

Ciudad Obregón, Sonora, a 12 de Diciembre de 2012.

Instituto Tecnológico de Sonora  
P r e s e n t e.

El que suscribe **Misahel Palma Miranda**, por medio del presente manifiesto bajo protesta de decir verdad, que soy autor y titular de los derechos de propiedad intelectual tanto morales como patrimoniales, sobre la obra titulada: "**Estudio de resistencia a compresión en morteros de Cal – Ceniza volante**", en lo sucesivo "LA OBRA", misma que constituye el trabajo de tesis que desarrolle para obtener el grado de **Ingeniero Civil** en ésta casa de estudios, y en tal carácter autorizo al Instituto Tecnológico de Sonora, en adelante "EL INSTITUTO", para que efectúe la divulgación, publicación, comunicación pública, distribución y reproducción, así como la digitalización de la misma, con fines académicos o propios del objeto del Instituto, es decir, sin fines de lucro, por lo que la presente autorización la extiendo de forma gratuita.

Para efectos de lo anterior, EL INSTITUTO deberá reconocer en todo momento mi autoría y otorgarme el crédito correspondiente en todas las actividades mencionadas anteriormente de LA OBRA.

De igual forma, libero de toda responsabilidad a EL INSTITUTO por cualquier demanda o reclamación que se llegase a formular por cualquier persona, física o moral, que se considere con derechos sobre los resultados derivados de la presente autorización, o por cualquier violación a los derechos de autor y propiedad intelectual que cometa el suscrito frente a terceros con motivo de la presente autorización y del contenido mismo de la obra.

  
\_\_\_\_\_  
**Misahel Palma Miranda**  
(Nombre y firma del autor)



**ITSON**

Educar para  
Trascender

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SONORA**

---

---

---

**“ESTUDIO DE RESISTENCIA A  
COMPRESIÓN EN MORTEROS DE  
CAL-CENIZA VOLANTE”**

**TESIS**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE**

**INGENIERO CIVIL**

**PRESENTA**

**MISAHUEL PALMA MIRANDA**

**CD. OBREGON, SON.**

**DICIEMBRE 2012**

## DEDICATORIA

Con mucho cariño a mi madre, María de Lourdes Miranda Cota, que me dió la vida y ha estado conmigo en todo momento. Gracias por todo mamá por darme una carrera para mi futuro y por creer en mí, aunque hemos pasado muchos momentos difíciles siempre ha estado a mi lado apoyándome y brindándome todo su amor y comprensión, por eso y por muchas cosas más le agradezco de corazón el que esté siempre a mi lado incondicionalmente.

A mi amada compañera de vida, mi esposa Carmen Alicia Méndez Anaya, por su apoyo y ánimo que me brinda día con día para alcanzar así nuevas metas, tanto profesionales como personales, además por compartir una de las bondades más maravilloso que la vida nos puede ofrecer, nuestra hija, Andrea Palma Méndez a quien siempre cuidaré y guiaré para así poder verla en un futuro convertida en una mujer capaz e independiente, que pueda valerse por sí misma, por ellas que son mi motivación día con día les dedico este triunfo.

¡A Toda mi familia!

A mis hermanos, amigos, por darme siempre su amistad, apoyo y por tantos momentos inolvidables que hemos pasado juntos.

## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios por permitirme llegar a esta etapa tan bonita de mi vida con salud y rodeado de personas que me aprecian y me brindan mucho cariño.

A mi maestro asesor. Dagoberto López López por guiarme con paciencia y dedicación gracias a su experiencia, brindándome su confianza y apoyo en la realización de mi tesis.

A todos mis maestros que formaron parte del conocimiento que poseo y las buenas vivencias que pasé con ellos, como también a mis amigos y compañeros de clases que me hicieron que todos estos años de esfuerzo pasarán como un abrir y cerrar de ojos, dejando experiencias y amistades.

A ITSON por darme la oportunidad de estudiar una carrera profesional.

## ÍNDICE

<b>DEDICATORIA .....</b>	<b>ii</b>
<b>AGRADECIMIENTOS .....</b>	<b>iii</b>
<b>ÍNDICE .....</b>	<b>iv</b>
<b>RESUMEN .....</b>	<b>6</b>
<b>CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN</b>	
<b>1.1 Antecedentes .....</b>	<b>8</b>
<b>1.2 Planteamiento del problema .....</b>	<b>10</b>
<b>1.3 Justificación .....</b>	<b>11</b>
<b>1.4 Objetivos .....</b>	<b>11</b>
<b>1.4.1 Objetivos generales .....</b>	<b>11</b>
<b>1.4.2 Objetivos específicos .....</b>	<b>12</b>
<b>1.5 Delimitación y Limitación .....</b>	<b>12</b>
<b>CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO</b>	
<b>2.1 Morteros .....</b>	<b>13</b>
<b>2.2 Cal .....</b>	<b>16</b>
<b>2.3 Cal viva .....</b>	<b>20</b>
<b>2.4 Cal apagada .....</b>	<b>21</b>
<b>2.4.1 Apagado espontaneo al aire .....</b>	<b>22</b>
<b>2.4.2 apagado por aspersion .....</b>	<b>22</b>
<b>2.4.3 Apagado por inmersión .....</b>	<b>22</b>
<b>2.4.4 apagado por fusión .....</b>	<b>22</b>
<b>2.4.5 Apagado en autoclaves .....</b>	<b>23</b>
<b>2.5 Tipos y usos .....</b>	<b>23</b>
<b>2.5.1 Cal grasa.....</b>	<b>24</b>
<b>2.5.2 Cales áridas y magras .....</b>	<b>24</b>
<b>2.5.3 Cales Hidráulicas .....</b>	<b>24</b>
<b>2.6 Puzolana .....</b>	<b>25</b>
<b>2.7 Clasificación de la ceniza .....</b>	<b>28</b>

2.7.1 Clasificación F cenizas .....	28
2.7.2 Clase C de cenizas volantes .....	28
2.8 Fuentes Relativas a la eliminación y el mercado.....	28
2.9 Densidad .....	29
2.9.1 Probeta graduada.....	30
2.10 Peso volumétrico .....	31
2.11 Cemento .....	32
2.11.1 Tipos de cemento .....	32
2.11.1.1 Cemento Portland .....	33
2.11.1.2 Cementos mezclados .....	35
2.11.1.3 Cemento fraguado rápido .....	36
2.11.1.4 Cemento aluminoso .....	37
2.11.2 Propiedades generales del cemento .....	38
2.11.3 Propiedades físicas del cemento de aluminato de calcio..	38
<b>CAPÍTULO III. MÉTODO Y MATERIALES</b>	
3.1 Metodología .....	40
3.2 Probetas y moldes.....	40
3.3 Mezclas .....	41
3.4 Pruebas de laboratorio.....	43
3.4.1 Procedimiento para determinar la densidad .....	44
3.4.2 Procedimiento para determinar la resistencia de especímenes .....	44
<b>CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b>	
4.1 Gráficas por familia.....	57
4.2 Pruebas finales .....	60
4.3 Pruebas complementarias.....	61
<b>CAPÍTULO V. CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES</b>	
5.1 Conclusiones .....	63
5.2 Recomendaciones .....	65
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>	<b>66</b>

## RESUMEN

Se realizó un estudio comparativo de morteros de cal, cemento y ceniza volante para determinar algunas propiedades físicas de ellos y posteriormente ser comparados.

Para este estudio se dispusieron de 3 tipos de materiales, cal (calidra), cemento Portland y ceniza volante (fly ash), éstos se mezclaron a diferentes porciones y se le aplicó una prueba que fue de resistencia a compresión simple.

La prueba se realizó para obtener la resistencia máxima que pueden desarrollar dichas muestras con sus diferentes dosificaciones y así encontrar la combinación mas adecuada.

Los especímenes estudiados para las pruebas de compresión se realizaron en nueve combinaciones diferentes con 2 ejemplares de cada uno con la misma cantidad de agua y diferentes porcentajes de cemento y ceniza volante. Los cilindros o especímenes fueron elaborados bajo las especificaciones de la norma Mexicana NMX-C-0610NNCCE-2001.

Los resultados obtenidos en cada una de las pruebas fueron analizados y comparados entre si para obtener los resultados para saber que combinación es más recomendable y cual es más desfavorable para la construcción.

## **CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN**

La cal es un material destacado y versátil, tiene una larga tradición de uso en la construcción, en la agricultura y en el tratamiento del agua y de residuos. Más recientemente ha sido empleada en numerosos procedimientos manufactureros, siendo los más notables la preparación de papel, azúcar, acero y ladrillos de silicato de calcio.

La historia no dice dónde empezó la práctica de la quema de piedra caliza para obtener cal viva. Sabemos que la civilización Cretense en el Mediterráneo utilizó la cal como mortero para albañilería hace más de tres mil años. En la China su utilización es de igual antigüedad: La Gran Muralla China contiene morteros de cal.

Está bien probado que la cal es un material apropiado y duradero para la construcción. El acueducto Pont du Gard en Nimes al Sur de Francia, construido en



el año 18 A.C. con mortero basado en cal hidráulica, es todavía impermeable. La excelencia del mortero se atribuye a la selección del material y también al tiempo empleado en apisonar la mezcla durante la construcción. Hasta el siglo XX, la cal fue el principal agente cementante empleado en la construcción de viviendas y era ampliamente aplicado en concretos, morteros y enlucidos. Fue también aprovechada como un acabado decorativo en muchos edificios.

Los diseños arquitectónicos y las obras civiles requieren actualmente materiales con mejores propiedades a la de los cementos más comunes en el mercado. Razón por la cual, el estudio experimental que se presenta en esta tesis es la comparación de la resistencia a la compresión de 9 mezclas y 124 especímenes de cal con diferentes dosificaciones de puzolana. Utilizando un método experimental de análisis de resultados, y los resultados son obtenidos mediante pruebas realizadas en el laboratorio de ingeniería civil en el Instituto Tecnológico de Sonora, unidad Nainari, en Ciudad Obregón Sonora.

Existen necesidades de conocer las variaciones que presentan morteros de cal, fabricados con diferentes porcentajes de puzolana, para así orientar al constructor a elegir la más conveniente en determinada situación de una construcción.

Las principales variaciones que pueden existir son las de mejor resistencia a la compresión el fraguado inicial y final de la cal, que pueden afectar la capacidad estructural de los elementos y el tiempo disponible para dar acabado a los elementos al ser trabajados.

## **1.1 ANTECEDENTES**

La cal es un recurso cuyo uso fue generalizado en la época prehispánica, fundamentalmente como material de construcción y para la nixtamalización. En la cuenca de México los afloramientos más importantes de rocas sedimentarias

utilizados para la producción de cal se encuentran al sureste de Cuernavaca y en la región de Tula, Atotonilco, Apaxco y Ajoloapan.

En esta región ha sido trascendental la explotación de las rocas calizas para la elaboración de cal, y al igual que otros recursos su importancia, usos y forma de explotación han variado a través del tiempo. Asimismo, la forma de acceso a este recurso ha variado de acuerdo con las entidades políticas dentro de las que se encontró inserta. No obstante que las primeras evidencias de explotación se ubican entre el 2500 a.C. - 200 d.C., y continúan a lo largo del apogeo de Teotihuacán, del 200 d.C. y el 600 d.C., es hasta que el Estado Tolteca inició la colonización del norte de la cuenca de México cuando se dió una mayor intensificación en la explotación de cal, del 850 al 1200 d.C. Cabe mencionar que se trataba de una sociedad estatal de tipo imperial, altamente estratificada, y que mantuvo el control de esta amplia zona de la cuenca a través de diversos sitios que se ubicaron estratégicamente cercanos a yacimiento de cantera, basalto, tezontle y caliza. A la caída de Tula, la región continuó densamente poblada y al parecer únicamente se abandonaron los sitios que cumplían funciones políticas y administrativas, dentro de las cuales estaba el control de los recursos naturales.

Las puzolanas son materiales silíceos o aluminio - silíceos a partir de los cuales se producía históricamente el cemento, desde la antigüedad Romana hasta la invención del cemento Portland en el siglo XIX. Hoy en día el cemento puzolánico se considera un ecomaterial.

El término se aplica popularmente a las áreas de frenado para salidas de pista durante competiciones automovilísticas, principalmente de fórmula 1, pues originalmente eran de puzolana, si bien hoy día se emplean otros materiales como grava calibrada de distinto origen.

La puzolana recibe su nombre de la población de Pozzuoli, en las faldas del Vesubio, donde ya en tiempos romanos era explotada para la fabricación de cemento puzolánico. Después el término fue extendiéndose a todos aquellos materiales que por sus propiedades similares a la Puzolana de origen natural pueden tener usos sustitutivos.

La civilización romana fue la que descubrió todo el potencial que estos materiales podían ofrecer. De esta forma uno de los mejores exponentes que podemos encontrar es el Panteón de Roma. Construido en el año 123, fue durante 1500 años la mayor cúpula construida, y con sus 43.3 metros de diámetro aun mantiene el record, como el de ser la mayor construcción de hormigón no armado que existe en el mundo. Para su construcción se mezcló cal, puzolana y agua; añadiendo en las partes inferiores ladrillos rotos a modo de los actuales áridos, aligerando el peso en las capas superiores usando materiales más ligeros como piedra pómez y puzolana no triturada.

## **1.2 Planteamiento del problema**

Existen varios factores que pueden influir en la realización de una obra civil, como un incorrecto plan de trabajo, así como el mal uso o aplicación de los materiales de construcción, en este último encontramos que la calidad con que se fabrican y la calidad de los productos o materia prima con que se elaboran estos materiales es muy importante, el presente trabajo está enfocado en el caso de la fabricación de morteros de cal para la elaboración de pasta para todos sus usos (enjarres, juntas) los cuales son fabricados para la construcción, a esta misma se le añade ceniza volante (fly ash), otro material que normalmente no es usado para su fabricación. Aunque la elaboración de estos puede ser un proceso poco complicado, muchas veces existen requisitos para su compra-venta como el alcanzar cierta resistencia y esta puede llegar a variar bastante si no se toman sus debidas precauciones.

### **1.3 Justificación**

La calidad de material con que se trabaja en una obra de ingeniería civil siempre ha tomado un papel muy importante en lo que a la construcción se refiere, ya que al tener una mayor calidad de material y un mejor desarrollo de propiedades mecánicas, como la resistencia a la compresión en nuestro caso, de este modo, se obtendrá una mayor ventaja sobre las otras construcciones, y por lógica un mayor mercadeo de este material sobre los otros productos.

Es por ellos que es de suma importancia la realización de este trabajo, ya que a través de éste, podremos darnos cuenta si el desarrollo y control de calidad con que se está llevando la fabricación de pastas es la adecuada, siendo los más beneficiados los integrantes o dueños de la empresa de venta de materiales, así como los clientes que adquieren estos productos y por qué no, las futuras personas a utilizar las obras civiles realizadas con estos mismos productos.

### **1.4 Objetivos**

#### **1.4.1 Objetivo general.**

Detectar la opción y cantidad óptima de materiales utilizados para la fabricación de probetas de mortero de cal a la hora de agregarle algún aditivo, en este caso la ceniza volcánica (puzolana), comparando muestras con distintos porcentajes de sus agregados, y así de este modo escoger que combinación es más apropiada para el ahorro de materia prima, sin afectar la resistencia a la compresión de dichas muestras.

### 1.4.2 Objetivos específicos

- ▶ Evaluar las propiedades físicas y mecánicas de los materiales y de las mezclas que constituyen estos materiales utilizados actualmente en las empresas de cal como es Grupo Calidra.
  
- ▶ Determinar un promedio de la capacidad de resistencia a la compresión alcanzada actualmente en los morteros fabricadas por la empresa Grupo Calidra.
  
- ▶ Comparar el promedio de resistencia a la compresión de las muestras de morteros de cal con diferentes porcentajes de ceniza volcánica. (Puzolana).

### 1.5 Delimitaciones y limitaciones

El estudio se limita al análisis del comportamiento de las probetas de cal, bajo la acción de ensayes a compresión en el laboratorio, considerando el uso de ceniza volcánica (fly ash) y misma cantidades de agua utilizadas a la hora de su fabricación. Este estudio solo será aplicable a la fabricación de muestras de morteros de cal elaborados con los mismos materiales utilizados por la empresa Grupo Calidra.

## **CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Morteros**

El mortero, es toda materia plástica que está compuesto por la mezcla de conglomerante inorgánicos como son: agua, aglutinante y arena, los cuales se utilizan para obra de albañilería como material de agarre, aplanados y repellados, revestimiento de pared, bloques para formar muros, hechura de registros, emboquillados y resanes, entortados y chaflanes en azoteas.

Ahora bien, estos pueden contener aglutinantes como:

- Cemento
- Cal
- Cemento de Albañilería o Mortero

Estos se pueden instalar aislada o combinadamente dependiendo del destino que tengan o el lugar de aplicación. Estos materiales deben de tener características como; arena gris de mina limpia, aglutinante y agua potable libre de sustancias orgánicas. Los morteros se pueden clasificar según el tipo de conglomerante en:

- ▶ Morteros de cal: está fabricado con cal, arena y agua. Esta cal puede ser tanto aérea como hidráulica. Los morteros de cal se caracterizan por: su plasticidad (Es la característica que define la manejabilidad o trabajabilidad del mortero. Depende de la consistencia de la mezcla, de la granulometría de la arena utilizada, de la cantidad de finos y del empleo de aditivos), color, y trabajabilidad en la aplicación (La trabajabilidad es determinada también por la graduación de los agregados, la proporción de los materiales y contenido de aire, el ajuste final a la trabajabilidad depende del contenido de agua).
  
- ▶ Morteros de cemento de aluminato de calcio Fabricados a base de cemento de aluminato de calcio, arena y agua. Ahora bien Si en este tipo de morteros la arena es del tipo refractaria obtenemos los morteros refractarios (Los morteros refractarios están diseñados para pegar los ladrillos refractarios y con ello dar una mayor estabilidad estructural a la instalación. se fabrican con materiales que les permiten soportar altas temperaturas sin degradarse, los ladrillos refractarios utilizados son de dos tipos, según su contenido de arcillas con sílices o alúminas. Sus características les permite soportar temperaturas muy elevadas, aunque ambos se comportan de diferente manera.
  
- ▶ Morteros bastardos de cemento de base Portland y cal aérea. Son morteros compuestos por dos clases de conglomerantes compatibles, es decir, cemento

y cal. Se caracterizan por su alta trabajabilidad, comunicada por la cal, presenta colores claros por lo que se utilizan como mortero de agarre en fábricas de ladrillo cara vista.

- ▶ También se puede clasificar en Morteros de cemento Portland ya que utiliza cemento como conglomerante.

Ahora bien existen morteros especiales como son:

- ▶ Morteros de cemento-cola. Son morteros fabricados con un conglomerante a base de mezclas de cemento de base, éstos necesitan poca agua para su amasado y endurecen rápidamente.
- ▶ Morteros ligeros. Se emplean en cubiertas planas para dar pendiente a los faldones.
- ▶ Morteros sin finos. Se utilizan principalmente para la fabricación de piezas de mortero aligerado y para pavimentos filtrantes.
- ▶ Morteros ignífugos. Se emplean para revestir estructuras metálicas, formadas por elementos de acero, o cualquier otro elemento al que se le tenga que proporcionar resistencia al fuego.



- ▶ Por otra parte; los morteros que tienen poca cantidad de cemento son los llamados morteros pobres o ásperos, estos morteros son muy difíciles de trabajar.
  
- ▶ Ahora bien los morteros que son capaces de soportar temperaturas elevadas sin corroerse o debilitarse por el entorno son llamados Morteros refractarios, ejemplo de este tipo de cementos se distingue las cerámicas. Los refractarios típicos están mezclados por diferentes partículas gruesas de óxido unidas con un material refractario más fino.

## 2.2 Cal

La cal es un óxido de calcio que se obtiene de la calcinación de rocas calizas, su proceso de elaboración consiste, explicado de forma general, en hacer maleable un material que en su forma natural no lo es. Se inicia con la extracción de rocas calizas en las canteras, para posteriormente quemarlas, dando como resultado la cal viva. Ésta se mezcla con agua para obtener la cal apagada o hidratada y de esta forma darle el uso para el que esté destinada. El proceso de producción es descrito por Sahagún de la forma siguiente:

Como escribe el cronista Sahagún, el proceso de producción inicia en los yacimientos de calizas en los que se extrae la roca, que se traslada a las caleras para ser quemada. Al quemar la roca ( $\text{CaCO}_3$ ) se libera dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) quedando óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ). Debido a la inestabilidad de este último, de inmediato reacciona con el oxígeno ( $\text{O}_2$ ), con lo cual se produce cal viva ( $\text{CaO}_2$ ), que es el resultado de la calcinación de la roca caliza original. Durante el enfriamiento las rocas empiezan a absorber agua, proceso que se acelera agregando agua a las piedras, es lo que se conoce como apagado, con lo cual se obtiene cal apagada

(Ca[OH]<sub>2</sub>). Finalmente, se deja reposar en los contenedores en los que se apagó por una o dos semanas, después de lo cual está lista para utilizarse.

Las actividades involucradas en el proceso de producción de cal en síntesis son las siguientes: extracción de la caliza, quema de la piedra, apagado de la cal y almacenamiento. Estas actividades se realizan en diversos lugares y cada una requiere de instrumentos específicos que, en ocasiones, se encuentran descritos en los documentos históricos, y en otras se cuenta con registros arqueológicos y etnográficos.

La elaboración de la cal se inicia con la extracción de la piedra caliza en las canteras, sobre el proceso de trabajo de la piedra en general el cantero tiene fuerzas y es recio, ligero y diestro en labrar y aderezar cualquiera piedra. El buen cantero es buen oficial, entendido y hábil en labrar la piedra, en desbastar, esquinar y hender con la cuña, hacer arcos, esculpir y labrar la piedra artificiosamente, Otra forma de obtener la piedra caliza es recogiendo piedras pequeñas de entre 20 y 30 cm de diámetro, que se encuentran en los terrenos, sin necesidad de picar la piedra. Durante la Colonia ésta parece haber sido la forma más generalizada, y posiblemente en la época prehispánica coexistieron ambas técnicas.

Posteriormente se continúa con el quemado de la piedra en caleras, es decir en el lugar en el que se quema la piedra caliza.

Para la época prehispánica se han encontrado al menos tres tipos de caleras: hogueras abiertas, fosos y hornos.

Las hogueras abiertas son caleras al aire libre que consisten en la construcción de una pila de ramas acomodadas en un radio de 2.5 m y que llega a alcanzar los dos

metros de altura, las piedras de caliza se acomodan entre las ramas y la pila se quema calcinando las rocas.

Las evidencias arqueológicas de la utilización de estas caleras son las siguientes: tierra quemada, cenizas, residuos de carbón y residuos de calizas.

El inconveniente de esta técnica es que la quema al aire libre requiere de mayor cantidad de energía, lo que implica más combustible y por ende un incremento del trabajo ya que se tiene que cortar y transportar más leña. La cantidad de cal producida por estas caleras depende del tamaño de la pira; por ejemplo una con las dimensiones arriba descritas produce alrededor de 11.33 m<sup>3</sup> de cal.

Un ejemplo de este tipo de caleras se ha localizado en el sitio arqueológico de Copán, ubicado en las tierras bajas mayas en Honduras, para el 650-1150 d.C.

Los hornos son estructuras arquitectónicas de piedra o arcilla, constituidos por una cámara o laboratorio provisto de una boca-respiradero y destinado a efectuar la cocción. Dentro de los hornos que se han encontrado para la cocción de la cerámica se han identificado hornos similares a los descritos anteriormente como fosos y que se denominan hornos abiertos sin embargo, se pueden distinguir de los fosos por sus dimensiones puesto que su diámetro varía entre los 2 y los 8 m y los fosos tienen generalmente un diámetro menor a 2 m. Además los hornos abiertos suelen estar contruidos de piedra, a diferencia de los fosos que generalmente están excavados sobre el suelo sin ningún acabado.

En Zapotitlán las Salinas, Puebla, Castellón ha encontrado hornos de forma circular con un diámetro de entre 1.5 y 2 m, que se excavan a los lados de barrancos y que en la parte baja tienen dos orificios, uno para introducir la leña y otro para retirar los desechos. Aunque estos hornos presentan acabado de piedras su elaboración es

muy compleja ya que las piedras que se van a quemar se acomodan formando una campana que permite una mejor combustión, además el horno se tapa con una capa de piedras que impide que se pierda calor. Esta tecnología, reportada para la época actual, posiblemente es de origen hispano, pero no se puede descartar que existiera en la época prehispánica.

Los hornos de piedra se hacen excavando pozos de forma circular en la tierra, que posteriormente son recubiertos con piedra. En el sitio arqueológico de Chalcatzingo, Morelos, del 1500-200 a.C., se localizaron tres hornos de este material, el mayor de los cuales era subterráneo, de forma circular, con un diámetro de 2.8 m a 3.1 m, y una profundidad de 2.3 m. Estaba construido con piedras ligeramente trabajadas, unidas con barro. Asociadas con este horno se encontraron restos de rocas calizas en distintos grados de calcinación, tierra quemada, cenizas y carbón, además de que las paredes del mismo estaban quemadas. Los otros dos hornos eran de menores dimensiones, uno con un diámetro de 2 m. y el otro de 1.2 m. ambos con una profundidad de 1 m.

El principal usos de la cal es el de la construcción ya que es la base para la elaboración de estucos y morteros. El estuco es un acabado que se le aplicaba a diversos elementos arquitectónicos como pisos, muros y techos. El mortero es la cal mezclada con arena o tierra utilizada como aglutinante en las construcciones de piedra.

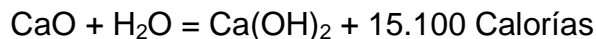
La nixtamalización es un proceso de precocción alcalina del maíz que permite que se desprendan los almidones y proteínas del grano seco para obtener la masa. Después de la cocción, el nixtamal se lava para eliminar el exceso de cal y se muele para obtener la masa. Los productos elaborados con esta masa eran y lo siguen siendo en la actualidad, una fuente de proteínas, calorías y calcio.

La cal es un material de construcción que se ha utilizado desde tiempos inmemoriales, ha sido indispensable tanto para la construcción de edificios como para la ornamentación en la arquitectura tradicional, pudiendo así disfrutar hoy en día de construcciones milenarias que han resistido el paso del tiempo gracias al uso de este noble material.

La cal se fabrica a partir de la piedra caliza, cociéndola a más de 900°C, desprendiéndose CO<sub>2</sub> y obteniéndose óxido de cal o cal viva. Para su utilización en la construcción o en la decoración, se hidrata y apaga obteniéndose la cal apagada presentándose en forma de pasta de cal.

### **2.3 Cal Viva**

Al óxido de calcio se llama también cal viva, siendo un producto sólido de color blanco, amorfo aparente pues cristaliza en el sistema regular, cuando se funde a 2570°C con un peso específico en torno a 3.18 – 3.40, según sea cocida a baja o alta temperatura respectivamente, inestable por tener gran avidez para el agua con la que reacciona de la siguiente manera.



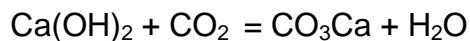
Produciendo hidróxido de calcio (Ca(OH)<sub>2</sub>) o cal apagada desprendiéndose calor, elevando la temperatura a unos 160°C, pulverizándose y aumentando considerablemente de volumen aparente. Esta avidez para el agua es tan grande que absorbe el vapor de agua de la atmósfera y la de las sustancias orgánicas, produciendo efectos cáusticos.

El hidróxido de calcio es un cuerpo sólido, blando, amorfo, polvoriento, algo soluble en agua, 1.23 por litro a 20°C, a la que identifica un color blanco (agua de cal o

lechada), y en mayor cantidad forma con ella una pasta muy trabada, fluida y untuosa llamada cal apagada.

## 2.4 Cal Apagada

La cal apagada en pasta tiene la propiedad de endurecerse lentamente en el aire, enlazando los cuerpos sólidos, por lo cual se emplea como aglomerante. Este endurecimiento recibe el nombre de fraguado, y es debido primeramente a una desecación por evaporación del agua con la que se forma la pasta, y después a una carbonatación por absorción del anhídrido carbónico del aire



Formándose carbonato cálcico y agua, reconstituyendo la caliza de que se partió.

Esta reacción es muy lenta, pues empieza a las veinticuatro horas de amasar la pasta y termina al cabo de los seis meses, por lo que las obras en que se emplea tarda mucho en secarse y adquirir la solidez definitiva, se verifica solo en aire seco, en el aire húmedo con mucha dificultad, y no se realiza dentro del agua pues la disuelve, por lo tanto la cal no sirve para obras hidráulicas.

Por otro lado al fraguar experimenta una contracción o disminución de volumen, que unida a la que experimenta por el peso propio de la obra produce asentamientos y grietas.

#### **2.4.1 Apagado Espontaneo al Aire**

Consiste en extender los terrones de cal viva sobre una superficie plana resguardada de la lluvia, exponiéndola a la acción del vapor del agua de la atmosfera para que la absorba. Esta transformación requiere unos tres meses y tiene el inconveniente de que absorbe también el anhídrido carbónico, carbonatándose también el anhídrido carbónico con lo cual no da buenos resultados.

#### **2.4.2 Apagado por Aspersión**

Se riega con una regadera o pulverizador a la cal extendida sobre una superficie en capas, con una cantidad entorno al 25 – 50%.

#### **2.4.3 Apagado por Inmersión**

Fragmentados los terrones de cal viva al tamaño de nueces, se colocan en cestos de mimbre o introducen durante un minuto en agua, hasta que se produzca un principio de efervescencia. Se sacan los cestos y se vierte el contenido en cajas o montones para que se reduzca a polvo.

#### **2.4.4 Apagado por Fusión**

Este procedimiento es el que suele emplearse a pie de obra y según la importancia de ésta se hace en mayor o menor cantidad. Para pequeños volúmenes se

introducen los terrones de cal viva en un cráter practicado sobre el mentón de arena que ha de formar la argamasa y después se vierte unas tres veces su volumen de agua, para obtener pasta y en mayor proporción si ha de ser lechada, la cal en pasta se obtiene en albercas de madera, mampostería y mejor, en pozos excavados en el suelo sin revestir, para que las paredes absorban el agua en exceso que disuelve las sales que pueda llevar. La cantidad de agua empleada se determina empezando por un peso igual al de la cal y revolviéndolo se añade otra cantidad igual o mayor que viene indicada por la aparición de grietas de un centímetro de ancho en la superficie.

#### **2.4.5 Apagado en Autoclaves**

Este procedimiento consiste en introducir la cal viva en terrones en unos grandes autoclaves, inyectando vapor de agua a presión durante un tiempo que varía con su capacidad, permitiendo el apagado en poco tiempo. Se puede apreciar que por este procedimiento se obtiene una cal mucho más plástica que la que se apaga a la presión atmosférica, lo que permite obtener enlucidos más fáciles de extender con llama.

### **2.5 Tipos y Usos**

La cal, como material de construcción, constituye el aglomerante más antiguo y sencillo para la preparación de morteros. Es muy común en la naturaleza y su obtención es sumamente sencilla, frente al resto de los materiales.

Hay muchas clasificaciones de la cal, atendiendo a sus propiedades físicas, químicas, constructivas. Para construir con cal es suficiente saber que según la naturaleza de la cal (el origen de la roca calcárea de la que proviene) podemos distinguir tres grandes grupos de cales.



### **2.5.1 Cal Grasa**

Si la caliza primitiva contiene hasta 5% de arcilla, la cal que se produce al calcinarse se le denomina cal grasa y al apagarse da una pasta fina trabada y untuosa, blanca, que aumenta mucho su volumen, permaneciendo indefinidamente blanda en sitios húmedos y fuera del contacto del aire, y en el agua termina por disolverse.

### **2.5.2 Cales Áridas o Magras**

Son las que proceden de calizas que aun teniendo menos de 5% de arcilla, contiene además magnesia en proporción superior al 10% (dolomías). Al añadirles agua forman una pasta gris poco trabada, que se endurece menos y desprende más calor que las cales grasas. Al secarse en el aire se reducen a polvo, y en el agua se deslíen y disuelven. Por esas malas cualidades no se usan en construcción.

### **2.5.3 Cales Hidráulicas**

Proceden de la calcinación de calizas que contienen más de 5% de arcilla, dan un producto que reúne además de las propiedades de las cales grasa, la de poder endurecer y consolidar en sitios húmedos y bajo del agua.

VICAT hizo una clasificación de los productos hidráulicos teniendo en cuenta el tiempo de fraguado y medio de conservación.

**Tabla 1.** Clasificación de Productos Hidráulicos

Naturaleza de los productos	Índice hidráulico	% de arcilla en la caliza primitiva	Tiempo de fraguado en agua	Observaciones
Cal grasa y magra	0.0 - 0.10	0.0 - 5.3	>>	Fraguan solo en el aire
Cal poco hidratada	0.10 - 0.16	5.3 - 8.2	16 - 30	Días
Cal medianamente hidratada	0.16 - 0.31	8.2 - 14.8	10 - 15	Días
Cal propiamente hidratada	0.31 - 0.42	14.8 - 19.1	5 - 9	Días
Cal eminentemente hidratada	0.42 - 0.50	19.2 - 21.8	2 - 4	Días
Cal límite o cemento lento	0.50 - 0.65	21.8 - 26.7	1 - 12	Horas
Cemento rápido	0.65 - 1.20	26.7 - 40.0	5 - 15	Minutos

## 2.6 Puzolana

Las cenizas volantes es uno de los residuos generados en la combustión , y comprende las partículas finas que se elevan con los gases de combustión . Ash, que no se levanta se llama las cenizas de fondo . En un contexto industrial, las

cenizas volantes se refieren generalmente a la ceniza producida durante la combustión de carbón. Las cenizas volantes es generalmente capturado por precipitadores electrostáticos u otros equipos de partícula de filtración antes de llegar a los gases de combustión de las chimeneas de plantas eléctricas de carbón, y junto con las cenizas de fondo retirado de la parte inferior del horno es en este caso conjuntamente conocido como ceniza de carbón. Dependiendo de la fuente y el maquillaje del carbón se quema, los componentes de la ceniza volante variar considerablemente, pero todas las cenizas volantes incluye cantidades sustanciales de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ) (tanto amorfo y cristalino) y óxido de calcio ( $\text{CaO}$ ), siendo ambos endémicas ingredientes de muchos que contienen carbón (estratos de roca).

Los componentes tóxicos específicos dependerán de la composición de lecho de carbón, pero puede incluir una o más de los siguientes elementos o sustancias en cantidades de trazas a varios puntos porcentuales: arsénico, berilio, boro, cadmio, cromo, cromo VI, cobalto, plomo, manganeso, mercurio, molibdeno, selenio, estroncio, talio y vanadio, junto con las dioxinas.

En el pasado, las cenizas volantes fue puesto en libertad por lo general en la atmósfera, pero el equipo de control de contaminación el mandato en las últimas décadas exigen ahora que se capturaron antes de su liberación. En la EE.UU., cenizas volantes se almacenan generalmente en centrales térmicas de carbón o en vertederos. Alrededor del 43 por ciento se recicla, se utiliza a menudo para complementar el cemento Portland en la producción de hormigón. Algunos han expresado preocupaciones sobre la salud acerca de esto.

En algunos casos, como la quema de los residuos sólidos para generar electricidad ("instalaciones de recuperación de recursos", alias residuos de energía), las cenizas

volantes pueden contener altos niveles de contaminantes y la ceniza de fondo, juntos traen los niveles proporcionales de los contaminantes dentro del rango para calificar como residuos no peligrosos en un estado determinado, mientras que, sin mezclar, las cenizas volantes estaría dentro del rango para calificar como residuos peligrosos.

La ceniza volante material se solidifica mientras está suspendido en los gases de escape y se recoge por precipitadores electrostáticos o bolsas de filtro. Dado que las partículas se solidifican mientras están suspendidas en los gases de escape, partículas de cenizas volantes son generalmente esféricas en forma y varían en tamaño desde 0,5 micras a 100 micras. Se componen principalmente de dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), que está presente en dos formas: amorfo, que es redondeado y suave, y cristalino, que es puntiaguda, y peligrosos; óxido de aluminio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ). Las cenizas volantes son generalmente muy heterogéneo, compuesto de una mezcla de partículas cristalinas con diversas fases identificables cristalinas tales como cuarzo, mullita, y diversos óxidos de hierro.

Las concentraciones por encima de elementos varían según el tipo de carbón quemado para formarlos. De hecho, en el caso del carbón bituminoso, con la notable excepción de boro, las concentraciones de elementos traza son generalmente similares a las concentraciones de elementos traza en suelos contaminados.

Dos clases de cenizas volantes son definidos por la norma ASTM C618: Clase F cenizas volantes y cenizas volantes Clase C. La diferencia principal entre estas clases es la cantidad de calcio, sílice, alúmina, y el contenido de hierro en la ceniza. Las propiedades químicas de las cenizas volantes son en gran parte influenciada por la composición química del carbón que se quema (es decir, antracita, bituminoso y lignito).

## **2.7 Clasificación de la Ceniza**

### **2.7.1 Clase F cenizas**

La quema de más difícil, antracita y carbón bituminoso más típicamente produce la clase F cenizas volantes. Esta ceniza volante es puzolánico en la naturaleza, y contiene menos del 20% de cal(CaO). La posesión de propiedades puzolánicas, la sílice y alúmina vítrea de las cenizas volantes Clase F requiere un agente de cementación, tal como cemento Portland, cal viva, o cal hidratada, con la presencia de agua con el fin de reaccionar y producir compuestos cementosos. Alternativamente, la adición de un activador químico tal como silicato sódico (vidrio soluble) a una ceniza clase F puede conducir a la formación de un geopolímeros.

### **2.7.2 Clase C de cenizas volantes**

Las cenizas volantes producidas por la quema de menor lignito o carbón sub-bituminoso, además de tener propiedades puzolánicas, también tiene algunas propiedades auto-cementación. En presencia de agua, Clase C ceniza volante se endurecerá y ganar fuerza con el tiempo. Clase C ceniza volante generalmente contiene más de 20% de cal (CaO). A diferencia de la clase F, la auto-ceniza volante clase C no requiere de un activador. Alcalinos y sulfato (SO<sub>4</sub>) son generalmente más altos contenidos en las cenizas volantes de la Clase C.

## **2.8 Fuentes relativas a la eliminación y el mercado**

En el pasado, las cenizas volantes producidas por la combustión de carbón fue arrastrada simplemente en los gases de combustión y se dispersa en la

atmósfera. Esto creó preocupaciones ambientales y de salud que llevaron a las leyes que han reducido las emisiones de cenizas volar a menos de 1 por ciento de ceniza producida. A nivel mundial, más del 65% de las cenizas volantes producidos a partir de las centrales eléctricas de carbón se dispone en rellenos sanitarios y lagunas de cenizas .

**Tabla 2.** Composición Química y Clasificación

<b>Componente</b>	<b>Bituminoso</b>	<b>Sub-bituminoso</b>	<b>Lignito</b>
<b>SiO<sub>2</sub> (%)</b>	20-60	40-60	15-45
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b>	5-35	20-30	20-25
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (%)</b>	10-40	10.04	15.04
<b>CaO (%)</b>	12.01	05.30	15-40
<b>LOI (%)</b>	0-15	0-3	0-5

## 2.9 Densidad

En física y química, la densidad (símbolo  $\rho$ ) es una magnitud escalar referida a la cantidad de masa contenida en un determinado volumen de una sustancia. Es la relación entre la masa de un cuerpo y el volumen que ocupa, Según una conocida anécdota, Arquímedes recibió el encargo de determinar si el orfebre de Hierón II de Siracusa defalcaba el oro durante la fabricación de una corona dedicada a los dioses, sustituyéndolo por otro metal más barato (proceso conocido como aleación).

Arquímedes sabía que la corona, de forma irregular, podría ser aplastada o fundida en un cubo cuyo volumen se puede calcular fácilmente comparado con la masa. Pero el rey no estaba de acuerdo con estos métodos, pues habrían supuesto la destrucción de la corona.

Desconcertado, Arquímedes se dio un relajante baño de inmersión, y observando la subida del agua caliente cuando él entraba en ella, descubrió que podía calcular el volumen de la corona de oro mediante el desplazamiento del agua.

La densidad o densidad absoluta es la magnitud que expresa la relación entre la masa y el volumen de una sustancia. Su unidad en el Sistema Internacional es kilogramo por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ ), aunque frecuentemente también es expresada en  $\text{g/cm}^3$ . La densidad es una magnitud intensiva.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Siendo  $\rho$ , la densidad;  $m$ , la masa; y  $V$ , el volumen de la sustancia.

### **2.9.1 Probeta Graduada**

Para determinar la densidad los materiales se utilizo el principio de liquido desalojado teniendo como herramienta una probeta graduada con la cual se encuentra en el laboratorio de ingeniería civil, se utilizo esta herramienta ya que es precisa y sencilla

de utilizar, la probeta o cilindro graduable es un instrumento volumétrico, hecho de vidrio, que permite medir volúmenes considerables con un ligero grado de inexactitud. Sirve para contener líquidos.

Está formado por un tubo generalmente transparente de unos centímetros de diámetro y tiene una graduación (una serie de marcas grabadas) desde 0 ml (hasta el máximo de la probeta) indicando distintos volúmenes. En la parte inferior está cerrado y posee una base que sirve de apoyo, mientras que la superior está abierta (permite introducir el líquido a medir) y suele tener un pico (permite verter el líquido medido). Generalmente miden volúmenes de 25 ó 50 ml, pero existen probetas de distintos tamaños; incluso algunas que pueden medir un volumen hasta de 2000 ml.

### **2.10 Peso Volumétrico**

En los agregados se conoce como peso volumétrico al peso del agregado que llenaría un recipiente de volumen unitario, un peso volumétrico alto señala que queda muy pocos huecos por llenar del recipiente entre cada una de las partículas. Está claro que el peso volumétrico depende de que tan bien se ha comprimido el agregado, por lo tanto el peso volumétrico depende del tamaño distribuido y forma de las partículas de este mismo agregado, las partículas de un mismo tamaño se pueden comprimir hasta cierto límite, pero las pequeñas se pueden acomodar entre los huecos de las más grandes, aumentando así el peso volumétrico del material o agregado.



## 2.11 Cemento

Desde la antigüedad se emplearon pastas y morteros elaborados con arcilla o greda, yeso y cal para unir mampuestos en las edificaciones. Fue en la Antigua Grecia cuando empezaron a usarse tobas volcánicas extraídas de la isla de Santorini, los primeros cementos naturales.

En el siglo I a. C. se empezó a utilizar el cemento natural en la Antigua Roma, obtenido en Pozzuoli, cerca del Vesubio. La bóveda del Panteón es un ejemplo de ello. En el siglo XVIII John Smeaton construye la cimentación de un faro en el acantilado de Edystone, en la costa Cornwall, empleando un mortero de cal calcinada. El siglo XIX, Joseph Aspdin y James Parker patentaron en 1824 el Portland Cement, denominado así por su color gris verdoso oscuro similar a la piedra de Portland. Isaac Johnson, en 1845, obtiene el prototipo del cemento moderno, con una mezcla de caliza y arcilla calcinada a alta temperatura.

En el siglo XX surge el auge de la industria del cemento, debido a los experimentos de los químicos franceses Vicat y Le Chatelier y el alemán Michaélis, que logran cemento de calidad homogénea; la invención del horno rotatorio para calcinación y el molino tubular y los métodos de transportar hormigón fresco ideados por Juergen Heinrich Magens que patenta entre 1903 y 1907.

### 2.11.1 Tipos de cemento

Se pueden establecer dos tipos básicos de cementos:

1. de origen arcilloso: obtenidos a partir de arcilla y piedra caliza en proporción 1 a 4 aproximadamente.

2. de origen puzolánico: la puzolana del cemento puede ser de origen orgánico o volcánico.

Existen diversos tipos de cemento, diferentes por su composición, por sus propiedades de resistencia y durabilidad, y por lo tanto por sus destinos y usos.

#### **2.11.1.1 El cemento Portland**

El cemento es el más utilizado como aglomerante para la preparación del hormigón es el cemento Portland, producto que se obtiene por la pulverización del clinker Portland con la adición de una o más formas de yeso (sulfato de calcio). Se admite la adición de otros productos siempre que su inclusión no afecte las propiedades del cemento resultante. Todos los productos adicionales deben ser pulverizados conjuntamente con el clinker. Cuando el cemento Portland es mezclado con el agua, se obtiene un producto de características plásticas con propiedades adherentes que solidifica en algunas horas y endurece progresivamente durante un período de varias semanas hasta adquirir su resistencia característica. El proceso de solidificación se debe a un proceso químico llamado hidratación mineral. Este material es usado en particular para el revestimiento externo de edificios.

#### **Normativa**

La calidad del cemento Portland deberá estar de acuerdo con la norma ASTM C 150. En México debe estar de acuerdo con la norma NMX-414-ONNCCE. En México los cementos vienen regulados por la Industria de la Construcción-Cementos Hidráulicos-Especificaciones y Métodos de Prueba.

- **Cementos Portland especiales**

Los cementos Portland especiales son los cementos que se obtienen de la misma forma que el Portland, pero que tienen características diferentes a causa de variaciones en el porcentaje de los componentes que lo forman.

- a. Portland férrico**

El Portland férrico está caracterizado por un módulo de fundentes de 0.64. Esto significa que este cemento es muy rico en hierro. En efecto se obtiene introduciendo cenizas de pirita o minerales de hierro en polvo, además de una mayor presencia de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (óxido ferroso), una menor presencia de  $3\text{CaOAl}_2\text{O}_3$  (Aluminato) cuya hidratación es la que desarrolla más calor. Por este motivo estos cementos son particularmente apropiados para ser utilizados en climas cálidos. Los mejores cementos férricos son los que tienen un módulo calcáreo bajo, en efecto estos contienen una menor cantidad de  $3\text{CaOSiO}_2$  (Silicato tricálcico), cuya hidratación produce la mayor cantidad de cal libre ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) (Hidróxido de Calcio).

- b. Cementos blancos**

Contrariamente a los cementos férricos, los cementos blancos tienen un módulo de fundentes muy alto, aproximadamente 10. Estos contienen por lo tanto un porcentaje bajísimo de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (Óxido Ferroso). El color blanco es debido a la falta del hierro que le da una tonalidad grisácea al Portland normal y un gris más oscuro al cemento férrico. La reducción del  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (Óxido Ferroso) es compensada con el agregado

de fluorita ( $\text{CaF}_2$ ) y de criolita ( $\text{Na}_3\text{AlF}_6$ ), necesarios en la fase de fabricación en el horno para bajar la calidad del tipo de cemento.

#### **2.11.1.2 Cementos mezclados**

Los cementos mezclados se obtienen agregando al cemento Portland normal otros componentes como la puzolana. El agregado de estos componentes le da a estos cementos nuevas características que lo diferencian del Portland normal.

- **Cemento puzolánico**

La puzolana es una piedra de naturaleza ácida, muy reactiva, al ser muy porosa y puede obtenerse a bajo precio. Un cemento puzolánico contiene aproximadamente:

- 55-70% de clinker Portland
- 30-45% de puzolana
- 2-4% de yeso

Puesto que la puzolana se combina con la cal ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ), se tendrá una menor cantidad de esta última. Pero justamente porque la cal es el componente que es atacado por las aguas agresivas, el cemento puzolánico será más resistente al ataque de éstas. Este cemento es por lo tanto adecuado para ser usado en climas particularmente calurosos o para coladas de grandes dimensiones. Se usa principalmente en elementos en las que se necesita alta impermeabilidad y durabilidad.

- **Cemento siderúrgico**

La puzolana ha sido sustituida en muchos casos por la ceniza de carbón proveniente de las centrales termoeléctricas, escoria de fundiciones o residuos obtenidos calentando el cuarzo. Estos componentes son introducidos entre el 35 hasta el 80%. El porcentaje de estos materiales puede ser particularmente elevado, siendo que se origina a partir de silicatos, es un material potencialmente hidráulico. El cemento siderúrgico tiene mala resistencia a las aguas agresivas y desarrolla más calor durante el fraguado. Otra característica de estos cementos es su elevada alcalinidad natural, que lo rinde particularmente resistente a la corrosión atmosférica causada por los sulfatos. Tiene alta resistencia química, de ácidos y sulfatos, y una alta temperatura al fraguar.

#### **2.11.1.3 Cemento de fraguado rápido**

El cemento de fraguado rápido, también conocido como "cemento romano ó prompt natural", se caracteriza por iniciar el fraguado a los pocos minutos de su preparación con agua. Se produce en forma similar al cemento Portland, es apropiado para trabajos menores, de fijaciones y reparaciones, no es apropiado para grandes obras porque no se dispondría del tiempo para efectuar una buena colada. Aunque se puede iniciar el fraguado controlado mediante retardantes naturales como el ácido cítrico, pero aun así si inicia el fraguado aproximadamente a los 15 minutos (a 20 °C). La ventaja es que al pasar aproximadamente 180 minutos de iniciado del fraguado, se consigue una resistencia muy alta a la compresión (entre 8 a 10 MPa), por lo que se obtiene gran prestación para trabajos de intervención rápida y definitivos. Hay cementos rápidos que pasados 10 años, obtienen una resistencia a la compresión superior a la de algunos hormigones armados (mayor a 60 MPa).

#### 2.11.1.4 Cemento aluminoso

El cemento aluminoso se produce principalmente a partir de la bauxita con impurezas de óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), óxido de titanio ( $\text{TiO}_2$ ) y óxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ). Adicionalmente se agrega óxido de calcio o bien carbonato de calcio. El cemento aluminoso también recibe el nombre de cemento fundido, pues la temperatura del horno alcanza hasta los  $1,600\text{ }^\circ\text{C}$ , con lo que se alcanza la fusión de los componentes. El cemento fundido es colado en moldes para formar lingotes que serán enfriados y finalmente molidos para obtener el producto final.

El cemento aluminoso tiene la siguiente composición de óxidos:

- 35-40% óxido de calcio
- 40-50% óxido de aluminio
- 5% óxido de silicio
- 5-10% óxido de hierro
- 1% óxido de titanio

Su composición completa es:

- 60-70%  $\text{CaOAl}_2\text{O}_3$
- 10-15%  $2\text{CaOSiO}_2$
- $4\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{Fe}_2\text{O}_3$
- $2\text{CaOAl}_2\text{O}_3\text{SiO}_2$

Por lo que se refiere al óxido de silicio, su presencia como impureza tiene que ser menor al 6 %, porque el componente al que da origen, tiene pocas propiedades hidrófilas (poca absorción de agua).

### **2.11.2 Propiedades generales del cemento**

- Buena resistencia al ataque químico.
- Resistencia a temperaturas elevadas. Refractario.
- Resistencia inicial elevada que disminuye con el tiempo. Conversión interna.
- Se ha de evitar el uso de armaduras. Con el tiempo aumenta la porosidad.
- Uso apropiado para bajas temperaturas por ser muy exotérmico.

### **2.11.3 Propiedades físicas del cemento de aluminato de calcio**

- Fraguado: Normal 2-3 horas.
- Endurecimiento: muy rápido. En 6-7 horas tiene el 80% de la resistencia.
- Estabilidad de volumen: No expansivo.
- Calor de hidratación: muy exotérmico.

### **CAPÍTULO III. MÉTODO Y MATERIALES**

En este capítulo se muestra el procedimiento a seguir para la recopilación de información y pruebas realizadas en el laboratorio para realizar la investigación de la pasta realizada con Cal, Cemento y Fly Ash.

Esta investigación se realizó en Ciudad Obregón Sonora en el periodo de agosto 2011 a febrero 2012, en las instalaciones del Instituto Tecnológico de Sonora (ITSON) campus Náinari. Las pruebas de laboratorio realizadas para el análisis de materiales como son (pesos específicos, densidad, pesos volumétricos y dosificaciones), así como los ensayos de compresión simple en las muestras obtenidas fueron procedimientos elaborados en las instalaciones del Laboratorio de Ingeniería Civil en el área de Concretos.



### **3.1 Metodología**

La metodología para la elaboración de este estudio fue el siguiente:

1. Análisis de las propiedades físicas y mecánicas de los agregados (pruebas de laboratorio), mismos que se utilizaron para la elaboración de los especímenes de prueba.
2. Obtener la dosificación óptima de los componentes que integran casa mezcla.
3. Elaboración, curado y ensaye de especímenes geometría cilíndrica de un peralte 2 pulgadas y 2 pulgadas de diámetro, para un ensayo a 3, 7, 14, 21, 28, 60, 90 días para una prueba de compresión simple.
4. Reportar los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio.
5. En base al análisis e interpretación de resultados obtenidos, se realiza las conclusiones y recomendaciones pertinentes.

Es importante aclarar que los estudios realizados en el laboratorio fueron de manera manual de la misma forma se utilizaron los recursos disponibles con los que cuenta en laboratorio de ingeniería civil.

### **3.2 Probetas y moldes**

Las probetas elaboradas son en moldes de policloruro de vinilo o mejor conocido por sus siglas (PVC) de forma geométrica cilíndrica de dimensiones de 2 pulgadas de peralte por 2 pulgadas de diámetro recortados de un tramo de tubo con la cierra

circula que se encuentra en el laboratorio de ingeniería civil para lograr así tener cortes más finos y de mayor precisión obteniendo un total de 126 moldes los cuales fueron lubricados con aceite para facilitar el retiro del molde, y las muestra son enumeradas dejándolas fuera del agua para su fraguado los días que se necesiten antes de su ensaye a compresión simple. Las especificaciones y dosificaciones de las cuales están compuestas las pruebas están detalladas en la tabla de diseño de mezclas.



Figura 1. Moldes utilizados para las probetas

### 3.3 Mezclas

Se trabajó con 9 tipos de especímenes diferentes variando las cantidades de cal, agua, cemento y puzolana (Fly – Ash) en todas ellas. Manteniendo con ello elementos constantes anteriormente mencionados solo variando su porcentaje en cada mezcla, con las dimensiones propuestas se calculo las cantidades necesarias para el número de muestras que se realizaron.

La mezcla previamente homogenizada son vertidas en 3 capas en cada molde, entre cada capa se le da diez golpes con un pisón metálico con la medida de los moldes a lo cual previamente se bayonetea con ayuda de un pedazo de alambón para liberar o deshacer los espacios de aire que pueda tener cada espécimen esto con el finalidad de comprimir y obtener un buen acomodo de partículas en la mezcla dentro de los moldes. Al terminar cada molde se enraza y se deja secar por 24 horas para después ser descimbrado y esperar los días necesarios para su prueba de compresión.

**Variables.**

En el presente trabajo las variables están definidas de la siguiente manera:

$$y = f(x)$$

Donde  $y$  es variable dependiente y  $x$  variable independiente

**Variables independientes:**

$$x \left\{ \begin{array}{l} \text{Puzolana: } \{10,20,30,40,50,60,70,80,90\} \% \\ \text{Cal: } \{10,20,30,40,50,60,70,80,90\} \% \\ \text{Cemento: } \{10\} \% \\ \text{Tiempo: } \{3,7,14,21,28,60,90\} \text{ Días} \end{array} \right.$$

Tabla 3. Cantidad de Cal y Puzolana en la mezcla

VARIABLES	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
%	90/10	80/20	70/30	60/40	50/50	40/60	30/70	20/80	10/90
CAL (gr)	1620	1440	1260	1080	900	720	540	360	180
PUZOLANA(gr)	159	317	476	635	793	952	1110	1269	1427
CEMENTO	10	10	10	10	10	10	10	10	10

**Variables Dependientes:**

$$y \left\{ \begin{array}{l} f'c: \text{Resistencia y compresión} \\ \delta: \text{Peso volumetrico} \end{array} \right.$$



Figura 2. Peso de la Muestra de Cal y Puzolana.

**3.4 Pruebas de Laboratorio**

A continuación se presentan las pruebas de laboratorio realizadas a los agregados utilizados para la fabricación de las probetas.

Nota: los materiales utilizados para las pruebas son los que se encuentran comúnmente en las construcciones locales de Cd Obregón Sonora.

### 3.4.1 Procedimiento para determinar la densidad

En el caso de este estudio se realizaron 2 pruebas iguales para obtener la densidad de la cal y de la puzolana, ya que son dos tipos de materiales distintos pero de apariencia física similares lo cual cada uno tubo su prueba de laboratorio, para la cal y la puzolana se les realizo la prueba con la probeta graduada, la cual consiste en un recipiente en forma de tubo de vidrio que se llena con gasolina hasta la marca de enrase y después se introduce el materia en este caso cal y puzolana, para realizar estos pasos primero se pesó previamente cada uno de los materiales en una balanza digital de precisión una vez obtenidos se prosigue a introducir los materiales para así lograr medir el liquido desalojado.

Para los estudios realizados en el laboratorio con respecto a la densidad de los agregados se siguió el procedimiento antes especificad en el marco teórico en el apartado de densidad, donde se nos explica cómo se obtienen los datos a continuación presentados.

Para obtener la densidad se utilizo la siguiente formula  $\rho = \frac{m}{V}$ , donde:

$m$ : representa el peso del material (cal o puzolana).

$V$ : Volumen desalojado de gasolina.

### 3.4.2 Procedimiento para determinar resistencia de especímenes

#### Colocación de especímenes

Se limpian las superficies de las placas superior e inferior y las cabezas del espécimen de prueba, se coloca este último sobre la placa inferior alineando su eje

cuidadosamente con el centro de la placa de carga con asiento esférico; mientras la placa superior se baja hacia el espécimen asegurándose que se tenga un contacto suave y uniforme.

### **Velocidad de aplicación de carga**

Se debe aplicar la carga con una velocidad uniforme y continua sin producir impacto, ni pérdida de carga. La velocidad de carga debe estar dentro del intervalo de 137 kPa/s a 343 kPa/s (84 kgf/cm<sup>2</sup>/min a 210 kgf/cm<sup>2</sup>/mln. Se permite una velocidad mayor durante la aplicación de la primera mitad de la carga máxima esperada siempre y cuando durante la segunda mitad se mantenga la velocidad especificada; pueden utilizarse máquinas operadas manualmente o motorizadas que permitan cumplir con lo anterior, teniendo en cuenta que sólo se harán los ajustes necesarios en los controles de la máquina de prueba para mantener uniforme la velocidad de aplicación de carga, hasta que ocurra la falla. Es recomendable colocar en la máquina, dispositivos para cumplir con los requisitos de seguridad para los operadores durante el ensaye del espécimen. Los especímenes para la aceptación o rechazo de concreto deben ensayarse a la edad de 14 días, en el caso del concreto de resistencia rápida o 28 días, en el caso de resistencia normal con las tolerancias, para los especímenes extraídos de concreto endurecido aplicar las edades especificadas en la NMX-C-169-0NNCCE.

Para aquellos especímenes en los cuales no se tenga una edad de prueba de las prescritas anteriormente, se ensayará con las tolerancias que se fijen en común acuerdo por los interesados.

### **Cálculo y expresión de los resultados**

Se calcula la resistencia a la compresión del espécimen, dividiendo la carga máxima soportada durante la prueba entre el área promedio de la sección transversal determinada con el diámetro medido como se describe en el inciso “Colocación de especímenes”. El resultado de la prueba se expresa con una aproximación de 100 kPa (1 kgf/cm).

### **Informe de la prueba**

El registro de los resultados debe incluir los datos siguientes:

- a) Clave de identificación del espécimen.
- b) Edad nominal del espécimen.
- c) Diámetro y altura en centímetros, con aproximación a mm.
- d) Área de la sección transversal en  $\text{cm}^2$  con aproximación al décimo,
- e) Masa del espécimen en kg.
- f) Carga máxima en N (kgf).
- g) Resistencia a la compresión, calculada con aproximación a 100 kPa (1  $\text{kgf/cm}^2$ ).



Figura 3. Probeta con Gasolina

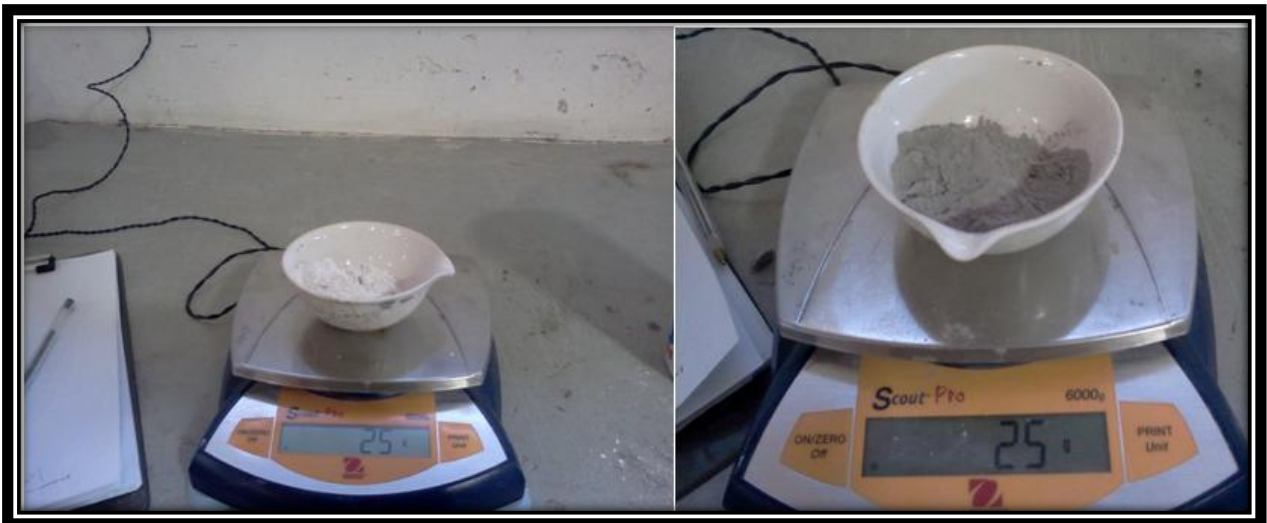


Figura 4. Muestra Cal – Puzolana



## **CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos, los cuales llevan a la selección de las probetas más adecuadas en cuanto a porcentaje de agregados utilizados de puzolana y cal, y la resistencia obtenida. Los resultados a las pruebas de compresión simple son presentados en tablas, así como también en graficas.

Las graficas y resultados presentados en este capítulo nos ayudaron a poder identificar las mezclas más apropiadas u óptimas para su empleo dentro de la construcción regional, en donde se busca que se adopte la mezcla óptima que ayude a descifrar cual es la que tiene mas resistencia.

De las primeras pruebas se puede observar en la tabla de diseño de mezcla que se trabajo con 1620, 1440, 1260, 1080, 900, 720, 540, 360, 180 gr de cal, en las combinaciones de la mezcla, y estas se combinaron con 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90 % de puzolana en cada una de las cantidades de puzolana, y como se había previsto, entre más cantidad de cal agregado, mayor resistencia a la compresión,

pero después de la primeras pruebas realizadas, al elaborar la grafica de resistencia contra los porcentajes de puzolana aplicados se observo que en la combinación de puzolana de 10% contra 1620 gr de cal se obtuvo una aumento de resistencia y logrando una muestra optima hasta llegar al 30% de puzolana donde se tuvo el ultimo incremento de resistencia para después del 40 al 90 % de puzolana fuera decreciendo gradualmente los resultados se pueden observar en las graficas mencionadas.

Tabla 4. Densidad de la Cal.

Prueba	Cal (gr)	Gasolina (ml)			Densidad (gr/cm3)
		Inicial	Final	Desalojado	
1	25	50	61	11	2.27
2	25	50	61	11	2.27
3	25	50	61	11	2.27
				Promedio	2.27

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \rho = 2.27$$

Tabla 5. Densidad de la Puzolana.

Prueba	Puzolana (gr)	Gasolina (ml)			Densidad (gr/cm3)
		Inicial	Final	Desalojado	
1	25	50	62.5	12.5	2.00
2	25	50	62.5	12.5	2.00
3	25	50	62.5	12.5	2.00
				Promedio	2.00

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \rho = 2.00$$

Tabla 6. Diseño de mezclas y resultados obtenidos.

FECHAS	ESPECIMEN	CAL (gr)	PUZOLANA (gr)	EDAD ENSAYE (DIAS)	PESO (gr)	DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)	AREA (cm <sup>2</sup> )	VOLUMEN (cm <sup>3</sup> )	Peso Vol. (Kg/m <sup>3</sup> )	CARGA MAXIMA (lb)	CARGA MAXIMA (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	f'c(Promedio) (kg/cm <sup>2</sup> )
24/10/2011	M1-1	1619.5	158.5	3	93.8	4.5	4.33	15.904	68.866	1362	190	86.1826	5.419	6.078
24/10/2011	M1-2	1619.5	158.5	3	93.5	4.44	4.33	15.483	67.041	1395	230	104.3262	6.738	
28/10/2011	M1-3	1619.5	158.5	7	108.8	4.5	4.61	15.904	73.319	1484	230	104.3262	6.560	5.849
28/10/2011	M1-4	1619.5	158.5	7	104	4.56	4.7	16.331	76.757	1355	185	83.9146	5.138	
04/11/2011	M1-5	1619.5	158.5	14	82.7	4.43	4.64	15.413	71.518	1156	175	79.3787	5.150	5.419
04/11/2011	M1-6	1619.5	158.5	14	79.6	4.45	4.7	15.553	73.098	1089	195	88.4505	5.687	
11/11/2011	M1-7	1619.5	158.5	21	77.5	4.4	4.6	15.205	69.944	1108	295	133.8097	8.800	8.483
11/11/2011	M1-8	1619.5	158.5	21	79.6	4.41	4.7	15.275	71.790	1109	275	124.7379	8.166	
18/11/2011	M1-9	1619.5	158.5	28	78.6	4.43	4.65	15.413	71.672	1097	210	95.2544	6.180	6.505
18/11/2011	M1-10	1619.5	158.5	28	79	4.41	4.69	15.275	71.637	1103	230	104.3262	6.830	
02/02/2012	M1-11	1619.5	158.5	60	83.4	4.4	4.67	15.205	71.009	1175	260	117.9340	7.756	7.118
02/02/2012	M1-12	1619.5	158.5	60	79.7	4.86	4.5	18.551	83.479	955	265	120.2020	6.480	
22/02/2012	M1-13	1619.5	158.5	90	82.3	4.4	4.66	15.205	70.857	1161	255	115.6661	7.607	8.016
22/02/2012	M1-14	1619.5	158.5	90	79.3	4.42	4.43	15.344	67.973	1167	285	129.2738	8.425	
24/10/2011	M2-1	1440	317	3	90.5	4.38	4.53	15.067	68.255	1326	180	81.6466	5.419	5.599
24/10/2011	M2-2	1440	317	3	93.7	4.3	4.15	14.522	60.266	1555	185	83.9146	5.778	
28/10/2011	M2-3	1440	317	7	100.9	4.39	4.54	15.136	68.719	1468	215	97.5224	6.443	6.810
28/10/2011	M2-4	1440	317	7	106.7	4.44	4.61	15.483	71.377	1495	245	111.1301	7.178	
04/11/2011	M2-5	1440	317	14	82.4	4.5	4.61	15.904	73.319	1124	150	68.0389	4.278	4.235
04/11/2011	M2-6	1440	317	14	79.9	4.47	4.63	15.693	72.658	1100	145	65.7709	4.191	
11/11/2011	M2-7	1440	317	21	77.7	4.47	4.57	15.693	71.717	1083	205	92.9864	5.925	5.832
11/11/2011	M2-8	1440	317	21	74.7	4.43	4.47	15.413	68.898	1084	195	88.4505	5.739	
18/11/2011	M2-9	1440	317	28	77.8	4.4	4.5	15.205	68.424	1137	250	113.3981	7.458	7.144
18/11/2011	M2-10	1440	317	28	79.8	4.41	4.71	15.275	71.943	1109	230	104.3262	6.830	

Tabla 6... Continuación

FECHAS	ESPECIMEN	CAL (gr)	PUZOLANA (gr)	EDAD ENSAYE (DIAS)	PESO (gr)	DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)	AREA (cm <sup>2</sup> )	VOLUMEN (cm <sup>3</sup> )	Peso Vol. (Kg/m <sup>3</sup> )	CARGA MAXIMA (lb)	CARGA MAXIMA (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	f'c(Promedio) (kg/cm <sup>2</sup> )
02/02/2012	M2-11	1440	317	60	80.2	4.45	4.54	15.553	70.610	1136	260	117.9340	7.583	7.229
02/02/2012	M2-12	1440	317	60	79.8	4.49	4.5	15.834	71.252	1120	240	108.8622	6.875	
22/02/2012	M2-13	1440	317	90	79.3	4.33	4.5	14.725	66.264	1197	285	129.2738	8.779	8.951
22/02/2012	M2-14	1440	317	90	80.5	4.43	4.56	15.413	70.285	1145	310	140.6136	9.123	
28/10/2011	M3-1	1260	475.5	3	93.4	4.44	4.53	15.483	70.138	1332	115	52.1631	3.369	3.589
28/10/2011	M3-2	1260	475.5	3	90.7	4.44	4.6	15.483	71.222	1273	130	58.9670	3.808	
01/11/2011	M3-3	1260	475.5	7	83.3	4.42	4.7	15.344	72.116	1155	200	90.7185	5.912	5.653
01/11/2011	M3-4	1260	475.5	7	83.6	4.39	4.7	15.136	71.140	1175	180	81.6466	5.394	
08/11/2011	M3-5	1260	475.5	14	81.5	4.45	4.61	15.553	71.699	1137	255	115.6661	7.437	7.597
08/11/2011	M3-6	1260	475.5	14	82.6	4.4	4.76	15.205	72.377	1141	260	117.9340	7.756	
15/11/2011	M3-7	1260	475.5	21	79.7	4.44	4.54	15.483	70.293	1134	255	115.6661	7.471	7.527
15/11/2011	M3-8	1260	475.5	21	80.3	4.45	4.55	15.553	70.765	1135	260	117.9340	7.583	
22/11/2011	M3-9	1260	475.5	28	77.99	4.43	4.33	15.413	66.740	1169	290	131.5418	8.534	8.159
22/11/2011	M3-10	1260	475.5	28	83.3	4.35	4.73	14.862	70.296	1185	255	115.6661	7.783	
02/02/2012	M3-11	1260	475.5	60	83.7	4.79	4.51	18.020	81.271	1030	280	127.0059	7.048	7.277
02/02/2012	M3-12	1260	475.5	60	83.5	4.6	4.5	16.619	74.786	1117	275	124.7379	7.506	
22/02/2012	M3-13	1260	475.5	90	82.9	4.45	4.62	15.553	71.854	1154	335	151.9534	9.770	9.777
22/02/2012	M3-14	1260	475.5	90	83.2	4.38	4.58	15.067	69.009	1206	325	147.4175	9.784	
28/10/2011	M4-1	1080	634.5	3	101.7	4.49	4.53	15.834	71.727	1418	140	63.5029	4.011	4.047
28/10/2011	M4-2	1080	634.5	3	108.7	4.45	4.15	15.553	64.544	1684	140	63.5029	4.083	
01/11/2011	M4-3	1080	634.5	7	88.3	4.47	4.9	15.693	76.896	1148	90	40.8233	2.601	2.370
01/11/2011	M4-4	1080	634.5	7	85.4	4.5	4.69	15.904	74.591	1145	75	34.0194	2.139	
08/11/2011	M4-5	1080	634.5	14	77.2	4.39	4.5	15.136	68.113	1133	155	70.3068	4.645	5.032
08/11/2011	M4-6	1080	634.5	14	75.9	4.44	4.32	15.483	66.887	1135	185	83.9146	5.420	

Tabla 6... Continuación

FECHAS	ESPECIMEN	CAL (gr)	PUZOLANA (gr)	EDAD ENSAYE (DIAS)	PESO (gr)	DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)	AREA (cm <sup>2</sup> )	VOLUMEN (cm <sup>3</sup> )	Peso Vol. (Kg/m <sup>3</sup> )	CARGA MAXIMA (lb)	CARGA MAXIMA (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	f'c(Promedio) (kg/cm <sup>2</sup> )
15/11/2011	M4-7	1080	634.5	21	81	4.5	4.6	15.904	73.160	1107	215	97.5224	6.132	6.347
15/11/2011	M4-8	1080	634.5	21	82.2	4.4	4.59	15.205	69.792	1178	220	99.7903	6.563	
22/11/2011	M4-9	1080	634.5	28	82.8	4.42	4.59	15.344	70.428	1176	205	92.9864	6.060	6.461
22/11/2011	M4-10	1080	634.5	28	82.3	4.4	4.6	15.205	69.944	1177	230	104.3262	6.861	
02/02/2012	M4-11	1080	634.5	60	85.6	4.5	4.59	15.904	73.001	1173	305	138.3457	8.699	8.956
02/02/2012	M4-12	1080	634.5	60	85.9	4.3	4.63	14.522	67.237	1278	295	133.8097	9.214	
22/02/2012	M4-13	1080	634.5	90	86.9	4.47	4.58	15.693	71.874	1209	280	127.0059	8.093	8.353
22/02/2012	M4-14	1080	634.5	90	84.8	4.41	4.55	15.275	69.499	1220	290	131.5418	8.612	
28/10/2011	M5-1	900	793	3	97.4	4.49	4.55	15.834	72.043	1352	155	70.3068	4.440	4.502
28/10/2011	M5-2	900	793	3	101	4.5	4.6	15.904	73.160	1381	160	72.5748	4.563	
01/11/2011	M5-3	900	793	7	84.2	4.44	4.77	15.483	73.854	1140	175	79.3787	5.127	5.273
01/11/2011	M5-4	900	793	7	84.2	4.5	4.75	15.904	75.545	1115	190	86.1826	5.419	
08/11/2011	M5-5	900	793	14	83.8	4.5	4.76	15.904	75.705	1107	155	70.3068	4.421	4.523
08/11/2011	M5-6	900	793	14	84.3	4.47	4.75	15.693	74.542	1131	160	72.5748	4.625	
15/11/2011	M5-7	900	793	21	82	4.5	4.63	15.904	73.637	1114	175	79.3787	4.991	5.059
15/11/2011	M5-8	900	793	21	82.5	4.44	4.6	15.483	71.222	1158	175	79.3787	5.127	
22/11/2011	M5-9	900	793	28	80	4.45	4.56	15.553	70.921	1128	200	90.7185	5.833	5.601
22/11/2011	M5-10	900	793	28	78.7	4.4	4.45	15.205	67.664	1163	180	81.6466	5.370	
02/02/2012	M5-11	900	793	60	79	4.4	4.55	15.205	69.184	1142	245	111.1301	7.309	7.383
02/02/2012	M5-12	900	793	60	82.9	4.4	4.4	15.205	66.903	1239	250	113.3981	7.458	
22/02/2012	M5-13	900	793	90	81.7	4.22	4.38	13.987	61.262	1334	315	142.8816	10.216	9.205
22/02/2012	M5-14	900	793	90	84.1	4.56	4.4	16.331	71.858	1170	295	133.8097	8.193	
28/10/2011	M6-1	720	951.5	3	116.3	4.5	5	15.904	79.522	1462	145	65.7709	4.135	4.359

Tabla 6... Continuación

FECHAS	ESPECIMEN	CAL (gr)	PUZOLANA (gr)	EDAD ENSAYE (DIAS)	PESO (gr)	DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)	AREA (cm <sup>2</sup> )	VOLUMEN (cm <sup>3</sup> )	Peso Vol. (Kg/m <sup>3</sup> )	CARGA MAXIMA (lb)	CARGA MAXIMA (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	f'c(Promedio) (kg/cm <sup>2</sup> )
28/10/2011	M6-2	720	951.5	3	107.5	4.49	4.75	15.834	75.210	1429	160	72.5748	4.584	
01/11/2011	M6-3	720	951.5	7	95	4.5	4.76	15.904	75.705	1255	170	77.1107	4.848	4.768
01/11/2011	M6-4	720	951.5	7	96	4.44	4.91	15.483	76.022	1263	160	72.5748	4.687	
08/11/2011	M6-5	720	951.5	14	87	4.5	4.66	15.904	74.114	1174	155	70.3068	4.421	4.563
08/11/2011	M6-6	720	951.5	14	87.1	4.5	4.72	15.904	75.068	1160	165	74.8427	4.706	
15/11/2011	M6-7	720	951.5	21	89.2	4.5	4.79	15.904	76.182	1171	140	63.5029	3.993	4.187
15/11/2011	M6-8	720	951.5	21	87	4.52	4.6	16.046	73.812	1179	155	70.3068	4.382	
22/11/2011	M6-9	720	951.5	28	89.8	4.5	4.82	15.904	76.659	1171	155	70.3068	4.421	4.378
22/11/2011	M6-10	720	951.5	28	90.3	4.47	4.74	15.693	74.385	1214	150	68.0389	4.336	
02/02/2012	M6-11	720	951.5	60	91.3	4.46	4.8	15.623	74.990	1218	250	113.3981	7.258	6.909
02/02/2012	M6-12	720	951.5	60	90.2	4.5	4.75	15.904	75.545	1194	230	104.3262	6.560	
22/02/2012	M6-13	720	951.5	90	91.6	4.45	4.79	15.553	74.498	1230	295	133.8097	8.604	8.703
22/02/2012	M6-14	720	951.5	90	94.4	4.51	4.89	15.975	78.118	1208	310	140.6136	8.802	
28/10/2011	M7-1	540	1110	3	94.8	4.5	4.86	15.904	77.295	1226	140	63.5029	3.993	4.135
28/10/2011	M7-2	540	1110	3	93.2	4.5	4.61	15.904	73.319	1271	150	68.0389	4.278	
01/11/2011	M7-3	540	1110	7	90.1	4.5	4.81	15.904	76.500	1178	145	65.7709	4.135	4.421
01/11/2011	M7-4	540	1110	7	91	4.5	4.83	15.904	76.818	1185	165	74.8427	4.706	
08/11/2011	M7-5	540	1110	14	90.8	4.5	4.84	15.904	76.977	1180	200	90.7185	5.704	5.918
08/11/2011	M7-6	540	1110	14	91.7	4.5	4.86	15.904	77.295	1186	215	97.5224	6.132	
15/11/2011	M7-7	540	1110	21	92.3	4.49	4.88	15.834	77.268	1195	160	72.5748	4.584	4.483
15/11/2011	M7-8	540	1110	21	91.8	4.52	4.91	16.046	78.786	1165	155	70.3068	4.382	
22/11/2011	M7-9	540	1110	28	95	4.47	4.95	15.693	77.680	1223	195	88.4505	5.636	5.242
22/11/2011	M7-10	540	1110	28	87.9	4.5	4.6	15.904	73.160	1201	170	77.1107	4.848	

Tabla 6... Continuación

FECHAS	ESPECIMEN	CAL (gr)	PUZOLANA (gr)	EDAD ENSAYE (DIAS)	PESO (gr)	DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)	AREA (cm <sup>2</sup> )	VOLUMEN (cm <sup>3</sup> )	Peso Vol. (Kg/m <sup>3</sup> )	CARGA MAXIMA (lb)	CARGA MAXIMA (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	f'c(Promedio) (kg/cm <sup>2</sup> )
02/02/2012	M7-11	540	1110	60	91.7	4.53	4.77	16.117	76.878	1193	290	131.5418	8.162	8.020
02/02/2012	M7-12	540	1110	60	93.5	4.49	4.84	15.834	76.635	1220	275	124.7379	7.878	
22/02/2012	M7-13	540	1110	90	92.7	4.5	4.66	15.904	74.114	1251	270	122.4699	7.700	7.629
22/02/2012	M7-14	540	1110	90	92.9	4.5	4.7	15.904	74.750	1243	265	120.2020	7.558	
31/10/2011	M8-1	360	1268.5	3	80.1	4.53	4.55	16.117	73.333	1092	95	43.0913	2.674	2.406
31/10/2011	M8-2	360	1268.5	3	91.6	4.5	4.7	15.904	74.750	1225	75	34.0194	2.139	
04/11/2011	M8-3	360	1268.5	7	84.1	4.5	4.5	15.904	71.569	1175	120	54.4311	3.422	3.280
04/11/2011	M8-4	360	1268.5	7	85.4	4.5	4.5	15.904	71.569	1193	110	49.8952	3.137	
11/11/2011	M8-5	360	1268.5	14	85.2	4.5	4.5	15.904	71.569	1190	165	74.8427	4.706	4.979
11/11/2011	M8-6	360	1268.5	14	84.3	4.51	4.4	15.975	70.290	1199	185	83.9146	5.253	
18/11/2011	M8-7	360	1268.5	21	87.7	4.5	4.6	15.904	73.160	1199	125	56.6990	3.565	3.565
18/11/2011	M8-8	360	1268.5	21	88.3	4.5	4.65	15.904	73.955	1194	125	56.6990	3.565	
25/11/2011	M8-9	360	1268.5	28	90.2	4.5	4.73	15.904	75.227	1199	150	68.0389	4.278	4.109
25/11/2011	M8-10	360	1268.5	28	84.2	4.53	4.41	16.117	71.076	1185	140	63.5029	3.940	
02/02/2012	M8-11	360	1268.5	60	85	4.5	4.4	15.904	69.979	1215	240	108.8622	6.845	6.916
02/02/2012	M8-12	360	1268.5	60	87.4	4.5	4.5	15.904	71.569	1221	245	111.1301	6.987	
22/02/2012	M8-13	360	1268.5	90	81.1	4.5	4.76	15.904	75.705	1071	195	88.4505	5.561	5.454
22/02/2012	M8-14	360	1268.5	90	87.4	4.47	4.5	15.693	70.618	1238	185	83.9146	5.347	
31/10/2011	M9-1	180	1427	3	93.3	4.5	4.66	15.904	74.114	1259	125	56.6990	3.565	3.486
31/10/2011	M9-2	180	1427	3	96.8	4.51	4.8	15.975	76.680	1262	120	54.4311	3.407	
04/11/2011	M9-3	180	1427	7	93.4	4.53	4.74	16.117	76.395	1223	115	52.1631	3.237	3.292
04/11/2011	M9-4	180	1427	7	90.9	4.55	4.63	16.260	75.282	1207	120	54.4311	3.348	
11/11/2011	M9-5	180	1427	14	95.2	4.54	4.9	16.188	79.323	1200	165	74.8427	4.623	4.753

Tabla 6... Continuación

FECHAS	ESPECIMEN	CAL (gr)	PUZOLANA (gr)	EDAD ENSAYE (DIAS)	PESO (gr)	DIAMETRO (cm)	ALTURA (cm)	AREA (cm <sup>2</sup> )	VOLUMEN (cm <sup>3</sup> )	Peso Vol. (Kg/m <sup>3</sup> )	CARGA MAXIMA (lb)	CARGA MAXIMA (kg)	f'c (kg/cm <sup>2</sup> )	f'c(Promedio) (kg/cm <sup>2</sup> )
11/11/2011	M9-6	180	1427	14	95.3	4.55	4.88	16.260	79.347	1201	175	79.3787	4.882	
18/11/2011	M9-7	180	1427	21	96.9	4.48	4.9	15.763	77.240	1255	235	106.5942	6.762	6.506
18/11/2011	M9-8	180	1427	21	96.7	4.56	4.9	16.331	80.023	1208	225	102.0583	6.249	
25/11/2011	M9-9	180	1427	28	92.4	4.55	4.7	16.260	76.421	1209	160	72.5748	4.463	4.656
25/11/2011	M9-10	180	1427	28	92.8	4.5	4.73	15.904	75.227	1234	170	77.1107	4.848	
02/02/2012	M9-11	180	1427	60	95.2	4.59	4.75	16.547	78.598	1211	260	117.9340	7.127	7.011
02/02/2012	M9-12	180	1427	60	95.1	4.53	4.71	16.117	75.911	1253	245	111.1301	6.895	
22/02/2012	M9-13	180	1427	90	93.9	4.5	4.75	15.904	75.545	1243	260	117.9340	7.415	7.629
22/02/2012	M9-14	180	1427	90	95.6	4.5	4.76	15.904	75.705	1263	275	124.7379	7.843	



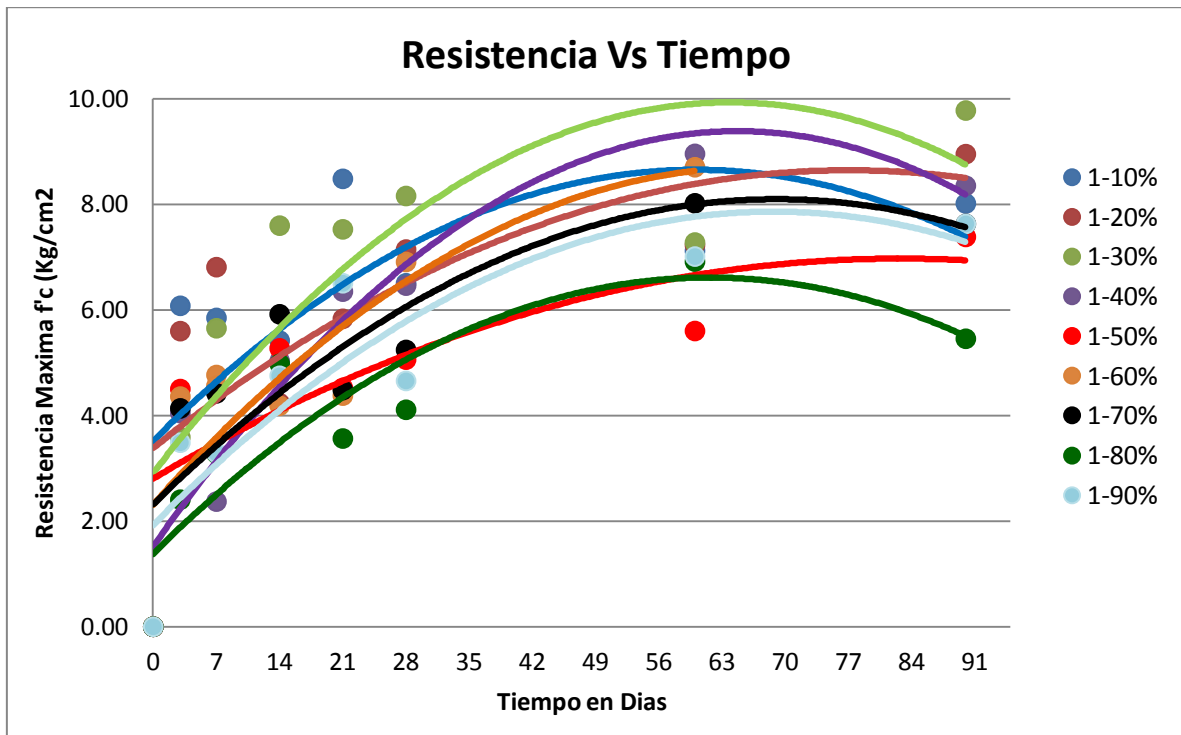
La tabla 6 se fue obteniendo conforme se iba realizando el trabajo y en ella se pueden apreciar las cantidades utilizadas de cada uno de los agregados para la fabricación de las probetas, también los porcentajes utilizados de puzolana. Se puede observar que se fabricaron un total de 126 probetas con un total de 9 variaciones, cada variación fue fabricada con 14 veces 2 por cada día para obtener resultados más exactos al momento de promediar los valores en sus pesos volumétricos y resistencias a compresión, esto también sirvió para la mejor obtención de gráficas. Para las variaciones, lo único que se manejó como variables fue la cal, el cemento y la puzolana. Se manejaron 9 distintas cantidades de cal en las probetas, de cada una de esas cantidades de cal se manejo 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, % de puzolana, esto con el propósito de obtener la relación más adecuada o que arrojava mejor resistencia a la hora de sus ensaye a compresión. Las medidas presentadas de las probetas se tomaron después de haber estado los días correspondientes a su secado a 3, 7, 14, 21, 28, 60, y 90 días, cada una de ellas fue llevada a ensaye de compresión.



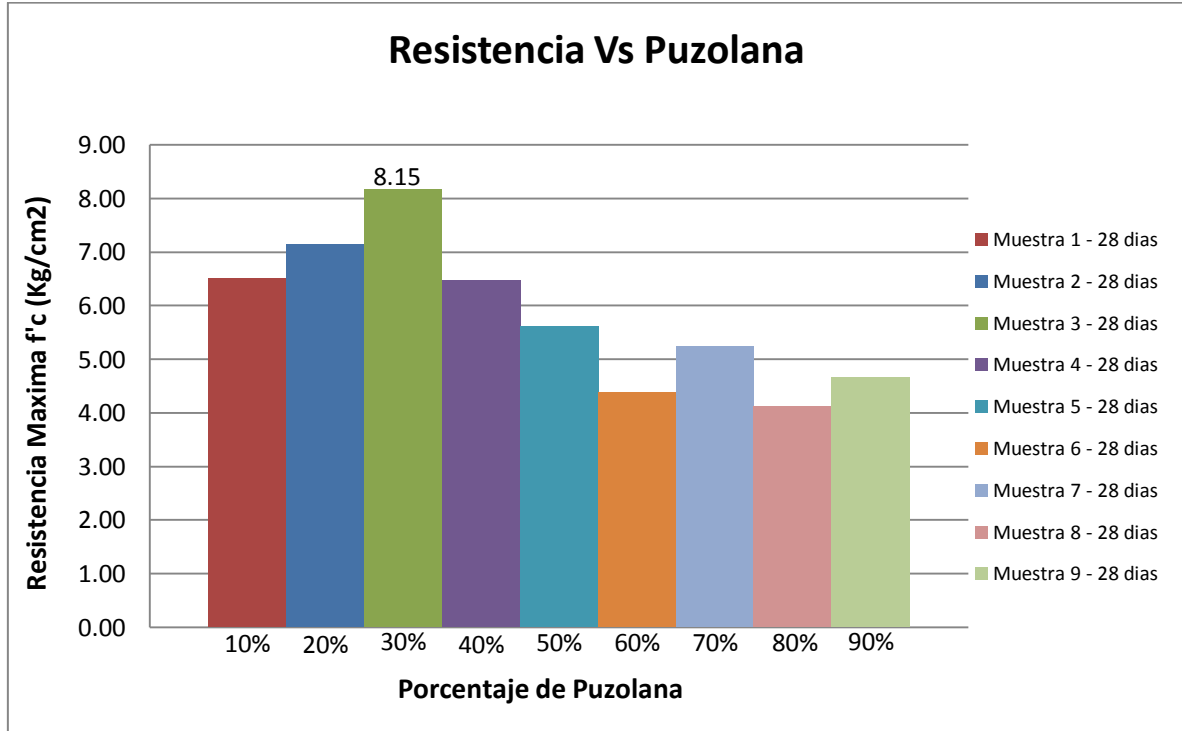
Figura 5. Ensaye de esfuerzo a compresión

#### 4.1 Gráficas por familias

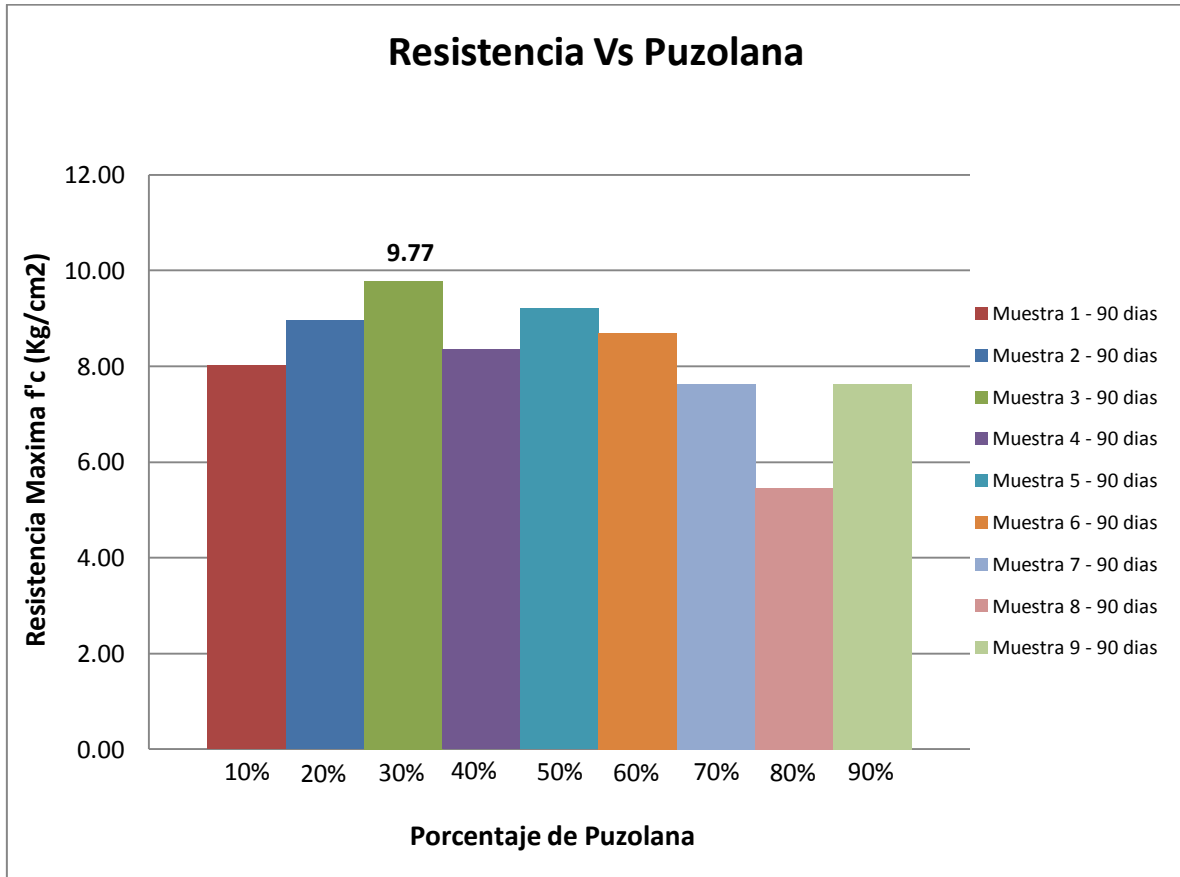
A continuación se presentan las gráficas por familias obtenidas de la tabla 6, en donde se puede observar que la combinación de puzolana y cal, de 3 a 90 días y de 2.3 a 9.7 Kg/cm<sup>2</sup> de resistencia a compresión respectivamente para conocer la mezcla más adecuada y con mejor tendencia a crecer.



Gráfica 1. Resistencia máxima en Kg/cm<sup>2</sup> soportada por cada espécimen contra el tiempo en días



Gráfica 2. Resistencia máxima en Kg/cm<sup>2</sup> soportada por cada espécimen contra el porcentaje de Puzolana agregado a los especímenes a los 28 días



Gráfica 3. Resistencia máxima en Kg/cm<sup>2</sup> soportada por cada espécimen contra el porcentaje de Puzolana agregado a los especímenes a los 90 días

Una vez terminado los ensayos y realizado las pruebas a compresión se realizan las gráficas por familias, se escogió la mejor combinación de porcentaje de puzolana contra resistencia a compresión, y de este resultado se realizó una segunda prueba de las mismas características pero a 60 y 90 días ya que los resultados obtenidos fue a 28 días de cada espécimen se realizaron 2 probetas, a 3,7,14,21,28,60,90 días para así obtener un valor más exacto realizando un promedio por cada uno para así ajustar mejor la gráfica.

## 4.2 Pruebas finales

A continuación se presenta la tabla de los ensayos a compresión simple de las pruebas realizadas con sus respectivas resistencias representadas en Libras fuerza (Lbf), que son las unidades que maneja la prensa que se encuentra en el laboratorio de ingeniería civil, se convierte a kilogramos fuerza (kgf) utilizando una simple regla de 3 tomando en cuenta que  $1\text{lb} = 0.454\text{ kg}$  y dividiendo entre el área del espécimen cilíndrico, para obtener unidades que se manejan en México y estar más familiarizado con los resultados obtenidos.

Tabla 7. Resultados de los ensayos.

No. de Especimen	Ensaye (días)	Carga Max (Lbf)	Carga Max (kgf)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Resistencia a compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio (kg/cm <sup>2</sup> )
3	3	115	52.16	4.44	4.53	15.44	3.36	3.58
		130	58.96	4.44	4.6	15.44	3.80	
	7	200	90.71	4.42	4.7	15.34	5.91	5.65
		180	81.64	4.39	4.7	15.13	5.39	
	14	255	115.66	4.45	4.61	15.55	7.43	7.59
		260	117.93	4.4	4.76	15.20	7.75	
	21	255	115.66	4.44	4.54	15.48	7.47	7.52
		260	117.93	4.45	4.55	15.55	7.58	
	28	290	131.54	4.43	4.33	15.41	8.53	8.15
		255	115.66	4.35	4.73	14.86	7.78	
	60	280	127	4.79	4.51	18.02	7.04	7.27
		275	124.73	4.6	4.5	16.61	7.50	
	90	335	151.95	4.45	4.62	15.55	9.77	9.77
		325	147.41	4.38	4.58	15.06	9.78	

De la tabla 7 podemos deducir la máxima resistencia alcanzada en las probetas fabricadas de cal y puzolana obteniendo un valor máximo a los 90 días y con proporción de 1-30%, resultando una resistencia de  $9.77\text{ kg/cm}^2$ .

Con estos resultados se puede observar que la cal fabricada en este trabajo fue adquiriendo una mejor compresión al momento de agregarle la ceniza volante (puzolana) a una mezcla de cal.

### 4.3 Pruebas complementarias

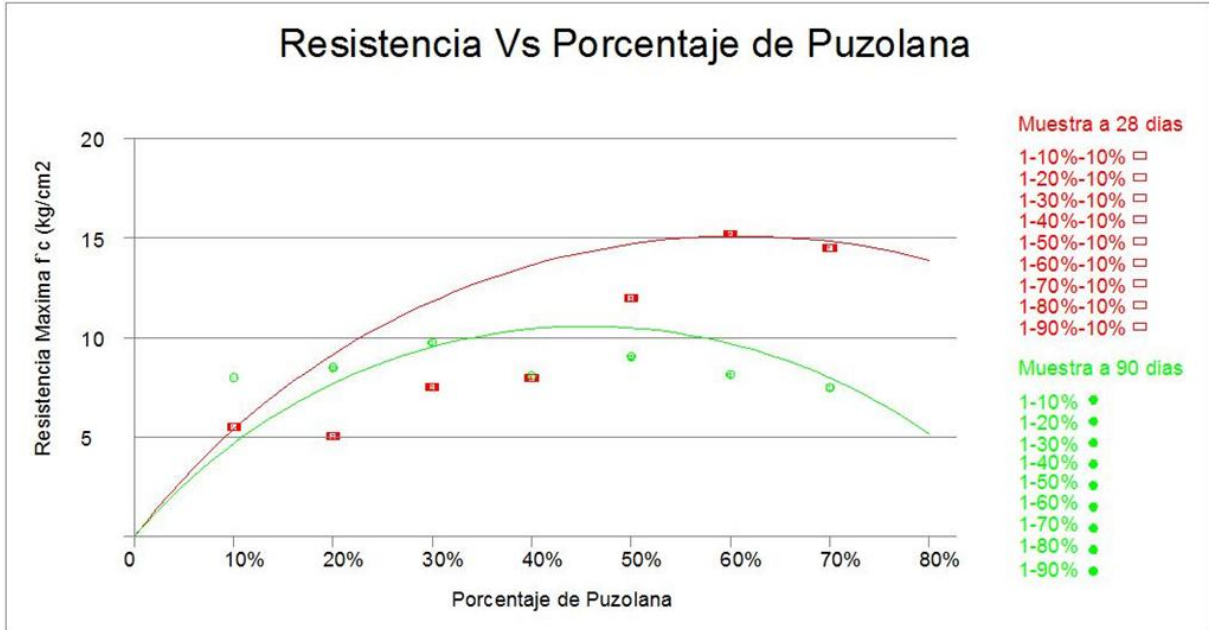
Se realizaron pruebas adicionales, ya que las pruebas realizadas no dieron los resultados deseados; por lo cual se optó por hacer unas muestras a las cuales se les agregó un 10% de cemento a la muestra original.

Para estas pruebas se crearon 18 muestras a un tiempo de colado de 28 días dándonos los siguientes resultados:

Tabla 8. Resultados de los ensayos en mezclas de cemento-cal-puzolana.

No. de Espécimen	Ensaye (días)	Carga Max (Lbf)	Carga Max (kgf)	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Área (cm <sup>2</sup> )	Resistencia a compresión (kg/cm <sup>2</sup> )	Promedio (kg/cm <sup>2</sup> )
1	28	200	90.718	4.5	4.7	15.90	5.704	5.56
		190	86.183	4.5	4.7	15.90	5.419	
2		180	81.64	4.5	4.7	15.90	5.13	5.06
		175	79.37	4.5	4.7	15.90	4.99	
3		240	108.86	4.5	4.7	15.90	6.84	7.42
		280	127.00	4.5	4.5	15.90	7.98	
4		290	131.54	4.5	4.7	15.90	8.27	7.99
		270	122.47	4.5	4.6	15.90	7.70	
5		400	181.43	4.5	4.7	15.90	11.40	13.97
		490	222.26	4.5	4.7	15.90	13.97	
6		570	258.54	4.5	4.8	15.90	16.25	15.40
		540	244.94	4.5	4.7	15.90	15.40	
7		585	265.35	4.5	4.6	15.90	16.68	14.69
		525	233.60	4.5	4.6	15.90	14.68	
8		760	344.73	4.5	4.6	15.90	21.67	20.53
		720	326.58	4.5	4.6	15.90	20.53	
9		900	408.23	4.5	4.6	15.90	25.66	23.38
		820	371.94	4.5	4.6	15.90	23.38	

De la tabla 8 podemos deducir la máxima resistencia alcanzada en las probetas fabricadas de cal, puzolana y cemento obteniendo un valor máximo a los 28 días y con proporción de 1-90%-10%, resultando una resistencia de 23.38 kg/cm<sup>2</sup>.



En la gráfica 4 se muestra los resultados comparativos de dos muestras a 28 y 90 días con diferente dosificación.

## **CAPÍTULO V. CONCLUSIÓN Y RECOMENDACIONES**

### **5.1 Conclusiones**

En este último capítulo se presenta de manera breve una conclusión al presente trabajo en donde, en el capítulo IV, la tabla 7 se puede observar los resultados de las últimas probetas, ahí se puede corroborar en la columna de resistencia a compresión, que la aplicación de ceniza volante o puzolana a las mezclas de cal fabricadas tuvo un efecto positivo en su aplicación al realizar la prueba de compresión simple a las probetas realizadas con esta misma cal, ya que, la resistencia alcanzada por las probetas va aumentando al incrementar el tiempo de fraguado el cual fue de 3, 7, 14, 21, 28, 60, 90 días, tiempo que es suficiente para alcanzar la máxima resistencia en un concreto de acuerdo con el manual de Tecnologías del Concreto, de Comisión Federal de Electricidad, tomo I del cual se tomó como referencia para el presente proyecto. Por lo tanto se puede tomar en



cuenta como un aditivo en la fabricación de morteros para la obtención de muestras con mayor resistencia ya sea para aplicación de enjarres o pasta para juntas para muros ya que no afecta a ningún agregado o variable, al contrario, en los lugares donde se fabrican y manejan la venta de este producto en grandes cantidades puede resultar conveniente su uso y considerar un ahorro de cal a largo plazo ya que este material es manejado en bajo costo.

- ▶ Se detectó la dosificación óptima de porcentaje de puzolana contra la resistencia en el primer juego de probetas siendo esta la proporción 1-30%, donde en el gráfico 1 se puede apreciar el crecimiento más favorable al haber graficado los valores de cada espécimen.
  
- ▶ Se comprobó que el uso de la ceniza volante (puzolana) obtuvo resultados positivos al no afectar la resistencia de las probetas obtenidas. (ver tabla 7, resultado de los ensaye finales).
  
- ▶ Se compararon los resultados de resistencia a la compresión desde los primeros días de vida de las probetas al llevar a la falla a los 3,7,14,21,28,60.90 días, en cada día de prueba se ensayaron 2 muestras, las cuales arrojaron resultados favorables al uso de este aditivo (puzolana), ya que en los promedios de la resistencias de estas muestras se observa que va en forma creciente donde el más bajo, a los 3 días, alcanzó apenas un promedio de  $3.58 \text{ kg/cm}^2$ , y el promedio más alto a los 90 días alcanzó de  $9.77 \text{ kg/cm}^2$  para este espécimen fabricado, lo cual no fue suficiente para el propósito de este estudio de  $15 \text{ kg/cm}^2$  que se necesita para la fabricación de un ladrillo.

## 5.2 Recomendaciones

La recomendación para el estudio realizado es poder seguir pensando en la posibilidad de agregarle o incorporarle algún aditivo a la mezclas de cal fabricados actualmente, ya que en este trabajo se observó la influencia positiva de la utilización de un aditivo en este caso (Puzolana).

Se recomienda el uso de un agregado extra a la mezcla realizada en este proyecto, ya que al incorporarle un 10% de cemento a todas las mezclas a 28 días se obtuvo un incremento del 23.39% en su resistencia última, siendo este resultado muy favorecedor para la fabricación de un nuevo ladrillo usando una proporción 1-90%-10% de cal, puzolana y cemento respectivamente.

Al tomar muy en cuenta estos resultados se recomienda seguir el estudio del comportamiento de estos resultados, ya que demuestra que se puede mejorar la resistencia de un material para la construcción como lo es el ladrillo, tomando esta alternativa para el mejoramiento de nuestras obras de construcción.

## BIBLIOGRAFÍA

- ▶ Santiago Crespo Escobar, Materiales de construcción para edificación y obra civil, Editorial Club Universitario (ECU).
- ▶ Jaime Nadal Urigüren, El Suelo Estabilizado, Material de Construcción.
- ▶ Instituto Juan Herrera, Historia de la Construcción, CEDEX.
- ▶ Manual de Tecnologías del Concreto, Tomo 1 y 1, Comisión Federal de Electricidad (CFE).
- ▶ Neville Adam M, Tecnología del Concreto, Tomo1.
- ▶ Norma ASTM C618 - 08 Especificación estándar para cenizas volantes de carbón y la puzolana natural cruda o calcinada para Hormigón" .ASTM International.
- ▶ Burke, Michael, El carbón sub-producto que se utiliza para fabricar ladrillos en Caledonia

### Link de Internet

- ▶ <http://www.flyash.com/flyashconcrete.asp>
- ▶ <http://www.curacreto.com.mx/productos-para-concreto/aditivos/fly-ash-tipo-f-ceniza-volante.html>
- ▶ <http://www.epa.gov/osw/conserva/rrr/imr/ccps/flyash.htm>