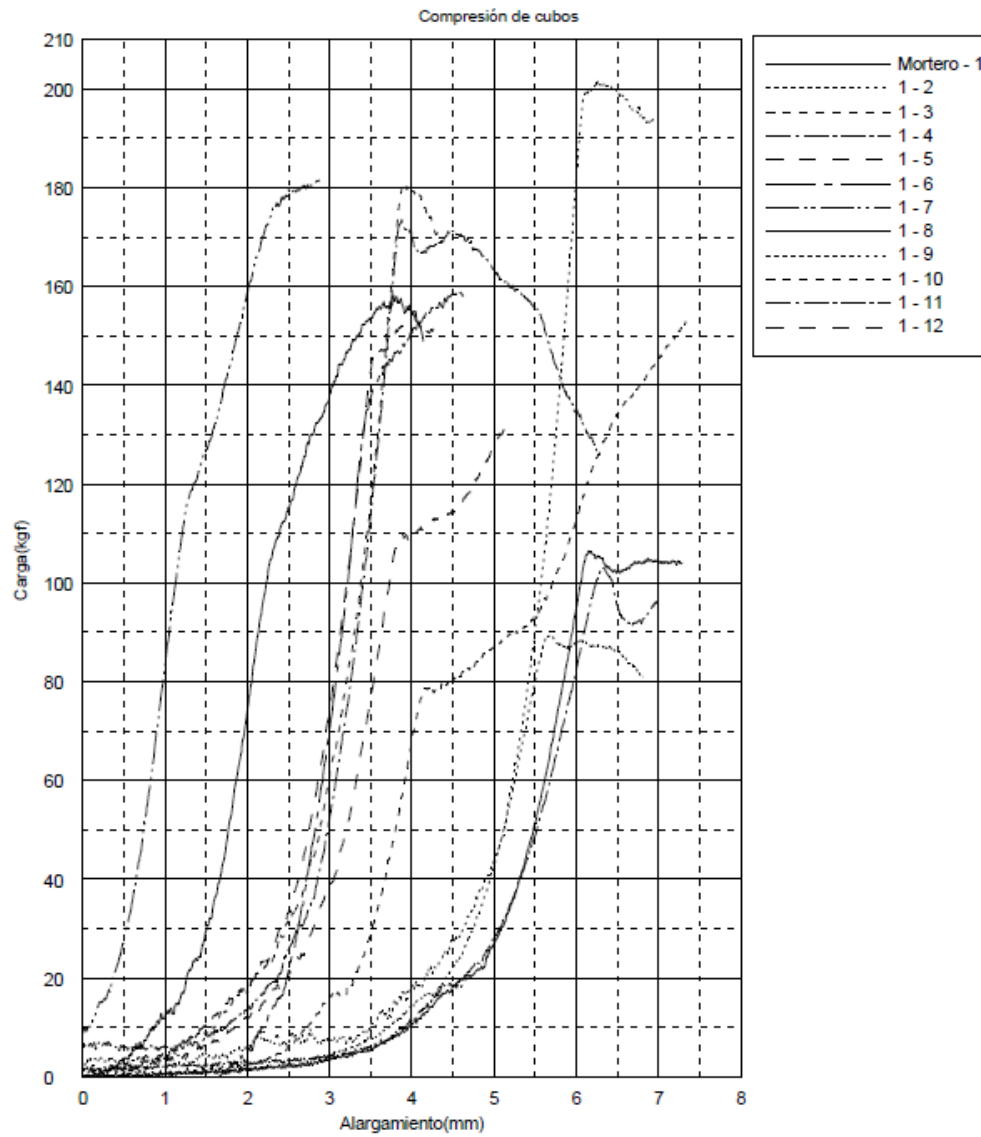


Gráfico 6: Resultados de las pruebas a compresión y su relación carga y alargamiento . Obtenido del software de la prensa universal .

## 6.2.4 Análisis en Statgraphics 2da fase

En la siguiente tabla (10) nos da las interacciones de todos los factores, donde por métodos estadísticos podemos interpretar que todas las interacciones tienen un intervalo de confianza del 95%, esto nos asegura que cada factor es importante en el muestreo:

- A y C influyen, dando como resultado que la mezcla y el tiempo de curado son factores relevantes para obtener una buena resistencia y aunque el contenido de agua (B) no es directamente un factor al momento de mezclarse si es relevante según los datos obtenidos.
- La relación BC que es contenido de agua y tiempo de curado es la interacción más significativa, donde podemos otra vez concluir que aunque no se considera por sí solo el contenido de agua algo importante en sus interacciones si tiene una injerencia relevante.
- La relación AB y AC que es mezcla y contenido de agua, y mezcla y tiempo de curado muestran resultados satisfactorios en su interacción.
- La relación ABC es importante mencionarla ya que con los datos estadísticos podemos ver que la interacción de los 3 factores no es significativo, con esto podemos pensar que hacen falta agregar algunos factores más para encontrar la mejor respuesta a estos 3 factores en su interacción.

Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio	P-Value
MAIN EFFECTS					
A:Mezcla	24.191	2	12.0955	67.11	0.0000
B:Agua	0.67335	1	0.67335	3.74	0.0772
C:Dias_Curado	27.0938	1	27.0938	150.32	0.0000
INTERACTIONS					
AB	1.84142	2	0.920712	5.11	0.0248
AC	1.84982	2	0.924912	5.13	0.0245
BC	2.06507	1	2.06507	11.46	0.0054
ABC	0.214608	2	0.107304	0.60	0.5669
RESIDUAL	2.1629	12	0.180242		
TOTAL (CORRECTED)	60.0919	23			

All F-ratios are based on the residual mean square error.

Tabla 10: Analysis of Variance for Resistencia - Type III Sums of Squares. Elaboración propia con el software statgraphics.

En el gráfico 5 se muestra como el tiempo de curado vuelve a ser bastante significativo en el aumento de las resistencias de las puzolanas, teniendo una curva bastante interesante en su resistencia.

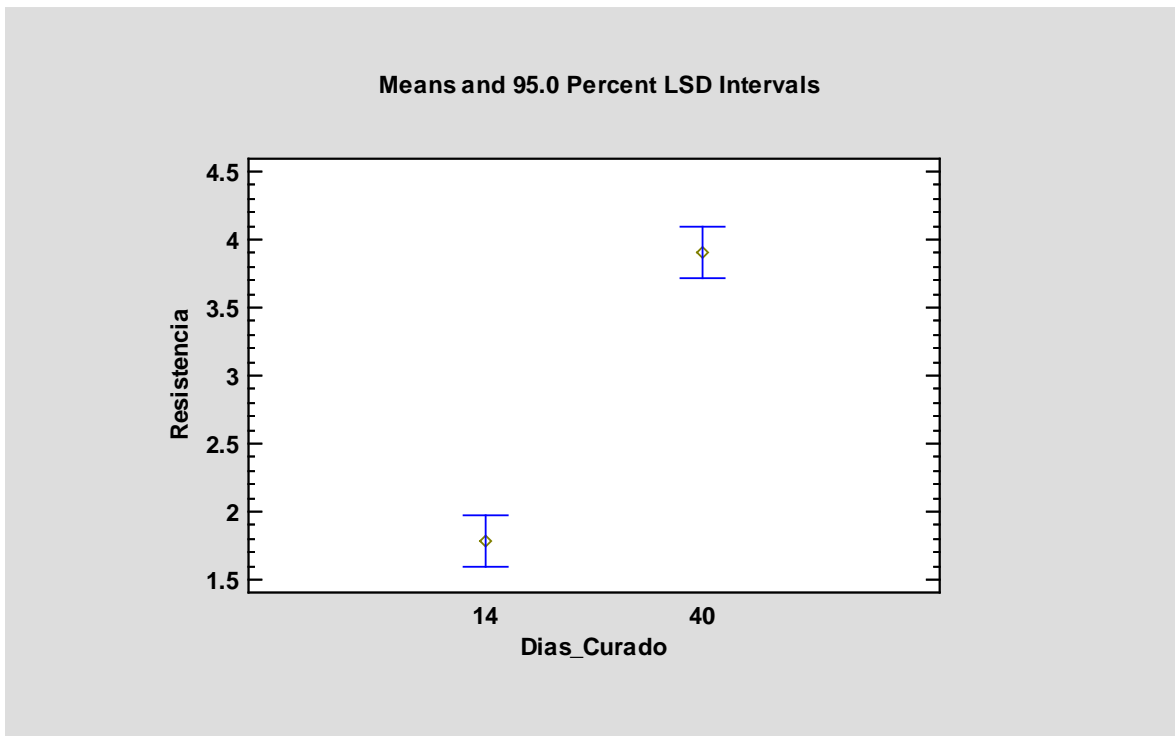


Gráfico 5 : Multiple Range Tests for Resistencia by Curado . Elaboración propia con el software statgraphics.

En el gráfico 6 se muestra como la mezcla TJ (ver anexo 6), siendo esta tepetate 25.5%, jal 25.5%, arena de rio 20%, cal hidratada 25% y cemento 4% fue la que obtuvo mejores resultados en cuanto a la resistencia, esto como pudimos ver en la literatura puede ser por la mezcla de dos o mas componentes y sus diferentes granulometrías.

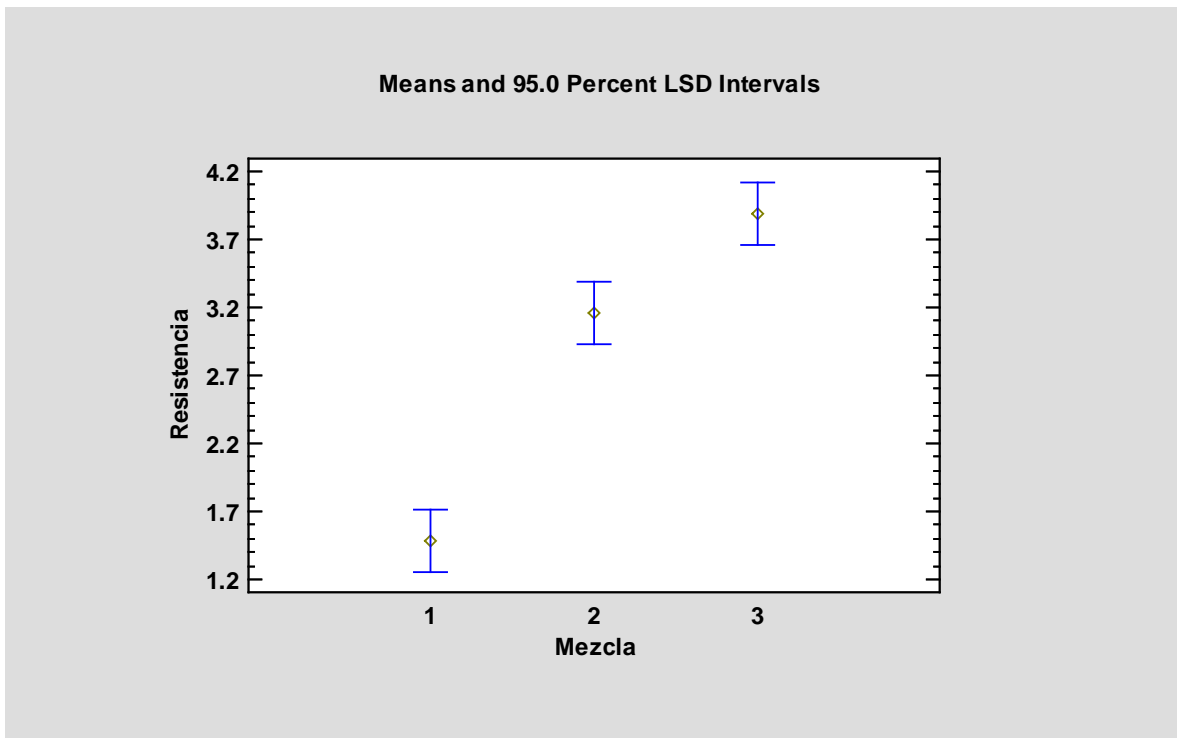


Gráfico 6: Multiple Range Tests for Resistencia by Mezcla . Elaboración propia con el software statgraphics.

En el gráfico 7 se muestra como el contenido de humedad del 12% es ligeramente mejor que el de 6 % esto nos da un importante dato para conocer el contenido optimo de humedad, por lo tanto en siguientes pruebas un contenido de 18% a 24% de agua se podría intentar para ver si las condiciones de resistencia mejoran.

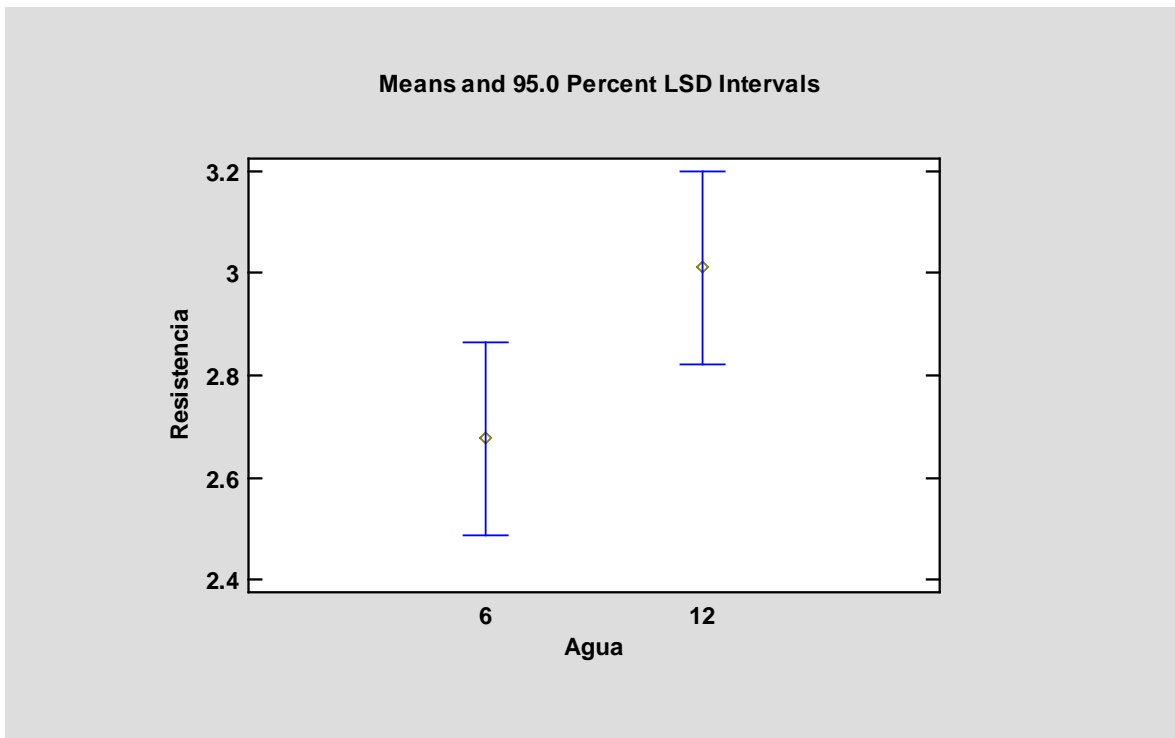


Gráfico 7: Multiple Range Tests for Resistencia by Contenido de agua . Elaboración propia con el software statgraphics.

### 6.2.5 Conclusión del análisis estadístico de la 2da fase

Como conclusión de este análisis podemos concluir que el método que se adaptó para la elaboración de las probetas resultó satisfactorio, y donde el contenido de humedad no fue tan relevante como se esperaba, pero nos da indicios que con un poco más de contenido de humedad podremos obtener mejores resultados.

## 6.2.6 Análisis sobre la plasticidad de la muestra 1ra fase

En comparación con los datos obtenidos en la primera fase, aquí el contenido de agua mejoro un poco el alargamiento en las pruebas a resistencia, donde podemos concluir que a un menor contenido de agua, la elasticidad de las mezclas es más grande y esto influye directamente en el diseño potencial de un sistema de tierra compactada.

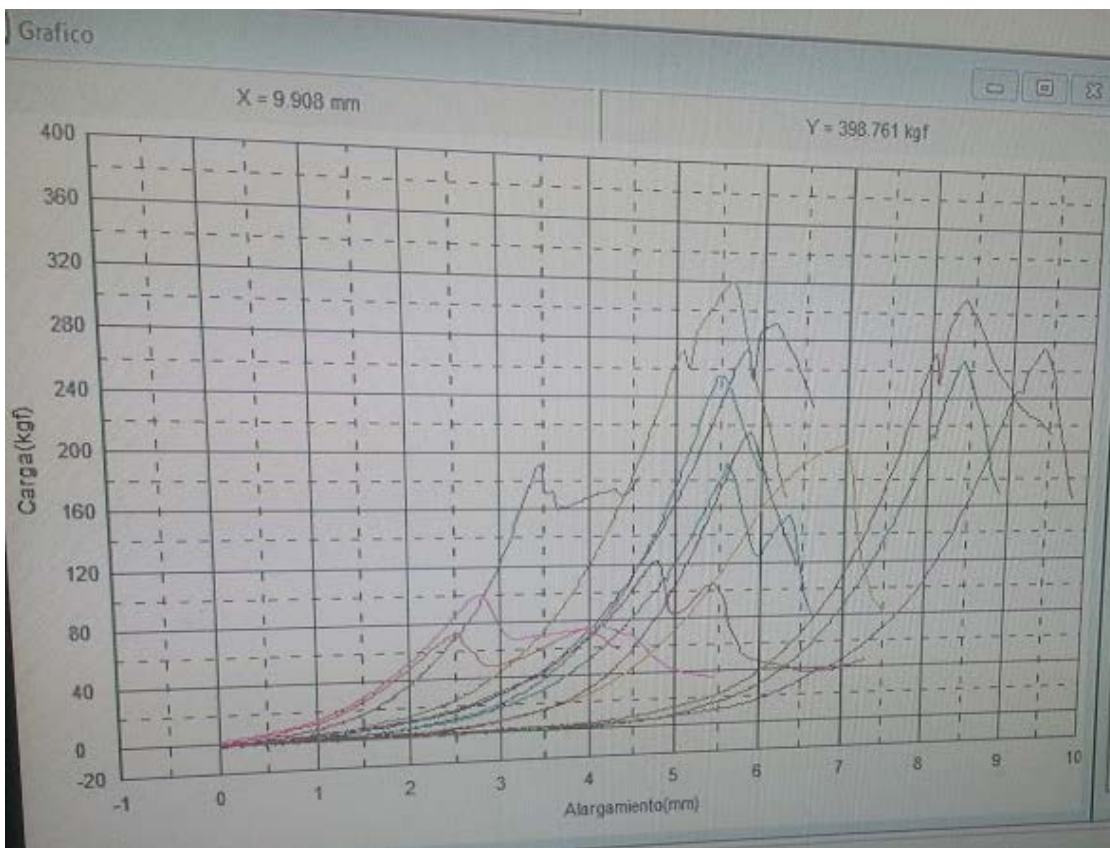


Gráfico 6: Resultados de las pruebas a compresión y su relación carga y alargamiento . Obtenido del software de la prensa universal .

## 7. Discusión de Resultados

El utilizar una malla para controlar la finura de los suelos, fue para emular lo que se podría hacer en obra y de una forma más sencilla para el constructor sin llegar a un nivel de molienda del material, ya que como mencionan Vargas del Río, Zarate del Valle, & Gutiérrez Pulido(2005) la reactividad de una puzolana depende directamente del tamaño de la finura del suelo. Esto pudo haber afectado a las resistencias a compresión que presento el muestreo.

La fluidez de la mezcla fue de 70 % , , donde las mezclas tenían una consistencia similar al puré de papa.

Se recomienda el uso de aceite para el descimbrado, aunque esto mancha el material. Se utilizo grasa vegetal, pero los resultados a la hora del descimbrado no fueron satisfactorios, debido a que el material se quedaba unido a las paredes de las probetas.

La cantidad de agua, fue un factor importante, ya que los sistemas de tierra compactada, tienen una cantidad mucho menor a lo hecho en estas pruebas, pero se logro ver su capacidad cementante de cada material, mezclado con cal y cemento, donde los resultados de la jal no fueron los esperados, esto pudo haber sido por el grado de molienda, la cantidad de agua, o por el tipo de curado que se le dio a las muestras.

Los trabajos documentados permiten corroborar que la acción de la cal produce un notable incremento en las cualidades de la tierra que se utiliza como material constructivo, disminuyendo su vulnerabilidad ante los agentes del medio ambiente que mayor impacto tienen sobre ellos: las cargas estructurales y la acción de la humedad.

Esta información será de gran utilidad para el desarrollo de productos más económicos y con un menor impacto al medio ambiente. Otros usuarios potenciales serán las compañías constructoras y los desarrolladores inmobiliarios

También es viable incorporar procesos de edificación que recuperen la propia tierra que se extrae en las obras para realizar las cimentaciones, cisternas y fosas sépticas, a fin de convertirla en el desarrollo del sistema de muro monolítico.

Es posible suponer que la menor resistencia a la compresión simple que manifestaron las probetas, es por su forma de mezclar, quizá con un proceso mas industrializado, hubiera tenido mejor resultado.

El tepetate logro mejores resultados con los mismos procedimientos, esto puede ser que el tepetate tiene más finos que el jal, (vease Anexo 3) y es ahí donde la finura de los materiales pudo afectar en los resultados .

El tipo de curado pude afectar sobre todo a las muestras que no contienen cemento, ya que la cal no fragua igual que el cemento.

La mezcla de tepetate (60% a 75%) con contenido medio de cal (25%) y contenido bajo de cemento (4%), tuvo buenos resultados como mezcla optima por lo que se requieren posteriores análisis para su uso en el sistema de Muros monolíticos.

En especifico la Mezcla de T2 y T4, (vease anexo 5), fueron las que obtuvieron mejores resultados a compresión.

Por resistencia a compresión, si pueden funcionar las arenas pumíticas para su adaptación al sistema de tierra compacta.

La falta de normativas afecta a la caracterización del uso de las puzolanas como componente principal en los muros monolíticos.

Al utilizar cal hidratada con un 97% de pureza en el hidróxido de calcio, en posteriores pruebas será necesario usar cal hidratada para la construcción, esto nos da a suponer que mejorara las resistencias de la mezcla, por los agregados que contiene.

El tipo de curado puede afectar sobre todo a las muestras que no contienen cemento, ya que la cal es aérea, no fragua igual que el cemento.

En la compresión de las probetas de la segunda fase, los resultados fueron relativamente bajos, pero aun así cumplen si se les compara con el adobe, esto como bien se pudo constatar a lo largo del documento pudo ser por el método de compactación.

Como ya se menciono anteriormente los resultados obtenidos en la primera fase en comparación con los de la segunda fase, podemos concluir que el contenido de agua y la compactación fueron relevantes en la resistencia, donde los experimentos de la primera fase obtuvieron mejores resultados, pero en contraparte utilizar un menor contenido de humedad es un punto a favor de las pruebas de la segunda fase para una utilización menor de agua cuando se aplique a un sistema de construcción.

## **8. Recomendaciones, aportes y conclusiones**

### **8.1 Recomendaciones**

Como posibilidades de continuar el desarrollo de futuras investigaciones, se visualizan objetivos por cumplir:

La construcción de un prototipo escala 1:1 para pruebas tanto sísmicas, como de resistencia a compresión.

El posible uso de algún acelerante para conseguir un menor tiempo de curado óptimo.

Desarrollar un sistema de cimbra económico, de máxima reutilización y de fácil instalación.

Una evaluación de desempeño bajo otros parámetros, como la resistencia al interperismo, capacidad térmica y acústica.

Convendría realizar la prueba del hidrómetro para obtener los finos de los materiales

Para futuras investigaciones , conviene incluir un nivel del 20% de cal.

El contenido óptimo de agua se puede encontrar en un rango mayor al 12% de agua sin que llegue este contenido de agua convertir la mezcla para su compactación en un materia con fluidez de agua.

La capacidad de soportar un segundo nivel o mas niveles en su estructura, y la exploración en capacidades morfológicas del sistema, abriendo un campo de interés que induce al desarrollo de futuras investigaciones tecnológicas respecto de la construcción teniendo en cuenta como componente principal a las arenas pumíticas.

El campo de aplicación se orienta principalmente a la construcción de viviendas de geometrías simples de un solo nivel o dos niveles, por lo tanto un estudio más profundo sobre los lineamientos básicos que requieren estos sistemas y sus ventajas y desventajas, ya en el documento se tienen bases sobre esto, en los apartados de Sistema de tierra compactada y en el anexo.....

Se considera un sistema apropiado por su simplicidad, posibilidad de utilización de mano de obra masiva, terminaciones superficiales adecuadas sin necesidad de acabados y por ser una técnica constructiva fácil de transferir a grupos de autoconstrucción, con mano de obra de baja calificación y con materiales locales y de fácil acceso.

Y por último el sector social de la autoconstrucción se verá ampliamente beneficiado al contar con un recurso material muy económico y que cumple con los estándares de calidad de otros componentes constructivos, pero con una alta competencia desde la perspectiva de la sustentabilidad

Finalmente explorar a fondo el sistema para su uso tanto en la autoconstrucción y en su forma industrializada.

## 8.2 Conclusiones y aportes

La mezcla de tepetate -T4- (60% a 75%) con contenido medio de cal (25%) y contenido bajo de cemento (4%), tuvo buenos resultados como mezcla optima, con una resistencia aceptable de 12.87kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días y a los 90 días de 29.41kg/cm<sup>2</sup> , esto en comparación (c.f. sec. 1.1.2) las resistencias a la compresión del adobe de 3 a 5 Kg. por cm<sup>2</sup>.

Respondiendo a la pregunta de investigación, las particularidades que se requieren es conocer su granulometría para su aplicación y uso, su relación con el contenido de agua, que en las pruebas de la segunda fase, obtuvimos que el contenido de agua no fue una variante relevante, que tiene una plasticidad las mezclas donde se puede obtener un colchón de seguridad al momento de su uso potencial con un sistema constructivo, que las arenas pumíticas a pesar de su poco uso para sistemas estructurales con mayores investigaciones se puede lograr aprovechar este tipo de material local como componente principal para su aplicación en la construcción.

La parte plástica de las muestras en las dos pruebas dio como resultado un límite de seguridad en el diseño, dando como resultado que las metodologías fueron adecuadas y que los materiales podrían usarse para un sistema de tierra compactada.

La mezcla -TJ- Ver anexo 6, con el 12% de contenido de humedad que alcanzo 5.71 kg/cm<sup>2</sup>, nos da un dato clave para continuar por este camino, con las condiciones que se mencionaron en las recomendaciones, como son probar un contenido de humedad más alto y pulverizar las arenas

La limitante del material que se uso, fue el desperdicio de este al momento de hacerlo de una forma mas común, donde gran parte del material se necesita pulverizar de alguna forma para no desperdiciarlo.

El uso del cemento en una menor proporción (4%) fue favorable en las dos fases de experimentación, y nos da como resultado que este porcentaje se puede utilizar y que su impacto ambiental sería mucho menor que con otros sistemas.

Un aporte muy importante que se dio en el proceso de esta investigación aplicada es la parte metodológica para el diseño de los experimentos, ya que por las dificultades que se tiene el adaptar algún material a un sistema donde sus componentes principales tienen otras características físicas y químicas, quedo demostrado que con ciertos aspectos en cuanto a herramientas que se usaron y procesos se puede llegar a utilizar las arenas pumíticas como componente principal en un sistema constructivo, que esto beneficiaría directamente en esta primera etapa a la autoconstrucción y que con mayores investigaciones se pueden lograr procesos industriales para aprovechar este material local del AMG y aportar en la construcción de una forma sostenible.

## 9. Literatura Citada

Arenas Cabello, F. J. (2014). *Los Materiales de Construcción y el Medio Ambiente*. Obtenido de [http://huespedes.cica.es/gimadus/17/03\\_materiales.html](http://huespedes.cica.es/gimadus/17/03_materiales.html)

Arndt, P., & Calderón, K. (2015). *Características generales del adobe como material de construcción*. Obtenido de EcoSur La red para el hábitat económico y ecológico: <http://www.ecosur.org/index.php/ecomateriales/adobe/43-caracteristicas-generales-del-adobe-como-material-de-construccion>

Barros, L. P., & Imhoff, F. A. (2010). Resistencia sísmica del suelo-cemento postensado en construcciones de baja complejidad geométrica. *Revista de la Construcción* , 9 (2), 26-38.

Bernache Pérez, G. (2006). *Cuando la basura nos alcance: El impacto de la degradación ambiental*. Mexico,DF: CIESAS- Centro de Invetigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social.

Berstraten, S., Hormias, E., & Altemir, A. (2011). Construcción con tierra en el siglo XXI. *Informes de la Construcción* , 5-20.

Borsani, M. S. (2011). *Materiales Ecológicos, Estrategias, Alcance y Aplicación de los Materiales Ecológicos como Generadores de Hábitats Urbanos Sostenibles*. Barcelona, España: Tesis de Maestría No Publicada, UPC.

Cedeño Valdiviezo, A. (2010). Materiales Bioclimáticos. *Revista de Arquitectura* , 12, 100-110.

Cedeño Valdiviezo, A. (2010). Materiales Boclímáticos. *Revista de Arquitectura* , 12, 100-110.

Chiras, D. D. (2004). *The New Ecological Home*. EUA: Chelsea Green.

Clarín Arq. (15 de 10 de 2015). Arq. Obtenido de Clarín: [http://arq.clarin.com/patrimonio/Shibam-ciudad-rascacielos-peligro-extremismo\\_0\\_1448855425.html](http://arq.clarin.com/patrimonio/Shibam-ciudad-rascacielos-peligro-extremismo_0_1448855425.html)

Cortes Delgado, J. L. (2001). *Reflexiones sobre el problema de la vivienda en México*. Obtenido de <http://www.uam.mx/difusion/revista/oct2001/archi1.pdf>

Costa, S. (2010). *La casa ecológica. Ideas prácticas para un hogar ecológico y saludable*. Madrid: Loft Publications.

Federal, S. H. (2015). *Dirección de estudios económicos de la vivienda. Demanda de la vivienda 2015*. México: SIF.

Fernández Carcedo, M. (2012). *Resistencia a compresión de bloques de tierra comprimida estabilizada con materiales de sílice de diferente tamaño de partícula*. Tesis de Maestría: Universidad Politécnica de Madrid.

Ferrandio Nicolau, E. (1992). El derecho a una vivienda digna y adecuada. *Anuario de Filosofía del derecho IX*, 305-322.

Font, F., & Hidalgo, P. (2011). La tapia en España. Técnicas actuales y ejemplos. *Informes de la construcción*, 63, 21-34.

Gatti, F. (2012). *Arquitectura y construcción en tierra. Estudio comparativo de las técnicas contemporáneas en tierra*. Universidad Politécnica de Catalunya : Tesis de Maestría.

González Blanco, Z. (24 de 08 de 2011). *Low-Tech Magazine*. Obtenido de Construir con Tierra: Eficiencia Energética: <http://www.es.lowtechmagazine.com/2011/08/construir-con-tierra2-eficiencia-energetica.html>

Guerrero Baca, L. f., Roux Gutiérrez, R. S., & Soria López, F. J. (2010). Ventajas constructivas del uso de tierra comprimida y estabilizada con cal en México. *Palapa*, 45-57.

Hall, M. R., Lindsay, R., & Rayenhoff, M. (2012). *Modern Earth Buildings*. Cambridge, UK: Woodhead Publishing.

Haramoto, E. (1998). *Conceptos basicos sobre vivienda y calidad*. Chile: Universidad de Chile.

Kasal, B. (2013). Hybrid Materials in Construction, Requirements and fundamental research questions. *Europäischer Kongress* , 1-8.

Maniatidis, V., & Walker, P. (2003). A Review of Rammed Earth Construction. *University of Bath* .

Mari, E. A. (2000). *El Ciclo de la Tierra*. Argentina: Fondo de Cultura Economica Ed.

Mileto, C., Vegas, F., & López, J. M. (2011). Criterios y técnicas de intervención en tapia. La restauración de la torre Bofilla de Bétera (Valencia). *Informes de la Construcción* , 81-96.

Minke, G. (2006). *Building with earth. Design and technology of a sustainable Architecture*. Berlin: Birkhäuser.

Minke, G. (2005). *Manual de Construcción con Tierra. La Tierra como Material de Construcción y su Aplicación en la Arquitectura Actual*. Uruguay: Fin de Siglo.

Neves, C., & Borges Faria, O. (2011). *Técnicas de construcción con tierra*. Brasil: PROTERRA.

Niroumand, H., & Jamil, M. (2013). Rammed Earth Theory in Earth Architecture. *African Journal of Agriculture Research* , 9, 432-435.

Pacheco Torgal, F., & Jalali, S. (2011). *Eco-efficient Construction and Building Materials*. Londres: Springer.

Roux Gutierrez, R. S. (2010). *Los Bloques de Tierra Comprimida en Zonas Húmedas*. México: PyV.

Sebastián, E., & Cultrone, G. (2010). Technology of rammed-earth constructions ("tapial") in Andalusia (Spain): Their restoration and conservation. En M. Bostenaru Dan, R. Poikryl, & A. Torok, *Materials, Technologies and practice in historic heritage* (págs. 11-28). Granada, Spain: Springer.

Secretaria de Energía. (2012). *Balance Nacional de Energía*. México.

Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales & Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático. (2012). *Diagnóstico Básico para la Gestión Integral de los Residuos 2012*. Obtenido de <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/Documentos/Ciga/libros2009/CD001408.pdf>

Sigfried, G. (1971). *La arquitectura. Fenómeno de transición*. Barcelona: Gustavo Gili.

Valentina, C., & Ruiz Checa, J. R. (2009). A traditional reinforced rammed line & earth technique the case of study of tapia valenciana. En A. Catalano, & C. Sansone, *The Buildings techniques*. Valencia, España: Luciano .

Vargas del Río, D. (2002). *Caracterización de la Actividad Puzolánica de las Tobas Pumíticas de la Zona Metropolitana de Guadalajara*. Guadalajara, México: Tesis de Maestria Publicada.

Vargas del Río, D., Zarate del Valle, P. F., & Gutiérrez Pulido, H. (2005). Actividad puzolánica de las tobas pumíticas de la zona metropolitana de Guadalajara. *e-Gnosis* .

Windstorm, B., & Schmidt, A. (2013). A report of contemporary rammed earth construction and research in North America. *Sustainability* .

## 10. Anexos

### 10.1 Anexo 1: Entrevista a Profundidad.

Entrevista realizada al Mtro. Arq. Antonio Penagos. Experto local en la Zona Metropolitana de Guadalajara. En Arquitectura de tierra. Realizada por Samy Orozco.

**Orozco. S-** ¿Que es la Construcción con tierra?

**Penagos. A** - Básicamente dentro de las técnicas de construcción con tierra, la tierra apisonada tiene más amplia gama de aplicación en cuanto al material. Puede ser con suelos más finos, arcillosos, limosos o arenas finas. Pero también se pueden hacer con arenas más gruesas, incluso hasta con algunas piedras de un diámetro específico, la textura cambia pero si funciona, se ha hecho y se sigue haciendo en el mundo.

Esta técnica se puede adaptar a la tierra que encuentres. Con el adobe no pasa lo mismo, ahí si tiene que ser a fuerzas una parte arcilla y otra parte tierra.

Se puede estabilizar con otro material, pero lo ideal es que vaya así. En cambio aquí este muro, si tú tienes arenas finas, gruesas, gravillas o piedras de dos centímetros de diámetro tú lo puedes trabajar.

Entonces no se a donde quieras dirigir tu investigación, ¿vas a hacer pruebas o vas a hacer muestras?

**Orozco. S** - Voy a hacer muestras, en esta semana. Mi tutor es Nayar Gutiérrez y también me estoy apoyando con David, porque él en su tesis de maestría y de licenciatura hizo acerca de puzolanas.

Me estoy basando en resultados que el obtuvo, porque no he encontrado muchas cosas de puzolanas.

Yo me estoy basando en dos tipos de suelos Jal y tepetate, que fue lo que me recomendaron ellos.

Del jal si encontré mucho en la tesis de David, de tepetate no he encontrado información, encontré de Puebla y Querétaro pero David me dijo que no es lo mismo, le pregunte a Nayar y me dijo que el tepetate es muy parecido a la jal, me dijo que la información que tengo es una puzolana.

**Penagos. A** - Creo que primero debes saber de las técnicas de construcción con tierra.

**Orozco. S** - Hasta ahorita es lo que he visto en teoría. Me estoy basando en un libro que se llama modern earth buildins y si he estado leyendo documentos

**Penagos. A** - Pero ese libro solo tiene imágenes de casas y si acaso planos, ¿o es un libro muy técnico?

**Orozco. S** - Es más técnico de hecho, tiene como 800 páginas. Nada más me estoy basando en ciertos capítulos.

**Penagos. A** - ¿Ese libro está editado en EU?

**Orozco. S** - Si

**Penagos. A** - Bueno dentro de esa teoría es muy importante que tú sepas algunas cuestiones fundamentales de la tierra.

Si lo puedes hacer con puzolanas, pero no específicamente con ellas, es decir el muro de tierra apisonada, cuando lleva arcillas, no lleva 100%, lleva entre un 8% y un 15% de arcilla del total de la mezcla, lo demás es lo que llamamos tierra.

Esta tierra trae unas cuestiones de limos, arenas finas y gruesas, y tú lo cribas. Entonces haces esa revoltura pero el componente no es exclusivamente puzolana.

**Orozco. S** - Hicimos varios factores. Jal, tepetate y cemento. Voy a hacer muestras de 10x10 o de 5x5.

**Penagos. A** - Sin embargo tú vas a hacer diferentes muestras, en realidad no te interesa tener más de 100 moldes, porque al final de cuentas vas a estar trabajando, no creo que en un día abarques todas las mezclas, entonces a lo mejor es más conveniente trabajarlo de 10x10, y al cabo las vas a ir desmoldando, nada más los tienes que dejar en un lugar donde no lo toquen.

**Orozco. S** - aquí tengo unos documentos, y tengo más pero al final de semestre los que ya no uso los voy dejando ahí, este libro me lo recomendó Nayar. Habla de estándar y algunos parámetros y clasificaciones.

**Penagos. A** - ¿Este quien lo hizo un ingeniero civil?.

**Orozco. S** - Si un ingeniero.

**Penagos. A** - Es interesante entender este capítulo 6, habría que ver si en ese capítulo, viene como características que tenemos que conocer de la tierra para construir, no para hacer caminos. Entonces como la granulometría, plasticidad, compresibilidad y cohesividad. Para saber de qué se trata el suelo, y que estas utilizando.

Ahora para que una construcción con tierra se defina como tal, la estabilización con cemento, cal o chapopote debe de ser entre 2% y 8% máximo, del peso total de la muestra, más del 8% ya no se considera construcción con tierra. Empieza a perder sus capacidades térmicas, el material empieza a trabajar de otra manera ya estás hablando más de un suelo-cemento, si se sostiene y todo y parece que es de tierra pero ya no es realmente eso.

Entonces si lo que tú quieres es estrictamente trabajar sobre la tierra apisonada, en teoría deberías de considerar ese rango de estabilización entre un 2% y un 8%.

Entonces habría que ver si en estas viene cohesividad y todas estas que dijimos. Por qué lo primero que uno debe de definir son estas bases o características.

Deberías de tener unas muestras bien analizadas en el laboratorio, en eso te podrían ayudar los de ingeniería civil, ellos hace la prueba proctor.

A nosotros nos interesa la cohesividad para ver qué tan cohesiva es una arcilla, hay arcillas que son altamente cohesivas o medianamente cohesivas y así. Al final de cuentas la arcilla es el pegamento de la tierra. Así como el cemento es el pegamento del concreto.

Entonces si tú tienes una muestra de tierra, que tienes arenas finas, algo de limos y no tienes arcillas, entonces te falta el pegamento, entonces como sustituyes el pegamento, una de dos que traigas arcillas de otro lado o dos agregarle cemento y a lo mejor voy agregándole cal, y ahí tranquilamente te pueden salir, ocho o diez muestras, ya con esas dos combinaciones.

Por ejemplo, cemento al 2%, o al 4%, 6% y 8%, y cal, igual 2% de cal y 2% de cemento, ahora cuando se trata de la estabilización, la cal funciona mejor para las arcillas como estabilizante que el cemento gris, y para las arenas funciona mejor el cemento. Básicamente son esas dos tendencias.

Entonces si tú no tienes arcillas se puede usar cal, esta te ayuda a bajar el costo por que es más barata que el saco de cemento. Pero si lo estabilizo en 2% y 2% en eso se vuelve interesante el costo.

Yo lo que te diría es, bueno ¿ya vas a empezar a hacer muestras verdad?

**Orozco. S-** Si, bueno de hecho tenía que venir desde antes contigo, pero necesito meter esta parte como empírica, esto es lo que he hecho después te lo mando.

Yo le estoy tirando a que sea arquitectura de tierra, de hecho mi título se llama.....

**Penagos. A -** Entonces hay estás hablando de puzolanas, no estás hablando de tierra, esa tesis así no la ubico dentro de la arquitecta de tierra, si tu realmente

quieres enfocarlo a arquitectura de tierra. Más allá del 8% no es arquitecta de tierra.

**Orozco. S** - Mi título anterior era tierras de la zona metropolitana enfocadas en muros monolíticos y tenía como base jal y tepetate, pero en el coloquio los geólogos me dijeron que estaba mal, me dijeron que no puedo poner un título como ese.

**Penagos. A** - Pero si puedes poner un título de arquitectura de tierra, este es un título internacional.

Aquí lo que yo veo, es que te estás enfocando en un solo material, que son las puzolanas en la Zona Metropolitana de Guadalajara, entonces es como si me dijeras el uso del pino para la construcción de viviendas en la ZMG, sin embargo digo lo puedes dejar así y entonces ese 30% de estabilización también lo puedes dejar así o lo puedes cambiar.

Son dos cosas muy diferentes este yo lo veo como un tema más ingenieril y el otro más de arquitectura.

**Orozco. S** - Quizás también porque mi tutor es ingeniero

**Penagos. A** - Pero tu formación es de ingeniería civil o de arquitectura

**Orozco. S** - De arquitectura

**Penagos. A** - Bueno, entonces hay en lo que tú quieras enfocarte, puedes dejarlo así y hacer un apartado de la aplicación de las puzolanas en la arquitectura de tierra, para que no cambies el título.

**Orozco. S** - Porque siempre mi enfoque fue de arquitectura en tierra, me enfoque en puzolanas por la información que encontré en Guadalajara.

**Penagos. A** - Claro también todo depende del punto de vista de los asesores y está bien.

Te voy a enseñar, este es un muro de tierra apisonada de 3m de altura y esta es una técnica mixta, no es exclusivamente arquitectura de tierra por todos lados porque tiene ladrillos, tabla roca, pigmentos.

**Orozco. S** - Uno de mis objetivos del TOG, es ver si son factibles los muros monolíticos, porque mi asesor me recomendó que no le fuera a poner tapial, que usara un término más conocido.

**Penagos. A** - Si, porque el termino tapial no se utiliza en México, Además la tierra apisonada es monolítico tal cual.

Describe que tipo de experimento vas a hacer.

**Orozco. S** - Mí idea es alcanzar a hacer algo de construcción hibrida, y como tengo otro compañero que está haciendo un trabajo de estructura de madera y pensamos hacer un mixto de ahí.

**Penagos. A** - Estaría padrísimo eso.

**Orozco. S** - Yo me estoy enfocando mucho en jal y tepetate y hasta ahorita que tú me dices de meter tierra eso nadie me los había dicho.

**Penagos. A** - Si de hecho hacer un muro de puro jal no se va a sostener, debe de ser arenas gruesas, finas, limo y arcillas. Y dependiendo que tan buena es tu arcilla le darás estabilización con cemento para que funcione.

Tienes que mezclar por que la densificación se va a lograr a través de que tenga una granulometría homogénea y constante.

El porcentaje de los granos es importante para saber a la hora que se comprima que se alcancen a llenar los huecos.

Primero tienes que hacer unas gráficas y después las llevas a una práctica, y apisonas con todas las mezclas en estado seco, porque la tierra normalmente viene húmeda, entonces lo primero que se tiene que hacer es secar la tierra en el

horno después pesarla en seco para darte cuenta de cuánto porcentaje de agua traía. La que se usa en el laboratorio es la malla 100 deja pasar 0.02 es la malla más fina.

Todo este material que a nosotros en arquitectura de tierra nos interesa muchísimo y lo estudiamos aparte no se estudia aquí en México. Por qué solo se utiliza para las plataformas de las casas.

De hecho la segunda parte que normalmente no se hace aquí en México es la sedimentación lo haces con dos probetas una de agua y otra es de tierra y con un decímetro. Con esto tú ya sabes de cuantas arcillas estás hablando, esto se puede sacar empíricamente pero si vas a hacer grandes desarrollo si tienes que hacer las pruebas.

También tiene que hacerse la cohesividad esta es para ver que tanto aguanta a la cohesividad la arcilla y que tanto se retrae.

Como aquí en Guadalajara no tenemos arcillas yo me dedicaría a desarrollar un sistema de construcción de tierra apisonada que pueda ser bueno, bonito y barato. Es decir no me importa tanto que no sea arquitectura de tierra si se puede convertir en un material viable para la construcción.

**Orozco. S** - si de hecho por eso estoy metiendo más cal que cemento, puse el factor de la cal de 25% y 30% y el cemento de 0% 5% y 10%. Por qué me dijeron en el coloquio que era mejor hacer las pruebas con cal.

**Penagos. A** - ahora de todos modos hay que hacerlo con pura puzolana, puedes meter ese factor de estabilización con otra tierra.

**Orozco. S** - ¿A otra tierra como le puedo poner de nombre?.

**Penagos. A** - puede ser que intentes con arena de rio, arena amarilla, esto daría una cuestión más homogénea en los resultados.

**Orozco. S** - si mi idea es que al final sea viable que se haga, al principio yo si había pensado en sacar muchas pruebas pero como no hay mucha información no pude hacer eso.

**Penagos. A** - es interesante agregarle arenas. De entrada hacer mezcla de arena amarilla y tepetate y hacer todas esas variaciones del material comercial que ya hay.

**Orozco. S** - Ahorita que me dices mi tesis si se enfoca más en una construcción con tierra, aunque estoy hablando de puzolanas pero si le meto arena amarilla y arena de rio bajo los porcentajes de cal.

**Penagos. A** - Si por supuesto, lo interesantes seria que una vez que se llegara a 2 o 3 modelos de muros se sometieran a pruebas de compresión, etc. Pero también a inercia térmica que esto nos va a servir para el confort. Para comprobar si resiste a estar fresco a pesar del calor y también para saber qué pasa con el frio. Para saber el comportamiento hidrotermico.

**Orozco. S** - Si porque de hecho en el coloquio me dijeron que de que iba a ser mi cimbra le dije que yo no me estoy basando en la cimbra, si me meto por ahí mí tema se va a extender mucho.

Mi teoría es llegar a una mezcla óptima y con esa hacer un muro a escala real, como un sistema de autoconstrucción y apisonar a mano. Y hacer otro de una forma industrializada.

**Penagos. A** - De entrada te digo que para hacer uno industrializado necesitas un pisón neumático, porque si le metes una bailarina u otro tipo, es demasiada fuerza que mete el muro en resonancia y entonces se empieza a fragmentar por capas y te va a salir mal y vas a creer que no sirve la tierra, y en realidad lo que no sirvió fue la técnica utilizada. Hay parámetros y hay límites.

**Orozco. S** - ¿Tú cuando construyes apisonas con la mano?.

**Penagos. A** - Si, con la mano, y hay una técnica para hacer el apisonado. Hay que empezar por las orillas del muro luego por el centro para que queden bien confinadas las orillas y no se degrade tan fácilmente.

La cimbra es otro tema, llegando el momento vemos cómo hacer la cimbra y los pisones tienen que tener cierto peso, normalmente van de acuerdo a la cultura y a las cuestiones físicas del lugar donde se está apisonando. Físicas me refiero a las cuestiones fisiológicas de la gente.

Hay pisones de madera, de metal, cuadrados, curvos, esquineros, medianeros, etc.

La arquitectura de tierra tiene sus reglas de diseño y si no las respetas se te caen los muros. La tierra apisonada funciona como muro portante o muro tapón, pero independientemente de cómo funcione tiene que tener masa.

Hay una relación entre el módulo de sección del muro que es 1 a 10 por ejemplo si tu altura tiene 3m mínimo debe de ser 30cm.

El muro de tierra debe de venir desde abajo, no es buena idea combinar dos técnicas.

Si hay que conocer, por eso hay una maestría en arquitectura de tierra porque es muy vasto el tema. Cada técnica tiene sus cuestiones.

La buena noticia es que tu trabajo de fin de grado no tiene que ser arquitectura de tierra. Se me hace muy padre y muy interesante desarrollar esa parte porque es material local aunque no sea arquitectura de tierra.

**Orozco. S** - Si yo al principio dije arcillas, pero elegí este tema mejor porque voy a construir en Guadalajara y aquí no funcionan las arcillas por el tema de transporte etc. Hice este tema es porque si voy a construir en Guadalajara y aquí hay esas tierras por que no usarlas.

**Penagos. A** - Acabas de mencionar un tema muy importante que es un punto de partida que debe de venir en tu hipótesis, si vas a construir en Guadalajara y excavar para hacer la cimentación y no la usas para suelo-cemento entonces que haces con esa tierra, entonces hay habría que ver cuáles son los tipos de suelo geológico que hay en la zona conurbada de Guadalajara. Y entonces tener muestras de cada una de ellas y hacer pruebas. Esa es una manera de cerrar más tu tesis.

Primero tienes que ver una carta geológica preguntar que estudios hay, conseguir las muestras y hacer las pruebas y entonces ya que desarrollaras ese muro hacer una comparativa de costo contra las de concreto.

**Orozco. S** - De hecho si tengo como evaluar las ventajas que tienen estas técnicas con la tradicional en la vivienda urbana.

Me dijeron que ponga datos de como contamina el ladrillo cocido.

**Penagos. A** - Puedes tomar datos internacionales como referencia. Hazlo un poco más científico. De ese jal y el tepetate que sacaron hacer una granulometría.

La otra cosa que puedes hacer es meterte a la página Proterra.

**Orozco. S** - ¿Has hecho cálculos de las construcciones que has realizado?

**Penagos. A** - No, porque solo los he usado de muros tapones. He hecho casas con tierra apisonada y con adobe, la ventaja de la tierra apisonada es que el acabado queda al natural y no daña al medio ambiente.

La prueba cortante es muy importante en este procedimiento, la arquitectura de tierra es bastante buena a la compresión pero al cortante no lo es por lo cual la manera de diseñarla tiene que seguir sus reglas para que pueda resistir. Por ejemplo si se hace un muro de más de 3m sin algo en medio, no aguantaría el cortante, es básico meter una contrapuerta hay que saber cuáles son los fundamentos del diseño.

Respetando las reglas de diseño me va a dar algo bueno, imagínate hay construcciones de tierra de más de 14 niveles de altura y son construcciones patrimoniales de la humanidad de más de 600 años de antigüedad.

**Penagos. A** - Haz una mezcla con tierra de tu jardín quita los 10 o 20 cm de capa vegetal esa no sirve para nada en la construcción, o llévate un costal de Tonalá y haces una muestra con esa específicamente, con latitud, coordenadas y sacar granulometría.

Puedes hacer una prueba con cemento virgen y otra con cemento compuesto a ver que tanto afecta.

Trata de encontrar una cuestión comercial, ósea práctica.

**Orozco. S** - Si por eso me llamo la atención las puzolanas porque se sacan de muchas partes. Y también la arena amarilla y de río la puedo conseguir en cualquier lado.

**Penagos. A** - Yo si abriría esas puerta de por lo menos tener un ensayo de cada una de ellas y tenerlas bien catalogadas.

**Orozco. S** - Si, y como este tipo de pura tierra ¿cuánto tarda en secarse?.

**Penagos. A** - De pura tierra sin arcilla tarda una o dos semanas máximo dejando las pruebas al aire libre. Depende del espesor del muro también entre más grueso tarda más.

Ahora cuando metas cemento no las dejes cercando al sol o tápalas con una bolsa negra porque si no se evapora el agua.

Yo te recomiendo utilizar cemento y cal en un 8% 4% y 0% y cuando estés haciendo todo tu proceso de fabricación tomar fotografías.

Busca que tu trabajo sea más práctico que de investigación.

Al final de cuentas la maestría es un medio para hacer lo que te gusta.

**Orozco. S** - Lo que tengo duda es de la cantidad de agua

**Penagos. A** - En tierra dependiendo de la técnica va desde un 6% de humedad hasta un 15% que ya es mucho, es cuestión de irle calando para encontrar el contenido óptimo.

## 10.2 Anexo 2: Especificación de la cal Hidratada



CALERAS DE LA LAGUNA, S.A. DE C.V.  
Product Specification



**NIXTACAL**

**HIDROXIDO DE CALCIO**  
**CALCIUM HYDROXIDE (FOOD GRADE)**

Chemical Characteristics		Reference	
Calcium Hydroxide	Ca(OH) <sub>2</sub>	ASTM C-25	97.0 % min.
Iron ppm	Fe	(*)	100 max
Aluminium ppm	Al	(*)	100 max
Sulfate ppm	SO <sub>4</sub>	(*)	1600 max
Insoluble matters (%) **		(*)	0.5 max
Chloride ppm	Cl	(*)	320 max
Magnesium Oxide	MgO	(*)	0.7 % max.
Phosphate ppm	PO <sub>4</sub>	(*)	600 max
Lead ppm **	Pb	(*)	2 max
Heavy Metals ppm		(*)	30 max
Magnesium & alkali salts % **		(*)	4.8 % max
Fluorine ppm **	F	(*)	50 max
Arsenic ppm **	As	(*)	3 max
Barium ppm	Ba	(*)	300 max

### Physical Characteristics

Humidity %	H <sub>2</sub> O	ASTM D-95	1.0 % max.
Granul scale (% which pass)	No. 100	ASTM C-110	99.0 % min
	No. 200		97.0 % min
	No. 325		90.0 % min

### Presentation

Paper bags ( 25kg & 50lb ) & Bulk

(\*) External laboratory analysis results

(\*\*) This Calcium Hydroxide meets the specifications of the Food Chemicals Codex Fifth Edition

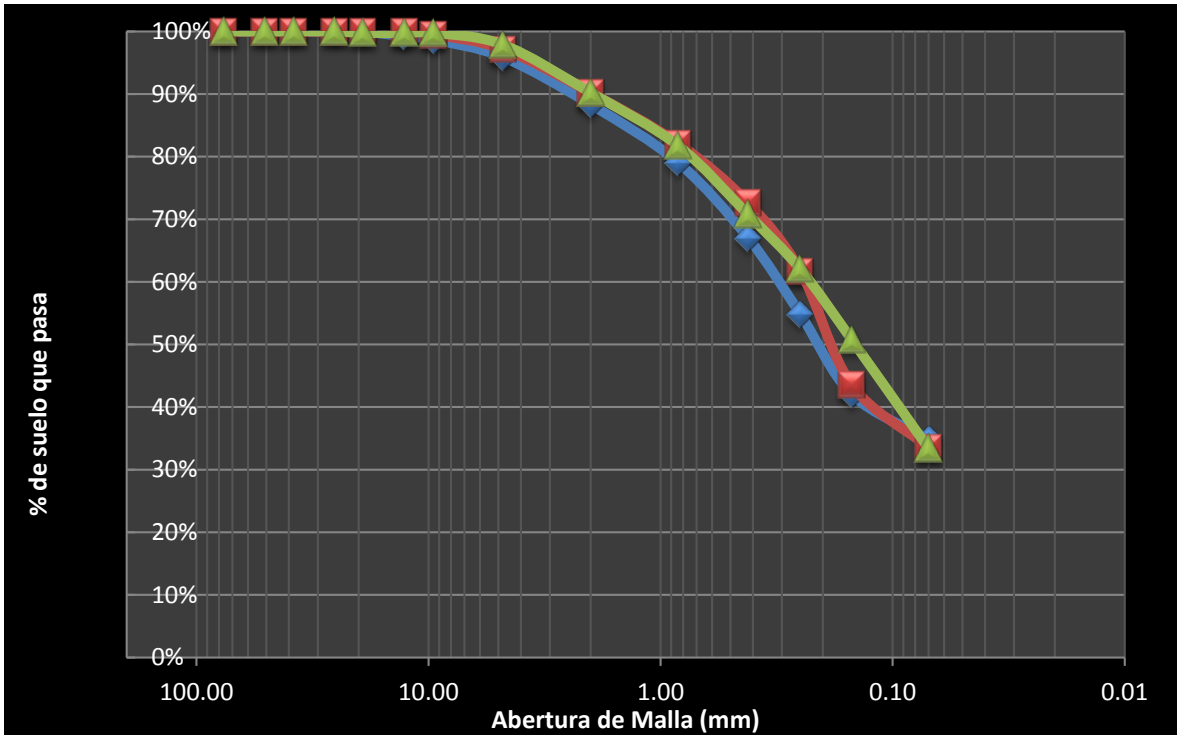
### Autorization

*Ing. Martin Campos Acosta*  
Plant Manager

October 2007

go-p-02-f2 Rev. 0

### 10.3 Anexo 3: Granulometría



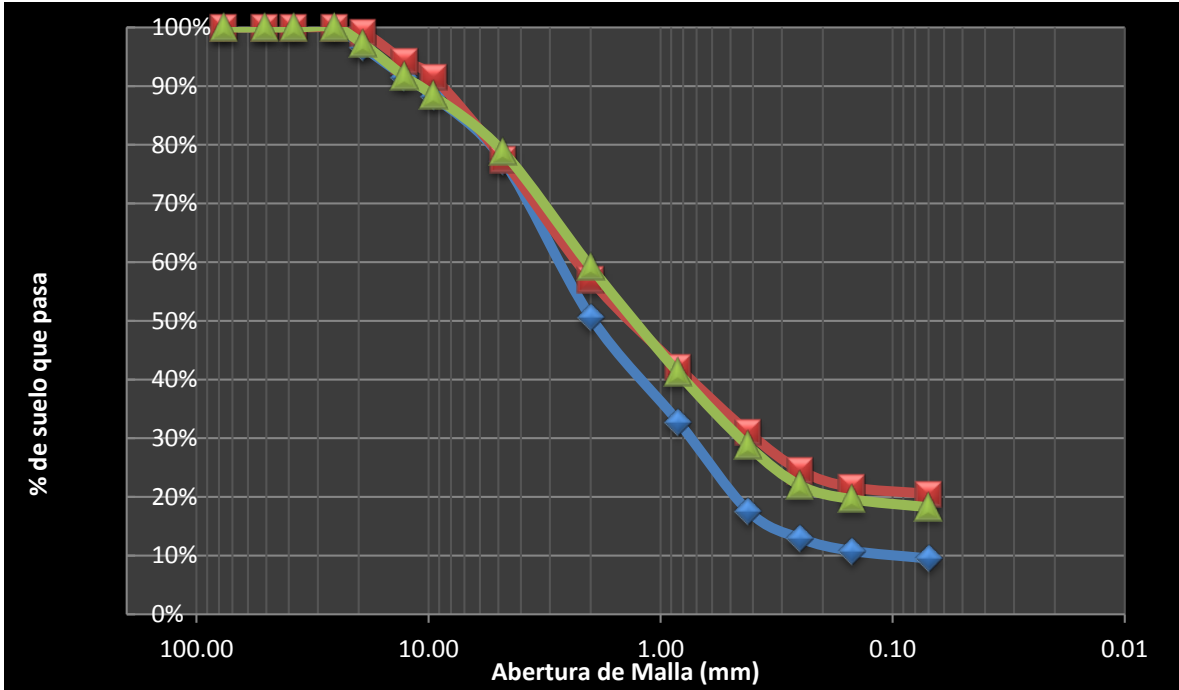
Análisis Granulométrico: Tepetate

Gravas= 3%

Arenas= 63%

Finos= 34%

Datos obtenidos del PAP del ITESO: Geotecnia para la mitigación de riesgos.



Análisis Granulométrico: Jal

Gravas= 22%

Arenas= 59%

Finos= 19%

Datos obtenidos del PAP del ITESO: Geotecnia para la mitigación de riesgos

#### 10.4 Anexo 4: Diseño de experimento en el software Statgraphics.

##### Primera Fase

Suelo: 1 = Jal, 2 = Tepetate.

Cemento: 1= 0%, 2 = 4 %, 3 = 8 %.

Cal: 1=25%, 2= 30%.

Agua: Fluidez del 70% (en la mesa de fluidez)

Criba: malla #16.

Curado: 1 = 7 días, 2 = 28 días, 3 = 90 días.

Compresión: en kg/cm<sup>2</sup>.

Suelo	Cemento	Curado
1	1	1
1	1	2
1	1	3
1	2	1
1	2	2
1	2	3
1	3	1
1	3	2

1	3	3
2	1	1
2	1	2
2	1	3
2	2	1
2	2	2
2	2	3
2	3	1
2	3	2
2	3	3
3	1	1
3	1	2
3	1	3
3	2	1
3	2	2
3	2	3
3	3	1
3	3	2
3	3	3
1	1	1

1	1	2
1	1	3
1	2	1
1	2	2
1	2	3
1	3	1
1	3	2
1	3	3
2	1	1
2	1	2
2	1	3
2	2	1
2	2	2
2	2	3
2	3	1
2	3	2
2	3	3
3	1	1
3	1	2
3	1	3

3	2	1
3	2	2
3	2	3
3	3	1
3	3	2
3	3	3

### 10.5 Anexo 5: Mezclas para experimento. Primera Fase

Material	Porcentaje	gramos	Porcentaje	gramos	Porcentaje	gramos	Porcentaje	gramos	Porcentaje	gramos	Porcentaje	gramos
	<b>J1</b>		<b>J2</b>		<b>J3</b>		<b>J4</b>		<b>J5</b>		<b>J6</b>	
Jal	70	2100	75	2250	66	1980	71	2130	62	1860	67	2010
Cal hidratada	30	900	25	750	30	900	25	750	30	900	25	750
Cemento Portland	0	0	0	0	4	120	4	120	8	240	8	240
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>3000</b>	<b>100</b>	<b>3000</b>	<b>100</b>	<b>3000</b>	<b>100</b>	<b>3000</b>	<b>100</b>	<b>3000</b>	<b>100</b>	<b>3000</b>

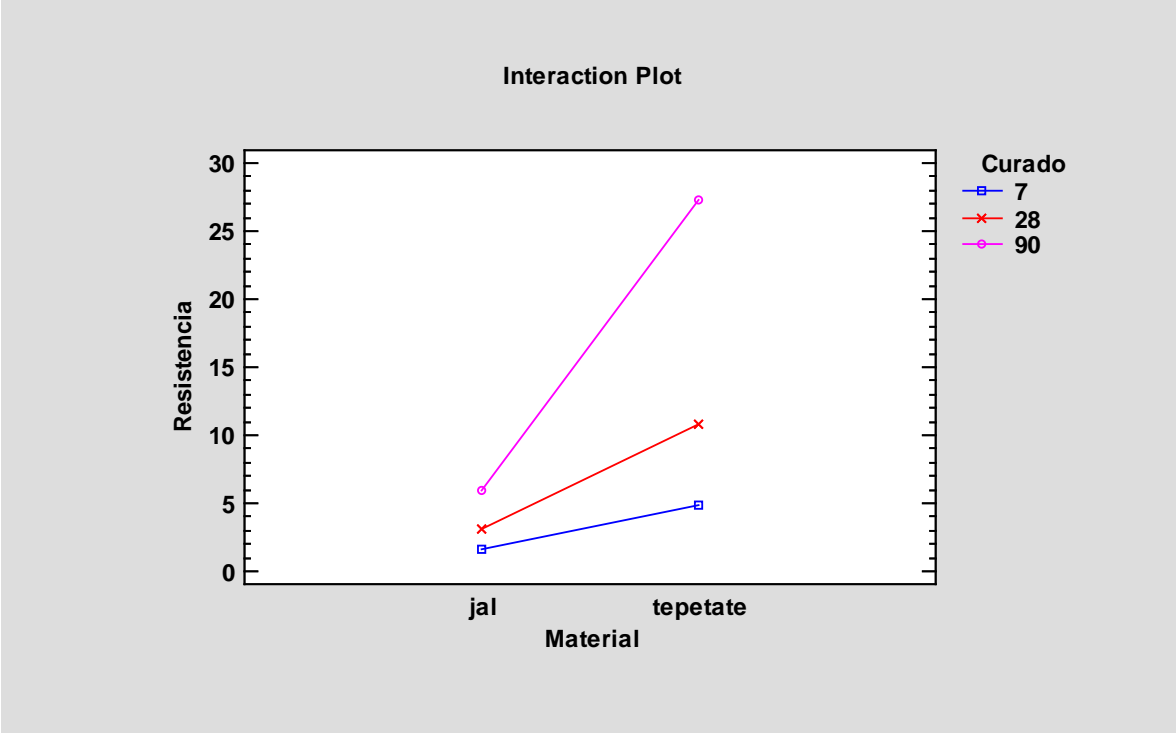
Material	Porcentaje	gramos	Porcentaje	gramos	Porcentaje	gramos	Porcentaje	gramos	Porcentaje	gramos	Porcentaje	gramos
	<b>T1</b>		<b>T2</b>		<b>T3</b>		<b>T4</b>		<b>T5</b>		<b>T6</b>	
Tepetate	70	2100	75	2250	66	1980	71	2130	62	1860	67	2010
Cal hidratada	30	900	25	750	30	900	25	750	30	900	25	750
Cemento Portland	0	0	0	0	4	120	4	120	8	240	8	240
<b>Total</b>	<b>100</b>	<b>3000</b>	<b>100</b>	<b>3000</b>	<b>100</b>	<b>3000</b>	<b>100</b>	<b>3000</b>	<b>100</b>	<b>3000</b>	<b>100</b>	<b>3000</b>

### 10.6 Anexo 6: Mezclas para experimento. Segunda Fase

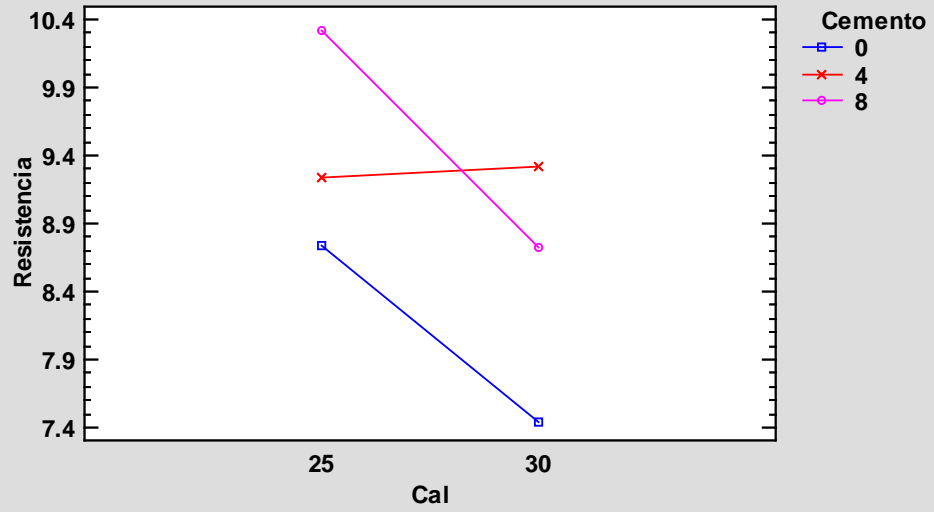
MATERIAL	PORCENTAJE	GRAMOS	PORCENTAJE	GRAMOS	PORCENTAJE	GRAMOS
	<b>T2</b>		<b>T4</b>		<b>TJ</b>	
TEPETATE	55%	4400	51%	4080	25.5%	2040
JAL	0%	0	0%	0	25.5%	2040
ARENA DE RÍO	20%	1600	20%	1600	20%	1600
CAL HIDRATADA	25%	2000	25%	2000	25%	2000
CEMENTO PORTLAND	0%	0	4%	320	4%	320
	100%	8000	100%	8000	100%	8000

10.7 Anexo 7: Datos Obtenidos de Statgraphics.

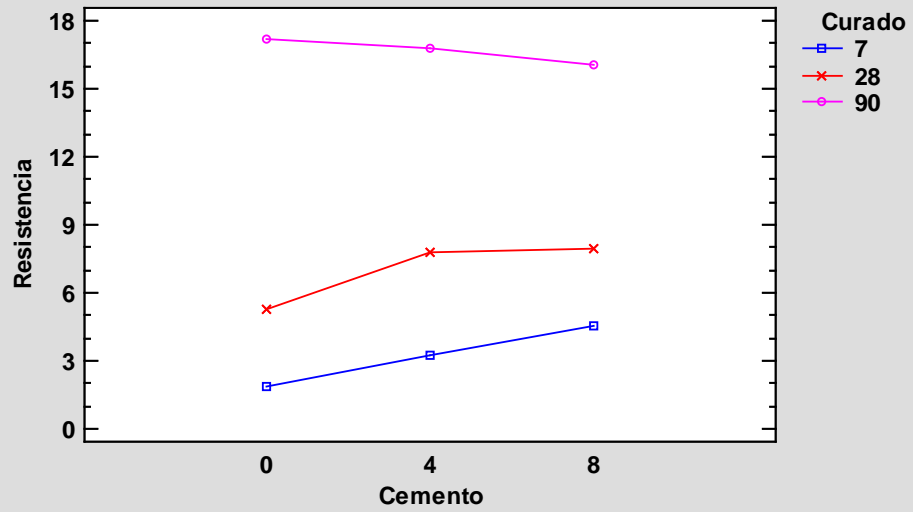
Graficas de la primera fase de la experimentación:



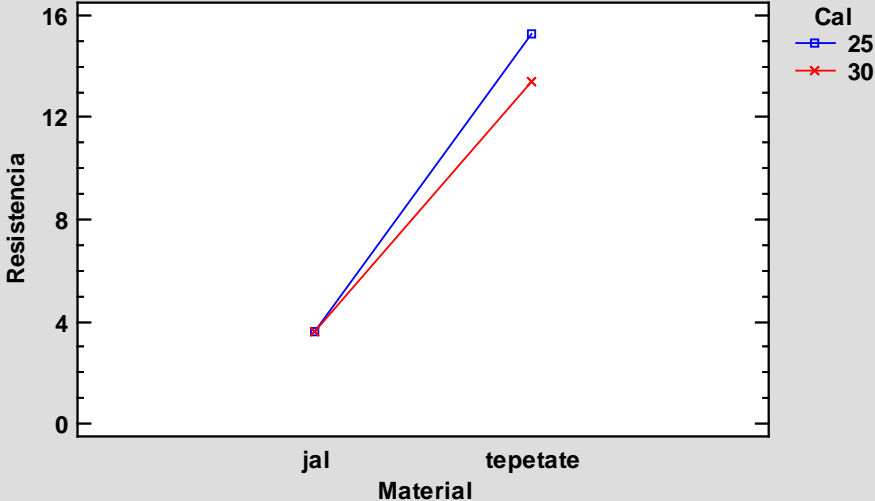
Interaction Plot



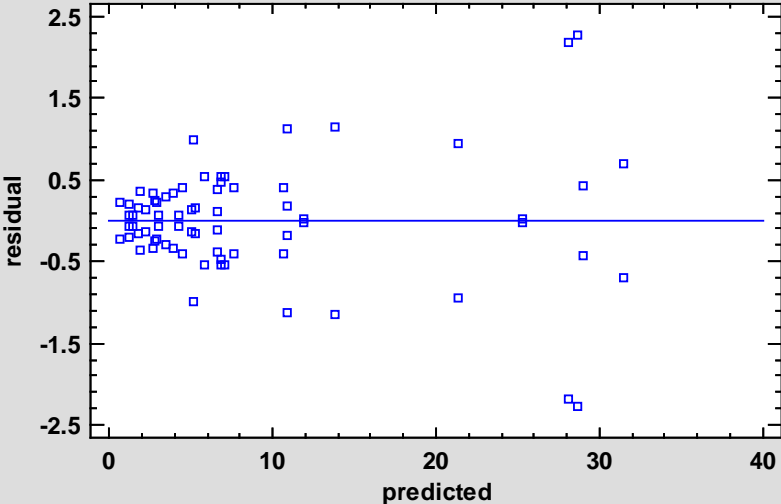
Interaction Plot



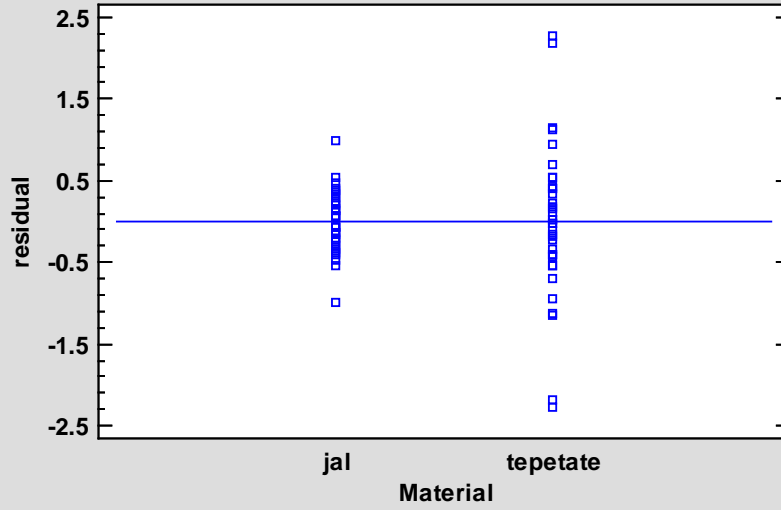
Interaction Plot



Residual Plot for Resistencia



Residual Plot for Resistencia



Residual Plot for Resistencia

