



**UNIVERSIDAD MICHOACANA  
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**TESIS PROFESIONAL**

**“DESEMPEÑO MECÁNICO DE MORTEROS DE CAL  
ADICIONADOS CON FIBRAS DESHIDRATADAS EN POLVO  
DE CACTUS OPUNTIA”**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**PRESENTA:**

**María Cristina Morales Garibay**

**ASESOR: Ing. Wilfrido Martínez Molina**

**COASESOR: Dr. Andrés Antonio Torres Acosta**

**MORELIA, MICHOACÁN, MÉXICO, JUNIO 2009.**

## DEDICATORIA

Dedico esta tesis a mi abuelo **Daniel Garibay Amezcua†**, que aunque hoy no se encuentra aquí para compartir este sueño conmigo, vive en mi corazón siempre y está a mi lado en cada paso que doy. Gracias por quererme tanto y hacerme tan feliz en el espacio que Dios te dio la oportunidad de estar conmigo.

## AGRADECIMIENTOS

Quizá este sea uno de los agradecimientos más largos que se ha visto escrito en una tesis, pero no puedo olvidar a las personas que han estado a mi lado desde el día que nací, a las que en el camino se incorporaron, dándole luz, alegría y felicidad a mi vida.

A **Dios**, que está conmigo en todo momento y me ha dado la oportunidad de salir adelante siempre, aún cuando el camino era incierto, protegiéndome cada día que estuve lejos de las personas que amo, siempre acompañándome y cuidándome.

### **A mi Familia:**

*Rosa María Garibay Casillas*, que siempre ha sabido buscar la forma para ayudar a cumplir mis sueños y los de mis hermanas. Madre Gracias!! Por todo el apoyo que me has dado, sabes que te quiero muchísimo y admiro tu fortaleza.

*Jesús Morales Navarro*, por su apoyo cada vez que le era posible, por intentar ser un mejor padre cada día. Papi, te quiero mucho.

A mi *Mamá Carmen*, por ser más que mi abuela, madre también para mí, por preocuparse siempre por lo que me falta y por demostrarme cuanto me quiere.

A mis hermanas, *María de Jesús y Ana Carmen*, porque siempre me han demostrado lo mucho que me quieren y me ayudan siempre que las necesito. Hermanitas gracias!

*Jesús Garibay Casillas*, por ser maestro, amigo y por tener la paciencia para explicarme cada una de las cosas que no entendía. Por alentar mis ganas de estudiar esta carrera cuando muchos me decían que no era para mí. Eres una de las personas que más admiro por su trabajo, por su entusiasmo y fortaleza para enfrentar la vida. Gracias por tu apoyo incondicional.

*Daniel Garibay Casillas*, por ser un gran apoyo cada vez que necesitaba de él. Gracias por estar ahí siempre.

*Benjamín Garibay Casillas y Antonio Garibay Casillas*, por el apoyo siempre me dieron, porque aunque no se les da mucho eso de hablar, sé que me quieren mucho y soy su sobrina consentida.

*Pablo Alberto Garibay Casillas*, porque detrás de esa persona tan enojona, hay un gran hombre que lucha por salir adelante y que cada vez que le pedía ayuda, muy a su manera siempre me ayudo. Gracias.

*Cecilia Garibay Casillas*, por ser mi confidente y amiga, siempre apoyándome con sus consejos y alientos. Señora Lanch, gracias por todo.

*Guadalupe Garibay Casillas*, por apoyarme y ayudarme siempre que la necesité.

*Margarita Garibay Casillas*, porque a pesar de estar lejos, siempre ha estado preocupándose por mí y apoyándome.

*Carlota Torres Puga*, por ser uno de las personas más valiosas que conozco, más sinceras y más luchonas en esta vida. Gracias por el apoyo durante todo este tiempo.

*Adriana Millán*, por haberme ayudado a no sentirme tan sola en el tiempo que llegué a Morelia.

*Esperanza Alejandre*, por sus consejos tan ocurrentes, pero que siempre me sirven mucho.

A todas las personas que me adoptaron como parte de su familia:

*Maru y Gerardo*, gracias por ser mis padres adoptivos, por quererme como uno más de sus hijos, por su apoyo tan desinteresado y por cada consejo que me han dado desde que tuve la oportunidad de conocerlos.

Maricarmen, que siempre estuvo procurando mi bienestar con tanta luz que ella proyecta, siempre animándome y contagiándome su alegría.

A mi hermana *Daniela Lúa Muratalla*, la gran amiga que quiero con todo mi corazón, que estuvo conmigo siempre y aún lo está, compartiendo cada alegría, tristeza, pero siempre acompañándome y aconsejándome, gracias Danilu.

#### **A mis amigos:**

*Benjamín, Bere, Carlos, Cristóbal, Guillermina, Leonor, Lupillo*, gracias por todo su apoyo en la carrera y por conservar una amistad tan bonita e incondicional a pesar de que el tiempo y el trabajo de cada uno nos hace coincidir menos.

*Gorety y Ana*, gracias por cada consejo, regaño y aliento, por compartir ideas y luchar por ellas.

*Benito, Miriam*, mis compañeros de escuela y amigos, siempre dispuestos a ayudarme y acompañarme.

*Xavier*, que estuvo conmigo siempre, apoyando, ayudando, regañando, presionando y que gracias a sus palabras nunca perdí el ánimo, al contrario, me ayudaba a seguir con más ganas.

*Benjamín Pérez Morales*, por ser un gran amigo, por los consejos, el aliento y la confianza que siempre me dio.

A las maestras *Patricia Araiza* y *Aida López*, que fueron de mis mejores maestras, agradezco el interés por que saliera adelante y cada comentario siempre tan acertado.

#### **A mis asesores:**

*Ing. Wilfrido Martínez Molina*, por toda la ayuda que me dio durante el tiempo que estuve en el Laboratorio de Materiales, por su sinceridad y constancia para cada actividad que se propone y por ayudarme a concretar este trabajo para finalmente titularme.

*Dra. Elia Mercedes Alonso guzmán*, por confiar en mí, por buscar un espacio para revisar mi trabajo y por los consejos y ayuda que me brindó durante todo este tiempo como maestra, asesora y amiga.

#### **A mis compañeros de trabajo:**

*Don chora, Don Chuy y Don Rube*, por el apoyo y asesoramiento en cada prueba realizada.

*Cindy, Edwin, Marco, Sergio*, por la ayuda, el apoyo y los consejos, por hacer muy grato el trabajar con ellos.

*Carmelita, la señora Dioni*, por siempre estar ahí apoyando y aconsejando, no solo a mí, sino a cada uno de los que trabajamos en el laboratorio.

*Amado, Norma, Marco, Sandra, Nayeli y Dani*, porque con su ayuda hicieron más amena esta investigación y por la disposición que tuvieron siempre para ayudarme. Mil Gracias por todo chicos.

**Al proyecto** 59999 CB-2006, titulado "Daño Antropogénico en Ignimbritas de los Monumentos Históricos, caso Morelia, Michoacán, México, Tecnología histórica en Mamposterías para esculpir rocas y elaborar Morteros de Cal", apoyado por el CONACYT, por el apoyo financiero para elaborar esta tesis.

## **OBJETIVO.**

Evaluar el efecto de la adición de fibras deshidratadas en polvo de cactus opuntia en las sollicitaciones mecánicas de compresión simple, tensión directa, flexión y cortante sobre morteros de cal.

El desempeño mecánico se comparará contra un mortero testigo sin adiciones.

## **JUSTIFICACIÓN.**

La ciudad de Morelia tiene más de un millar de monumentos arquitectónicos contruidos con ignimbritas y tobas riolíticas.

Estos monumentos coloniales se preservan, restauran y conservan según la normativa vigente en el Instituto Nacional de Antropología e Historia.

Las normas obligan el empleo de la cal como material cementicio y el uso preferente de adiciones orgánicas e inorgánicas contenidas en la bibliografía histórica y los tratados de época.

El cactus es un vegetal repetidamente mencionado en la bibliografía existente. Se habla de las fibras deshidratadas, las pencas asadas, el mucílago obtenido por cocción, inmersión, picado.

Este trabajo emplea una adición orgánica de las sugeridas por el INAH y evalúa su efecto sobre las propiedades mecánicas.

Es imperante la necesidad de preservar y proteger las juntas y aplanados existentes con materiales como el que nos ocupa.

## RESUMEN

El presente trabajo es una investigación acerca de la adición de cactus opuntia en su presentación de fibra deshidratada en polvo para la elaboración de morteros.

Se evalúan las respuestas a las distintas sollicitaciones de esfuerzos como son Compresión simple, Tensión, Flexión y Cortante.

El material utilizado para la elaboración del mortero es arena volcánica del banco de materiales de Joyitas, ubicado en la ciudad de Morelia Michoacán México (Latitud 19° 43' 11.91" N, Longitud 101° 23' 26.83" O), Cal Muro, agua potable y nopal en polvo.

Los especímenes fueron elaborados con una proporción de 1:3 (Cementante/Agregado pétreo), a la parte de cementante se le adicionó un 6% de nopal en polvo y para lograr una consistencia adecuada se utilizó el 31% de agua en relación al peso total (material pétreo, cementante y aditivo).

A la par se elaboró un mortero testigo, con la misma cantidad de agua utilizada para el mortero adicionado con nopal para evaluar el cambio de sus características mediante la adición.

Los especímenes de mortero adicionado con nopal en polvo y los de mortero testigo se probaron a distintas edades: 3, 5, 7, 14, 21, 28, 35 y 45 días. A la edad de un día los especímenes estaban demasiado húmedos, por lo que no fue posible registrar resultado en ninguna de las sollicitaciones mecánicas.

Las pruebas de resistencia efectuadas así como la caracterización del material se hizo de acuerdo a las especificaciones de la American Society in Testing of Materials (ASTM).

## CONTENIDO.

### CAPÍTULO UNO: INTRODUCCIÓN

<b>1.1 Antecedentes Históricos.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Materiales para construcción.....</b>	<b>5</b>
<b>1.3 Mortero.....</b>	<b>6</b>
1.3.1 Propiedades Físicas de los morteros.....	7
1.3.2 Clasificación de los morteros.....	7
<b>1.4 Conglomerantes.....</b>	<b>9</b>
1.4.1 Cal.....	9
<b>1.5 Áridos.....</b>	<b>16</b>
1.5.1 Origen de los agregados.....	17
1.5.2 Propiedades de los agregados.....	20
<b>1.6 Agua.....</b>	<b>22</b>
<b>1.7 Aditivos.....</b>	<b>25</b>
1.7.1 Breve reseña de los aditivos.....	26
<b>1.8 El nopal.....</b>	<b>27</b>
1.8.1 Características del nopal.....	29

### CAPÍTULO DOS: Materiales y diseño de mezcla.

<b>2.1 Caracterización física del pétreo fino.....</b>	<b>31</b>
2.1.1 Prueba de granulometría .....	32
2.1.2 Peso Volumétrico Seco y Suelto.....	36
2.1.3 Peso Volumétrico Seco y Varillado.....	37
2.1.4 Densidad.....	38

2.1.5 Absorción.....	39
<b>2.2 Diseño de la mezcla.....</b>	<b>40</b>
2.2.1 Prueba de Fluidéz en Morteros.....	40
<b>2.3 Realización de los especímenes.....</b>	<b>43</b>
2.3.1 Cubos para compresión.....	43
2.3.2 Prismas rectangulares para flexión.....	44
2.3.3 Briquetas para Tensión.....	44

### **CAPÍTULO TRES: Pruebas.**

<b>3.1 Resistencia a la compresión.....</b>	<b>45</b>
3.1.1 Verificación de la calidad de los cubos.....	45
3.1.2 Prueba de compresión.....	45
<b>3.2 Resistencia a la Flexión.....</b>	<b>47</b>
<b>3.3 Resistencia a la Tensión.....</b>	<b>48</b>

### **CAPÍTULO CUATRO: RESULTADOS.**

<b>4.1 Esfuerzos de Compresión.....</b>	<b>50</b>
<b>4.2 Esfuerzos de Flexión.....</b>	<b>55</b>
<b>4.3 Esfuerzos de Cortante.....</b>	<b>60</b>
<b>4.4 Esfuerzos de Tensión.....</b>	<b>65</b>

### **CAPÍTULO CINCO:**

<b>DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....</b>	<b>69</b>
--	-----------

### **CAPÍTULO SEIS:**

<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>72</b>
-------------------------	-----------

# CAPÍTULO UNO

## INTRODUCCION.

### 1.1 ANTECEDENTES HISTÓRICOS.

La Conservación y restauración de obras de arte es el conjunto de procesos dedicados a la preservación de los bienes culturales para el futuro, devolviendo la eficiencia y originalidad a un producto de la actividad humana o natural. Las actividades de conservación corresponden a: observación y levantamiento de daños, documentación, tratamiento, prevención y cuidado. Dentro de esta área, la cal tiene una importante participación, pues es un material original que aún a la fecha puede ser obtenido fácilmente y a un costo realmente bajo [ANFACAL, 2009].

La mayor parte del patrimonio arquitectónico monumental que tenemos a la fecha fue construido con rocas, pues lo construido con materia orgánica en muchos casos desapareció. La piedra ha sido uno de los materiales de construcción preferido por las civilizaciones, ya que tiene cualidades que no presentan los demás; uno de los aspectos más valorados además de su consistencia y resistencia, era su gran durabilidad con el paso del tiempo. Esto puede verse en monumentos que han llegado hasta nuestros días en un estado de conservación muy aceptable. Pero a pesar de su durabilidad, las piedras con el paso del tiempo tienden a deteriorarse. El deterioro de la piedra se ha acelerado últimamente, pero ya en la antigüedad se apreciaba como la piedra perdía su consistencia y era necesario intervenir en los edificios para mantenerlos en buen estado. Estas actuaciones iban dirigidas fundamentalmente a la sustitución de las piezas que se iban deteriorando y al revestimiento de las fachadas con morteros de cal y yeso [Fort R., 2007].

Históricamente, la Cal se empleó desde la antigüedad en sorprendentes construcciones internacionalmente conocidas por su solidez y resistencia a lo largo del tiempo, como La Vía Apia, Las Pirámides de Egipto, La Muralla China y El Coliseo Romano o las Pirámides de Teotihuacán, las del área Maya o las antiguas construcciones Toltecas, por sólo mencionar algunos ejemplos [ANFACAL, 2009].

El hombre con el objetivo de crear obras adecuadas, agradables a la vista y capaces de provocar un valor estético, fue perfeccionando los materiales y las técnicas constructivas, en el año 2680 a.C., los egipcios ante la obsesión de sus gobernantes edificaron grandes pirámides y tumbas espléndidas que se distinguían por medio de una mastaba (banco de adobe) de planta rectangular con muros en talud que evolucionó a la pirámide escalonada y más tarde a las pirámides de caras planas, en 1428 a.C., lograron emplear la roca caliza y el granito en la construcción de edificios y tumbas de grandes dimensiones [Camacho, 2001].

La cal ya era conocida en el sexto milenio A.C. como material de construcción para morteros y revestimientos, ya que en Çatal Hüyük (ubicado en la

península de Anatolia, en Turquía), se han encontrado paredes revocadas con frescos y armadas con morteros. Posteriormente, gracias a investigaciones de arqueólogos se ha descubierto que se ha usado en periodos como el antiguo Egipto, imperio Asirio, Grecia clásica, en el imperio romano; también, fuera del Mediterráneo, fue usada por los Mayas, Incas y Aztecas en América y las primeras dinastías chinas o también las primeras dinastías indias [es.wikipedia.org, 2009].

Los artistas de las ciudades romanas solían pintar sobre las paredes de las habitaciones de las casas mediante la técnica del fresco. A veces hasta siete capas sustentaban las pinturas y se utilizaba la cal y el jabón de cera. Los colores empleados son muy vivos y variados y muchas veces se conseguía plasmar la sensación de tridimensionalidad y de perspectiva [ANFACAL, 2009].

En Creta, existen frescos y estucos realizados a base de Cal en el palacio de Cnosos; en tanto que, en Delos la Cal se usó como cementante para la construcción; sin embargo en la mayor parte de las islas griegas la Cal se reservó como material para los enlucidos y revestimientos. Debido al cuidado extremo que tenían para tratar las instalaciones hidráulicas, cisternas, aljibes, zonas portuarias y las partes bajas de los muros, las recubrían de una mezcla impermeable de Cal, arena, puzolana o piedra pómez [ANFACAL, 2009].

Los romanos bajo la influencia de los griegos, lograron perfeccionar el uso de la caliza descubriendo un cementante natural (cal aérea) que combinaban con alguna sustancia inerte para formar una argamasa, las obras construidas con este material, se cubrían posteriormente con mármoles o estucos para obtener un acabado más estético, sus avances en el arte de la edificación fueron innumerables y en sus obras utilizaron toda clase de materiales de construcción. Al inicio del siglo III a.C., en Roma, el uso del mortero cal-arena, comenzó a generalizarse y la experiencia demostró muy lentamente que las arenas de ciertos lugares producían un mortero mucho más resistente y que fraguaba con mayor rapidez [Camacho, 2001].

Pero, las obras más antiguas realizadas con Cal se encuentran en lo que fue Mesopotamia, en ciudades como Uruk (ahora Warka), y en Gilgamesh, donde se descubrieron edificios con carácter religioso (como el Templo Blanco) los cuales fueron construidos con ladrillos crudos; cubiertos de una lechada de Cal y revestidos con mosaicos [ANFACAL, 2009].

En la América Precolombina la Cal se utilizó en forma de argamasas, la materia prima se obtenía calcinando conchas y se mezclaba con arena y a veces con gravillas. Sobre la mezcla utilizada en las antiguas construcciones del Valle de México, por ser muy dura, se pensó en un principio que era algún cemento artificial, sin embargo finalmente se determinó que era una mezcla de Cal con piedra volcánica [ANFACAL, 2009].

Ante de la llegada de los españoles, ya se usaba la cal como material de construcción, incluso se ha demostrado su uso en el periodo preclásico superior (600 a.C.-100 a.C.), ya que se encontraron pisos elaborados con cal, tanto en Monte Albán I, como en monte Negro. Los mayas en la construcción de sus pirámides y templos, dispusieron de materiales como la piedra caliza para los

sillares de revestimiento, tierra cascajo, piedra laja para el recubrimiento de los núcleos que sujetaban con estucos de cal. Fue la única civilización prehispánica que utilizó la cal en la construcción de muros, acostumbraban hacer pinturas murales sobre los sustratos de cal para decorar el interior y exterior de sus monumentos, a pesar de su antigüedad y las extremas condiciones de clima, muchos lugares arqueológicos, todavía conservan sus estucos de cal y sus pinturas murales [Camacho, 2001].

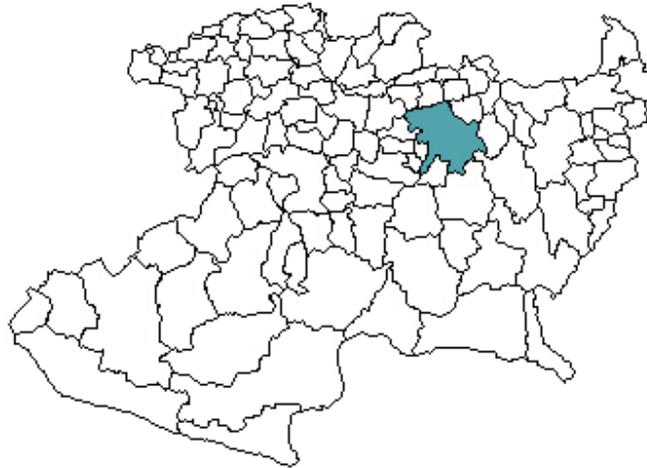
En América, durante la época colonial, la Cal continuó usándose para levantar importantes construcciones, mismas que, hasta el día de hoy, han resistido con firmeza los embates del tiempo y la fuerza de la naturaleza [ANFACAL, 2009].

En nuestro país el uso de la Cal como cementante tiene sus orígenes en la época prehispánica, ya que los vestigios encontrados revelan que la mayoría de las ciudades fueron construidas con piedras de distinta morfología, es decir, mamposterías juntadas con mortero de cal [ANFACAL, 2009].

Cuando se habla de Patrimonio Cultural en nuestro país, se debe entender como el riquísimo acervo que hemos heredado los mexicanos de hoy, el cual es producto del devenir histórico de los pueblos que, en distintas épocas y de manera sucesiva se han asentado y desarrollado en nuestro territorio. Dentro de este marco, en nuestro país, se ha utilizado la Cal para la restauración de piezas arqueológicas. Actualmente los sistemas constructivos no consideran la cal y la gama de productos disponibles es cada día mayor, y a la fecha, no hay un material sustituto de la Cal que brinde tantos beneficios a un costo tan accesible [ANFACAL, 2009].

La cal es uno de los pilares que se mantienen en la industria química mundial por su versatilidad, tradicionalmente el uso de la cal en nuestro país se ha orientado a la construcción, los edificios coloniales fueron construidos con cal viva apagada en obra, actualmente todas las restauraciones de estos monumentos se realizan con el mismo material, caso concreto el del Acueducto de Morelia, el cual se restauró con Cal apagada en obra, pruebas de ingeniería certifican que cuando se utiliza en la edificación de muros, lozas y aplanados, estos fraguan lentamente lo cual evita el agrietamiento y con el tiempo aumenta su resistencia y estabilidad, además de proporcionarle gran impermeabilidad [www.calmuro.com.mx, 2009].

La ciudad de Morelia, se localiza en la zona centro-norte del Estado de Michoacán. Su cabecera es la capital del Estado. Se ubica en las coordenadas 19°42' de latitud norte y 101°11.4' de longitud oeste, a una altura de 1,951 metros sobre el nivel del mar. Limita al norte con Tarímbaro, Chucándiro y Huaniqueo; al este con Charo y Tzitzio; al sur con Villa Madero y Acuitzio; y al oeste con Lagunillas, Coeneo, Tzintzuntzán y Quiroga. Su distancia a la capital de la República es de 315 km [INEGI, 2008].



**Figura 1. Localización de la Ciudad de Morelia Michoacán.**

Su superficie es de 1,199.02 km<sup>2</sup> y representa el 2.03 por ciento del total del Estado [INEGI, 2008].

Por localizarse cerca de poblaciones con tradiciones y próxima a escenarios naturales, como Los Azufres y los lagos de Pátzcuaro y de Coituzo, entre otros sitios, y por haberse fundado la ciudad de Morelia el 18 de mayo de 1541, cuenta con un significativo acervo arquitectónico, cultural e histórico. En la cabecera del municipio se desarrolla una importante actividad turística. Morelia se caracteriza por la suntuosidad de sus monumentos, siendo la mayoría de tipo colonial, entre los que destacan [INEGI, 2008]:

- La Catedral, construida en 1744.
- El convento de San Francisco, iniciado en 1513.
- El convento de San Agustín, fundado en 1550.
- El Colegio y templo de la Compañía de Jesús, iniciado en 1580, conocido como Palacio Clavijero.
- El convento del Carmen, de 1597.
- El convento de Santa Catarina, que data de finales del siglo XVII y principios del XVIII.
- El convento de la Merced, de 1613.
- El colegio de Santa Rosa María, cuya fundación es de 1743.
- El palacio del Poder Ejecutivo, su construcción inició en 1734 y se terminó en 1770.
- El Palacio del Poder Legislativo y Palacio del Supremo Tribunal de Justicia, del siglo XVIII.
- El Colegio Primitivo y Nacional de San Nicolás de Hidalgo, del siglo XVI, reconstruido en 1882.
- El Museo Michoacano, del siglo XVIII.
- La Casa natal de Morelos, sobre la calle Corregidora, utilizada como Museo, biblioteca y para eventos culturales.

- La casa propiedad de Morelos, sobre la calle Morelos Sur, usada como museo.
- El Acueducto, iniciada su construcción en 1787 y terminada en 1789, compuesto de 253 arcos y que abasteció a la ciudad aproximadamente hasta 1910.
- Otros edificios como la antigua Alhóndiga; la Casa de Don Mariano Michelena, el Museo del Estado, la Casa Correccional de Clérigos y la Casa Natal de Iturbide.

Dentro de la escultura, también cuenta con importantes monumentos como son:

- Las Tarascas.
- José María Morelos
- Lázaro Cárdenas
- Benito Juárez
- Miguel de Cervantes
- Vasco de Quiroga
- Melchor Ocampo.

Al ser Morelia una ciudad con un importante número de monumentos históricos, así como sitios y edificios considerados como patrimonio cultural, se hace necesaria la implementación de métodos y técnicas que permitan la conservación, restauración y preservación de cada uno de estos elementos.

## 1.2 MATERIALES PARA CONSTRUCCIÓN.

Los ingenieros manejan cotidianamente los materiales, con ellos diseñan y construyen, seleccionan y analizan sus fallas y prevén un funcionamiento adecuado de éstos [Askeland, 1987].

Actualmente, estamos rodeados de un gran número de edificios, monumentos y obras diseñadas por los profesionales de la industria de la construcción. Cada uno de estos elementos, tiene su procedimiento constructivo particular, que se ha venido desarrollando a través del tiempo, gracias a diversas técnicas y procedimientos que han tenido como fin el mejoramiento de las características físicas, químicas y estructurales dependiendo de la obra que se trate [Askeland, 1987].

Así pues, se tienen diversos materiales a nuestra disposición para efectuar infinidad de obras, dependiendo de las características de éstas se utilizará un determinado material.

Los materiales se clasifican [Askeland, 1987] según su uso en:

**Metales:** tienen como características generales una adecuada conductividad tanto térmica como eléctrica, relativamente alta resistencia mecánica, alta rigidez, ductilidad y resistencia al impacto. Son particularmente útiles en aplicaciones estructurales o de carga. Aunque ocasionalmente se utilizan en forma pura, se

prefiere normalmente el empleo de sus combinaciones, llamadas aleaciones, para mejorar ciertas propiedades o permitir una mejor combinación de las mismas.

**Cerámicos:** tienen escasa conductividad, tanto térmica como eléctrica y aunque pueden tener resistencia y dureza, son deficientes en ductilidad y resistencia al impacto. Son menos usados que los metales en aplicaciones estructurales. No obstante presentan en su mayoría una excelente resistencia a las altas temperaturas y a ciertas condiciones de corrosión. En este tipo de materiales se encuentran los ladrillos, el vidrio, la loza, los aislantes y los abrasivos.

**Polímeros:** se producen creando grandes estructuras moleculares a partir de moléculas orgánicas obtenidas del petróleo o productos agrícolas, en un proceso conocido como polimerización. Tienen baja conductividad eléctrica y térmica, escasa resistencia mecánica y no se recomiendan para aplicaciones en temperatura elevadas. Algunos polímeros, los termoplásticos, presentan excelente ductilidad y resistencia al impacto. Los polímeros son ligeros y con frecuencia cuentan con excelente resistencia a la corrosión. En este tipo de material se incluye el caucho o hule, los plásticos y muchos tipos de adhesivos.

**Materiales Compuestos:** están constituidos por dos o más materiales, que generan propiedades no obtenibles por sí solos. Con los compuestos se fabrican materiales ligeros, resistentes, dúctiles, resistentes a altas temperaturas, etc. Dentro de esta clasificación se encuentra la fibra de vidrio, el concreto y el mortero.

### Propiedades de los materiales.

Se puede considerar que las propiedades de los materiales son de dos tipos: mecánicas y físicas.

Las propiedades mecánicas determinan como responde un material al aplicársele una fuerza o esfuerzo. El esfuerzo se define como la fuerza dividida entre el área transversal sobre la cual actúa. Las propiedades mecánicas más comunes son la resistencia mecánica, la ductilidad y la rigidez del material [Askeland, 1987].

Las propiedades físicas dependen de la estructura, así como del procesamiento del material.

### 1.3 MORTERO

Un mortero es una pasta compuesta por agua, arena y un conglomerante. Eventualmente puede contener un aditivo para mejorar alguna de sus propiedades [Arcos, 1995].

Los morteros deben reunir una serie de características específicas según el uso al que se destine:

- En la obra como material de agarre.
- En revestimientos.
- La fabricación de prefabricados.

### 1.3.1 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MORTEROS [Fernández, 2004].

**Porosidad:** es la capacidad de retener el agua en sus intersticios o poros. Se calcula el porcentaje de porosidad en relación con el volumen total [Luna, 1976].

**Permeabilidad:** es la capacidad para permitir el paso de un líquido. Está determinada por el número de poros, tamaño y forma, así como por las interconexiones que haya entre ellos [Luna, 1976].

**Capacidad de retención de agua:** es la capacidad que tiene el mortero de evitar la pérdida de agua necesaria para su fraguado.

**Resistencia Mecánica:** Es la capacidad del mortero para soportar las diferentes sollicitaciones de esfuerzos (compresión, tensión, flexión, cortante, etc.).

**Trabajabilidad o consistencia:** Se puede definir como el grado de plasticidad adecuado para su aplicación. Para que un mortero sea trabajable debe tener una adecuada consistencia, que permita una buena adherencia y también una cierta capacidad para retener agua. La consistencia de un mortero puede ser seca, plástica o fluida.

De forma general [Fernández, 2004] un mortero es de buena calidad cuando cumple con lo siguiente:

- Buena consistencia.
- Capacidad de retención de agua.
- Buena adherencia.
- Soporte para ciertos estados de carga en estado fresco, sin que sufra alteraciones.
- Resistencia a la abrasión.
- Su grado de retracción no debe ser excesivo, ya que en ese caso se producirían fisuras o grietas.

### 1.3.2 CLASIFICACIÓN DE LOS MORTEROS

Según su la **relación de conglomerante y material pétreo** [Arcos, 1995] se pueden clasificar en:

**Mortero normal:** Se compone de una parte de conglomerante por cada tres de arena. De manera que el conglomerante llene los vacíos existentes en la arena.

**Mortero Magro:** El volumen de conglomerante es inferior a los vacíos de volumen de la arena empleada.

**Mortero Graso:** tiene un volumen de conglomerante mayor al de los vacíos de arena.

En función del **tipo de conglomerante** [Fernández, 2004]:

**Mortero de Yeso.**

**Mortero de Cal:** es aquel que está fabricado con cal, arena y agua. La cal puede ser aérea o hidráulica. Este tipo de morteros no se caracterizan por su gran dureza a corto plazo, sino por su plasticidad, color, y trabajabilidad en la aplicación.

**Mortero de Cemento.**

**Morteros mixtos o Terciados:** formados por dos conglomerantes o más.

**Morteros de alta resistencia inicial:** formados por cementos aluminosos y áridos refractarios.

Otra clasificación de los morteros [Venuat, 1972]:

**Morteros Ordinarios:** constituidos por el conglomerante hidráulico, arena y agua. Reciben ciertos aditivos dependiendo el uso: un hidrófugo en el caso de impermeabilización, anticongelantes, retardadores o aceleradores de fraguado.

**Morteros activados:** en los cuales cambian sus características de acuerdo a la vía de activación que puede ser mecánica, química o electromecánica. La activación por vía mecánica, se hace a base de aparatos especiales como amasadoras de alta turbulencia, mediante las cuales los granos son descortezados y defloculados y se obtiene un mortero coloidal con fuerte cohesión y muy plástico. La activación por vía química debido a algún aditivo como un fluidificante o acelerador de fraguado, entre otros. La vía electromecánica se presenta gracias a un enérgico amasado y a la vez, la adición de un aditivo.

En función del **tipo de Aditivo** [Fernández, 2004]:

**Morteros Hidrófugos:** también conocidos como impermeabilizantes, ya que impiden el paso del agua a través de la masa.

**Morteros Coloreados:** para dar color en usos particulares.

**Morteros de cola:** se utilizan resinas orgánicas como aditivo.

**Morteros monocapa:** se utilizan aditivos impermeabilizantes. Son impermeables y transpirables; es decir, impermeables al agua, pero no al vapor de agua. Normalmente se utilizan en el revestimiento de edificios y su aplicación debe ser de dos capas aplicadas en intervalos cortos de tiempo.

## 1.4 CONGLOMERANTES

Los conglomerantes son los materiales encargados del proceso de fraguado y endurecimiento de la mezcla. Una vez amasados, sufren un proceso de consolidación de naturaleza química, siendo capaces de unir partículas y dar cohesión al conjunto, es decir, da lugar al fraguado [Fernández, 2004].

Existen dos tipos de conglomerantes [Fernández, 2004]:

**Conglomerantes Aéreos:** una vez amasados con agua, fraguan y endurecen en el aire. Se obtienen morteros y pastas no resistentes al agua. Y dentro de éstos se encuentran el yeso y la cal aérea entre otros.

**Conglomerantes hidráulicos:** una vez amasados con agua, fraguan y endurecen tanto en el agua como en el aire. Se obtienen morteros y pastas resistentes al agua. Y dentro de éstos se encuentran el cemento y la cal hidráulica entre otros.

### 1.4.1 CAL.

La cal se define como el producto que se obtiene calcinado de la piedra caliza por debajo de la temperatura de descomposición del óxido de calcio. En ese estado se denomina cal viva ( $\text{CaO}$ ) y si se apaga sometiéndola al tratamiento de agua, se le llama cal apagada [NMX-C-003-1996].

La Cal es un producto químico básico que resulta de la calcinación de piedra caliza ( $\text{CO}_3\text{Ca}$  Carbonato de Calcio), proceso del que se obtiene la Cal viva ( $\text{CaO}$  Óxido de calcio), la cual después de apagarse con agua se convierte en cal hidratada ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$  hidróxido de calcio) y ésta se puede utilizar en innumerables aplicaciones de diversas áreas: industria, construcción, agricultura, rellenos sanitarios, tratamiento de aguas y lodos, alimentación, y muchas otras [ANFACAL, 2009].

Si se somete por procedimientos adecuados una piedra caliza pura a la acción de una temperatura entre  $880\text{-}900^\circ\text{C}$ , se provoca una reacción endotérmica [Sandoval, 1985]; este procedimiento es la calcinación y encierra tres operaciones:

- La piedra caliza pierde su agua de cantera entre 120 y 150°C.
- Se provoca en la caliza una disociación en óxido de calcio y bióxido de carbono entre 880 y 900°C.
- El bióxido de carbono en forma de gas se pierde en la atmósfera, quedando como producto aprovechable el óxido de calcio, comercialmente conocido como cal viva.

La piedra caliza es una roca de origen sedimentario, que se forma a partir de material precipitado por la acción química y orgánica sobre las aguas de escurrimiento lacustre, zonas marinas, cavernas. La roca caliza tiene un contenido de más del 50% de carbonato de calcio [Pérez, 2008].

El carbonato de calcio ( $\text{CO}_3\text{Ca}$ ) abunda en la naturaleza, presentándose asociado a distintos componentes, por lo tanto con varios grados de pureza [ANFACAL, 2009]:

- **Calcita y aragonita:** son variedades muy puras, incoloras y de brillo vítreo. Sus cristales, a veces observables a simple vista, tienen formas poliédricas.
- En los **mármoles**, los cristales de calcita son de tamaño submicroscópico. De atractivas coloraciones y adquieren intenso brillo cuando son pulidos.
- Las **piedras calizas** son semejantes a los mármoles pero el contenido de carbonato de calcio es menor. En la dolomita, el carbonato de calcio ( $\text{CO}_3\text{Ca}$ ) es acompañado por otro carbonato, el carbonato de magnesio ( $\text{CO}_3\text{Mg}$ ). En las calizas arcillosas hay hasta un 40% de arcillas, que confieren un aspecto terroso. Otras impurezas son la arena y los óxidos de hierro.

La cal puede tener diferentes denominaciones:

**CAL VIVA:** Es el resultado de la calcinación del carbonato de calcio ( $\text{CO}_3\text{Ca}$ ) a más de 1.000 °C, ya que éste se descompone dando dióxido de carbono y óxido de calcio o Cal viva [ANFACAL, 2009].

**CAL HIDRATADA:** Se conoce con el nombre comercial de cal hidratada a la especie química de hidróxido de calcio, la cual es una base fuerte formada por el metal calcio unido a dos grupos hidróxidos [NMX-C-003-1996]. Los albañiles, cuando vierten agua sobre Cal viva, dicen que la "apagan". Cal apagada es el nombre vulgar del hidróxido de calcio. El apagado es exotérmico; es decir, que en este proceso se desprende gran cantidad de calor que evapora parte del agua utilizada. La Cal "apagada" tiene un volumen 3 veces mayor que el de la Cal viva [ANFACAL, 2009].

**CAL GRASA:** si la cal primitiva contiene hasta un 5% de arcilla, la cal al calcinarse se denomina cal grasa [Sandoval, 1985].

**CAL MAGRA:** es aquella que contiene impurezas y contiene de 50 a 80% de hidróxido de calcio, se apaga lentamente y no es buena para la construcción [Sandoval, 1985].

Desde el punto de vista de su pureza, es decir, del contenido de óxido de calcio (CaO), las cales empleadas en la construcción pueden ser clasificadas del modo siguiente [ANFACAL, 2009]:

**CALES AÉREAS:** denominadas así porque endurecen al aire, debido a que la acción cementante se logra por carbonatación de la Cal mediante el CO<sub>2</sub> atmosférico. A su vez, las cales aéreas se dividen en:

- *Cal Dolomítica:* es el producto obtenido de la calcinación de rocas dolomíticas, de donde surge el óxido de calcio y de magnesio, que también es un óxido básico, pero no es recomendable para construcción porque se apaga muy lentamente con agua. Consecuentemente, si se revoca una pared con una mezcla de cal dolomítica, como sus granos se hidratan al cabo de mucho tiempo, la superficie se hincha y deterioran la superficie lisa.
- *Cal Cálctica ó Grasa:* Es una Cal muy pura o con muy escaso contenido de arcillas y es altamente eficiente en la preparación de las mezclas aéreas. Las cales grasas fabricadas con piedras calizas de gran pureza, contienen 95% o más de óxido de calcio. Cuando se apagan dan una pasta blanca, untuosa y fuertemente adhesiva.

**CALES HIDRÁULICAS:** son llamadas así porque fraguan y endurecen con el agua. Contienen entre un 10% y 20% de arcillas y en ellas el efecto cementante se logra tanto por medio de la carbonatación de la Cal, como por el proceso de hidratación de los silicatos y aluminatos formados por reacción a bajas temperaturas entre la caliza y la arcilla presente, de modo similar a como ocurre con los componentes minerales del cemento portland. Cuando se trabaja con calizas moderadamente arcillosas, con 10 a 20% de arcillas, resultan cales hidráulicas, intermedias entre cales y cementos. Las mezclas preparadas con ellas ofrecen las siguientes ventajas con respecto a las cales comunes: apagan sin desprendimiento de calor, se emplean inmediatamente después del apagado, entre 3 y 5 días, a partir del apagado, adquieren la misma resistencia que la Cal viva a los 30 días y no son afectadas por la humedad, justificándose su uso en cimientos y piletas.

**CAL LÍMITE:** La que contiene un 25% de arcilla y es de propiedades similares a las cales hidráulicas.

**CEMENTOS ROMANOS:** Los que contienen entre el 27% y el 61% de arcillas, y de acuerdo con el contenido de arcillas se denominan como inferiores, ordinarios y superiores. En estos cementos el endurecimiento es provocado tanto por la hidratación de los silicatos y aluminatos presentes como por reacción entre la Cal

presente y las arcillas activadas térmicamente y que no se han combinado con la Cal. También se llama cemento romano a las mezclas de Cal con puzolanas.

### La cal aérea y su uso.

La *cal aérea* tiene capacidad bioclimática y es capaz de conservarse en perfectas condiciones durante siglos, ya que posee poros que dejan transpirar las paredes y al mismo tiempo la impermeabilizan. También el núcleo que conserva, regula la temperatura del interior de una casa gracias al efecto de "respiración" de la casa a través suyo [es.wikipedia.org, 2009].

En la antigüedad, cuando se comenzaba la construcción de algún monumento (catedrales, palacios, etc.), se preparaban las balsas de cal, ya que era el último elemento que se usaba en grandes cantidades y como la construcción era muy lenta, en algunos casos duraba más de un siglo, la cal iba madurando para cuando fuera necesaria. Los antiguos caleros decían que la cal ideal era la que llevaba al menos treinta años en reposo y la denominaban "chica" mientras que a la cal de entre veinte y treinta años la denominaban "chico" [es.wikipedia.org, 2009].

Una vez que la cal se utiliza, empieza a cristalizar y a carbonatarse, desde la superficie hacia dentro, conservando un núcleo húmedo que es el que le confiere sus propiedades y elasticidad, gracias a la cual tiene un comportamiento mecánico mejor que un cemento portland, tanto para revocos exteriores como interiores, así como para morteros y otros usos. Al cabo de cientos de años, la cal *apagada*, después de carbonatarse completamente, retorna a su estado original en la cantera, que es el de roca caliza [es.wikipedia.org, 2009].

Otro uso de la cal aérea es en "lechada" para pintar las paredes y en algunos casos los techos con una brocha gorda. Esta pintura tiene, como los enfoscados, revocos, estucos, etc., de cal aérea apagada, un comportamiento bioclimático que hace que un edificio sea fresco en verano y cálido en invierno. La Cal puede convertirse en una pintura para muros interiores y exteriores, ofreciendo un gran rendimiento ya que con un saco de 25 kg, se pueden pintar 135 metros de superficie [ANFACAL, 2009].

### La cal hidráulica.

La cal hidráulica fue creada en Francia en 1821 ya que en este país las canteras de cal, al igual que en las de Bélgica y Alemania, daban una roca de pésima calidad con muchos silicatos en comparación a las canteras de países como España e Italia. Básicamente la cal hidráulica se comporta en la construcción como un cemento portland blanco pero con peores resultados [es.wikipedia.org, 2009].

Dentro de las cales hidráulicas existen las *cales hidráulicas naturales*, son naturales ya que no tienen ningún tipo de aditivo, como los cementos y poseen mucha más resistencia que una cal aérea, las cales aéreas para poder usarse en

construcción deberá estar siempre mezclada con algún tipo de aditivo llamados puzolánicos (cemento, escoria, etc.) para obtener resistencia; se pueden utilizar en rehabilitación de edificios antiguos como en Bioconstrucción ya que no contiene ningún tipo de Sulfato, Aluminatos, Sales, etc., y que pueden dañar tanto el edificio a rehabilitar o a construir. La resistencia de este tipo de cales viene dada por la combinación de sílice que se da durante el proceso de cocción de la cal, mientras que en las *cales hidráulicas no naturales* consiguen su resistencia por adición de elementos puzolánicos durante el proceso de fraguado [es.wikipedia.org, 2009].

PROCESO DE OBTENCIÓN DE LA CAL.

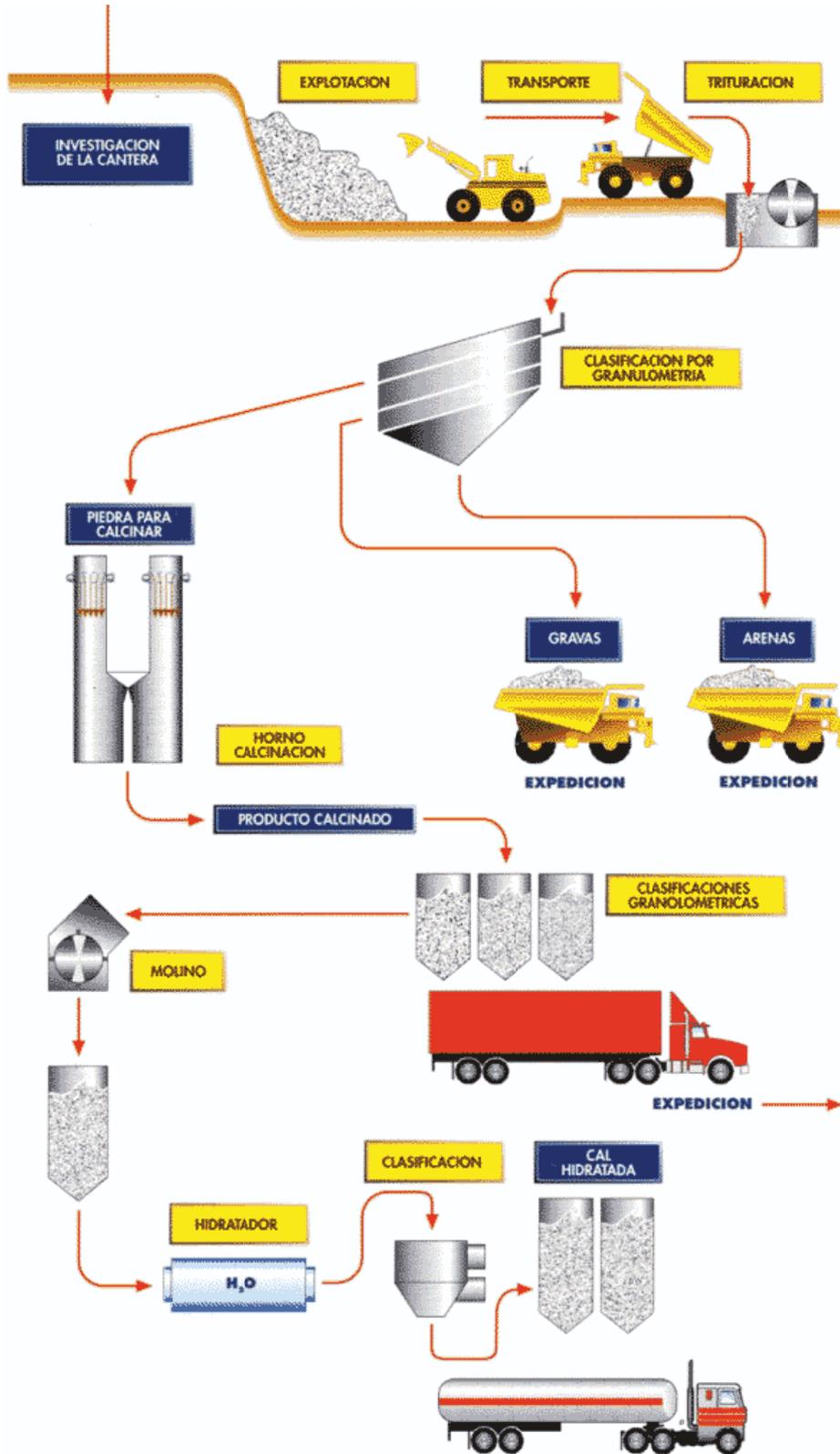


Figura 2. Proceso de obtención de la cal [ANFACAL, 2009].

El procedimiento mediante el cual se obtiene la Cal consiste en la extracción, la trituración donde se pasa la piedra caliza a la quebradora. Ya que la roca ha sido triturada se somete a cribado con el objetivo de seleccionar la caliza de forma que sea posible llevar a los hornos roca de un mismo tamaño. La calcinación es el proceso directo, de la caliza triturada, a temperaturas superiores a  $1000^{\circ}\text{C}$ . En esta etapa, las rocas pierden bióxido de carbono lo cual da origen al óxido de calcio o Cal viva.

Para obtener de este proceso el resultado deseado, es importante que el tamaño de la roca sometida a calcinación sea homogéneo, de tal forma que existan espacios entre las rocas que permitan el libre paso del fuego y la calcinación sea uniforme.

La roca ya calcinada continúa a un proceso de enfriamiento. Ya que tenemos la Cal viva, ésta pasa a un proceso de trituración y pulverización, con el objeto de reducir su tamaño y así obtener Cal viva para diferentes mercados, el polvo se separa para que sea enviado al proceso de hidratación.

La hidratación consiste en agregar agua a la Cal viva para obtener la Cal hidratada. A la Cal viva dolomítica y alta en calcio se le agrega agua para su hidratación y posterior paso a un separador de residuos para obtener Cal hidratada normal dolomítica y alta en calcio, también se puede pasar por un hidratador a presión.

El último proceso es el envase y embarque necesario para que la Cal hidratada pueda ser comercializada en sacos o a granel.

El ciclo de la cal se representa a continuación en forma gráfica:

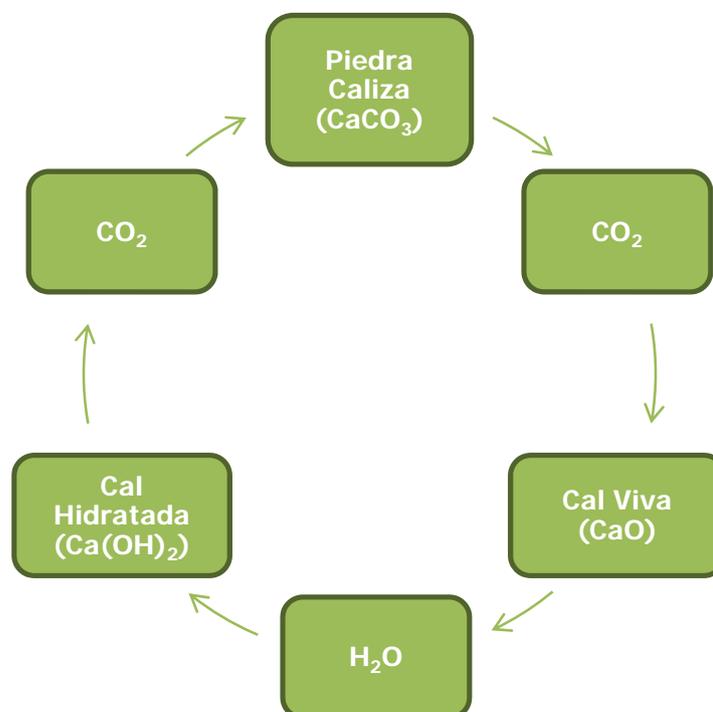


Figura. 3. Ciclo de la cal [Pérez, 2008].

## 1.5 ÁRIDOS.

Los áridos o material pétreo, son productos granulares finos procedentes de yacimientos naturales (canteras ó minas, ríos, dunas) o productos de trituración. No deberá contener impurezas, como materia orgánica, mica, yesos, feldespatos, etc., en cantidad superior al 2% [Arcos, 1995].

La función principal de los áridos es la de proporcionar un armazón al conglomerante, así como también proporcionar una estabilidad volumétrica, compensando la retracción del conglomerante en el proceso de endurecimiento. Además, reduce el costo, puesto que se reduce la cantidad de conglomerante que es más caro [Fernández, 2004].

Los áridos se pueden clasificar atendiendo a los siguientes criterios:

- **Por su tamaño [ASTM]:**

Grava { Tiene un diámetro de grano mayor de 4mm. Se utiliza en la elaboración de concretos. Se considera como tal, el material que es mayor a la malla No. 4 y hasta 2 pulgadas.

Arena { Tiene un diámetro de grano menor a 4mm. Se utiliza para la elaboración de concreto y morteros. Se considera como tal, el material que pasa la malla No. 4, hasta la que se retiene en la malla No. 200.

- **Por su origen [Fernández, 2004]:**

Naturales { *Rodados*: fragmentos de roca que se encuentran en la naturaleza, por lo general con esquinas redondeadas.  
*Triturados*: producto de la trituración de grandes rocas que se rompen con mandíbulas mediante un impacto y un molino.

Artificiales { *Escorias*: son subproductos de algún proceso industrial, con características similares a las de los áridos.  
*Materiales ligeros*: como corcho granulado tratado, bolas de perlita, poliestireno, serrín de madera, vermiculita [Venuat, 1972].

- **Por la composición Mineralógica [Fernández, 2004]:**

Áridos duros, resistentes { Silicios, calizos, graníticos y basálticos. En general son los más apropiados para la elaboración de concreto y mortero.

Áridos blandos, frágiles { Pizarrosos o arcillosos. En la construcción no son de interés.

- **Geológicamente [Symes, 1995]:**

Ígneas { Intrusivas  
Extrusivas

Sedimentarias

Metamórficas

- **Por el Yacimiento [Fernández, 2004]:**

De río { Suelen ser resistentes y estables.

De mar y playa { Generalmente en la industria de la construcción no interesan debido a la cantidad de sales.

De mina { Generalmente contienen demasiada arcilla.

### 1.5.1 Origen de los agregados.

Lo primero de que debemos ocuparnos, en las obras, es de la selección de una arena que sea adecuada para el mortero [Oliver, 2000]. Siendo el material pétreo uno de los elementos más importantes en la elaboración de los morteros y en general de todo el material relacionado con edificación, es importante conocer el origen y formación de dicho material pétreo.

Los agregados pétreos son las rocas, su origen depende de la zona y condiciones en que se forme. Las rocas son el conjunto o la combinación de uno o varios minerales. Algunas como las cuarcitas y los mármoles, se componen de una sola variedad de mineral. Los minerales se definen como cuerpos sólidos naturales inorgánicos, con una composición química propia y una disposición de los átomos estrictamente ordenada [Symes, 1995].

El proceso de formación de las rocas comienza cuando el magma caliente sale al exterior de la Tierra a través de la erupción de un volcán, se enfría y solidifica dando lugar a las rocas **ígneas**. Posteriormente, la erosión del viento y agua separa trozos de estas rocas ígneas, que son transportados y depositados en otros lugares, como lagos y mares, formando sedimentos que se compactan con el paso del tiempo formando así las rocas **sedimentarias**. Cuando estas rocas sedimentarias se encuentran a gran profundidad, el magma las cubre, elevando su temperatura, y las rocas se transforman en **rocas metamórficas**. Algunas rocas metamórficas se van enterrando hasta lugares donde aumenta mucho la

temperatura y la presión. Así pueden fundirse y transformarse de nuevo en rocas ígneas. De esta manera se cierra el ciclo.

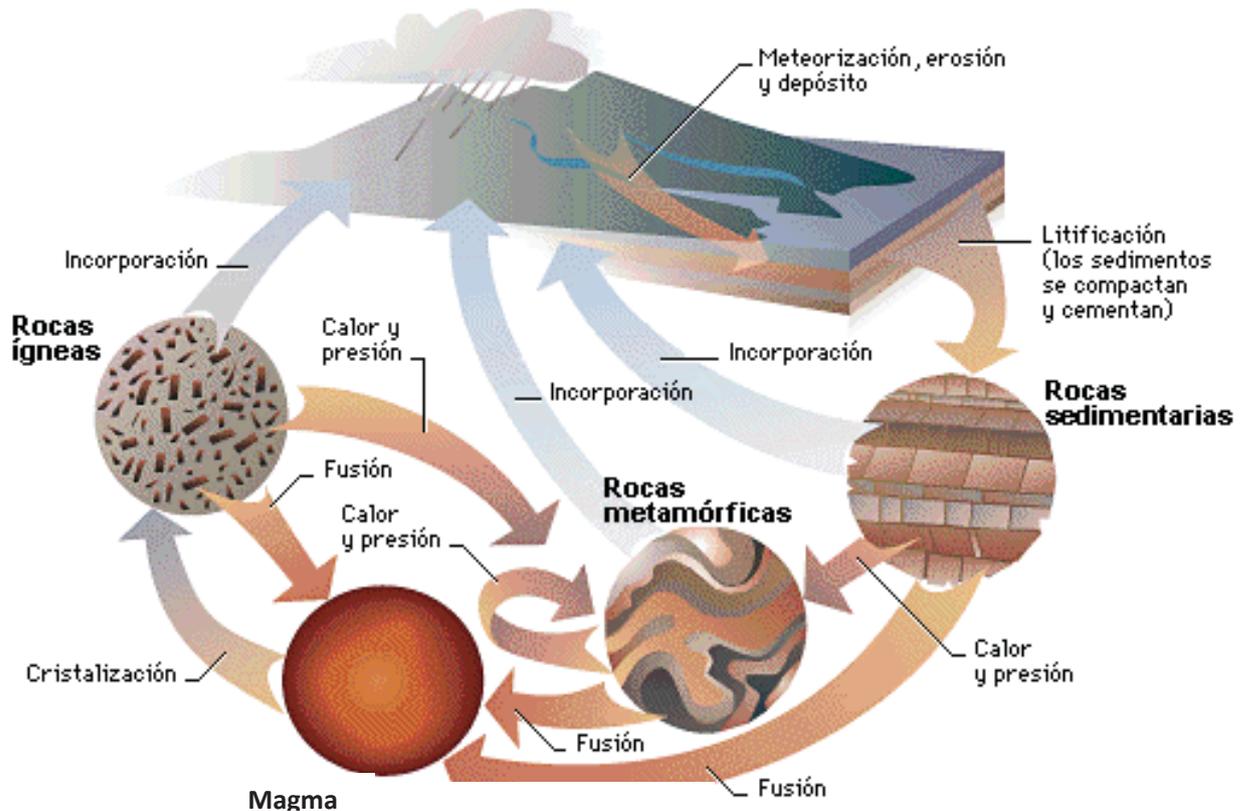


Figura 4. Ciclo de las rocas [ENCARTA, 2008].

Muchos de los agregados son obtenidos de la trituración de piedras o rocas. Pero dependiendo de sus características, desde el punto de vista geológico [Somayaji, 1995], son divididas en tres categorías: ígneas, sedimentarias y metamórficas.

**Rocas Ígneas:** representan el 95% de la corteza terrestre. Son formadas por consolidación del magma producto del interior de la tierra. Ejemplo de este tipo de rocas son el granito y el basalto. Las rocas de color oscuro son formadas por la solidificación cerca de la superficie terrestre y compuestas de cristales microscópicos. Las rocas ígneas se clasifican según la textura (grano grueso, grano fino o vítrea) y su composición mineralógica [Somayaji, 1995].

Existen dos tipos de magma: los magmas intrusivos, cuyas rocas se solidifican en el interior de la corteza terrestre y pueden verse en la superficie solamente cuando las rocas suprayacentes han sido desgastadas y eliminadas por la erosión, y los magmas extrusivos que proceden de la consolidación de la lava en la superficie terrestre [Symes, 1995].

El granito, es la más común de todas las rocas ígneas intrusivas, está formado por feldespato, cuarzo y mica (figura 5). El tamaño grande de cada mineral se explica por el lento enfriamiento del magma a profundidad. Generalmente el color de los granitos varía del gris al rojo según la proporción de los distintos componentes minerales [Symes, 1995].



Figura 5. Roca ígnea intrusiva: Granito [ENCARTA, 2008].

**Rocas Sedimentarias:** son formadas por la solidificación de materiales transportados y depositados, principalmente por agua o hielo. Cubren cerca del 75% en la superficie terrestre. Pueden ser de origen detrítico (formadas a base de partículas que fueron cementadas juntas) o químico [Somayaji, 1995]. Ejemplo de rocas sedimentarias son la arenisca, limolita, caliza, entre otras. La arenisca es una roca sedimentaria constituida, predominantemente, por granos de cuarzo. Los granos pueden estar cementados por sílice, calcita u óxidos de hierro (figura 6).



Figura 6. Roca Sedimentaria: Arenisca [ENCARTA, 2008].

Muchas de las rocas sedimentarias se componen de restos de organismos fósiles. La caliza oolítica, está constituida por calcita que se deposita alrededor de los granos de arena [Symes, 1995].

**Rocas metamórficas:** son tipos de rocas que han sido formados por el cambio gradual en la estructura y características de rocas ígneas y sedimentarias a través de calor, agua, presión y otros agentes. Ejemplos de rocas metamórficas con estructura cristalina son gneis y mármol [Somayaji, 1995].

Estas rocas toman su nombre de las palabras griegas *meta* y *morfa*, que significan cambio de forma. Las rocas sepultadas, sometidas a elevadas temperaturas, son comprimidas o plegadas, dando lugar su recristalización a la formación de nuevos minerales [Symes, 1995].

Cuando la caliza es expuesta a altas temperaturas se transforma, crecen nuevos cristales de calcita y forman una roca compacta conocida como mármol.



Figura 7. Rocas Metamórficas: micasquito, cuarcita y mármol [ENCARTA, 2008].

### 1.5.2 PROPIEDADES DE LOS AGREGADOS.

Los principales tipos de agregados utilizados comúnmente en la elaboración de mezclas son la piedra triturada, arena y grava, debido a su bajo costo y también porque hay gran cantidad de bancos de material a los que tenemos fácil acceso.

Los usos de la arena y grava se muestran en la siguiente gráfica, donde puede observarse los distintos porcentajes dependiendo del uso que se le vaya a dar.

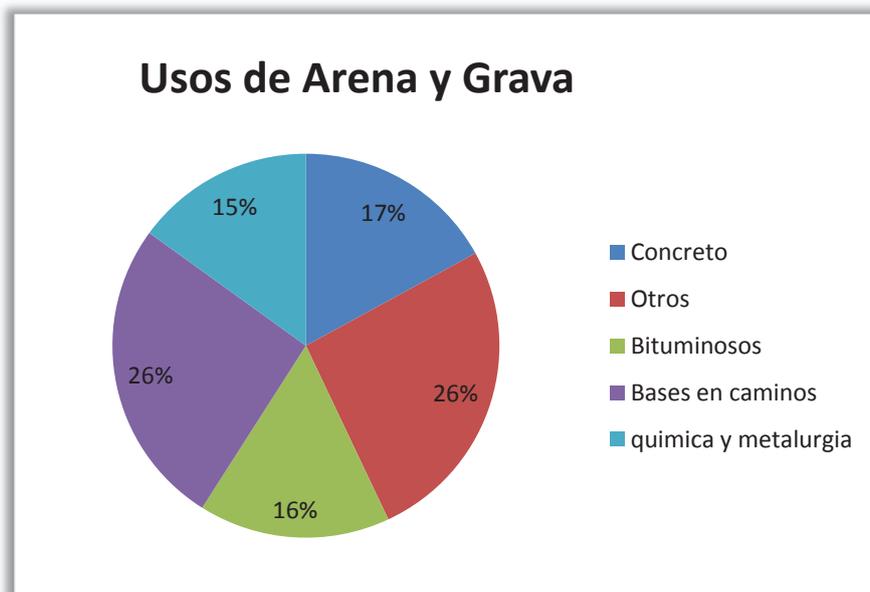


Figura 8. Usos de los agregados [Somayaji, 1995].

Los agregados pétreos, deben cumplir con ciertas características [Somayaji, 1995], como las que se mencionan a continuación:

**Absorción:** es la capacidad de retener agua. Depende directamente de la porosidad. Indica el volumen relativo de poros en relación al volumen total de la roca. Se cuantifica en porcentaje.

**Densidad:** es el peso por unidad de volumen de una roca y depende de la porosidad, tipo de minerales y estructura cristalina. Se cuantifica en  $\text{g/cm}^3$  o  $\text{g/ml}$ .

**Distribución Granulométrica:** se refiere a la proporción de agregados y su distribución en un rango especial de tamaños de partículas. Es una propiedad muy importante, ya que afecta severamente las características del concreto en el proporcionamiento de mezclado. Partículas con un mismo tamaño, pueden generar más vacíos que un agregado en el cual haya variedad de tamaños.

Hay agencias y organizaciones, como la American Society in Testing of Materials (ASTM) o el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación (ONNCCE), entre otras, que especifican límites en porcentajes de partículas que deben ser mayores o menores que una malla en particular. Una malla es un equipo con aberturas rectangulares, que se identifica por la abertura o por el número. La tabla 1, muestra la designación de la malla y abertura normal correspondiente a cada una:

TAMAÑOS DE MALLAS			
Designación de malla		Abertura Normal	
Pulgadas	mm	Pulgadas	mm
2	50	2	50
1 1/2	37.5	1.5	37.5
1	25	1	25
3/4	19	0.75	19
1/2	12.5	0.5	12.5
3/8	9.5	0.375	9.5
No. 4	4.75	0.187	4.75
No. 8	2.36	0.0937	2.36
No. 16	1.18	0.0469	1.18
No. 30	600 $\mu\text{m}$	0.0234	0.6
No. 50	300 $\mu\text{m}$	0.0117	0.3
No. 100	150 $\mu\text{m}$	0.0059	0.15
No. 200	75 $\mu\text{m}$	0.003	0.075

Tabla1. Tamaños de mallas [Somayaji, 1995].

**Módulo de Finura:** en relación a la representación gráfica de la distribución de tamaño de partículas, se calcula un valor llamado módulo de finura, un número

obtenido de la suma de los porcentajes acumulativos de las mallas y dividido entre 100.

El módulo de finura de los agregados está generalmente entre 2 y 4. En el caso de agregados finos, es una propiedad esencial para el diseño de mezclas de concreto.

## 1.6 AGUA.

El agua tiene un papel fundamental, sin ella no se desarrollan las reacciones químicas de los cementantes.

Le da consistencia, trabajabilidad o manejabilidad a la mezcla. Debe ser potable (sin desechos orgánicos, sales, sulfuros ni sulfatos), debe usarse con mesura, su exceso produce baja o mala resistencia y al escurrir el agua se lleva consigo el cementante [Fernández, 2004].



Figura 9. El agua [ENCARTA, 2008].

Como sustancia el agua es inolora, incolora e insabora. Como sustancia química es única, es un compuesto de gran estabilidad, solvente notable y poderosa fuente de energía química. Sus moléculas se adhieren unas a otras con más tenacidad que la de ciertos metales. Cuando la congelación la convierte en un sólido, se dilata en vez de contraerse, como ocurre con casi todas las demás sustancias, y el sólido, flota en el líquido que resulta más pesado. Es capaz de absorber e irradiar más calor que la mayoría de las sustancias comunes [Luna, 1976].

El agua está compuesta por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno ( $H_2O$ ), formando una molécula de resistencia sorprendente, se requiere demasiada energía para descomponer el agua [Luna, 1976].

El agua en estado líquido puede disolver muchas sustancias, como las sales minerales que necesitan las plantas y la mayoría de los organismos vivos; puede incluso disolver gases: el oxígeno que respiran los peces está disuelto en el agua del mar [ENCARTA, 2008].

El agua en estado sólido, es decir, hielo tiene una densidad de  $0,92 \text{ g/cm}^3$ , más baja que la del agua en estado líquido, igual a  $1 \text{ g/cm}^3$ . El hielo ocupa un volumen mayor que el agua líquida, para una misma cantidad o masa de ambos [ENCARTA, 2008]. El hielo flota, según las leyes de la física, no debería hacerlo, casi todas las sustancias sólidas, líquidas o gaseosas se reducen en volumen al descender la temperatura, a medida que se contraen se vuelven más densas; así pues, en forma líquida son más pesadas que en forma gaseosa, y en la sólida, más pesadas que como líquidos [Luna, 1976].

El agua obedece esta regla fielmente como gas, y como líquido, pues durante el 96% del camino hacia el punto de congelación, se contrae

ininterrumpidamente. Pero al llegar a los 4°C algo ocurre. A medida que prosigue el enfriamiento, el agua se dilata y se vuelve más ligera y al congelarse en un sólido a 0°C, se vuelve todavía más ligera, hasta aumentar aproximadamente un 9% de su volumen [Luna, 1976].

El agua líquida se transforma en gas a la temperatura de 100 grados centígrados que corresponde al punto de ebullición del agua. En estado gaseoso el agua está por todas partes, incluso en los desiertos. La evaporación y la condensación son procesos que forman un ciclo continuo, llamado *ciclo del agua*, que hace que esta se reparta por toda la biosfera terrestre [ENCARTA, 2008].

El agua puede considerarse el solvente químico universal, si se le da tiempo suficiente disolverá casi cualquier sustancia. Sin la propiedad solvente del agua, se interrumpiría el proceso de la nutrición, todos los organismos vivientes dependen del agua para disolver las sustancias de que se alimentan [Luna, 1976].

Dentro de la construcción el agua es parte fundamental para llevar a cabo los procedimientos constructivos, así como ayudar a completar los procesos de conformación y consolidación de los distintos materiales.

Entre las funciones que tiene el agua en el proceso de elaboración de mortero, se encuentran las siguientes [Fernández, 2004]:

- **Hidratar al conglomerante:** el agua se añade al conglomerante para que éste se disuelva en ella y se forme así la masa de mortero.
- **Facilitar el curado del mortero.**
- **Dar docilidad al mortero** (trabajabilidad): para poder trabajar el mortero, hay que añadirle la cantidad justa de agua. Todo depende de la relación agua cemento que se utilice. Aunque se puede calcular una cierta cantidad de agua teóricamente, físicamente la mezcla puede quedar trabajable con más o menos agua de la calculada y esto va depender de las condiciones con que se cuente, como por ejemplo el clima.

La agresividad de las aguas para la elaboración y curado del concreto y mortero, está en función de la ausencia de algunos compuestos en ellas o de la presencia de sustancias químicas perjudiciales disueltas o en suspensión en concentraciones que sobrepasan determinados límites.

Dependiendo de la acción agresiva del agua [NMX-C-122-ONNCCE-2004], se tiene la siguiente clasificación:

**Aguas Puras:** son aquellas cuyo PH es aproximadamente 7. En general son aguas que no contienen sales o si las contienen es cantidades mínimas. Son agresivas por su acción disolvente e hidrolizante sobre los compuestos cálcicos.

**Aguas Ácidas Naturales:** Son aquellas que contienen una gran cantidad de ácido carbónico libre, ácido nítrico y cuyo PH es inferior a 6. En general son producto de la lluvia que disuelve el dióxido de carbono. Su acción en la mezcla se debe a la presencia de gas carbónico libre (CO<sub>2</sub>) y/o ácidos húmicos que disuelven rápidamente los compuestos y agregados cálcicos.

**Aguas fuertemente Salinas:** tienen su origen en el alto poder disolvente de las aguas ácidas y de las puras al atravesar diferentes suelos. Cuando este tipo de aguas contienen fuerte concentración de sales, propician que otras muy agresivas se vuelvan más solubles antes de la saturación. Como aguas de mezclado su acción en la cal es que interrumpe las reacciones del fraguado y puede ejercer acción disolvente sobre los componentes cálcicos.

**Aguas alcalinas:** estas aguas provienen generalmente de los depósitos graníticos o porfiríticos en los que las aguas puras y las ácidas descomponen los feldespatos alcalinos como la albita y ortoclasa. Puede sufrirse un ataque corrosivo por este tipo de aguas, ya que los cationes alcalinos tienen una acción sobre los aluminatos cálcicos hidratados y sobre los iones de calcio.

**Aguas Sulfatadas:** algunas tienen su origen en el ataque de formaciones dolomíticas o con yeso con aguas puras o ácidas. Son consideradas las más agresivas, propician la formación de una sal fuertemente hidratada, conocida como sal de Candlot, que es un sulfato aluminato tricálcico bajo una forma pulverulenta y expansiva.

**Aguas Cloruradas:** se originan por la acción disolvente de las aguas puras o las ácidas que atraviesan yacimientos de sal gema o antiguos lechos marinos. En general se consideran agresivas puesto que la solubilidad de la cal y el yeso es mayor que en las aguas puras y el efecto se incrementa en aguas altamente cloradas que con la presencia de cloruros alcalinos favorecen la solubilidad de varias sales agresivas.

**Aguas Magnesianas:** provienen de terrenos dolomíticos que por acción del gas carbónico disuelto en el agua, los hacen solubles por la transformación de los carbonatos en bicarbonatos y éstos últimos al reaccionar con el sulfato de calcio forman el sulfato de magnesio. Las aguas magnesianas que contienen sulfato de magnesio son las más agresivas por la solubilidad de éste y su tendencia a fijar la cal formando hidróxido de magnesio y yeso insoluble. Cuando se encuentra disuelto en el agua de mezclado en fuertes dosis, su acción sobre la cal es la que interrumpe el fraguado.

**Agua de mar:** tienen una gran cantidad de sales disueltas (35000 ppm o más), en la cual predominan el cloruro de sodio, cloruro de magnesio y sulfato de calcio. la acción del agua de mar es muy compleja.

**Aguas Recicladas:** se consideran como tales las que se usan para el lavado interior de las revolvedoras de concreto y que después de un proceso incompleto de sedimentación se emplean en la fabricación de mezclas. Pueden ser agresivas si contienen sulfatos, cloruros y álcalis en concentraciones considerables. Por otra parte si tienen gran cantidad de sólidos en suspensión puede causar los defectos que provoca un exceso de finos en la mezcla.

**Aguas industriales:** las aguas residuales de las instalaciones industriales generalmente son perjudiciales, ya que contienen sulfatos, ácidos orgánicos e inorgánicos.

**Aguas Negras:** provienen de los desagües de las poblaciones. Dada la complejidad de las aguas negras no es recomendable su uso ya que sus efectos son imprevisibles, solamente podrían ser utilizadas aquellas que han sido tratadas adecuadamente y contengan sustancias perjudiciales dentro de los límites.

LÍMITES MÁXIMOS TOLERABLES DE SALES E IMPUREZAS		
Sales e impurezas	Cementos ricos en Calcio Límites en ppm.	Cementos Sulforesistentes Límites en ppm.
<b>Sólidos en suspensión</b>		
En aguas Naturales (limos y arcillas)	2000	2000
En Aguas Recicladas (finos de cemento y agregados)	50000	35000
Sulfato	3000	3500
Magnesio	100	150
Carbonatos	600	600
Dióxido decarbonatado disuelto	5	3
Álcalis totales	300	450
Total de impurezas en solución	3500	4000
Grasas o aceites	0	0
Materia orgánica	150	150
Valor de PH	No menor de 6	No menor de 6.5

Tabla 2. Límites permitidos en el agua de mezclado. [NMX-C-122-ONNCCE-2004]

## 1.7 LOS ADITIVOS.

Son sustancias que se añaden a la masa de mortero con objeto de modificar sus cualidades. Son materias que modifican ciertas características de la pasta pura del mortero o concreto, gracias a una acción química o físico-química [Venuat, 1972].

La cantidad de aditivo utilizado está alrededor del 5% [Venuat, 1972], generalmente por debajo de este porcentaje. Los tipos de aditivos más utilizados pueden clasificarse en los siguientes:

- **Plastificantes o fluidificantes:** Mejoran la trabajabilidad del mortero (la plasticidad).
- **Aceleradores y retardadores de fraguado y aceleradores de endurecido:** modifican los tiempos de fraguado y endurecido.
- **Colorantes:** dan color a la masa, pueden ser naturales o artificiales.

Los aditivos pueden clasificarse también de acuerdo a las modificaciones que aportan, como aditivos que modifican las propiedades físicas, las propiedades químicas o las propiedades físico-mecánicas.

### 1.7.1 BREVE RESEÑA DE LOS ADITIVOS.

En la época romana se utilizaron aditivos agregados al concreto de cal y puzolanas. Hay quienes suponen que los primeros aditivos fueron la sangre y la clara de huevo. Tiempo después, y con el fin de obtener fraguados más regulares se utilizó el yeso crudo o cloruro cálcico, que se agregaba al cemento al fabricarlo o al concreto a la hora de su preparación [Venuat, 1972].

Hacia 1895, se utilizaron los primeros aditivos hidrófugos en Alemania, practicaron adiciones de cal grasa con el fin de mejorar la plasticidad. En 1906, se hicieron ensayos con un gran número de productos finos, inertes o que se hinchaban, así como con adiciones de aceite de linaza y aceite de máquinas. En una publicación de 1926, citaba la acción de productos tales como: el alumbre, el jabón potásico, la caseína, las materias albuminosas, la caliza y la arcilla en polvo, ciertos cloruros, carbonatos, silicatos, sulfatos [Venuat, 1972].

Los morteros de cal con mucílago de nopal como aditivo, son utilizados en la conservación y restauración de monumentos históricos de la ciudad de Morelia, dado que conservan las características del mortero con que fueron construidos sus edificios. De la información que existe acerca de estos morteros, se menciona que al añadir mucílago de nopal a la pasta de cal, ayuda a que la piedra de cantera utilizada en los muros pueda transpirar a través del recubrimiento de mortero, sin que se corra. El INAH, recomienda que el mortero con mucílago de nopal que se utilice en los monumentos históricos para juntas de cantera y aplanados, debe ser elaborado con relación 1:3 y con la cantidad de mucílago necesaria para una buena consistencia [Camacho, 2001].

La bibliografía existente [Camacho, 2001, Pérez, 2008], informa resultados favorables en el uso del mucílago de nopal y esta investigación tiene como fin, definir las diferencias tanto físicas como mecánicas al utilizar ahora el nopal en polvo.

## 1.8 El Nopal.

Las cactáceas han sido motivo de atención en nuestro país desde tiempos remotos. La historia y el folclor registran la importancia que adquirieron entre las tribus prehispánicas, según se deduce de sus tradiciones, teogonías y códices [Bravo, 2002].

En la vida social, económica y religiosa de los nahuas, estas plantas desempeñaron un papel muy importante, a tal grado que el emblema de la gran Tenochtitlán ostentaba airesamente un nopal, símbolo que conserva el escudo del México actual. Las cactáceas intervinieron en sus prácticas religiosas y algunas fueron elevadas a categorías de Dioses. Fueron empleadas como remedios en la curación de enfermedades [Bravo, 2002].

Dentro de la nomenclatura usada para designarlas había dos grupos bien definidos: el de los *nochtli*, integrado por las especies de tallos articulados, discordes y aplanados, y el de los *comitl*, cuyo tallo se asemeja a las esferas. Los *nochtli*, llamados también *nopalli*, comprendían diversas especies, cuyos nombres se formaban añadiendo al radical *nochtli* uno o varios términos que precisaban sus cualidades. Por ejemplo, con el nombre de *nopalnocheztli* (*nopalli* se refiere a la opuntia, mientras que *nocheztli*, hace referencia a la cochinilla o a la sangre del propio nopal –de *nochtli*, *nopal* y *eztli*, sangre-) eran conocidos los nopales en que se cultivaba la cochinilla, insecto del que se extraía la grana, uno de los colorantes más apreciados para teñir telas, aún en nuestros días [Bravo, 2002].

La iconografía indígena nos ha legado numerosas representaciones de especies de opuntia. Una de las más interesantes es el *tenochtli* o tuna de piedra, que aparece representado en el emblema de la Gran Tenochtitlán, el nopal está representado por tres pencas, una central y dos laterales, todas previstas de espinas y coronadas por una flor. Otro jeroglífico, el *teonachtli* o tuna divina; es una opuntia que lleva en la base el símbolo del sol [Bravo, 2002].



Figura 10. Dibujo del código Florentino [Bravo, 2002].

En algunos códices también aparecen nopales representados en los nombres geográficos de México que tienen el prefijo *nochtli*, que sin duda fue impuesto a ciertos pueblos por haber sido regiones donde abundaban estas

plantas. En el código florentino, las opuntias determinan la formación de núcleos de población humana, pues distintas tribus errantes concurrían en la época de fructificación a las zonas habitadas por estas plantas, y acababan por fijar ahí su residencia [Bravo, 2002].

Así pues, el nopal ha venido formando parte de nuestra historia, y lo sigue haciendo al formar parte de nuestra alimentación y seguir como ícono en nuestro escudo Nacional.

En nuestro territorio el nopal que más se cultiva es el de tuna blanca o tuna piedra. En la región de los otomíes, para preparar una huerta de nopales, primero se acondiciona el suelo y al terminar de limpiar la tierra se hacen hoyos para meter las plantas. Éstas deben ir dentro de depresiones más grandes que se llenan de agua cuando llueve. No requieren ser sembradas profundamente, porque de hacerlo, no producen vástagos y se pudren. Las hojas o pencas que sirven de semillas son podadas de otra planta muchos días antes y las dejan enjutar. Si siembran una hoja recién cortada se pudre. Las hojas se extienden al sol por tres meses para secarlas bien. Los campesinos comienzan a sembrar y colocan las plantas el día de luna llena. Otros comienzan en la luna nueva, cada quien tiene sus creencias. Los que siembran en luna llena, dicen que el nopal dará tunas rápidamente. Los que lo hacen en luna nueva, creen que no dará fruto, que sólo producirá nuevas hojas [Salinas, 2002].

Antes de sembrar hay que observar como caen los rayos de luz a la tierra. Si caen verticalmente los plantadores colocan la planta recta en el hoyo. Se siembra de esta manera porque si no llueve inmediatamente, toda la fuerza del sol no le pegará a las hojas. Si el sol brilla intensamente sobre una nueva planta de nopal, ésta muere antes de echar raíces. El calor intenso del sol y la tierra seca la marchitan y se muere. Al llegar las lluvias estas plantas echan raíces y entonces pueden resistir el sol sin ayuda [Salinas, 2002].

En México las cactáceas destacan por su amplia representatividad a nivel genérico y específico, alcanzando mayor significancia en regiones áridas y semiáridas, las cuales están ampliamente representadas dentro del territorio nacional, llegando a ser junto con los agaves, las plantas más características del paisaje mexicano [Vázquez, 2004].

La familia cactácea comprende tres subfamilias de plantas perenes (es decir, que viven más de una estación): Pereskioideae, Cactoideae y Opuntioideae.

Existen géneros que pueden encontrarse en dos o más tipos de vegetación como es el caso de *Opuntia* y *Mammillaria*, aunque en su mayoría se encuentran en un solo ambiente vegetal. Existe una relación porcentual aproximada de los géneros de cactáceas presentes en México, en función de los principales tipos de vegetación: los matorrales xerófilos albergan aproximadamente un 34%, seguidos por los bosques tropicales subcaducifolios, caducifolios y espinosos con un 21% [Vázquez, 2004].

Se ha registrado a nivel internacional que las cactáceas incluyen cerca de 110 géneros y 1500 especies, cifras de las cuales México alcanza 70 géneros y unas 900 especies [Vázquez, 2004].

Aunque las cactáceas se pueden encontrar en cualquier lugar de la república mexicana, existen estados con mayor diversidad entre los cuales se pueden mencionar: Oaxaca, Puebla, Hidalgo, Querétaro, San Luis Potosí, Nuevo León y Coahuila.

Las cactáceas en México desempeñan un papel muy importante desde el punto de vista biológico, social y económico. Muchos de sus frutos y tallos son alimentos importantes en la dieta de los mexicanos, aunque también se usan como forraje, ornamento y fuente de obtención de sustancias químicas de interés médico y farmacológico; así mismo existen pruebas claras que apuntan al papel ecológico sobresaliente de muchas de las cactáceas en las zonas áridas y semiáridas del país [Vázquez, 2004].

### 1.8.1 CARACTERÍSTICAS DEL NOPAL.

Científicamente se conoce con el nombre de *Opuntia Streptacantha*, comúnmente lo conocemos como Nopal o tuna de castilla, o Xoconoxtle blanco. Esta considerado en la familia de la cactácea [Márquez, 1999].

*Características botánicas:* plantas de hasta 5m de altura, de tallo ramificado color verde opaco, tiene pencas aplanadas con espinas color amarillo. Sus flores son amarillas o naranjas de 7 a 10cm de ancho. Sus frutos son llamados tunas y son de color verde [Márquez, 1999].

El nopal se caracteriza por tener tallos planos comúnmente llamados pencas, cubiertos de pequeños agrupamientos de pelos rígidos llamados gloquidios y por lo general, también de espinas. Los más jóvenes presentan hojas con forma de escama. Los ejemplares viejos pierden las palas inferiores y aparece entonces un tallo leñoso que da a la planta aspecto de árbol. Las flores nacen en los bordes de las palas, dan lugar al fruto piriforme llamado tuna, comestible, de pulpa carnosa y dulce [redescolar.ilce.edu.mx, 2009].

Los nopales llegan a medir hasta 4m de altura y a tener un tronco leñoso, segregan una sustancia viscosa llamada mucílago o comúnmente "baba de nopal", cuya función es cicatrizar las heridas de la propia planta. El contenido nutricional de esta planta comprende minerales como calcio, hierro, aluminio, magnesio, sulfatos, fosfato, potasio, sílice, sodio, carbohidratos, componentes nitrogenados, además de vitaminas A, B1, B2 y C. Las semillas de la tuna contienen un alto contenido de sustancias grasas y proteicas. Una característica importante del nopal es su alto contenido de carbohidratos (glucosa), que agrupados en grandes cadenas forman el almidón, considerado también como aditivo en la elaboración de morteros, para retener agua de amasado y favorecer el fraguado [Camacho, 2001].

El hábitat del nopal es clima seco, semiseco y templado. Su crecimiento óptimo se da en zonas áridas y semiáridas, aunque puede desarrollarse en cualquier clima. El tipo de ecosistema donde habita generalmente es en la estepa y en el desierto, ya que son zonas de poca lluvia en las que a veces predominan las condiciones desérticas [redescolar.ilce.edu.mx, 2009].

En México el nopal se encuentra distribuido en casi todo el país, principalmente en las regiones áridas y semiáridas. No está en peligro de extinción, pero puede estarlo ya que algunos países se empiezan a interesar en él, por la gran cantidad de propiedades que se pueden extraer, como vitaminas y propiedades astringentes y antisépticas, para producir miel, vino, alcohol y confituras como el queso de tuna. Además las pencas de nopal no son solo un alimento delicioso, también sirven como forraje para el ganado y son medicinales [redescolar.ilce.edu.mx, 2009].

Además de su uso alimenticio y medicinal, las cactáceas han sido usadas con fines muy diversos entre los cuales se citan los siguientes [Camacho, 2001]:

- Para protección de suelos.
- Obtención de colorantes.
- Fuente de combustible.
- Fines artesanales.
- Material de construcción.
- Fuente de azúcar, alcohol y vinagre.
- Fuente de mucilagos, gomas y pectinas.
- Fuente de fibras y pulpas para la fabricación de papel y material aislante.

# CAPÍTULO DOS

## MATERIALES Y DISEÑO DE MEZCLAS.

### 2.1 CARACTERIZACIÓN DEL PÉTREO FINO.

La arena utilizada proviene del banco de Joyitas de la Ciudad de Morelia, Michoacán, México y es de origen volcánico.



Figura 11. Ubicación geográfica del banco de Joyitas.

La arena fue transportada por medio de camiones al laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”, de la Facultad de Ingeniería Civil de la UMSNH, donde se almacenó en un contenedor, del cual se extrajo una muestra representativa de material para comenzar los análisis correspondientes de la arena.

Primero se hizo un análisis granulométrico para determinar si la arena a utilizar era apta para morteros, es decir, que cumpliera con las especificaciones marcadas por la norma ASTM C 404-97, la cual maneja los siguientes parámetros:

Tamaño de Agregado en Arenas		
Malla		Arena Volcánica
Abertura	Designación	% que Pasa
4.75-mm	No. 4	100
2.36-mm	No. 8	95-100
1.18-mm	No. 16	70-100
600- $\mu$ m	No. 30	40-75
300- $\mu$ m	No.50	10-35
150- $\mu$ m	No. 100	2-15
75- $\mu$ m	No. 200	0-5

Tabla 3. Tamaño de arena para mortero (ASTM).

### 2.1.1 PRUEBA DE GRANULOMETRÍA (ASTM C 136-01).

La prueba de granulometría tiene como fin determinar cuál es la distribución de tamaños que contiene una muestra de material para poder ser utilizada en la elaboración de mezclas, en nuestro caso, mortero.

Para determinar la granulometría de una muestra de arena, se debe tener aproximadamente 50kg de material, el cual se revuelve por medio de palas para lograr una homogeneidad en los tamaños que tiene el material. Después se procede a cuartearlo (dividirlo en 4 partes), para tomar una muestra representativa de las dos esquinas opuestas. Como se requiere una muestra pequeña, el material obtenido por medio del cuarteo con palas, se pasa a través de un cuarteador de muestras.

Teniendo nuestra muestra representativa de arena, entre 400 y 500gr se hace pasar por una serie de mallas con ayuda del rot-taf, que es un equipo mecánico en el que se coloca la serie de mallas en orden decreciente, en la cual se vierte la arena y al encender el equipo, comienza a moverse de lado a lado y tamiza la muestra. Se deja durante un tiempo de 5 a 10 minutos tamizando y a continuación se separa cada una de las mallas y se pesa el retenido de material en cada malla. Con los datos de los pesos obtenidos, se hace el cálculo y la gráfica correspondiente. Los datos obtenidos se muestran en la tabla 4.

Malla	Peso Retenido (gr)	% Retenido	% Acumulado	%Que pasa
4	0	0	0	100
8	55.45	15.29	15.29	84.71
16	118.8	32.77	48.06	51.94
30	89.7	24.74	72.80	27.20
50	46.55	12.84	85.64	14.36
100	25.65	7.07	92.72	7.28
200	12.35	3.41	96.12	3.88
Charola	14.05	3.88	100.00	0.00
$\Sigma$ Material	362.55			

Tabla 4. Cálculo de la Granulometría inicial de la arena.

El peso retenido corresponde al material que se retiene en cada una de las diferentes mallas. El porcentaje retenido se determina en base al peso de la muestra:

$$\% \text{ Retenido} = \frac{\text{Peso Retenido en la malla}}{\text{Peso total de la muestra}} \times 100$$

El porcentaje acumulativo se determina de la siguiente forma:

$$\% \text{ Acumulativo} = \% \text{ Retenido en la malla} + \% \text{ acumulativo de la malla anterior}$$

Y finalmente el % que pasa cada una de las mallas es la diferencia entre 100 y los porcentajes Acumulativos en cada malla:

$$\% \text{ Que pasa} = 100 - \% \text{ acumulativo en la malla}$$

Como puede observarse en la tabla 3, la granulometría cumple con los porcentajes determinados de material solamente en las tres últimas mallas de acuerdo a las especificaciones de la tabla 2. En la figura 12 correspondiente a la gráfica de la granulometría inicial de la arena, puede observarse perfectamente que nuestra arena sale de los parámetros máximos y mínimos especificados.

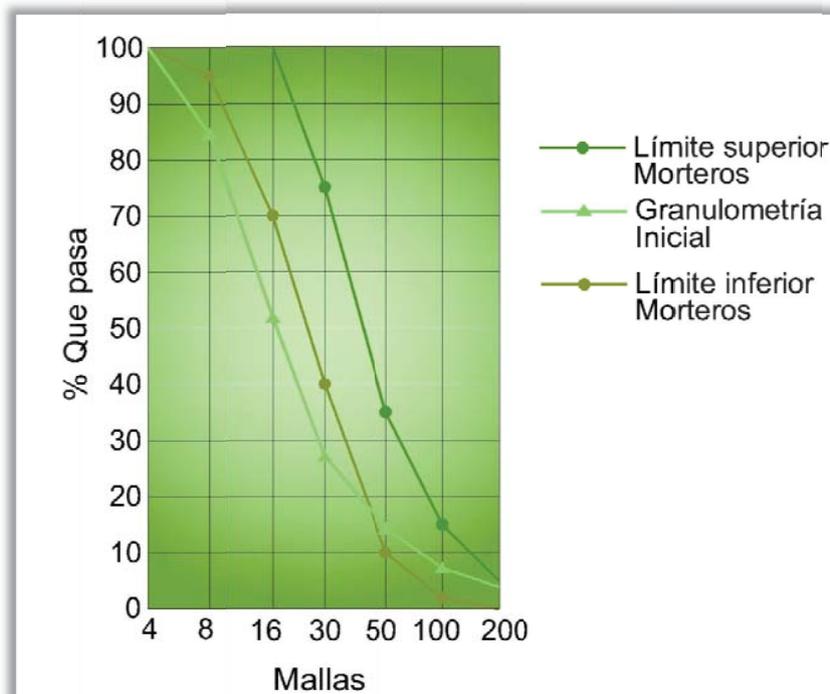


Figura 12. Gráfica Granulométrica inicial de la arena.

En base a que la granulometría no cumplía con las especificaciones en cuanto a tamaño, se diseñó la granulometría que contuviera los tamaños de partículas requeridos. Se estimó la cantidad de material a utilizar, siendo

aproximadamente 50 kg, se comenzó a tamizar por cada malla y se separó en costales de acuerdo a los retenidos de cada una.

Se hizo el cálculo de la cantidad de kilos necesarios en cada malla para que el material quedara dentro de los límites. Las cantidades en peso para lograr la granulometría de arena propuesta se muestran en la tabla 5 y la gráfica correspondiente a estos pesos, puede observarse en la figura 13.

Malla	Peso Retenido (Kg)	%Retenido	%Acumulado	%Que pasa
4	0	0	0	100
8	1.5	2.66	2.66	97.34
16	5.8	10.30	12.97	87.03
30	15	26.64	39.61	60.39
50	20	35.52	75.13	24.87
100	10	17.76	92.90	7.10
200	4	7.10	100.00	0.00
Charola	0	0	100	0
<b>Σ Material</b>	<b>56.3</b>			

Tabla 5. Cálculo de la Granulometría propuesta de arena.

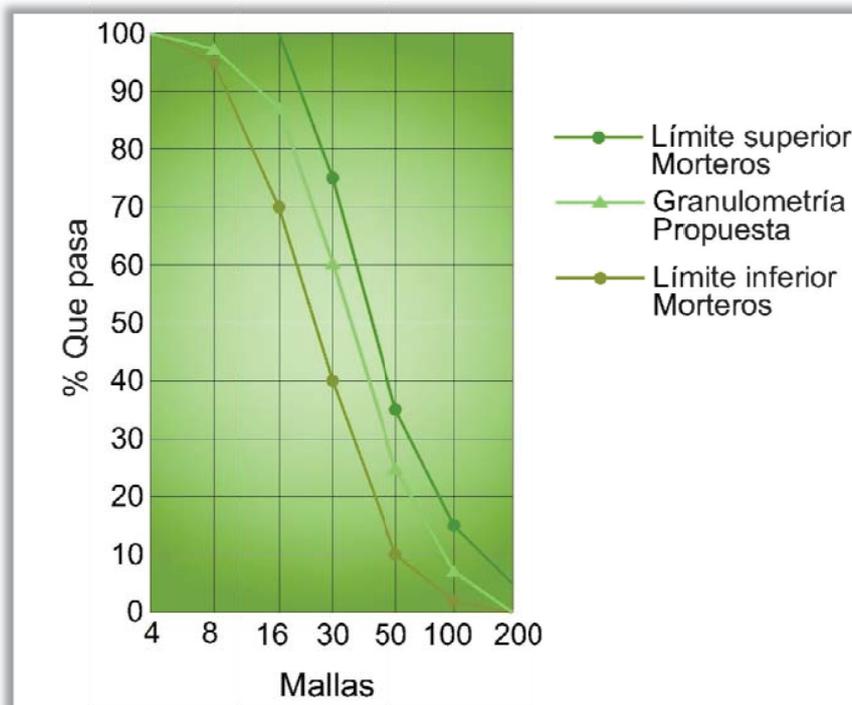


Figura 13. Gráfica Granulométrica propuesta de arena.

Cuando se completaron los pesos correspondientes para cada malla, se revolvió el material y se tomó una nueva muestra representativa a la cual se le hizo la prueba granulométrica para corroborar prácticamente que estaba dentro de

los límites. Teóricamente si separáramos el material y hacíamos una mezcla de acuerdo a los pesos determinados para cada malla en la granulometría propuesta, al volver a hacer la prueba de granulometría en laboratorio, ésta debería quedar dentro de los límites y efectivamente, así ocurrió. Los resultados se muestran en la tabla 6 y la figura 14.

Malla	Peso Retenido (gr)	%Retenido	%Acumulado	%Que pasa
4	0	0	0	100
8	8	1.8	1.8	98.2
16	35.5	7.9	9.7	90.3
30	109.8	24.5	34.2	65.8
50	136.7	30.5	64.7	35.3
100	95.2	21.2	85.9	14.1
200	40.8	9.1	95.0	5.0
Charola	22.4	5.00	100	0
$\Sigma$ Material	448.4			

Tabla 6. Cálculo definitivo de la Granulometría de arena.

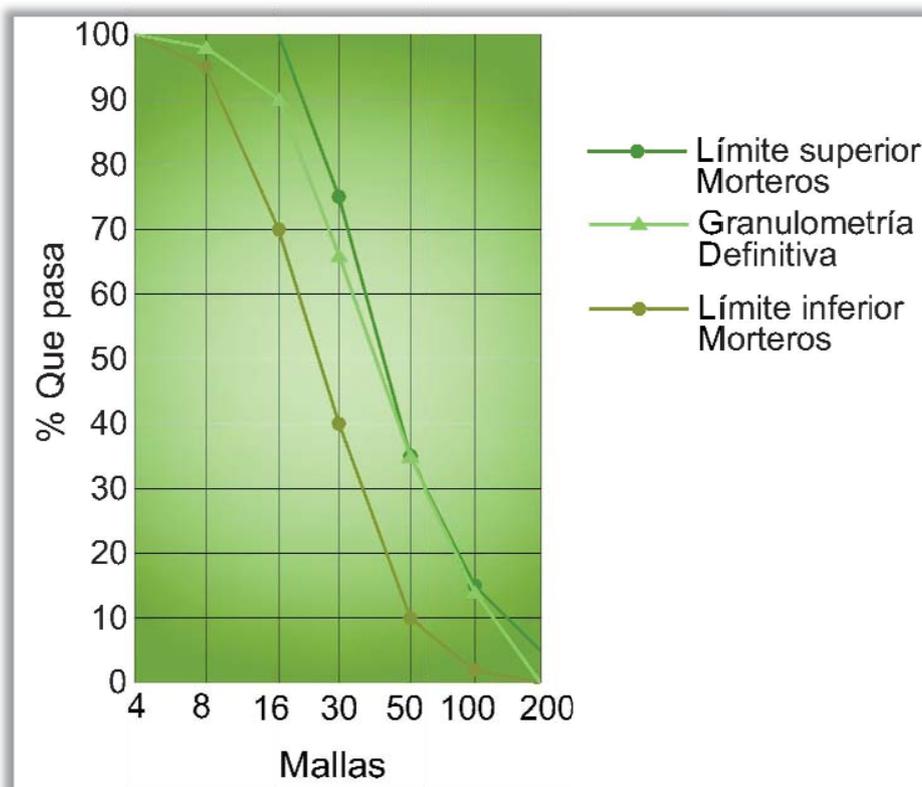


Figura 14. Gráfica Granulométrica definitiva de arena.

El módulo de finura, se define como la suma de los porcentos retenidos en cada una de las mallas, sin incluir la malla No. 200 ni la charola, por lo tanto el módulo de finura de nuestra arena fue el siguiente:

$$\text{Módulo de Finura} = \frac{1.8 + 9.7 + 34.2 + 64.7 + 85.9}{100} = 1.96$$

El módulo de finura debe estar contenido entre 1.6 y 2.5 para mortero.

### 2.1.2 PESO VOLUMÉTRICO SECO Y SUELTO (ASTM C29/C29M-97).

El peso volumétrico seco y suelto de un material tiene como finalidad determinar el peso por unidad de volumen cuando el material se acomoda de forma libre y natural.

Para determinarlo, se toma una muestra representativa de material y se revuelve y cuartea la arena. Se llena un recipiente de volumen conocido, dejando caer el material a una altura aproximada de 5cm a partir de la base del recipiente, cuando éste se llena, se enrasa y se toma su peso. A éste peso se resta el peso del recipiente (tara), para tener el peso neto y así determinar el Peso Volumétrico Seco y Suelto a partir de la siguiente fórmula:



Figura 15. Cuarteo de la arena

$$PVSS = \frac{\text{Peso neto (gr)}}{\text{Volumen (cm}^3\text{)}}$$

Donde:

Peso neto = peso del material – peso de la tara

Volumen = volumen del recipiente en que se pesa la muestra.

La prueba se realiza por duplicado o triplicado y se toma como resultado el promedio, el cual se muestra en la tabla 7.

PVSS	Muestra 1	Muestra 2
Peso Bruto (gr)	5580	5570
Tara (gr)	1890	1890
Peso Neto (gr)	3690	3680
Volumen (cm <sup>3</sup> )	2783	2783
Peso Volumétrico (gr/cm <sup>3</sup> )	1.33	1.32
PVSS Promedio	1.325 gr/cm <sup>3</sup>	

Tabla 7. PVSS de la arena.

Los resultados obtenidos usando la misma mezcla y procedimiento, no deben diferir en más de 1%.

### 2.1.3 PESO VOLUMÉTRICO SECO Y VARILLADO (ASTM C29/C29M-97).

El peso volumétrico seco y varillado de un material tiene como finalidad determinar el peso por unidad de volumen cuando el material tiene una cierta compactación.

El procedimiento es similar al PVSS, se toma una muestra representativa del material, después de haber revuelto y cuarteado la arena. Se llena un recipiente de volumen conocido, dejando caer el material a una altura aproximada de 5cm a partir de la base del recipiente, cuando se tiene el material a un tercio del volumen del recipiente, se distribuye en esta primera capa 25 golpes con ayuda de la varilla punta de bala, distribuidos en toda el área que va ocupando la arena en el molde, se sigue llenando el molde conservando la altura a la que se deja caer el material y a los dos tercios del volumen del recipiente, se vuelve a compactar el material como en la primera capa; finalmente se llena el recipiente hasta que el material sobrepase el borde superior y se vuelve a compactar con otros 25 golpes, se enrasa y se toma su peso. A éste peso se resta el peso del recipiente (tara), para tener el peso neto y así determinar el Peso Volumétrico Seco y Varillado a partir de la siguiente fórmula:

$$PVSV = \frac{\text{Peso neto (gr)}}{\text{Volumen (cm}^3\text{)}}$$

Donde:

Peso neto = peso del material – peso de la tara

Volumen = volumen del recipiente en que se pesa la muestra.

La prueba se realiza por duplicado o triplicado y se toma como resultado el promedio, el cual se muestra en la tabla 8.

PVSV	Muestra 1	Muestra 2
Peso Bruto (gr)	5900	5880
Tara (gr)	1890	1890
Peso Neto (gr)	4010	3990
Volumen (cm <sup>3</sup> )	2783	2783
Peso Volumétrico (gr/cm <sup>3</sup> )	1.44	1.43
PVSV Promedio	1.435 gr/cm <sup>3</sup>	

Tabla 8. PVSV de la arena.

En esta prueba debe tenerse cuidado al momento de llenar el recipiente, ya que en la compactación de cada una de las capas, la varilla no debe penetrar la

capa anterior, ya que de hacerlo no se tendría la compactación uniforme en cada una de las capas.

#### 2.1.4 DENSIDAD (ASTM C128-01).

La prueba de densidad consiste en determinar el volumen absoluto de las partículas de arena por unidad de volumen.

Para determinarla, se toma una muestra representativa de arena que pasa la malla No. 4 y se deja saturar inmersa en agua a temperatura ambiente durante 24 hrs. Transcurrido éste tiempo, se coloca en una parrilla para quitar el exceso de agua y se determina la humedad superficial de la arena.

Para determinar la humedad superficial de la arena se utiliza el molde troncocónico, durante el proceso de secado se hace una prueba con el molde al llenarlo en 3 capas con 12 golpes repartidos con un pisón en la primera capa, 8 golpes en la segunda y 5 golpes en la tercera, enseguida se retira el molde y si el material queda íntegro quiere decir que aún está demasiado húmedo el material. Este procedimiento se repite hasta que a la hora de retirar el molde, el material presente una segregación lateral de material alrededor de todo el molde, como se muestra en la siguiente imagen:



Figura 16. Prueba de humedad superficial de la arena.

De este material se toman dos muestras entre 200 y 300gr de arena, se anotan los pesos de cada una de las muestras y se coloca la arena dentro de un picnómetro para determinar el volumen desalojado de material (Figura 17).



Figura 17. Prueba Densidad de la arena.

Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 9 mostrada a continuación:

DENSIDAD	Muestra 1	Muestra 2
Peso (gr)	200	200
Volumen (cm <sup>3</sup> )	75	80
Densidad	2.67	2.50
<b>DENSIDAD PROMEDIO</b>	<b>2.585 gr/cm<sup>3</sup></b>	

Tabla 9. PVSV de la arena.

La densidad se obtiene de dividir el peso de la arena entre el volumen que desaloja la muestra. El resultado es el promedio de los dos valores obtenidos.

### 2.1.5 ABSORCIÓN (ASTM C128-01).

La prueba de absorción consiste en determinar la capacidad máxima de absorción de agua que tiene una arena expresada en porcentaje.

Para determinarla, se toma una muestra representativa de arena que pasa la malla No. 4 y se deja saturar inmersa en agua a temperatura ambiente durante 24 hrs. Transcurrido éste tiempo, se coloca en una parrilla para quitar el exceso de agua y se determina la humedad superficial de la arena con ayuda del molde troncocónico como se señaló en la prueba de densidad. De este material se toman dos pesos y se anotan como el peso húmedo de la muestra. A continuación se colocan en la parrilla y se seca completamente el material, para determinar que la muestra ya no presenta agua, se coloca un cristal sobre ella y si éste no se empaña, nos indica que el material está completamente seco. Después se pesan ambas muestras y se registran los pesos como peso seco de la muestra 1 y 2.

El porciento de humedad de absorción se determina con ayuda de la siguiente fórmula:

$$\% \text{ Humedad de absorción} = \frac{\text{Peso húmedo} - \text{Peso Seco}}{\text{Peso Seco}} \times 100$$

Los resultados de las pruebas se muestran en la tabla 10.

ABSORCION	Muestra 1	Muestra 2
Peso Húmedo (gr)	250	250
Peso Seco (gr)	245.3	245.2
% Humedad de Absorción	1.92	1.96
<b>% Hum. Absorción</b>	<b>1.94</b>	

Tabla 10. % de Humedad de absorción de la arena.

En los casos en que los valores difieran considerablemente, se realiza una tercera muestra o se vuelve a realizar el procedimiento completo.

## 2.2 DISEÑO DE LA MEZCLA.

Actualmente no existe un método de diseño universalmente aceptado para la elaboración de morteros, sin embargo, una vez terminadas las pruebas que determinan la calidad de la arena, se comenzó a elaborar la mezcla de mortero, utilizando una proporción 1:3, que es una proporción ya utilizada para morteros elaborados con cal. Cita Vitruvio en su libro segundo, capítulo V: "La cal que resulte de piedra dura y compacta será muy útil en la construcción y la que resulte de piedra más porosa será mejor para los enlucidos. Cuando la cal queda apagada se mezcla con arena de cantera en una proporción de tres parte de arena por una de cal, así se hará una exacta proporción de la mezcla. Se conseguirá una mezcla de mejor calidad para su uso, si se añade a la arena parte de arcilla machacada y cribada. Por lo tanto cuando se echa agua y arena a la cal se consigue consolidar la obra" [Vitruvio, 2000].

A la parte del aglutinante, en este caso la cal, se le incorporó un 6% de nopal en polvo, porcentaje recomendado para el uso de cualquier tipo de aditivo [Fernández, 2004].

La marca de cal utilizada en el diseño de la mezcla es **Cal Muro**, propiedad de una empresa Michoacana. Tiene sus yacimientos de piedra caliza ubicados en Piedras de Lumbre, Municipio de Jungapeo, Michoacán, México. Es el principal distribuidor de cal en la zona, dentro de la industria de la construcción es una marca ampliamente recomendada por los ingenieros.



Para saber la cantidad de agua necesaria para la mezcla de mortero se hace la prueba de fluidez en morteros, para determinar la consistencia adecuada que permita el perfecto manejo de la mezcla y el mejor acomodo y llenado de los moldes para las distintas pruebas a realizar.

Durante el amasado del mortero se deben mezclar muy bien todos los constituyentes, hasta obtener una masa homogénea y así mantener las características del mortero en una misma amasada, es decir, tener cuidado en mantener las proporciones de material, tiempos de mezcla y la mayor uniformidad que sea posible para obtener un mortero con características similares, aunque no sea de una misma mezcla.

El realizar una mezcla a mano, contribuye a que se tengan morteros con menor homogeneidad y menor calidad. El tiempo estimado de amasado va entre los 4 a 5 minutos [Fernández, 2004].

### 2.2.1 PRUEBA DE FLUIDEZ EN MORTEROS (ASTM C109 Y C230).

La fluidez en los morteros es una propiedad que ayuda a medir la consistencia del mortero. Para determinarla se utiliza la prueba de fluidez, la cual consiste en hacer distintas pruebas al mortero con diferentes cantidades de agua; con ayuda de la mesa de fluidez se determina el porcentaje de fluidez.

Para la realización de la prueba, primero se acondiciona la mesa de fluidez, que es un aparato que consiste en un bastidor de fundición de hierro gris con un eje al que va montado una flecha con una excéntrica que sirve para llevar la mesa de bronce y dejarla caer a una altura de 13 cm, un molde de bronce de forma troncocónica que lleva en la parte superior una ceja para poder levantarla con facilidad, el molde tiene en la parte superior 69.8mm de diámetro, en la parte inferior 101.6mm de diámetro y una altura de 50.8mm.



Figura 18. Mesa de Fluidez.

La mesa debe ser mantenida limpia y lubricada con aceite SAE-10, el aceite no debe estar presente entre la superficie donde golpea la mesa, el lubricar el vástago y la leva permite un trabajo más suave y evita el desgaste.

La mesa debe accionarse por lo menos doce veces antes de hacer la prueba si esta no se ha utilizado por algún tiempo.

Para el procedimiento de elaboración de la prueba primero se aceitan tanto la base de la mesa, como el molde de forma cónica y se procede a elaborar la mezcla con la proporción antes mencionada una parte de cal (con un 6% de nopal en polvo) por tres de arena.

El molde troncocónico se llena en dos capas y a cada capa se le proporcionan 25 golpes repartidos en toda el área de la sección transversal, teniendo cuidado de no penetrar la capa subyacente, finalmente se enrasa al nivel superior del molde y se limpia el mortero que haya caído al rededor.

A continuación se retira el molde y la muestra de mortero puede observarse en la figura 19.

A la mezcla se le comienza a aplicar los golpes especificados de 15 en un tiempo de 15 segundos. Transcurrido este tiempo, tendremos un diámetro extendido de la muestra (figura 20), el cual representa el aumento de la superficie alcanzado por la muestra o mejor dicho la extensión del mortero.



Figura 19. Muestra de mortero.



Figura 20. Extensión del mortero.

Se toman las medidas del diámetro extendido en 5 puntos y se obtiene un solo diámetro extendido promedio, el cual se introduce en la siguiente fórmula para obtener el porcentaje de fluidez:

$$\% \text{ Fluidez} = \frac{(25 - \text{diámetro extendido})}{25} \times 100$$

Se realizaron varias pruebas de fluidez con distintas cantidades de agua, y la proporción de agua que mejor consistencia dio al mortero fue la que equivalía a 31% del peso total de la muestra expresado en cm<sup>3</sup>; es decir, de 1000 gr de material (arena, cal y nopal) se añadía 310 cm<sup>3</sup> de agua. Los resultados obtenidos de las pruebas realizadas se muestran en la tabla 10, donde se observan los resultados de la mezcla que contiene nopal y la mezcla Testigo. La mezcla testigo únicamente está conformada por cal, arena y agua para poder definir el cambio de propiedades entre ésta mezcla y la que contiene nopal.

Las cantidades de material para cada mezcla se pueden ver en la siguiente tabla:

Mortero Cal y nopal		Mortero Testigo	
Material	Cantidad	Material	Cantidad
Cal	1175 gr	Cal	1500 gr
Nopal	75 gr	Arena	4500 gr
Arena	3750 gr	Agua	1550 cm3
Agua	1550 cm3		

Tabla 11. Material para mortero.

Los resultados de la prueba de fluidez para cada una de las mezclas se muestran a continuación:

Mezcla de Mortero de cal y nopal.						
Diámetros Extendidos	4	3.5	3.3	3.3	4	3.6
Diámetro Promedio	3.62					
%Fluidez		85.5				
Mezcla Testigo de Mortero de cal.						
Diámetros Extendidos	3.5	3.4	3.2	3.6	3.5	3.5
Diámetro Promedio	3.45					
%Fluidez		86.2				

Tabla 12. % Fluidez del mortero.

## 2.3 REALIZACIÓN DE LOS ESPECÍMENES.

Los especímenes elaborados fueron cúbicos para la prueba de compresión, prismas rectangulares para la prueba de flexión y briquetas (especímenes con forma de cacahuete) para la prueba de tensión.

Se elaboraron mezclas de mortero de cal y nopal en polvo y la mezcla testigo con las cantidades indicadas en la tabla 10. A partir de la mezclas se procedió al llenado de los moldes para cada tipo de espécimen.

### 2.3.1 CUBOS PARA COMPRESIÓN.

La elaboración de los cubos para ser utilizados en la prueba de resistencia a la compresión se realiza de acuerdo a la norma **ASTM C109/C109M-02** que especifica que el llenado debe hacerse en 4 capas en un molde de 5 x 5 cm y en cada capa se compacta 8 veces con un pisón rectangular como se muestra en la figura 24, los 8 golpes de la primer capa van en un sentido y los 8 de la segunda en el otro sentido y así sucesivamente.

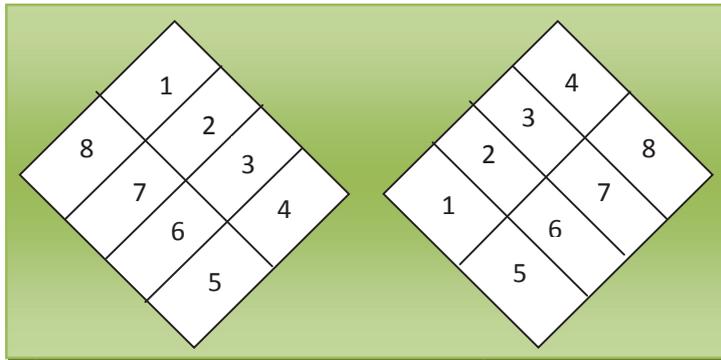


Figura 21. Llenado de moldes para compresión.

Al completar la cuarta capa, el espécimen se enrasa y se deja durante un tiempo de 24 horas y transcurrido este tiempo se descimbra y se coloca en un lugar fresco para que termine de fraguar.



Figura 22. Especímenes de mortero para compresión.

### 2.3.2 PRISMAS RECTANGULARES PARA FLEXIÓN.

La elaboración de los prismas rectangulares para ser utilizados en la prueba de Flexión se realiza en base a la norma **ASTM C293**. Los especímenes se realizaron en un molde de 4 cm x 4 cm x 16 cm. Se llenaron en 2 capas y con un pisón rectangular se le proporcionó un vibrado uniforme a lo largo del molde en cada una de las capas.



Figura 23. Espécimen de mortero para flexión.

Al completar el llenado de los moldes, el espécimen se enrasa y se deja durante un tiempo de 24 horas mínimo para poder descimbrarlos. Después de este tiempo, se coloca en un lugar fresco para que termine de fraguar.

### 2.3.3 BRIQUETAS PARA TENSIÓN.

La elaboración de las briquetas para ser utilizados en la prueba de Tensión, se realizan en base a la norma **ASTM C307-99**. El llenado de los especímenes se realizó en dos capas y cada capa se compactó con el dedo índice y pulgar, debido a la forma y el tamaño del espécimen no es posible compactar con un pisón.



Figura 24. Espécimen de mortero para Tensión.

Al completar el llenado de los moldes, los especímenes se enrasan y se dejan durante un tiempo de 24 horas para descimbrarlos. Después de este tiempo, se coloca en un lugar fresco para que termine de fraguar.

# CAPÍTULO TRES

## PRUEBAS

### 3.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (ASTM C109/C109M-07).

La Resistencia a la compresión es una de las propiedades más importantes y su ensayo es de los más usados en el laboratorio, por ser este esfuerzo como generalmente trabajan los materiales.



Figura 25. Espécimen de mortero para prueba de compresión.

#### 3.1.1 VERIFICACIÓN DE LA CALIDAD DE LOS CUBOS.

Antes de su empleo se eliminan los cubos que presenten defectos, es decir, los que por diversas causas se considere que no cumplen con las características necesarias para obtener resultados confiables.

Los cubos con defectos visibles como fisuras, deformaciones o desportilladuras sufridas al retirarlos del molde, podrán ser ensayados y considerados, siempre que su resistencia a la compresión no sea menor del 10% del valor medio obtenido con los cubos sin defectos, hechos de la misma muestra y ensayados a la misma edad. En caso contrario el resultado obtenido con ellos no debe ser considerado [NMX-C-061-ONNCCE-2001].

Al calcular la resistencia a la compresión, los especímenes que sean visiblemente defectuosos o que den una resistencia que difiera en más del 10% del valor medio dado por todos los especímenes hechos de la misma muestra y probados a la misma edad, no se tomarán en cuenta. Si queda un sólo valor de la determinación de la resistencia a la compresión para una misma edad por haber sido rechazados especímenes o valores de prueba se deba repetir ésta [NMX-C-061-ONNCCE-2001].

#### 3.1.2 PRUEBA DE COMPRESIÓN.

La prueba de compresión se realiza en la máquina universal de pruebas, la cual cuenta con una platina fija y otra móvil la cual se va desplazando para ir

aplicando la carga a una velocidad constante. La maquina Universal utilizada fue la Tinius Olsen, propiedad del laboratorio de Materiales. La máquina tiene una capacidad de 50 toneladas.

Antes de colocar el espécimen en la máquina, se cuantifican sus dimensiones. Después se colocan en la máquina universal. Se coloca una cama de arena fina en la parte inferior y superior del cubo, con la finalidad de que la carga se distribuya uniformemente en toda el área. Finalmente se aplica la carga a velocidad constante en forma lenta hasta la falla de la muestra.



Figura 26. Prueba de compresión.

Para determinar la resistencia a la compresión una vez probados los especímenes, se hace utiliza la siguiente fórmula:

$$R=W/A$$

Donde:

R= Resistencia a la compresión en  $\text{kg}/\text{cm}^2$

w= Carga de ruptura de la muestra en kg

A= Área de la muestra en  $\text{cm}^2$



Figura 27. Falla de ruptura por compresión.

### 3.2 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN (ASTM C293-02).

La prueba de flexión se realiza en la máquina universal de pruebas Tinius Olsen.

Antes de colocar el espécimen en la máquina, se cuantifican sus dimensiones. Se marca el espécimen a 2.5 cm a cada lado y se coloca otra marca al centro de la muestra donde va a ser aplicada la carga.

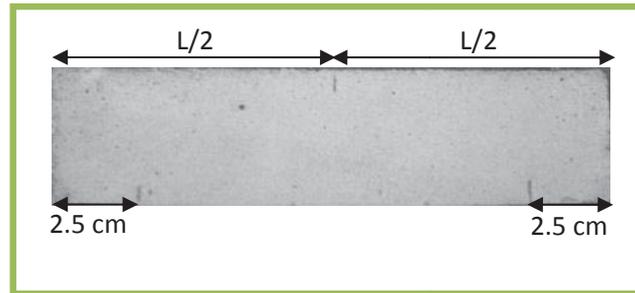


Figura 28. Medidas en el espécimen para flexión.

Se coloca la muestra en la máquina universal, cuidando que los apoyos coincidan con las marcas. Se nivela la máquina. Se aplica la carga lentamente hasta la fractura.



Figura 29. Colocación de los apoyos para flexión

Una vez realizada la prueba se determina la resistencia a la flexión.

Si la fractura ocurre en el tercio medio del claro, el módulo de ruptura se calculará con:

$$R = \frac{PL}{bd^2}$$

Si la fractura ocurre fuera del tercio medio en no más del 5% del claro, el módulo de ruptura se calculará con:

$$R = \frac{3Pa}{bd^2}$$

Donde:

R =Módulo de ruptura en kg/cm<sup>2</sup>.

P =Carga de ruptura en Kg.

L =Claro en cm.

b =Peralte promedio en cm.

d =Ancho de la muestra en cm.

a =Distancia entre la línea de falla y el apoyo más cercano.



Figura 30. Fractura por flexión

El esfuerzo cortante lo calculamos con la siguiente expresión:

$$\sigma = \frac{3P}{2A}$$

Donde:

A=Área transversal de la viga.

$\sigma$  =Esfuerzo cortante.

### 3.3 RESISTENCIA A LA TENSIÓN (ASTM C307-99).

La prueba de tensión se realiza en la máquina Michaelis, la cual puede observarse en la figura 31. La máquina utilizada es propiedad del Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería Civil.



Figura 31. Máquina Michaelis de Tensión.

Antes de colocar la muestra en la máquina, se toman las medidas de la sección media de la briqueta. Se coloca en las mordazas, las cuales se ajustan hasta quedar nivelada la máquina. La carga se aplica lentamente por medio de municiones hasta la falla de las muestras, las municiones serán colocadas en la tolva de la máquina.

Después de la falla de la muestra se pesan las municiones y éste es el peso considerado como la carga que soportó la sección media de la briqueta. La resistencia a la Tensión se calcula con la siguiente fórmula:

$$R = \frac{P_m * 50}{S_m}$$

Donde:

R= Resistencia a la tensión en kg/cm<sup>2</sup>.

P<sub>m</sub>= Peso de las municiones o carga de ruptura en Kg.

S<sub>m</sub>= Sección media de la briqueta en cm<sup>2</sup>.

50= Constante de la máquina Michaelis de tensión.



Figura 32. Falla de ruptura por Tensión.

# CAPÍTULO CUATRO

## RESULTADOS

### 4.1 ESFUERZOS DE COMPRESIÓN.

La prueba de compresión se realizó para diferentes edades: 3, 5, 7, 14, 21, 28, 35 y 45 días. Los resultados de los morteros testigo se muestran en la tabla 13.

ESFUERZOS DE COMPRESIÓN EN MORTERO TESTIGO (cal + arena + agua)										
Espécimen	Fecha de elaboración	Fecha de ruptura	Edad en Días	Dimensiones (cm)	Carga (Kg)	Área (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio		
1	31/03/2009	15/05/2009	45	5.20	193.50	27.04	7.16	7.14		
2	31/03/2009	15/05/2009	45	5.19	206.00	26.99	7.63			
3	31/03/2009	15/05/2009	45	5.34	185.50	27.98	6.63			
4	31/03/2009	05/05/2009	35	5.25	126.50	27.25	4.64	4.59		
5	31/03/2009	05/05/2009	35	5.22	129.50	26.57	4.87			
6	31/03/2009	05/05/2009	35	5.08	112.50	26.42	4.26			
7	31/03/2009	28/04/2009	28	5.21	100.00	26.88	3.72	4.16		
8	31/03/2009	28/04/2009	28	5.21	127.50	27.67	4.61			
9	31/03/2009	28/04/2009	28	5.02	106.50	25.70	4.14			
10	31/03/2009	21/04/2009	21	5.35	106.00	27.29	3.88	3.98		
11	31/03/2009	21/04/2009	21	5.04	98.00	26.06	3.76			
12	31/03/2009	21/04/2009	21	5.22	109.50	25.58	4.28			

ESFUERZOS DE COMPRESIÓN EN MORTERO TESTIGO (cal + arena + agua) Continuación.									
Espécimen	Fecha de elaboración	Fecha de ruptura	Edad en Días	Dimensiones (cm)	Carga (Kg)	Área (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio	
13	31/03/2009	14/04/2009	14	5.18 5.16	89.00	26.73	3.33	3.08	
14	31/03/2009	14/04/2009	14	5.11 5.09	70.50	26.01	2.71		
15	31/03/2009	14/04/2009	14	5.19 5.18	86.00	26.88	3.20		
16	31/03/2009	08/04/2009	8	5.23 5.42	62.50	28.35	2.20	2.26	
17	31/03/2009	08/04/2009	8	5.05 5.15	56.50	26.01	2.17		
18	31/03/2009	08/04/2009	8	5.10 5.21	63.50	26.57	2.39		
19	08/04/2009	13/04/2009	5	4.93 4.94	93.50	24.35	3.84	3.55	
20	08/04/2009	13/04/2009	5	5.15 5.18	92.50	26.68	3.47		
21	08/04/2009	13/04/2009	5	5.11 5.11	87.00	26.11	3.33		
22	13/04/2009	16/04/2009	3	5.04 5.96	38.00	30.04	1.27	1.67	
23	13/04/2009	16/04/2009	3	4.95 5.05	48.00	25.00	1.92		
24	13/04/2009	16/04/2009	3	5.03 4.97	45.50	25.00	1.82		
25	13/04/2009	14/04/2009	1	no se pudo probar por estar húmedo				0	
26	13/04/2009	14/04/2009	1	no se pudo probar por estar húmedo					
27	13/04/2009	14/04/2009	1	no se pudo probar por estar húmedo					

Tabla 13. Esfuerzos de compresión a diferentes edades en mortero Testigo.

Como se puede observar no se pudieron probar los especímenes a 1 día de edad, se pudieron descimbrar, pero estaban demasiado húmedos.

Los resultados de los esfuerzos de compresión obtenidos en los especímenes adicionados con nopal en polvo a las diferentes edades se muestran en la tabla 14.

ESFUERZOS DE COMPRESIÓN EN MORTERO NOPAL (cal + arena + nopal en polvo + agua)										
Espécimen	Fecha de elaboración	Fecha de ruptura	Edad en días	Dimensiones (cm)		Carga (Kg)	Área (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio	
1	03/04/2009	18/05/2009	45	5.27	5.18	40.00	27.30	1.47	1.63	
2	03/04/2009	18/05/2009	45	5.21	5.16	39.00	26.88	1.45		
3	03/04/2009	18/05/2009	45	5.14	5.14	52.50	26.42	1.99		
4	03/04/2009	08/05/2009	35	5.10	5.18	32.50	26.42	1.23	1.49	
5	03/04/2009	08/05/2009	35	5.21	5.21	38.50	27.14	1.42		
6	03/04/2009	08/05/2009	35	5.20	5.30	50.00	27.56	1.81		
7	03/04/2009	01/05/2009	28	5.20	5.19	35.00	26.99	1.30	1.40	
8	03/04/2009	01/05/2009	28	5.20	5.25	37.50	27.30	1.37		
9	03/04/2009	01/05/2009	28	5.20	5.21	41.50	27.09	1.53		
10	03/04/2009	24/04/2009	21	5.04	5.19	40.50	26.16	1.55	1.62	
11	03/04/2009	24/04/2009	21	5.06	5.17	38.00	26.16	1.45		
12	03/04/2009	24/04/2009	21	5.19	5.09	49.50	26.42	1.87		
13	03/04/2009	17/04/2009	14	5.26	5.26	22.50	27.67	0.81	1.05	
14	03/04/2009	17/04/2009	14	5.28	5.16	37.50	27.24	1.38		
15	03/04/2009	17/04/2009	14	5.19	5.15	25.50	26.73	0.95		
16	13/04/2009	20/04/2009	7	5.22	5.28	23.50	27.56	0.85	0.86	
17	13/04/2009	20/04/2009	7	5.19	5.25	27.00	27.25	0.99		
18	13/04/2009	20/04/2009	7	5.19	5.19	20.00	26.94	0.74		

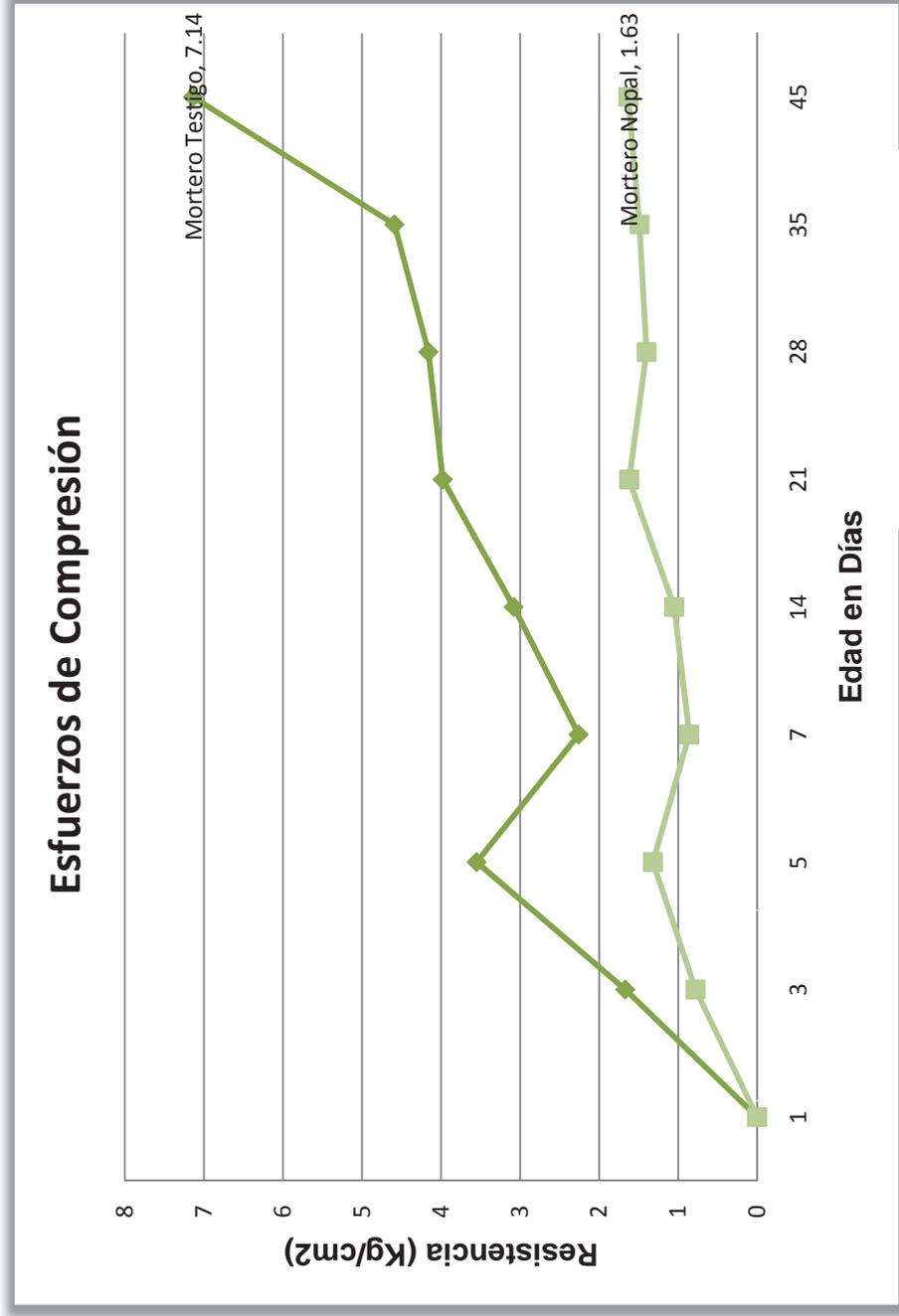
**ESFUERZOS DE COMPRESIÓN EN MORTERO NOPAL (cal + arena + nopal en polvo + agua) Continuación.**

Espécimen	Fecha de elaboración	Fecha de ruptura	Edad en Dias	Dimensiones (cm)	Carga (Kg)	Área (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio
19	03/04/2009	08/04/2009	5	5.25 5.19	36.00	27.25	1.32	1.32
20	03/04/2009	08/04/2009	5	5.12 5.25	39.50	26.88	1.47	
21	03/04/2009	08/04/2009	5	5.22 5.15	31.50	26.88	1.17	0.78
22	13/04/2009	16/04/2009	3	4.99 4.99	22.50	24.90	0.90	
23	13/04/2009	16/04/2009	3	5.26 5.09	18.50	26.77	0.69	0
24	13/04/2009	16/04/2009	3	4.99 5.00	18.50	24.95	0.74	
25	13/04/2009	14/04/2009	1	no se pudo probar por estar húmedo				0
26	13/04/2009	14/04/2009	1	no se pudo probar por estar húmedo				
27	13/04/2009	14/04/2009	1	no se pudo probar por estar húmedo				

**Tabla 14. Esfuerzos de compresión a diferentes edades en Mortero con Nopal.**

Como se puede observar no se pudieron probar los especímenes a 1 día de edad, se pudieron descimbrar, pero estaban demasiado húmedos.

La gráfica correspondiente a los esfuerzos de compresión presentados en las dos muestras de mortero es la siguiente:



#### 4.2 ESFUERZOS DE FLEXIÓN.

La prueba de Flexión se realizó para diferentes edades: 3, 5, 7, 14, 21, 28, 35 y 45 días. Los resultados de los morteros testigo se muestran en la tabla 15.

ESFUERZOS DE FLEXIÓN EN MORTERO TESTIGO (cal + arena + agua)										
Espécimen	Fecha de elaboración	Fecha de ruptura	Edad en Días	Dimensiones (cm)	Carga (Kg)	Área (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio		
1	31/03/2009	15/05/2009	45	3.95 3.85 16.00	18.50	15.21	1.22	1.22		
2	31/03/2009	15/05/2009	45	3.96 3.80 16.00	16.50	15.05	1.10			
3	31/03/2009	15/05/2009	45	3.91 3.84 16.00	20.00	15.01	1.33			
4	31/03/2009	05/05/2009	35	4.00 3.91 15.90	9.00	15.64	0.58	0.81		
5	31/03/2009	05/05/2009	35	3.90 4.00 15.90	17.50	15.60	1.12			
6	31/03/2009	05/05/2009	35	3.83 4.00 16.00	11.00	15.32	0.72			
7	08/04/2009	06/05/2009	28	3.88 4.05 16.00	11.50	15.71	0.73	0.777		
8	08/04/2009	06/05/2009	28	4.10 3.80 15.90	15.15	15.58	0.97			
9	08/04/2009	06/05/2009	28	4.10 3.90 16.00	10.00	15.99	0.63			
10	08/04/2009	29/04/2009	21	4.00 3.90 16.00	6.50	15.60	0.42	0.50		
11	08/04/2009	29/04/2009	21	3.95 3.90 16.00	7.50	15.41	0.49			
12	08/04/2009	29/04/2009	21	3.84 3.98 16.00	9.00	15.28	0.59			
13	08/04/2009	22/04/2009	14	3.96 3.92 16.00	6.00	15.52	0.39	0.46		
14	08/04/2009	22/04/2009	14	4.03 3.78 16.00	10.00	15.23	0.66			
15	08/04/2009	22/04/2009	14	3.92 3.81 16.00	5.00	14.94	0.33			
16	08/04/2009	15/04/2009	7	3.98 3.88 16.00	16.00	15.44	1.04	0.54		
17	08/04/2009	15/04/2009	7	4.00 3.83 16.00	3.00	15.32	0.20			
18	08/04/2009	15/04/2009	7	3.98 3.88 16.00	6.00	15.44	0.39			

ESFUERZOS DE FLEXIÓN EN MORTERO TESTIGO (cal + arena + agua) Continuación										
Espécimen	Fecha de elaboración	Fecha de ruptura	Edad en Días	Dimensiones (cm)			Carga (Kg)	Área (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio
19	08/04/2009	13/04/2009	5	3.95	3.89	16.00	10.50	15.37	0.68	0.62
20	08/04/2009	13/04/2009	5	3.97	3.85	16.00	6.50	15.28	0.43	
21	08/04/2009	13/04/2009	5	4.05	3.83	16.00	11.50	15.51	0.74	0.68
22	13/04/2009	16/04/2009	3	4.05	3.90	16.00	8.00	15.80	0.51	
23	13/04/2009	16/04/2009	3	4.08	3.87	16.00	11.00	15.79	0.70	0.68
24	13/04/2009	16/04/2009	3	3.97	3.90	16.00	13.00	15.48	0.84	
25	13/04/2009	14/04/2009	1	No se pudo probar por estar demasiado húmedos						
26	13/04/2009	14/04/2009	1	No se pudo probar por estar demasiado húmedos						
27	13/04/2009	14/04/2009	1	No se pudo probar por estar demasiado húmedos						

Tabla 15. Esfuerzos de Flexión a diferentes edades en Mortero Testigo.

Como se puede observar no se pudieron probar los especímenes a 1 día de edad, se pudieron descimbrar, pero estaban demasiado húmedos.

Los resultados de los esfuerzos de Flexión obtenidos en los especímenes adicionados con nopal en polvo a las diferentes edades se muestran en la tabla 16.

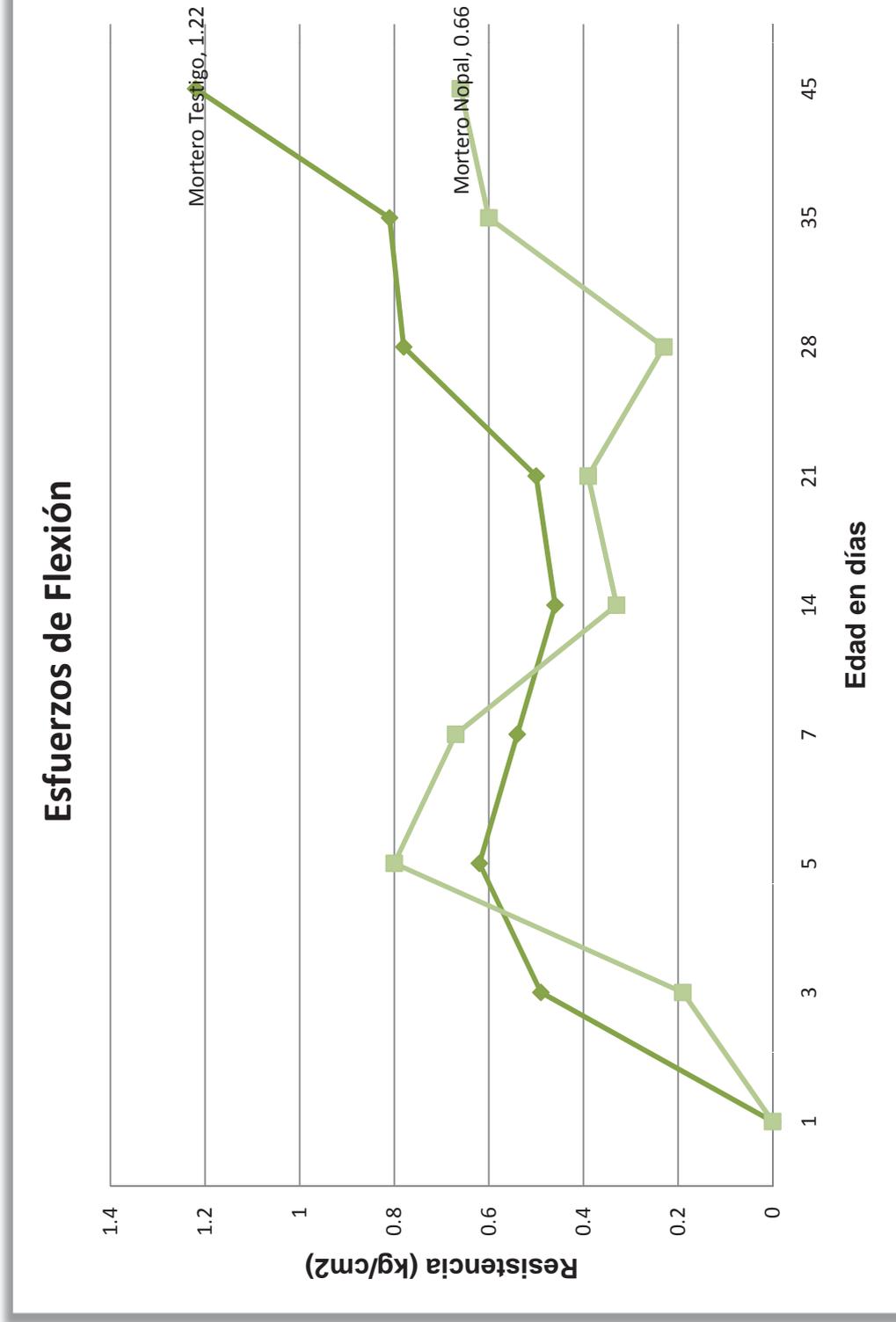
ESFUERZOS DE FLEXIÓN EN MORTERO NOPAL (cal + arena + nopal en polvo+ Agua)									
Espécimen	Fecha de elaboración	Fecha de ruptura	Edad en Días	Dimensiones (cm)		Carga (Kg)	Área (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio
1	03/04/2009	18/05/2009	45	3.94	3.91	16.00	15.41	0.58	0.66
2	03/04/2009	18/05/2009	45	3.88	3.95	16.00	15.33	0.55	
3	03/04/2009	18/05/2009	45	4.01	3.91	16.00	15.68	0.83	
4	03/04/2009	08/05/2009	35	3.95	4.01	16.00	15.84	0.60	0.60
5	03/04/2009	08/05/2009	35	3.90	3.90	16.00	15.21	0.56	
6	03/04/2009	08/05/2009	35	4.00	4.00	16.00	16.00	0.66	
7	03/04/2009	01/05/2009	28	4.00	4.10	16.00	16.40	0.21	0.229
8	03/04/2009	01/05/2009	28	3.94	4.05	16.00	15.96	0.22	
9	03/04/2009	01/05/2009	28	3.93	4.00	16.00	15.72	0.25	
10	13/04/2009	04/05/2009	21	3.96	3.89	16.00	15.40	0.23	0.39
11	13/04/2009	04/05/2009	21	3.92	3.86	16.00	15.13	0.66	
12	13/04/2009	04/05/2009	21	3.96	3.92	16.00	15.52	0.29	
13	03/04/2009	17/04/2009	14	3.97	3.84	16.00	15.24	0.30	0.33
14	03/04/2009	17/04/2009	14	3.94	3.93	16.00	15.48	0.39	
15	03/04/2009	17/04/2009	14	3.92	3.89	16.00	15.25	0.30	
16	13/04/2009	20/04/2009	7	4.04	3.93	16.00	15.88	0.66	0.667
17	13/04/2009	20/04/2009	7	3.97	3.96	16.00	15.72	0.67	
18	13/04/2009	20/04/2009	7	4.02	3.88	16.00	15.60	0.67	

ESFUERZOS DE FLEXIÓN EN MORTERO NOPAL (cal + arena + nopal en polvo + Agua) Continuación									
Espécimen	Fecha de elaboración	Fecha de ruptura	Edad en Días	Dimensiones (cm)		Carga (Kg)	Área (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio
19	03/04/2009	08/04/2009	5	3.91	4.00	16.00	15.64	0.67	0.80
20	03/04/2009	08/04/2009	5	3.89	4.03	16.00	15.68	0.99	
21	03/04/2009	08/04/2009	5	3.88	4.00	16.00	15.52	0.74	
22	13/04/2009	16/04/2009	3	4.00	3.91	16.00	15.64	0.13	0.19
23	13/04/2009	16/04/2009	3	3.94	3.90	16.00	15.37	0.16	
24	13/04/2009	16/04/2009	3	4.00	3.90	16.00	15.60	0.29	
25	03/04/2009	04/04/2009	1	No se pudo probar por estar demasiado húmedos					
26	03/04/2009	04/04/2009	1	No se pudo probar por estar demasiado húmedos					
27	03/04/2009	04/04/2009	1	No se pudo probar por estar demasiado húmedos					

Tabla 16. Esfuerzos de Flexión a diferentes edades en Mortero con nopal.

Como se puede observar no se pudieron probar los especímenes a 1 día de edad, se pudieron descimbrar, pero estaban demasiado húmedos.

La gráfica correspondiente a los esfuerzos de Flexión presentados en las dos muestras de mortero es la siguiente:



### 4.3 ESFUERZOS DE CORTANTE.

Los esfuerzos de cortante se determinaron a partir de la prueba de Flexión como se mencionó anteriormente. Se probaron a 3, 5, 7, 14, 21, 28, 35 y 45 días de edad. Los resultados en mortero testigo se muestran en la tabla 17.

ESFUERZOS DE CORTANTE EN MORTERO TESTIGO (cal + arena + Agua)									
Espécimen	Fecha de elaboración	Fecha de ruptura	Edad en Días	Dimensiones (cm)		Carga (Kg)	Área (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo Cortante (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio
1	31/03/2009	15/05/2009	45	3.95	3.85	16.00	15.21	1.82	1.82
2	31/03/2009	15/05/2009	45	3.96	3.80	16.00	15.05	1.64	
3	31/03/2009	15/05/2009	45	3.91	3.84	16.00	15.01	2.00	
4	31/03/2009	05/05/2009	35	4.00	3.91	15.90	15.64	0.86	1.21
5	31/03/2009	05/05/2009	35	3.90	4.00	15.90	15.60	1.68	
6	31/03/2009	05/05/2009	35	3.83	4.00	16.00	15.32	1.08	
7	08/04/2009	06/05/2009	28	3.88	4.05	16.00	15.71	1.10	1.16
8	08/04/2009	06/05/2009	28	4.10	3.80	15.90	15.58	1.46	
9	08/04/2009	06/05/2009	28	4.10	3.90	16.00	15.99	0.94	
10	08/04/2009	29/04/2009	21	4.00	3.90	16.00	15.60	0.63	0.75
11	08/04/2009	29/04/2009	21	3.95	3.90	16.00	15.41	0.73	
12	08/04/2009	29/04/2009	21	3.84	3.98	16.00	15.28	0.88	
13	08/04/2009	22/04/2009	14	3.96	3.92	16.00	15.52	0.58	0.69
14	08/04/2009	22/04/2009	14	4.03	3.78	16.00	15.23	0.98	
15	08/04/2009	22/04/2009	14	3.92	3.81	16.00	14.94	0.50	
16	08/04/2009	15/04/2009	7	3.98	3.88	16.00	15.44	1.55	0.81
17	08/04/2009	15/04/2009	7	4.00	3.83	16.00	15.32	0.29	
18	08/04/2009	15/04/2009	7	3.98	3.88	16.00	15.44	0.58	

ESFUERZOS DE CORTANTE EN MORTERO TESTIGO (cal + arena + Agua) Continuación									
Espécimen	Fecha de elaboración	Fecha de ruptura	Edad en Días	Dimensiones (cm)		Carga (Kg)	Área (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo Cortante (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio
19	08/04/2009	13/04/2009	5	3.95	3.89	16.00	15.37	1.03	0.93
20	08/04/2009	13/04/2009	5	3.97	3.85	16.00	15.28	0.64	
21	08/04/2009	13/04/2009	5	4.05	3.83	16.00	15.51	1.11	1.02
22	13/04/2009	16/04/2009	3	4.05	3.90	16.00	15.80	0.76	
23	13/04/2009	16/04/2009	3	4.08	3.87	16.00	15.79	1.04	1.02
24	13/04/2009	16/04/2009	3	3.97	3.90	16.00	15.48	1.26	
25	13/04/2009	14/04/2009	1			No se pudo probar por estar demasiado húmedos			
26	13/04/2009	14/04/2009	1			No se pudo probar por estar demasiado húmedos			
27	13/04/2009	14/04/2009	1			No se pudo probar por estar demasiado húmedos			

Tabla 17. Esfuerzos de Cortante a diferentes edades en Mortero testigo.

Como se puede observar no se pudieron probar los especímenes a 1 día de edad, se pudieron descimbrar, pero estaban demasiado húmedos.

Los resultados de los esfuerzos de Cortante obtenidos en los especímenes adicionados con nopal en polvo a las diferentes edades se muestran en la tabla 18.

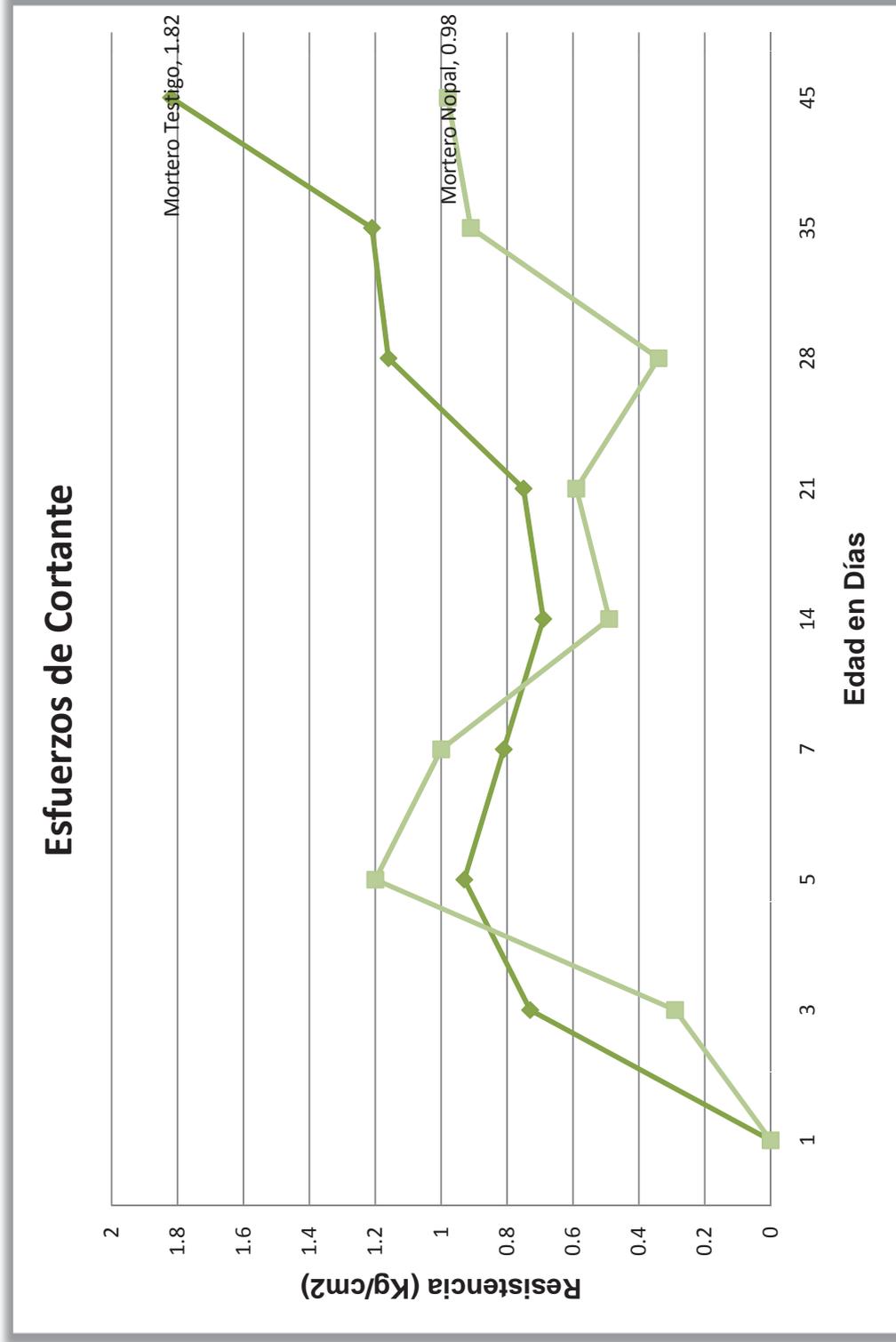
ESFUERZOS DE CORTANTE EN MORTERO NOPAL (cal + arena + nopal en polvo + Agua)										
Espécimen	Fecha de elaboración	Fecha de ruptura	Edad en Días	Dimensiones (cm)		Carga (Kg)	Área (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo Cortante (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio	
1	03/04/2009	18/05/2009	45	3.94	3.91	16.00	15.41	0.88	0.98	
2	03/04/2009	18/05/2009	45	3.88	3.95	16.00	15.33	0.83		
3	03/04/2009	18/05/2009	45	4.01	3.91	16.00	15.68	1.24		
4	03/04/2009	08/05/2009	35	3.95	4.01	16.00	15.84	0.90	0.91	
5	03/04/2009	08/05/2009	35	3.90	3.90	16.00	15.21	0.84		
6	03/04/2009	08/05/2009	35	4.00	4.00	16.00	16.00	0.98		
7	03/04/2009	01/05/2009	28	4.00	4.10	16.00	16.40	0.32	0.344	
8	03/04/2009	01/05/2009	28	3.94	4.05	16.00	15.96	0.33		
9	03/04/2009	01/05/2009	28	3.93	4.00	16.00	15.72	0.38		
10	13/04/2009	04/05/2009	21	3.96	3.89	16.00	15.40	0.34	0.59	
11	13/04/2009	04/05/2009	21	3.92	3.86	16.00	15.13	0.99		
12	13/04/2009	04/05/2009	21	3.96	3.92	16.00	15.52	0.43		
13	03/04/2009	17/04/2009	14	3.97	3.84	16.00	15.24	0.44	0.49	
14	03/04/2009	17/04/2009	14	3.94	3.93	16.00	15.48	0.58		
15	03/04/2009	17/04/2009	14	3.92	3.89	16.00	15.25	0.44		
16	13/04/2009	20/04/2009	7	4.04	3.93	16.00	15.88	0.99	1.001	
17	13/04/2009	20/04/2009	7	3.97	3.96	16.00	15.72	1.00		
18	13/04/2009	20/04/2009	7	4.02	3.88	16.00	15.60	1.01		

ESFUERZOS DE CORTANTE EN MORTERO NOPAL (cal + arena + nopal en polvo + Agua)										
Espécimen	Fecha de elaboración	Fecha de ruptura	Edad en Días	Dimensiones (cm)	Carga (Kg)	Área (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo Cortante (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio		
19	03/04/2009	08/04/2009	5	3.91 4.00 16.00	10.50	15.64	1.01	1.20		
20	03/04/2009	08/04/2009	5	3.89 4.03 16.00	15.50	15.68	1.48			
21	03/04/2009	08/04/2009	5	3.88 4.00 16.00	11.50	15.52	1.11			
22	13/04/2009	16/04/2009	3	4.00 3.91 16.00	2.00	15.64	0.19	0.29		
23	13/04/2009	16/04/2009	3	3.94 3.90 16.00	2.50	15.37	0.24			
24	13/04/2009	16/04/2009	3	4.00 3.90 16.00	4.50	15.60	0.43			
25	03/04/2009	04/04/2009	1	No se pudo probar por estar demasiado húmedos						
26	03/04/2009	04/04/2009	1	No se pudo probar por estar demasiado húmedos						
27	03/04/2009	04/04/2009	1	No se pudo probar por estar demasiado húmedos						

Tabla 18. Esfuerzos de Cortante a diferentes edades en Mortero Nopal.

Como se puede observar no se pudieron probar los especímenes a 1 día de edad, se pudieron descimbrar, pero estaban demasiado húmedos.

La gráfica correspondiente a los esfuerzos de Cortante presentados en las dos muestras de mortero es la siguiente:



#### 4.4 ESFUERZOS DE TENSIÓN.

La prueba de Tensión se realizó para diferentes edades: 3, 5, 7, 14, 21, 28, 35 y 45 días. Los resultados de los morteros testigo se muestran en la tabla 18 y los adicionados con nopal en la tabla 19.

ESFUERZOS DE TENSIÓN EN MORTERO TESTIGO (cal + arena + agua)										
Espécimen	Fecha de elaboración	Fecha de ruptura	Edad en Días	Dimensiones (cm)	Carga (Kg)	Área (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio		
1	31/03/2009	15/05/2009	45	2.50	2.46	0.22	6.15	1.81	1.95	
2	31/03/2009	15/05/2009	45	2.50	2.44	0.22	6.10	1.82		
3	31/03/2009	15/05/2009	45	2.50	2.46	0.27	6.15	2.23		
4	31/03/2009	05/05/2009	35	2.49	2.58	0.23	6.42	1.82	1.84	
5	31/03/2009	05/05/2009	35	2.50	2.56	0.24	6.40	1.86		
6	13/04/2009	11/05/2009	28	2.50	2.49	0.23	6.23	1.84	1.62	
7	13/04/2009	11/05/2009	28	2.52	2.43	0.17	6.12	1.38		
8	13/04/2009	11/05/2009	28	2.50	2.47	0.20	6.18	1.62		
9	13/04/2009	04/05/2009	21	2.55	2.46	0.20	6.27	1.61	1.72	
10	13/04/2009	04/05/2009	21	2.56	2.56	0.24	6.55	1.83		
11	17/04/2009	01/05/2009	14	2.45	2.54	0.16	6.22	1.28	1.25	
12	17/04/2009	01/05/2009	14	2.48	2.58	0.16	6.40	1.22		
13	17/04/2009	01/05/2009	14	2.43	2.54	0.16	6.17	1.26		
14	17/04/2009	24/04/2009	7	2.46	2.50	0.11	6.15	0.90	0.90	
15	17/04/2009	24/04/2009	7	2.55	2.41	0.11	6.15	0.90		
16	30/04/2009	05/05/2009	5	2.55	2.54	0.09	6.48	0.70	0.53	
17	30/04/2009	05/05/2009	5	2.55	2.60	0.06	6.63	0.47		
18	30/04/2009	05/05/2009	5	2.50	2.49	0.05	6.23	0.43		

ESFUERZOS DE TENSION EN MORTERO TESTIGO (cal + arena + agua) Continuación								
Espécimen	Fecha de elaboración	Fecha de ruptura	Edad en Días	Dimensiones (cm)	Carga (Kg)	Área (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio
19	28/04/2009	01/05/2009	3	2.48 2.50	0.00	6.20	0.00	0.25
20	28/04/2009	01/05/2009	3	2.48 2.50	0.04	6.20	0.29	
21	28/04/2009	01/05/2009	3	2.50 2.55	0.03	6.38	0.22	
22	30/04/2009	01/05/2009	1	No se pudo probar por estar húmedo				
23	30/04/2009	01/05/2009	1	No se pudo probar por estar húmedo				

Tabla 19. Esfuerzos de Tensión a diferentes edades en Mortero Testigo.

Como se puede observar no se pudieron probar los especímenes a 1 día de edad, se pudieron descimbrar, pero estaban demasiado húmedos.

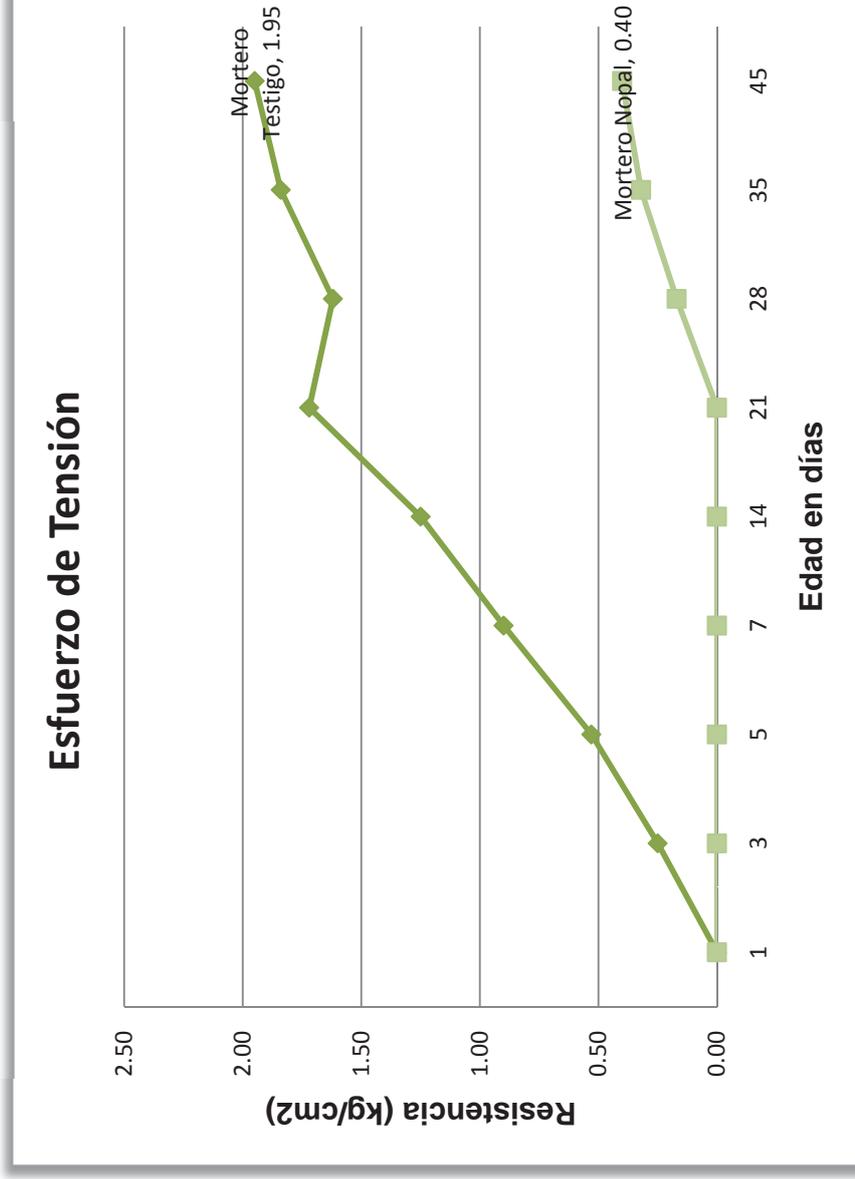
Los resultados de los esfuerzos de Tensión obtenidos en los especímenes adicionados con nopal en polvo a las diferentes edades se muestran en la tabla 20.

**ESFUERZOS DE TENSIÓN EN MORTERO NOPAL (cal + arena + nopal en polvo + agua)**

Espécimen	Fecha de elaboración	Fecha de ruptura	Edad en Días	Dimensiones (cm)	Carga (Kg)	Área (cm <sup>2</sup> )	Esfuerzo (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio
1	03/04/2009	18/05/2009	45	2.49	2.48	6.18	0.05	0.42
2	03/04/2009	18/05/2009	45	2.50	2.49	6.23	0.05	0.37
3	14/04/2009	19/05/2009	35	2.51	2.70	6.78	0.03	0.24
4	14/04/2009	19/05/2009	35	2.54	2.44	6.20	0.05	0.39
5	14/04/2009	12/05/2009	28	2.51	2.42	6.07	0.03	0.23
6	14/04/2009	12/05/2009	28	2.49	4.46	11.11	0.02	0.10
7	14/04/2009	12/05/2009	28	2.49	2.42	Se rompió		
8	29/04/2009	20/05/2009	21	2.50	2.40	Se rompió		
9	29/04/2009	20/05/2009	21	2.49	2.46	Se rompió		
10	29/04/2009	20/05/2009	21	2.51	2.47	Se rompió		
11	29/04/2009	13/05/2009	14	2.52	2.53	Se rompió		
12	29/04/2009	13/05/2009	14	2.55	2.45	Se rompió		
13	01/05/2009	08/05/2009	7	2.49	2.48	Se rompió		
14	01/05/2009	08/05/2009	7	2.51	2.50	Se rompió		
15	01/05/2009	08/05/2009	7	2.50	2.46	Se rompió		
16	01/05/2009	06/05/2009	5	2.49	2.47	Se rompió		
17	01/05/2009	06/05/2009	5	2.52	2.53	Se rompió		
18	04/05/2009	07/05/2009	3	2.48	2.50	Se rompió		
19	04/05/2009	07/05/2009	3	2.52	2.48	Se rompió		
20	04/05/2009	07/05/2009	3	2.50	2.52	Se rompió		
21	04/05/2009	05/05/2009	1		No se pudo probar por estar húmedo			
22	04/05/2009	05/05/2009	1		No se pudo probar por estar húmedo			

Tabla 20. Esfuerzos de Tensión a diferentes edades en Mortero Nopal.

La gráfica correspondiente a los esfuerzos de Tensión presentados en las dos muestras de mortero es la siguiente:



# CAPÍTULO CINCO

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El estudio que ahora se presenta forma parte de un proyecto de investigación más amplio, en el cual se considera incorporar diferentes tipos de adiciones orgánicas, con el objetivo de cuantificar el impacto que éstas tendrán en el comportamiento físico y mecánico de morteros de cal con arena inerte; se considera la posibilidad de utilizar los morteros que resulten con un buen comportamiento ingenieril, a la restauración de monumentos históricos, empleándose técnicas constructivas antiguas.

Respecto a la determinación de la resistencia a la compresión en los morteros, se observa que para todas las edades de prueba, la resistencia de los especímenes testigo siempre es mayor a la de los especímenes que contienen la adición de nopal en polvo. Se observa que de manera general el peso específico es mayor en los especímenes testigo (10.5%) que en los especímenes que contienen nopal en polvo. Entonces puede considerarse que la sustitución parcial (6%) de polvo de nopal por el adhesivo cementante que es la cal, no contribuye en forma alguna, al aumento del poder cementante, antes bien, se inducen espacios volumétricos en donde la resistencia a compresión de los morteros con polvo de nopal es inferior a la que genera la cal.

Es factible suponer que el polvo no aumenta el poder cementante por estar en condición deshidratada, inhibiéndose la formación de gel.

En relación al análisis de las gráficas de especímenes a cortante y flexión puede decirse que a edades tempranas los especímenes adicionados con fibra de nopal tienden a aumentar su resistencia en relación a los especímenes testigo, pero después de los 14 días se invierte el comportamiento. Sin embargo, los especímenes testigo, en general mantienen un incremento a la resistencia a la flexión con la edad, no ocurriendo lo mismo en los especímenes adicionados con polvo de nopal. Esto puede deberse a una falta de precisión en la lectura de máquina universal Tinius Olsen, la cual tiene una aproximación de 0.5 kg, por lo que en la continuación de la investigación será recomendable ensayar un mayor número de especímenes para la obtención de los promedios de resistencia a cortante y flexión en cada edad.

Referente al comportamiento de los especímenes a tensión, la tendencia de los especímenes testigo fue la de incrementar la resistencia con la edad,

pudiéndose realizar la prueba desde los tres días de edad. No ocurrió así con los especímenes estudiados que contienen nopal en polvo, los cuales pudieron probarse a partir de los 21 días de edad y a partir de ahí se tuvo un incremento a la resistencia a la tensión, pero menor a la obtenida con los especímenes testigo. Las causas de este comportamiento, se estiman similares a las arriba escritas y que se refieren a los especímenes a compresión. Se estima conveniente sugerir que la continuación de la investigación se realice con fibras y no con polvo de nopal.

De acuerdo a los resultados obtenidos, puede concluirse que la adición de fibras deshidratadas de cactus opuntia en los morteros, no mejora el comportamiento mecánico en las distintas sollicitaciones como son compresión, tensión, flexión y cortante, siendo menores los esfuerzos resistidos por los morteros adicionados en comparación con el mortero testigo.

Con los resultados anteriores, se puede inferir que el nopal en su estado deshidratado al fraguar el mortero de cal con la incorporación de éste no alcanza a formar un gel que le proporcione capacidad de cohesión y adherencia, en la mezcla de mortero.

En cuanto a la tonalidad de los morteros adicionados con polvo de nopal, respecto al mortero testigo que no lo contiene, ésta cambia de color blanco a un color ligeramente verde, que es agradable a la vista cuando se empleó en aplanados de muros y junteado de mampostería. Se muestra la diferencia en la fotografía:



Es importante continuar con el estudio de morteros adicionados con nopal en sus diferentes modalidades como puede ser: nopal en polvo, fibras deshidratadas y mucílago, las cuales con seguridad presentarán resultados

diferentes en su estudio. Adicionalmente convendrá complementar los análisis mecánicos realizados con microanálisis físicos y químicos, en donde podrá conocerse la formación de microestructuras, interfases y nuevos compuestos químicos, con los cuales se tendrá un mejor marco de referencia para emitir un mejor análisis del comportamiento macroscópico de estos materiales analizados y de cualquier material de construcción.

# CAPÍTULO SEIS

## REFERENCIAS

American Society for Testing and Materials Standars 1997, ASTM

Arcos Molina J., 1995, "Los materiales básicos de la construcción", Editorial PROGENSA, 1ra. Edición, Sevilla, pp 107-113, ISBN 84-8650-547-X

Askeland D. R., 1987, "La Ciencia e Ingeniería de los Materiales", Grupo Editorial Iberoamérica, México, pp 1-4, ISBN 968-7270-19-5

Bravo Hollis H., 2002, "Pencas de Antaño", Artes de México "El Nopal", Revista libro No. 59, CONACULTA, México, pp 8-15

Camacho Sánchez C. S., 2001, "Caracterización de Morteros Antiguos de base orgánica vegetal", Tesis Licenciatura, Facultad de Ingeniería civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México, pp 4-7, 43-44.

Fernández Pérez M., 2004, "Enfoscados y enlucidos con morteros y pastas: Guía práctica para el profesional albañil", Editorial Ideas Propias, 1ra. Edición, Vigo, ISBN 849792150X

Fort R., 2007, "Polímeros sintéticos para la conservación de los materiales pétreos", "Ciencia, Tecnología y Sociedad para una conservación sostenible del patrimonio pétreo", Restauradores sin fronteras, 1ra. Edición, Madrid, pp. 71-72

<http://es.wikipedia.org/wiki/Cal> Consultada 7/JUN/09

[http://redescolar.ilce.edu.mx:2000/redescolar/publicaciones/publi\\_reinos/flora/nopal\\_chumbera/nopal-chum.htm](http://redescolar.ilce.edu.mx:2000/redescolar/publicaciones/publi_reinos/flora/nopal_chumbera/nopal-chum.htm) Consultada 7/JUN/09

<http://www.anfacal.org/espaniol.htm> Consultada 7/JUN/09

<http://www.calmuro.com.mx/index.html> Consultada 7/JUN/09

Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (*INEGI*)

Luna B. L., 1976, "Agua", Offset Larios, México, Colección Científica de Time Life, pp 9-15.

Márquez Alonso c., 1999, "Plantas Medicinales de México II, Composición, Usos y Actividad Biológica", Universidad Nacional Autónoma de México, 1ra. Edición, México, ISBN 968-36-6996-4

Microsoft ® Encarta ® 2008. © 1993-2007 Microsoft Corporation. Reservados todos los derechos.

NMX-C-003-1996-ONNCCE.

Oliver Domingo J. L., 2000, "Los diez libros de Arquitectura" Vitruvio (traducción), Editorial Alianza Forma, Segunda reimpresión, Madrid, España, pp 105-107, ISBN 84-206-7133-9

Olmos G., 2002, "Para todos sale el Nopal", Artes de México "El Nopal", Revista libro No. 59, CONACULTA, México, pp

Pérez Yépez D. Y., 2008 "Ceniza Volcánica como agregado en morteros de albañilería con cal apagada artesanalmente", Tesis Licenciatura, Facultad de Ingeniería civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México.

Salinas Pedraza J., 2002, "Los otomíes y el Nopal", Artes de México "El Nopal", Revista libro No. 59, CONACULTA, México, pp 23-27

Sandoval Madrigal G., 1985, "Uso y aplicación de los materiales de construcción", Editorial Universidad de Guadalajara, Guadalajara, Jalisco, México, pp 17-30.

Symes R. F., 1995, "Rocas y Minerales", Biblioteca Visual Altea, D. F., México, pp 8-25, ISBN 968-19-0162-2

Somayaji S., 2001, "Civil engineering materials", Prentice Hall, Second edition, Upper Saddle River, New Jersey, pp 5-255, ISBN 0-13-083906-X

Vázquez Zalapa T., "Micropropagación de Pelecyphora aselliformis ehrenberg (Cactaceae), endémica y en peligro de extinción", Tesis Licenciatura, Facultad de Biología, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Morelia, México, pp 1-4.

Venuat M., 1972, "Aditivos y tratamientos de morteros y hormigón", Editorial Eta, Barcelona, pp 26-240

### **Bibliografía de imágenes del capítulo 1.**

**Figura 5.** Breck P. Kent/Animals Animals  
Microsoft ® Encarta ® 2008. © 1993--2007 Microsoft Corporation. Reservados todos los derechos.

**Figura 6.** Yoshiyuki Koide

Microsoft ® Encarta ® 2008. © 1993--2007 Microsoft Corporation. Reservados todos los derechos.

**Figura 7.** Paul Silverman/Fund. Photos/Photo Researchers, Inc.

Microsoft ® Encarta ® 2008. © 1993--2007 Microsoft Corporation. Reservados todos los derechos.

**Figura 9.** Ric Ergenbright/Corbis

Microsoft ® Encarta ® 2008. © 1993--2007 Microsoft Corporation. Reservados todos los derechos