



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo



Facultad de Ingeniería Civil
Departamento de Materiales

Tesis

“Análisis de la Influencia de Aditivos para Cal utilizados en Mamposterías”

Tesis Profesional que para obtener el
Título de Ingeniero Civil
Presenta el:

P.I.C. David Mendoza Cachú

Asesor:
Dr. José Carlos Rubio Ávalos

Morelia, Michoacán, diciembre de 2010

Agradecimientos

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, por abrirme sus puertas e inculcarme el Espíritu Nicolaita, que nos impulsa a ser mejores y a comprometernos con la sociedad...

A la Facultad de Ingeniería Civil, por facilitarme las herramientas que me permitirán superarme como ser humano; por cinco años de experiencia y, sobre todo, por ayudarme a ser un individuo competente...

A la Sección de Investigación e Innovación en Materiales de Construcción, que me brindó la oportunidad de realizar los trabajos necesarios para el desarrollo adecuado de esta tesis...

A SIALATO S.A. de C.V., por las facilidades concedidas, por proporcionarnos los aditivos, los cuales fueron elaborados por dicha empresa, y que constituyen parte importante en el desarrollo de esta tesis...

Al Dr. José Carlos Rubio Ávalos, por el apoyo brindado antes y durante la elaboración de este trabajo, por mostrarme lo bueno de la investigación...

“El proceso de crecimiento del ser humano nunca termina... sobre todo cuando se pretende alcanzar las estrellas...”

Dedicatorias

A mis Padres, sin ellos nada hubiera sido posible, por cinco años de sacrificios que me permitieron que este barco llegara a puerto seguro... Gracias, este triunfo es compartido...

A mis hermanos, que paso a paso estuvieron a mi lado, que se convirtieron en soporte cuando las cosas parecían no tener solución. No tengo palabras que expresen el profundo Agradecimiento por lo que han hecho por mi...

A todos mis familiares, que siempre han sido ejemplo a seguir para mí; e ellos que me han acompañado a lo largo de mi vida y a aquellos que por desgracia no pudieron estar conmigo pero que me llevaron en su corazón...

A todos aquellos que me acompañaron por esta larga travesía, a mis amigos, que me alentaron en los momentos difíciles y que me ayudaron a sobrellevar las vicisitudes de la vida... Gracias...





II.3.2.3. Estabilización	36
II.3.2.4. Usos Industriales	39
II.3.2.5. Agricultura	41
II.3.2.6. Otros Usos	43
II.3.3. Mitos y Realidades de la Cal	43
II.3.3.1. ¿Qué es la Salitre?	44
II.3.3.2. ¿Qué es la Eflorescencia?	44
II.3.3.3. Otros Mitos	45
II.4. Asociaciones y Productores de Cal	46
II.4.1. Asociaciones en México	47
II.4.2. Productores en México	48
II.4.2.1. Grupo Calidra®	48
II.4.2.2. Cal Muro®	49
II.4.2.3. Grupo Bertrán®	51
II.4.2.4. CEMEX®	51
II.4.3. Asociaciones Internacionales	52
II.4.3.1. Asociación Europea de la Cal	52
II.5. Aditivos	54
II.5.1. Aditivos para Concreto	55
II.5.2. La Cal como Aditivo	59
II.5.2.1. Cal Hidratada: Aditivo para la Durabilidad de los Pavimentos Asfálticos	59
II.5.2.2. Cal Viva: Aditivo para eliminar La Contracción del Cemento	61
II.5.3. Aditivos Policarboxilatos	62
II.5.4. Aditivos para Cal	63
Capítulo III. Diseño Experimental	64
III.1. Materiales Utilizados	65
III.1.1. Cal Estándar (Cal Muro)	65



III.1.2. Cal Química Muro	66
III.1.3. Marmolina Tipo 1	67
III.1.4. Agua de Mezcla	67
III.1.5. Óxido de Aluminio	67
III.1.6. Hiperfluidificante Plastol 4000	69
III.1.7. Aditivo DK12	70
III.1.8. Ladrillos	70
III.2. Diseño de las Mezclas	74
III.2.1. Compresión Simple en Morteros	74
III.2.1.1. Composición 1	75
III.2.1.2. Composición 2	76
III.2.1.3. Composición 3	77
III.2.1.4. Composición 4	78
III.2.1.5. Composición 5	79
III.2.2. Diseño de Mezclas Utilizadas en Mamposterías	80
III.2.2.1. Composición 1	80
III.2.2.2. Composición 2	81
III.2.2.3. Composición 3	82
III.2.2.4. Composición 4	83
Capítulo IV. Evaluación Física y Mecánica de Morteros	
De Cal Utilizando Aditivos	84
IV.1. Compresión Simple en Morteros	85
IV.1.1. Consideraciones Generales	85
IV.2. Elaboración de los Especímenes	86
IV.3. Composiciones Seleccionadas Y Resultados de la Prueba	89
IV.3.1. Elaboración de la Muestras Estándar (C1:051010)	89



IV.3.2. Elaboración de Especímenes	
(C2:071010)	92
IV.3.3. Elaboración de Especímenes	
(C3:081010)	96
IV.3.4. Elaboración de Especímenes	
(C4:141010)	99
IV.3.5. Elaboración de Especímenes	
(C5:151010)	103

Capítulo V. Evaluación a Compresión de Pilas

De Mampostería de Cal	107
V.1. Compresión Simple en Mamposterías	108
V.2. Elaboración de los Especímenes	110
V.3. Composiciones Seleccionadas	
Y Resultados de la Prueba	112
V.3.1. Composición 1	113
V.3.2. Composición 2	114
V.3.3. Composición 3	116
V.3.4. Composición 4	119
V.4. Resistencia de Diseño	121

Capítulo VI. Evaluación de la Adherencia

Ladrillo-Mortero de Cal Modificado	122
VI.1. Análisis de la Adherencia en Mamposterías	123
VI.2. Elaboración de los Especímenes	124
VI.3. Composiciones Seleccionadas y	
Resultados de la Prueba	127
VI.3.1. Composición 1	128
VI.3.2. Composición 2	130
VI.3.3. Composición 3	131



VII.4.1. Composición 1 (Cal Estándar)	153
VII.4.2. Composición 2	
(Cal Estándar+Plastol 4000)	154
VII.4.3. Composición 3	
(Cal Estándar+Plastol 4000+Alúmina)	154
VII.4.4. Composición 4	
(Cal Estándar+Aditivo DK12+Alúmina)	155
VII.4.5. Comparación de la Adherencia entre	
Las Composiciones Utilizadas	156
VII.5. Observaciones para la Elaboración de las	
Mezclas: Todas las Composiciones	159
VII.6. Tipos de Fallas en Mamposterías	160
VII.6.1. Falla en Pilas	160
VII.6.2. Adherencia: Tipo de Falla	162
VII.7. Análisis de la Estructura Interna en Morteros	
E Interfase Ladrillo- Mortero de Cal	164
VII.7.1. Análisis de las Lechadas de	
Morteros de Cal	165
VII.7.2. Análisis de la Interfase	173
Capítulo VIII. Estudio de Factibilidad Económico	178
VIII.1. Muestreo Representativo	179
VIII.2. Comparación con los Productos	
De Competencia	182
VIII.2.1. Análisis Económico	182
VIII.2.2. Comparación de Costos	186
Capítulo IX. Conclusiones	189
Capítulo X. Referencias	193



Capítulo I. Introducción





CAPÍTULO I. **INTRODUCCIÓN**

Desde la antigüedad, el hombre se ha enfrentado a un gran problema en materia de vivienda. Desde los tiempos en que el sedentarismo dio inicio, tener un lugar seguro donde habitar y poder resguardarse de la inclemencias del clima y, sobre todo, de los animales salvajes fue una gran preocupación para el ser humano.

Al principio, el hombre comenzó a vivir en cuevas cercanas a los lugares donde podían cultivar, sin embargo, en ocasiones éstas se encontraban muy lejos, por lo que comenzaron a construir los primeros vestigios de casas que hemos encontrado en nuestros días.

La roca caliza se convirtió en uno de los principales componentes de las construcciones de las civilizaciones antiguas, y muchas de ellas aún se encuentran en pie. De hecho, la cal se reconoce como uno de los primeros materiales que fueron utilizados como adherentes para mamposterías. Esto nos demuestra la calidad y confiabilidad de este material, que fue usado como principal cementante durante miles de años.

En la actualidad, la industria de la construcción se ha preocupado por la modernización de los materiales utilizados y se ha dedicado a investigar e innovar en dicha área. Todo este proceso de innovación ha permitido la creación de una gran cantidad de productos que han desplazado a la Cal como componente importante de las obras.

Sin duda alguna, el cemento es el material que más se utiliza en la actualidad, convirtiéndose en el principal punto de inflexión para el uso de la Cal. Podemos señalar varias ventajas que el cemento tiene sobre la Cal, sin embargo, también podemos señalar algunas desventajas.

Entre las **ventajas** que tiene la cal sobre el cemento podemos mencionar:

- Durante el proceso de fabricación de la Cal se producen menos gases y, por lo tanto, se genera menos contaminación, y es por ello que se le considera un producto Ecológico.
- Además de la industria de la construcción, la cal puede ser utilizada en diversas industrias para un gran número de procesos de fabricación y/o mejoramiento de técnicas.
- La energía utilizada para fabricar Cal es mucho menor que la utilizada en la producción de cemento.



- La cal puede ser utilizada como aditivo en ciertos procesos de construcción.
- La materia prima se encuentra en grandes cantidades alrededor de todo el mundo, por lo que las reservas de Cal son abundantes.

Por otro lado, el cemento tiene ciertas características que han llevado a los constructores a usarlo en grandes cantidades. Por ejemplo, algunas **desventajas** de la Cal con respecto al cemento son:

- Las propiedades mecánicas de la Cal son menores en comparación con las del cemento.
- En obras expuestas a condiciones climáticas adversas, el cemento presenta mejores condiciones de resistencia que la Cal.
- Existe una mayor variedad de cementos, cada uno con la capacidad de ser utilizado bajo ciertas condiciones presentes en una obra, mientras que la cal presentará siempre las mismas capacidades. Por ejemplo, es posible que se requieran componentes en obra que resistan el ataque de sulfatos, en el mercado encontramos cementos con esa característica, mientras que la cal no es resistente bajo estas condiciones.

Por lo tanto, el objetivo principal de esta investigación, es sentar las bases para tratar de mejorar las propiedades de la Cal. Crear un producto que tenga mejores características de resistencia que una cal convencional, pero tratando de que se encuentre a un precio mucho más accesible que otros productos dentro del mercado.

El producto que se busca con el desarrollo de este trabajo, es aquel que nos proporcione una buena resistencia bajo las condiciones de carga que se espera han de ser aplicadas durante su vida útil; que presente buenas características de adherencia, para que, cuando se exhiban cargas accidentales y por lo tanto la presencia de esfuerzo cortante en las juntas de una mampostería, el mortero sea capaz de resistir sin causar graves daños estructurales.

En este trabajo también se tratará de establecer las mejores condiciones de uso para los productos que se desarrollaron durante la investigación, con la finalidad de que se obtengan los mejores resultados y los beneficios sean los esperados.

Es importante señalar que, todos los ensayos realizados en este trabajo fueron llevados a cabo siguiendo un estricto apego a las normas establecidas en nuestro país; por lo que, los productos desarrollados cumplen con las características de calidad requeridas.



Capítulo II. Estado -del-Arte





CAPÍTULO II.

ESTADO-DEL-ARTE

En el presente apartado se tratará de dar a conocer una serie de conceptos importantes que se requieren para conocer un poco más acerca del tema que se analizará. Conoceremos también un poco más acerca del mercado del cual dependemos para poder desarrollar el proyecto que se trata de establecer, esto con la finalidad de poder determinar la viabilidad económica de los productos que se tratan de desarrollar en esta investigación.

II.1. ¿Qué es la Cal?

La Cal es un producto químico básico que resulta de la calcinación de piedra caliza (CO_3Ca Carbonato de Calcio), proceso del que se obtiene la cal viva (CaO Óxido de Calcio), la cual después de apagarse con agua (H_2O) 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, tratamientos de aguas y lodos, alimentación y muchas otras.

El Carbonato de Calcio abunda en la naturaleza, presentándose asociada a distintos componentes, por lo tanto con varios grados de pureza:

- Calcita y Aragonita.- Son variedades muy puras, incoloras y de brillo vítreo. Sus cristales, a veces observables a simple vista, tienen formas poliédricas.
- Mármoles.- Los cristales de calcita son de tamaño submicroscópico. De atractivas coloraciones 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 es acompañado por otro carbonato, el Carbonato de Magnesio (CO_3Mg). 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.
- El carbonato de calcio, asociado con fosfatos de calcio, integra huesos y dientes de mamíferos.



II.1.1. Roca Caliza.

El componente fundamental de la caliza es el Carbonato de Calcio (CaCO_3); además pueden tener en su composición sílice, arcilla, óxidos de hierro, etc.

La definición de caliza nos dice que son rocas constituidas, por más de 50% de calcita, y la gran mayoría de ellas están formadas en su totalidad por calcita, siendo de esta manera rocas mono-minerales.

Las calizas constituyen uno de los tipos más abundantes de rocas sedimentarias. Se pueden formar por cualquiera de los medios descritos para las rocas sedimentarias en general; así, existen calizas detríticas, químicas y orgánicas.

Calcita.

La calcita es un mineral muy común, su composición química es CaCO_3 , cristaliza en el sistema trigonal, con una densidad de 2.71 y dureza 3 de fractura concoide, exfoliación perfecta, raya blanca y brillo de vítreo a nacarado; con frecuencia se presenta en forma de masas microcristalinas compactas, dando lugar a las calizas. En masas fibrosas constituye las alabastritas.

Ópticamente presenta doble refracción, esto es, que nos permite ver una imagen doble a través de él. Estos cristales son birrefringentes o anisótropos. Este fenómeno conocido como doble refracción, es debido a que la luz, cuando atraviesa el cristal, origina un rayo ordinario y otro extraordinario que vibran en planos normales entre sí y, a distinta velocidad, tienen índices de refracción diferentes.

La calcita es un mineral característico de ambientes sedimentarios, se forma ya sea por precipitación química, o bien es fijado por organismos marinos, para construir sus caparazones y esqueletos. Puede tener origen metamórfico o magmático. Sus cristales en la variedad de espato de Islandia se utilizan en la fabricación de instrumentos ópticos como microscopios de tipo petrográfico. Las calizas y los mármoles se utilizan en la construcción y en el arte.

II.1.1.1. Clasificación de las Calizas.

De acuerdo a la clasificación establecida por Pettijhon las calizas pueden ser autóctonas y aloctonas.

Las autóctonas se forman in situ por una acumulación de calizas orgánicas, no transportadas y se pueden dividir a su vez en dos: las



Bioermales, si son de extensión restringida y Bioestromales si son de carácter extendido.

Las calizas aloctonas son formadas por materiales desarrollados en otros sitios y depositados en el lugar.

Las dos clasificaciones más utilizadas son las de Folk (1959) que denomina a los constituyentes esenciales de las calizas como los aloquímicos y ortoquímicos; y la de Dunham (1962) que considera la textura depositacional en base a la presencia o ausencia de lodo carbonatado, abundancia de granos carbonatados y signos de ligadura o unión entre las estructuras orgánicas.

II.1.1.2. Tipos de Calizas.

Calizas Detríticas.

Se originan por erosión y transporte de calizas anteriores. Son semejantes a los conglomerados, areniscas o arcillas, pero compuestas por clastos y cemento calcáreo.

Las calizas oolíticas están formadas por pequeñas concreciones de carbonato (oolitos), son esféricas y están cementadas por el mismo carbonato. Cuando las concreciones son mayores (pinolitos), se tienen las calizas pisolíticas.

Entre las calizas detríticas de grano de tamaño arcilloso están las calizas litográficas, muy compactas. En ellas se han conservado impresiones de fósiles.

Las margas son rocas intermedias entre calizas y arcillas; cuando contienen aproximadamente igual cantidad de ambas sustancias, constituyen la materia prima para la fabricación del cemento Portland.

Calizas Químicas.

Se forman por precipitación del carbonato insoluble, al desprenderse el Dióxido de Carbono; son los travertinos y las tobas calizas. Los caliches son costras calizas formadas sobre el suelo, en las regiones secas, al ascender el agua por capilaridad y precipitar el carbonato en la superficie.

Calizas Bioquímicas.

Se forman por precipitación del carbonato de calcio, debido a la actividad de algas y bacterias. En conjunto son poco importantes.

Calizas Organogenas.

Son las calizas más abundantes. Se forman por la acumulación de los esqueletos u otras partes duras de diversos grupos de animales: moluscos, corales, esponjas, equinodermos, etc.



II.1.2. Factores que afectan la calidad de la Cal.

Impurezas.

Las impurezas en la piedra caliza afectan la calidad del Óxido de Calcio que se obtenga. Las piedras calizas comunes están formadas por los siguientes minerales:

- Carbonato de Calcio.
- Carbonato de Magnesio.
- Sílice.
- Alúmina.
- Hierro.
- Sulfuros y otros minerales derivados.

Estructura Cristalina.

La estructura cristalina en el carbonato de Calcio afecta el grado de calcinación, la resistencia interna de la Caliza, así como el tamaño de los cristales de Óxido de Calcio (CaO) resultantes. Los cristales más pequeños coagulan durante la calcinación, formando cristales más largos, lo que produce una reducción en el volumen. Mientras más alta sea la temperatura a la cual se somete la piedra de Carbonato de Calcio, mayor será la coagulación. Mientras más coagulación se presente, se tendrá una mayor reducción de volumen.

Densidad y Estructura Cristalina.

La densidad de la piedra caliza y su estructura cristalina están de alguna forma relacionadas. El acomodo de los cristales determina los espacios vacíos entre ellos y, por lo tanto, la densidad de la piedra caliza. Vacíos más grandes permitirán una mayor generación de gases de Dióxido de Carbono durante la calcinación.

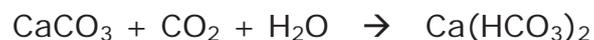
II.1.3. Propiedades Físicas y Químicas.

Carbonato de Calcio.

Como todos los carbonatos, el de Calcio reacciona con los ácidos. El ácido clorhídrico cuando actúa sobre el mármol, produce efervescencia: el dióxido de Carbono se desprende gaseoso.



El Carbonato Cálculo que reacciona con agua que está saturada con Dióxido de Carbono forma Bicarbonato Cálculo, como lo muestra la siguiente ecuación:





Nombre (IUPAC) sistemático	
Carbonato de calcio	
General	
Otros nombres	Carbonato cálcico
Fórmula semidesarrollada	CaCO ₃
Fórmula molecular	CaCO ₃
Identificadores	
Número CAS	471-34-1

Tabla 2.1.

Propiedades físicas	
Estado de agregación	Sólido
Apariencia	Polvo blanco inodoro.
Densidad	2700 Kg./m ³ ; 2,7 g/cm ³
Masa molar	100,1 g/mol
Propiedades químicas	
Solubilidad en agua	0,0013g por cada 100g de agua

Tabla 2.2.

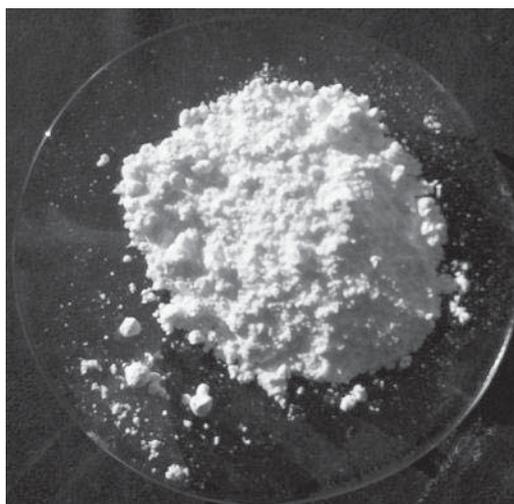


Figura 2.1. Carbonato de Calcio



Óxido de Calcio (Cal Viva).

Las principales propiedades químicas del Óxido de Calcio ó Cal viva son:

Nombre (IUPAC) sistemático	
Óxido de calcio	
General	
Otros nombres	Óxido cálcico Óxido de calcio (II) Cal viva
Fórmula semidesarrollada	CaO
Fórmula molecular	n/d

Tabla 2.3.

Identificadores	
Número CAS	1305-78-8
Propiedades físicas	
Estado de agregación	Sólido
Apariencia	Blanco
Densidad	3300 Kg./m ³ ; 3,3 g/cm ³
Masa molar	56,1 g/mol
Punto de fusión	3200 K (2927 °C)
Punto de ebullición	3773 K (3500 °C)

Tabla 2.4.

Propiedades químicas	
Solubilidad en agua	Reacciona
Riesgos	
Ingestión	Peligroso, causa irritación, en grandes dosis puede ser fatal.
Inhalación	Peligroso; causa irritación, bronquitis química o la muerte en casos de exposición a largo plazo.
Piel	Irritación y posibles quemaduras.
Ojos	Puede causar daños permanentes.

Tabla 2.5.

Todos los valores proporcionados se muestra con unidades de medición del Sistema Internacional (SI) y en condiciones normales (0°C y 1atm.).

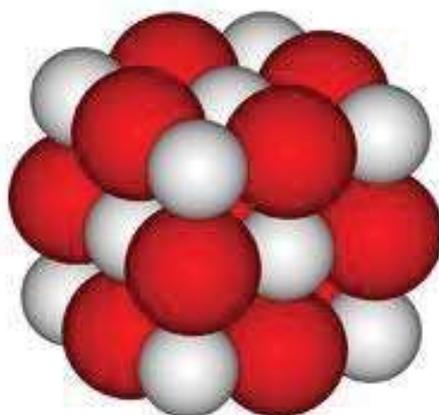


Figura 2.2. Molécula de CaO

Hidróxido de Calcio.

El hidróxido de Calcio es un hidróxido cáustico. Es un cristal incoloro o polvo blanco, obtenido al reaccionar óxido de Calcio con agua. Puede también precipitarse mezclando una solución de Cloruro de Calcio con una de Hidróxido de Sodio.

La solución de hidróxido de Calcio en agua es una base fuerte que reacciona violentamente con ácidos y ataca varios metales. Se enturbia en presencia de dióxido de carbono por la precipitación de Carbonato de Calcio.

Nombre (IUPAC) sistemático	
Hidróxido de calcio	
General	
Otros nombres	Hidróxido cálcico Cal apagada Cal muerta
Fórmula semidesarrollada	Ca (OH) ₂
Fórmula molecular	CaO ₂ H ₂

Tabla 2.6.

Propiedades físicas	
Estado de agregación	Sólido
Apariencia	Polvo blanco
Densidad	2211 Kg./m ³ ; 2,211 g/cm ³
Masa molar	74,093 g/mol
Punto de descomposición	653 K (°C)



Estructura cristalina	Hexagonal
Propiedades químicas	
Alcalinidad (pK _b)	-2.37
Solubilidad en agua	0.185g/100 cm ³
KPS	7.9 x 10 ⁻⁶

Tabla 2.7.

II1.4. Historia y Antecedentes.

Históricamente, la cal ha sido utilizada en grandes construcciones que han sido conocidas por su solidez y resistencia a lo largo del tiempo. Entre estas obras realizadas por el hombre, utilizando la cal, podemos mencionar las siguientes:

- Pirámides de Egipto.



Figura 2.3. Pirámides de Egipto



Figura 2.4. Muralla China

- Muralla China



- Coliseo Romano



Figura 2.5. Coliseo Romano

Las obras más antiguas realizadas con cal se encuentran en el territorio que en la antigüedad formó parte del imperio de Mesopotamia, específicamente en ciudades como Uruk (ahora Warka) y en Gilgamesh, en donde se descubrieron de carácter religioso, los cuales estaban contruidos con ladrillos crudos que se cubrían con una lechada de cal y revestidos con mosaicos.

En América, durante la época colonial, se siguieron erigiendo grandes edificaciones en las que se implicaba el uso de la Cal para su construcción. Algunos de esos edificios han logrado resistir con firmeza los embates del tiempo y la fuerza de la naturaleza.



Figura 2.6. Algunos edificios en los que se utilizó Cal para su construcción. México.

Con base en los testimonios mencionados anteriormente podemos señalar que la cal es un producto que nos garantiza solidez y resistencia en la construcción, siempre y cuando sea utilizado bajo las condiciones adecuadas, tan es así que en la elaboración del primer concreto moderno producido en América, el cual fue utilizado para la construcción del canal Erie, en Lockport, New York, se empleo Cal Hidráulica.



Actualidad.

Hablando del mercado dentro del cual se encuentra la Cal, podemos mencionar tanto fortalezas como oportunidades de esta industria.

FORTALEZAS:

1. Es una industria muy arraigada en el medio de la construcción, pues aquí la cal ha probado su efectividad a lo largo del tiempo.
2. Cuenta con suficiente materia prima en toda la República Mexicana.
3. Es capaz de cubrir cualquier demanda a mediano plazo.
4. Se puede diversificar el uso de los productos en diferentes aplicaciones: industriales, ecológicas, agricultura y más.
5. Es una industria con cobertura nacional.
6. Genera empleos.
7. Las mezclas Cal-Arena tienen más rendimiento que otros aglomerantes y no generan desperdicio, es más económica que otros y, finalmente, es un producto ecológico.

OPORTUNIDADES:

1. El alto índice de crecimiento demográfico es un factor que aumenta la actividad que se desarrolla en el medio de la construcción y posiciona a la industria en dicho mercado.
2. La participación en mayor medida en la construcción formal, toda vez que cada día se trabaja para elevar la calidad de los productos, cumpliendo con las normas establecidas en cada país.
3. Su permanencia, a través de la constante modernización y eficiencia.
4. La conquista de importantes mercados comerciales.
5. Su capacidad para satisfacer las necesidades mediante la segmentación de productos, de acuerdo a las necesidades del mercado que se desee abordar.
6. La facilidad para la exportación de los productos.
7. Los resultados de estudios y pruebas físicas y químicas que demuestran la eficiencia de la Cal.
8. Aumento de la presencia de la industria de la Cal en los mercados actuales, esto debido a que la mayoría de los formadores de la industria se están modernizando e invirtiendo para mantenerse a la vanguardia.
9. Los precios competitivos en el mercado de la construcción formal.



II.2. Proceso de Fabricación de la Cal.

En este apartado se dará a conocer el proceso mediante el cual se fabrica la cal, desde el momento de la obtención de las materias primas, hasta la consecución de los productos finales. También se hará mención de los alcances actuales en la industria calera, es decir, la producción anual de estos productos, con la finalidad de poder establecer la disponibilidad del material y, así poder determinar la factibilidad en el uso de la cal.

II.2.1. Yacimientos de Roca Caliza.

Yacimientos de minerales metálicos en rocas carbonatadas

Las rocas carbonatadas con cierta frecuencia contienen mineralizaciones metálicas, sobre cuyo origen ha habido una larga y aún inconclusa polémica: se han defendido desde un origen estrictamente sedimentario para los mismos, hasta un origen claramente postdeposicional, pasando por la posibilidad de que tengan origen diagenético.

Los más frecuentes corresponden a yacimientos de sulfuros de Pb-Zn-Cu, a menudo acompañados de fluorita y barita, que también pueden llegar a ser mayoritarios: se conocen también con el nombre de "yacimientos de tipo *Mississippi Valley*", ya que son muy abundantes en esta región del centro de los Estados Unidos. Son también abundantes en las formaciones carbonatadas de las cordilleras alpinas europeas (Alpes, Béticas...), por lo que también reciben el nombre de yacimientos de tipo Alpino.

Suelen aparecer encajados en formaciones carbonatadas, en forma de masas más o menos continuas lateralmente y de potencia muy variable en el detalle, y la mineralización suele ir asociada a encajante dolomítico. Este hecho sugiere que su origen sea posterior al proceso de dolomitización, y posiblemente esté condicionado por el aumento de porosidad de estas rocas, que favorece la entrada de fluidos en la misma. En cualquier caso, lo que a menudo resulta evidente es que son el resultado de la interacción entre fluidos mineralizados y la roca carbonatada; al tratarse de fluidos por lo general ácidos, su introducción en la roca se ve favorecida por la reactividad de sus componentes (calcita y/o dolomita) frente a la acción de estos fluidos.

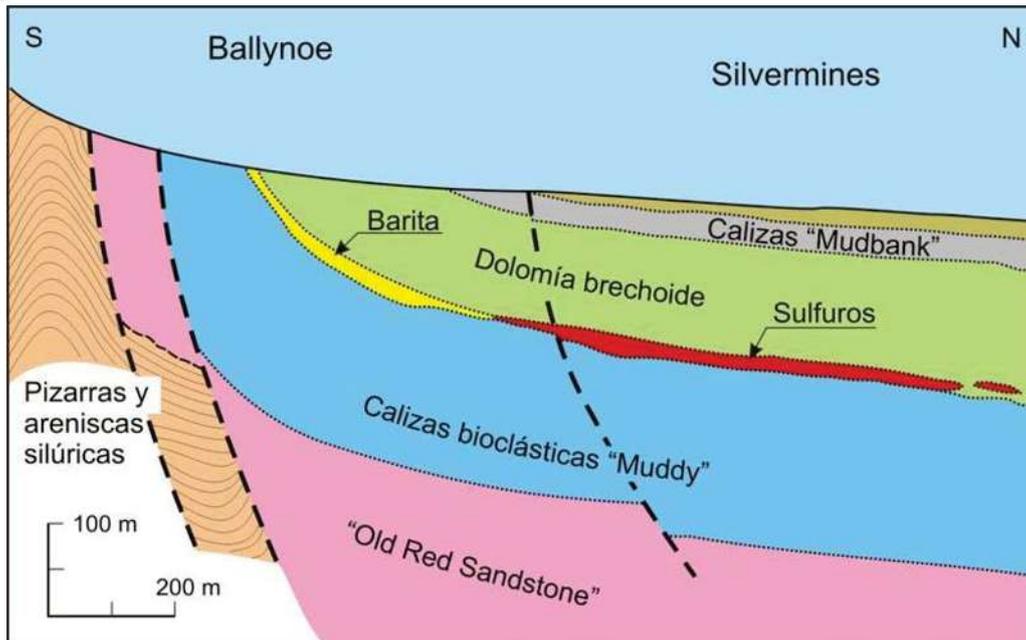


Figura 2.7. Esquema de Yacimientos tipo Mississippi Valley

Para que los yacimientos de piedra caliza puedan ser aprovechados, éstos deben tener una pureza de al menos 98% de Carbonato de Calcio y un contenido máximo de 0.2% de fierro y aluminio. Para hacer una operación rentable se debe asegurar un abasto de materia prima de al menos 1 millón de toneladas de piedra.

II.2.1.1. Yacimientos en México.

La importancia de la Caliza en México se hace evidente al observar un mapa geológico de la república, pues éste nos muestra las grandes extensiones de formaciones carbonatadas, principalmente Mesozoicas, que afloran en el país.

Los yacimientos de caliza más importantes que se encuentra en México son los de Huescalapa, Jalisco, Tolteca Hidalgo, Apasco México y otros en los estados de Nuevo León, Oaxaca y Guanajuato.

Otros yacimientos importantes los podemos encontrar en la zona de Tizayuca y Zimapán, en el estado de Hidalgo, en algunas zonas de Puebla y en el norte del país en la región de la Laguna.

Otros yacimientos de caliza que toman gran importancia en nuestro país, son aquellos de los cuales podemos extraer calizas ópticas. Las zonas en donde encontramos este tipo de yacimientos son:

- En Mina Nuevo León de los predios "Los Dos Amigos" y "Comodín".
- En el Estado de Hidalgo (Zimapán).



Los cristales que son extraídos de estas áreas son de mejor calidad de los que podemos encontrar en Brasil, China y algunos países Sudafricanos.

Además de los mencionados anteriormente, en Tula, Apaxco y Ajoloapan se localizan varios de los afloramientos de rocas sedimentarias más importantes de la cuenca de México (actualmente territorio del Estado de México).

II.2.1.2. Yacimientos alrededor del Mundo.

Como ya se mencionó anteriormente, los yacimientos de piedra caliza se encuentran distribuidos en todo el mundo, por lo que sería muy difícil tratar de mencionarlos todos. Por lo tanto, en este apartado se mencionarán solo los yacimientos que se pudieron localizar con más facilidad.

Sudamérica.

A través de todo el mundo, las industrias productoras de Cal están localizadas al lado de los propios yacimientos de Caliza, o en las cercanías de los mismos.

En la región del MERCOSUR, formada por la parte central de Argentina, sur de Brasil y todo Uruguay, hay solamente cuatro puntos donde están ubicados los yacimientos de caliza con concentraciones adecuadas de Carbonato de Calcio. Ellos son:

- San Juan y Córdoba en Argentina.
- Minas Gerais en Brasil.
- Lavalleja en Uruguay; y
- Maldonado y Treinta y tres en Uruguay.

Estados Unidos de América.

A continuación se muestra una tabla en la que se presentan los estados con mayor producción de Cal en ese país, por lo que se establece que los principales yacimientos de caliza se encuentran en dichos lugares:



State	Plants ³	Hydrated (thousand metric tons) ⁴	Quicklime ⁵ (thousand metric tons) ⁴	Total (thousand metric tons) ⁴	Value (thousands)
2006:					
Alabama	5	164	2,290	2,450	\$224.000
Arizona, Colorado, Idaho, Montana, Nevada, New Mexico, Utah, Wyoming	20	357	2,910	3,260	237.000
California, Oregon, Washington	6	70	253	323	39.000
Illinois, Indiana, Missouri	7	549	3,450	4,000	322.000
Iowa, Nebraska, South Dakota	3	W	W	352	26.900
Kentucky, Tennessee, West Virginia	5	133	2,730	2,860	209.000
Ohio	7	140	1,710	1,850	150.000
Pennsylvania	6	177	984	1,160	115.000
Texas	5	654	995	1,650	130.000
Wisconsin	4	196	726	922	70.700
Other ⁶	23	340	2,170	2,510	181.000
Total	91	2,780	18,200	21,000	1,700.000
2007:					
Alabama	5	152	2,330	2,480	234.000
Arizona, Colorado, Idaho, Montana, Nevada, New Mexico, Utah, Wyoming	20	295	2,790	3,090	264.000
California, Oregon, Washington	6	58	163	222	30.700
Illinois, Indiana, Missouri	6	457	3,470	3,920	317.000
Iowa, Nebraska, South Dakota	3	W	W	338	29.400
Kentucky, Tennessee, West Virginia	5	128	2,520	2,640	205.000
Ohio	6	125	1,570	1,690	159.000
Pennsylvania	4	143	954	1,100	112.000
Texas	4	697	923	1,620	132.000
Wisconsin	5	175	784	959	78.000
Other ⁶	24	362	2,120	2,140	197.000
Total	89	2,590	17,600	20,200	1,760.000

Tabla 2.8. Producción de Cal en USA

II.2.2. Extracción y Trituración

Extracción.

Como ya se mencionó anteriormente, la piedra caliza (formada principalmente por Carbonato de Calcio) se encuentra en la naturaleza, en depósitos distribuidos en casi todo el mundo. Por lo tanto, si se está hablando del proceso de producción de la cal, es muy importante que el primer paso sea mencionar la forma en que se extrae la piedra caliza, de la cual se deriva el producto final en cuestión: Cal.

El Carbonato de Calcio es un producto natural que puede ser encontrado como piedra caliza, como mármol, entre otras.

La piedra caliza, totalmente pura, puede presentarse con tonalidades de gris claro u oscuro, de acuerdo con las condiciones del lugar del cual ha sido extraída, como puede ser el clima y la mineralogía del suelo en el cual se encuentra el depósito de rocas de este tipo. Estas rocas contienen aproximadamente un 98% de Carbonato de Calcio, para



producir Oxido de Calcio ó Cal Dolomítica (CaO y CaO MgO respectivamente).

La piedra caliza, ya sea e forma de Carbonato de Calcio (CO_3Ca) ó Dolomita ($\text{CaCO}_3.\text{MgCO}_3$), se extrae (a partir de una gran masa) selectivamente, de acuerdo con sus características físicas y químicas.

La extracción consiste en desmotar el área donde existe un yacimiento de caliza, descapotar y posteriormente barrenar aplicando el plan de minado que se haya diseñado, enseguida se pone la carga de explosivos y se procede a la voladura primaria, moneo, tumba y rezagado para, a continuación cargar y acarrear la materia prima hacia la planta de trituración.

Removida por cargadores mecánicos o camiones, las rocas son transportadas y descargadas en trituradoras donde serán lavadas, fracturadas, transportadas y almacenadas de acuerdo al uso que se la vaya a dar al material obtenido.

Trituración.

Consiste en pasar la roca caliza a la quebradora, la cual arrojará como productos trozos de menor tamaño. Si se cuenta con hornos rotatorios, la roca deberá ser de fragmentos de menor tamaño.

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, éste puede ser de 2", 3", 4", 5" ó 6".

II.2.3. Proceso de Fabricación.

En este apartado se mostrará el proceso que se sigue para la elaboración de la cal una vez que se ha terminado el proceso de extracción y selección de la roca caliza. El procedimiento que a continuación se menciona es el más comúnmente usado por los fabricantes de cal. Además, también se mencionarán los factores que deben ser tomados en cuenta durante el proceso, con la finalidad de que los productos sean de la más alta calidad y confiabilidad.

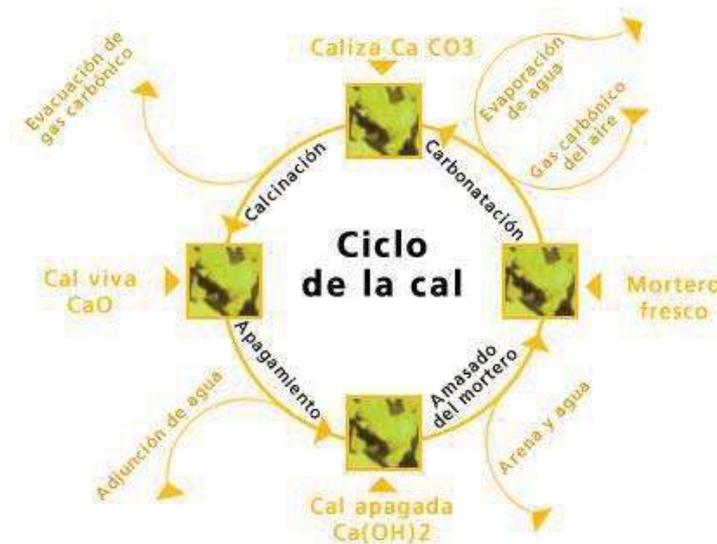


Figura 2.8. El Ciclo de la Cal

II.2.3.1. Calcinación de la Roca Caliza.

En los yacimientos de roca caliza, donde encontramos esta roca en su estado natural y, dependiendo de las características geológicas de la zona, encontraremos una gran variedad de este tipo de roca sedimentaria, con diferentes contenidos minerales y que nos permitirán obtener productos para diversos usos.

Parte de las rocas extraídas, seleccionadas de acuerdo a su composición química y granulometría, son calcinadas a temperaturas cercanas a los 1000 °C en diferentes tipos de hornos. La calcinación se hace utilizando diversos tipos de combustibles tales como gas natural, carbón mineral, aceite combustible, entre otros.



Figura 2.9. Calcinación de la Roca Caliza



El dióxido de carbono de las rocas es liberado para producir cal dolomítica o cal viva calcinadas (CaO.MgO ó CaO respectivamente). Esto se produce de acuerdo a la reacción que se muestra a continuación:



Figura 2.10. Precipitación del CO₂

Factores que afectan el Proceso de Calcinación.

Composición Química de la Roca.

La composición química de las rocas no puede ser controlada sin que se incremente el costo de manufactura, por lo tanto, variaciones en la composición son generalmente aceptadas, esto genera que la temperatura de calcinación deba tener un mayor control. Para que la roca sea calentada uniformemente en el horno, el tamaño de la partícula debe ser relativamente uniforme. Además, para evitar una estadía larga dentro del horno, el tamaño de la partícula de las rocas debe ser pequeño, lo más usual es que no sobrepasen los 3.8 cm (1.5 pulgadas). De cualquier forma, debido a la naturaleza del proceso de trituración, se acepta un rango en el tamaño de la partícula de 1.25 cm-5cm (0.5-2.0 pulgadas aproximadamente).

Desde que la temperatura y el tiempo de estadía en el horno son constantes, el calor de penetración en las partículas de la roca es diferente debido a la variación del tamaño de las rocas. Si se tiene un tamaño de roca muy grande, el calor no penetra mucho más allá de la corteza. Por lo tanto, el centro de estas piezas permanece como Carbonato de Calcio mientras que el exterior se convierte en Óxido de Calcio. Para rocas de tamaño medio, el calor de penetración es completo y toda la roca es convertida en Óxido de Calcio. Para rocas pequeñas, el calor alcanza el centro rápidamente y la capa del exterior se sobrecalienta formando una coraza en el exterior donde el agua no puede penetrar, por lo tanto, el proceso de descomposición es



notablemente retardado o prevenido. Aquí, las partículas más grandes y las de tamaño medio son cal altamente reactiva, de quemado fácil, mientras que las partículas pequeñas son llamadas cal de quemado difícil (hard-burned quicklime).

Temperatura del Horno.

La temperatura teórica que se requiere para la calcinación es de aproximadamente 900 °C, de cualquier forma, en la práctica encontramos que la temperatura debe ser mucho mayor, cerca de los 1,350 °C. Determinar la temperatura correcta en el horno es un arte más allá de una ciencia, y depende del tamaño de las rocas, del tipo de horno y del combustible que ha de usarse. El operador debe experimentar para poder determinar la temperatura exacta para cada caso particular, de acuerdo al tamaño de la roca. En general, lo mejor es usar la temperatura más baja con el tiempo de estadía más corto para alcanzar la calcinación completa.

Si se utiliza una temperatura de calcinación muy alta se provocará una contracción o disminución en el volumen. Altas temperaturas causarán también una re-carbonatación en la superficie de las rocas de Óxido de Calcio con la presencia de Dióxido de Carbono, que elimina los poros de la cal y la hace inapropiada para la hidratación.

La temperatura en el horno afecta la calidad del Óxido de Carbono producido. Partículas de tamaños muy pequeños y superficie específica más grande son los productos más recomendables. Una partícula de cal de bajo quemado (soft-burned lime) está llena de grietas semejantes a un cabello donde el Dióxido de Carbono ha escapado de la roca caliza durante el proceso de calcinación. Cuando las partículas con expuestas al agua, ésta penetra por las grietas de las partículas de cal y llena esas cavidades.

La hidratación ocurre rápidamente, liberando una gran cantidad de energía calorífica. Esta energía hará hervir el agua y generará vapor, que provocará que las partículas se fracturen, dejando expuestas las capas internas que se hidratarán para una mayor slaking. Este proceso continuará hasta que la hidratación se complete.

Rango de Incremento de Temperatura.

El incremento de la temperatura debe ser gradual y constante. Esto es particularmente importante cuando se trata de rocas de tamaño grande, aproximadamente de 10 a 15 cm (4-6 pulgadas). Cuando se están calcinando rocas de este tamaño, deben permanecer porosas durante el proceso. Mientras la temperatura aumenta, la capa externa de las rocas es calentada hasta una temperatura de disociación, donde el Dióxido de Carbono escapa, dejando pasajes capilares y haciendo a la



roca porosa. Mientras el gas escapa, la roca disminuye su volumen hasta en un 40%. Esta disminución en el volumen restringe el paso de gas desde el centro de la roca, previniendo que sigan escapando cantidades adicionales de Dióxido de Carbono.

Un tamaño de roca adecuado cuando se utilizan hornos VSK es de 5 a 10 centímetros (2-4 pulgadas). Este tamaño permite un calentamiento más rápido, un tiempo de estadía en el horno más corto. En conclusión, las rocas de menor tamaño, es decir, de aproximadamente 4 a 5 centímetros (1.5-2 pulgadas) son apropiadas para ser calcinadas en hornos rotatorios, donde tendrán un tiempo de estadía óptimo. La baja temperatura de calcinación también permitirá un menor consumo de combustible. Si la temperatura en el horno se aumenta muy rápido la capa del exterior de la roca se calcina muy rápido. Mientras la temperatura siga aumentando, la superficie de las rocas se contraerá, cerrando los poros creados por el escape de Dióxido de Carbono. Esto producirá un incremento en la presión interna de la roca. Una vez que el gas no puede escapar, se produce una implosión y la roca se desintegra, produciendo partículas finas que no son deseadas en el proceso, por lo que se reduce la calidad del Óxido de Calcio resultante.

Retención en el Horno.

El tiempo de retención depende del tamaño de la roca tanto como de la temperatura de calcinación. El tamaño de las rocas es el elemento más crítico en el proceso de calcinación. Cuando la roca entra en el horno será expuesta a los gases calientes que se encuentran dentro del horno. El rango de la penetración de calor en las rocas está basado en ΔT (temperatura de la roca vs. Temperatura de los gases). Adicionalmente al ΔT , al calor le toma un cierto tiempo penetrar la roca. Mientras más pequeña sea la roca, menor es el tiempo de penetración del calor; en el caso de roca pulverizada, el tiempo de retención puede ser reducido hasta menos de un minuto. Si el tiempo de retención es muy corto, el centro de la roca permanece como Carbonato de Calcio mientras que el exterior se convertirá en Óxido de Calcio. Por otro lado, si el tiempo de retención es muy largo, la superficie de las rocas se contraerá, cerrando los poros creados por el escape de Dióxido de Carbono, produciendo una superficie impermeable. Por lo tanto, podemos establecer que, un tiempo de retención en el horno muy largo significa menos producción y altos costos de producción.

El tiempo de estadía en el horno para el Óxido de Calcio es crítico durante el proceso de calcinación. Es importante que este tiempo sea lo más corto posible. De cualquier forma, debemos permitir que el tiempo



sea suficiente para que el calor penetre en las partículas de Óxido de Calcio y conduzca al Dióxido de Carbono fuera de dichas partículas. La calcinación puede hacerse de cualquiera de las formas que se mencionan a continuación:

1. Con una baja temperatura y aun alto tiempo de estadía en el horno.
2. Con alta temperatura y bajo tiempo de estadía en el horno.

Concentración de Dióxido de Carbono en el Horno.

Como el Dióxido de Carbono es liberado de la roca caliza durante el proceso de calcinación, la concentración de este gas en la atmósfera del horno se incrementa. Para una apropiada calcinación, el Dióxido de Carbono debe ser liberado continuamente; si esto no ocurre, una combinación de altas cantidades de CO_2 y una temperatura de calcinación alta producirán una re-carbonatación en la superficie de las rocas, convirtiendo el Óxido de Calcio en Carbonato de Calcio. Además, el Dióxido de Carbono y el Óxido de Calcio reaccionarán con las impurezas que son partículas inertes de la roca caliza (como pueden ser silicatos, alúmina y otros minerales).

Tamaño de la Roca/Tipo de Horno.

Dependiendo del tipo de horno, ya sea vertical o rotatorio horizontal, el tamaño de la roca será diferente.

En hornos verticales, la roca se mueve hacia abajo, mientras que los gases fluyen hacia arriba a través de la roca, por lo que éstas deben ser lo suficientemente grandes para permitir la formación de cavidades, a través de las cuales, los gases de combustión, podrán fluir hacia la parte alta del horno. Estos hornos, generalmente trabajan con rocas de tamaño de 5 a 10 cm (2-4 pulgadas), además, el incremento de temperatura debe ser lento y por lo tanto, el tiempo de estadía debe ser alto. Usualmente, los hornos verticales son operados a una temperatura de 900 a 1000°C. Los hornos verticales son óptimos en cuanto al uso de combustible, pero limitados en su capacidad.

Tipo de Combustible Usado.

La mayoría de los procesos de calcinación se hacen utilizando aceite, petróleo o gas natural como combustibles. Normalmente, los hornos verticales usan aceite o gas natural, mientras que los horizontales usan petróleo. De cualquier forma, ambos tipos de horno pueden utilizar cualquiera de los combustibles mencionados anteriormente. Generalmente, el petróleo es pulverizado dentro de una cámara de combustión.



Los hornos deben ser enfriados periódicamente y las cenizas retenidas deben ser removidas manualmente, lo que implica un alto costo de operación. El gas natural es el más limpio de los combustibles utilizados. Para calcinar la roca hasta un grado reactivo, el gas natural debe ser el combustible elegido.

Pre-calentado y Enfriamiento.

La calcinación de la roca demanda una gran cantidad de energía y consume cantidades considerables de combustible. Gran parte de la energía desperdiciada viene de la remoción de los gases del horno. Para lograr la eficiencia en el consumo de combustible, la industria ha desarrollado el siguiente proceso:

- Los gases de combustión son utilizados para pre-calentar la roca antes de entrar al horno. Este proceso, además de recuperar una gran cantidad de la energía calorífica producida por los gases, también reduce el tiempo de estadía de la roca en el horno y, por lo tanto, se reduce el tamaño del horno requerido para la calcinación.
- Cuando la roca ha sido calcinada y sale del horno se encuentra al rojo vivo, a una temperatura cercana a los 1200°C. Esto representa una substancial fuente de calor. Para recuperar parte de esta energía, la combustión de aire fresco es usada para enfriar la cal. El aire caliente resultante es introducido en el horno. Este aire ayuda a lograr un consumo de combustible eficiente mediante la recuperación de una parte del calor desperdiciado.

Atmósfera del Horno.

Además de la temperatura y tiempo de estadía en el horno, la atmósfera del horno afecta la calidad del Óxido de Calcio. Mientras la temperatura del Carbonato de Calcio se incrementa, se libera Dióxido de Carbono, produciendo Óxido de Calcio. El CO_2 debe ser emitido fuera de la atmósfera del horno, ya que si no es así, el CaO tiende a unirse nuevamente con el gas, generando una re-carbonatación, es decir, se convierte nuevamente en CaCO_3 .

II.2.3.2. Hidratación: Apagado de la Cal.

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.



Figura 2.11. Proceso de Hidratación

Factores que afectan el Proceso de Apagado.

El factor más importante que afecta la eficiencia durante el proceso de apagado es la superficie específica (o área superficial) de las partículas de hidróxido de calcio. Mientras más grande sea dicha superficie, mayor será el área disponible para la reacción y, por lo tanto, se tiene una reacción más eficiente y un menor consumo de roca.

Además de la superficie específica de las partículas de Hidróxido de Calcio, existen otros factores que pueden afectar el proceso de apagado de la cal viva, a continuación se mencionan algunos de ellos.

Tipo de Roca Caliza.

Los depósitos de Carbonato de Calcio generalmente no son puros, es decir, que pueden contener muchos otros elementos, tales como magnesio, aluminio y compuestos que afectan la calidad de hidratación producida en sus rocas. Los productores de cal no pueden tener control sobre esas impurezas, por lo tanto, mientras menos puro sea el depósito, mayor será el requerimiento de agua para la hidratación del Óxido de Calcio.

Proceso de Calcinación.

La temperatura y tiempo de residencia apropiados durante el proceso de calcinación tienen una gran influencia en la calidad del hidróxido que se obtenga. El problema que más comúnmente se asocia al proceso de calcinación es la obtención de cal de quemado difícil (hard-burned quicklime). Cuando se tiene este tipo de Cal, encontramos una capa muy dura en el exterior de las partículas del Óxido de Calcio, lo cual provoca que sea muy difícil que el agua penetre para iniciar el proceso de apagado. Para poder apagar este tipo de Cal es necesario que la capa superficial sea retirada, con la finalidad de que los poros de la partícula queden expuestos y así, pueda penetrar el agua. Por lo



tanto, si encontramos este tipo de partículas de CaO necesitaremos un mayor tiempo de apagado.

Temperatura de Apagado.

La temperatura de apagado es el factor más importante que afecta el tamaño y el área superficial de las partículas hidratadas. Mientras más cercana a los 99°C sea la temperatura de apagado, obtendremos partícula de tamaño mucho más fino y con una mayor área superficial. Por lo tanto, la relación entre la temperatura y el tamaño de la partícula no es lineal.

Aunque desde un punto de vista teórico la mejor temperatura para llevar a cabo el proceso de apagado es de aproximadamente 100°C, desde un punto de vista práctico, es muy difícil que se lleva a cabo el proceso a tan alta temperatura sin tener problemas de seguridad u otros efectos adversos debido a la aglomeración de partículas. En la práctica, temperatura de apagado entre los 70 y 85°C son lo más adecuado para obtener resultados óptimos.

Grado de Agitación.

El grado de agitación durante el proceso de apagado tiene gran impacto en el producto final. Muy poca agitación provocará temperaturas desiguales dentro de la cámara de apagado, obteniendo algunos puntos fríos y otros calientes. Los puntos calientes se obtienen cuando el proceso de apagado se lleva a cabo a temperaturas superiores a los 100°C; si el proceso se realiza a dicha temperatura, obtendremos cristales hexagonales muy grandes con reducida superficie específica y aglomeración de partículas. Los puntos fríos pueden dar como resultado partículas de Óxido de Calcio ya sean ahogadas o deshidratadas.

Viscosidad de la Mezcla.

La viscosidad de la mezcla de Hidróxido varía fuertemente de una roca a otra, así como con las condiciones bajo las cuales se lleva a cabo el proceso. Ciertos cambios en las condiciones de hidratación o en las impurezas de las rocas aumentarán la viscosidad de la mezcla. En otras ocasiones la viscosidad aumenta cuando se tienen temperaturas de apagado entre 80 y 85°C.

La relación entre la viscosidad, el tamaño de la partícula y el área específica, no ha sido estudiada en la actualidad. En general, se cree que una alta viscosidad significa que se tiene un tamaño de partícula muy pequeño.



Tiempo de Apagado.

El tiempo de apagado se define como: "El tiempo requerido para completar el proceso de hidratación". Este tiempo varía dependiendo del tipo de roca que se tenga en el depósito. Una roca altamente reactiva estará completamente hidratada en 5 o 10 minutos. Rocas menos reactivas y rocas que contengan magnesio se hidratarán en un periodo de 15 a 30 minutos.

Química del Agua.

La presencia de ciertos componentes químicos en el agua de apagado aceleran o retardan el proceso de hidratación. Si el agua contiene una gran cantidad de sólidos disueltos se presentará mucha efervescencia, que nos dará como resultado problemas durante la operación.

Aguas que contengan más de 500 mg/l. de sulfatos no son recomendables para llevar a cabo el proceso de hidratación; sin embargo, el agua de mar puede ser muy efectiva para el apagado del CaO. Por lo tanto, los materiales con los cuales ha de ser construida la cámara de apagado deben ser capaces de soportar la corrosión generada por cloruros.

II.2.3.3. Envase y Embarque.

El último proceso durante la fabricación de la cal es el Envase y Embarque, necesarios para que la cal hidratada pueda ser comercializada en sacos para su transporte. A granel es llevada a una tolva a través de bandas, hasta el medio de transporte que la llevará al cliente. Generalmente la Cal es distribuida en sacos de 25 Kg.

II.3. Tipos de Cal y sus Principales Usos.

En este apartado se mencionarán los productos obtenidos una vez terminado el proceso mencionado en los puntos anteriores. Además se establecerán los principales usos de dichos productos en diferentes áreas, desde su uso más común en la construcción, hasta su uso como arma.

II.3.1. Variedades de Cal.

A continuación se mencionarán los diversos tipos de cal que se obtienen, tomando en cuenta dos clasificaciones, las cuales son: De acuerdo a la forma de elaboración y De acuerdo al su pureza.



II.3.1.1. Clasificación de acuerdo a la forma de elaboración.

Cal Viva.

De acuerdo con el porcentaje de óxido de calcio las cales vivas se clasifican en dos variedades:

- Cales Grasas.- Son las más blancas, fabricadas con piedras calizas de gran pureza, que en presencia de agua reaccionan con fuerte desprendimiento de calor.
- Cales Magras.- Son más amarillentas, más impuras porque poseen sustancias como arcilla, óxido de magnesio, etc., que en presencia de agua reaccionan con poco desprendimiento de calor.

Cal Apagada.

Se dice que se obtiene cal apagada, cuando los albañiles vierten agua sobre la cal viva en las construcciones. El apagado es exotérmico, es decir, se desprende una gran cantidad de calor que evapora parte del agua utilizada. Simultáneamente, la cal viva se desterrona y expande. Es pastoso y como es cáustica, no debe tocarse con los dedos. El apagado de la cal viva se practica en un hoyo excavado en el terreno o dentro de un recipiente de madera. Con cal apagada, arena y en ocasiones polvo de ladrillo se hace la mezcla o mortero aéreo, para colocar ladrillos y/o fijar baldosas y azulejos.

Cal Hidratada.

Es el nombre comercial del Hidróxido de Calcio y se forma al agregarse agua al óxido de calcio o Cal Viva, para que una vez apagada (hidratada) pueda ser utilizada.

La cal hidratada es trabajada en condiciones cuidadosamente controladas. Cuando el óxido de calcio recibe la cantidad de agua estrictamente necesaria, el hidróxido de calcio es obtenido como polvo seco, que se separa para obtener la finura. La cal hidratada es envasada, principalmente, en bolsas de papel Kraft de 25 Kg., facilitando su transporte y almacenamiento que se hace en estibas y es recomendable que no esté expuesta al aire para su conservación. Por otro lado, la aplicación puede ser inmediata por lo que, en este caso, no se requiere almacenamiento.

II.3.1.2. Clasificación de acuerdo a la Pureza.

Desde el punto de su pureza, es decir, del contenido de Óxido de Calcio (CaO), las cales empleadas en la construcción pueden ser clasificadas del modo siguiente:



Cales Aéreas.

Denominadas así porque endurecen el aire mediante su reacción con el anhídrido carbónico del mismo u otra fuente de Dióxido de Carbono, se clasifican a su vez en:

- Cal Dolomítica.- El producto obtenido en la calcinación depende de la composición química de las calizas, por lo que ésta se denomina así por su origen, es decir, por ser el resultado de la calcinación de rocas dolomíticas, de donde surge el Óxido de Calcio y de Magnesio, que también es un óxido básico, pero no recomendable para construcción porque se apaga muy lentamente con agua. Ni siquiera su preparación con 48 horas de anticipación es suficiente para completar su apagado. Consecuentemente, si se revoca una pared con una mezcla de cal dolomítica, como sus granos se hidratan a cabo de mucho tiempo, la superficie se hincha pasado algún tiempo y deterioran la superficie lisa. En cambio es utilizada con éxito en la industria azucarera. Para la producción de cales dolomíticas de calidad se utilizan dolomías con riqueza en carbonatos de calcio y de magnesio superior al 95% y cuyo contenido de óxido de magnesio sea superior al 5%.
- Cal Cállica.- Es una cal muy pura o con escaso contenido de arcillas y es altamente eficiente en la preparación de las mezclas aéreas, llamadas así debido a que la acción cementante se logra por carbonatación de la cal mediante el Dióxido de Carbono atmosférico. Estas cales son fabricadas con piedras calizas de gran pureza, contiene 95% o más de Óxido de Calcio. Cuando se apagan dan una pasta blanca 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 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.
- No son afectadas por la humedad, justificando así su uso en cimientos o piletas.

Se conoce media docena de variedades de cales hidráulicas, desde "pobrementemente" hidráulicas, hasta "fuertemente" hidráulicas. Se les diferencia por el índice de hidraulicidad, cuyo valor numérico está en función del porcentaje de arcillas en la materia prima.

La producción de cales hidráulicas ha disminuido porque el albañil prefiere mezclar cal hidratada y cemento Portland en proporciones adecuadas.

Cal Límite.

Es aquella 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.

II.3.2. Principales usos de la Cal.

La cal es un producto que, por su gran variedad y porque la podemos encontrar casi en todos lados, ha encontrado un lugar en casi todas las áreas de producción. En este apartado se mencionarán los principales usos que se le han dado a la cal en diversas áreas.

II.3.2.1. Construcción.

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 este material y rocas de distinta morfología. Actualmente los sistemas constructivos no la consideran y la gama de productos disponibles es cada día mayor. Sin embargo, no hay un material sustituto de la cal que brinde tantos beneficios a un costo tan accesible.



Algunos de los principales usos de la cal dentro de la industria de la construcción son los siguientes:

- **Mezclas de Albañilería.-** Cuando la cal se combina con agua y arena, el resultado es una mezcla que se utiliza para diferentes funciones dentro de una construcción como es el pegado de tabique, block, celosías y piedra braza. Se recomienda utilizar cal hidratada, ya que es impermeable, con alta adherencia, flexible, así como resistente a la compresión cuando es aplicada gradualmente.

Las mezclas con cal hidratada forman unidades de albañilería resistentes, estables y sin fisuras, al mismo tiempo que son las más económicas. Las mezclas con cal presentan mejor trabajabilidad, mayor plasticidad y la consistencia adecuada. Tienen un tiempo de fraguado gradual que les facilita la correcta hidratación e interacción entre sus componentes.

Debido a que el peso específico de la cal es menor al del cemento, se obtiene un mayor volumen de mezcla con la misma proporción en peso, dando como resultado un rendimiento superior, y un menor costo.



Figura 2.12. Mezclas de Albañilería

- **Recubrimientos o Aplanados.-** Las mezclas para recubrimientos exteriores, serían con Cal hidratada, ya que tienen buen comportamiento mecánico, mayor impermeabilidad y mejor resistencia al ataque de elementos ambientales. Los interiores para la fijación de una superficie con mala adherencia, podrían ser compuestos por varias capas de lechada de Cal aérea teniendo un



soporte justo y un acabado fino. Por su elevada finura la cal aérea proporciona máxima trabajabilidad, que se puede aumentar si se trabaja con Cal muy fina en pasta, esto es necesario para un buen resultado. Su elevada porosidad es responsable para un efecto benéfico de compensación de vapores de agua en la vivienda, así como un excelente aislamiento térmico.



Figura 2.13. Uso en Aplanados

- **Pegado de Tejas.-** Para el pegado de tejas utilizaríamos Cal hidratada natural ya que interesa resistencia mecánica así como máxima impermeabilidad. Para la fijación de piezas decorativas cerámicas o de piedra natural en superficies verticales, además de elaborar un mortero con alto contenido de cal y óptima granulometría, se podría aplicar un mortero a base de cal hidráulica (resistencia mecánica y buena adherencia) y pasta de cal grasa (aumento de adherencia). El soporte, si fuese necesario, se podría preparar con una lechada de cal grasa.



Figura 2.14. Pegado de Piezas en superficies verticales



- **Impermeabilizante.-** La cal también es un magnífico y económico impermeabilizante. Una sencilla mezcla de alumbre, jabón de barra amarillo y Cal hidratada, disueltos en un tambo con agua tibia, proporciona un efectivo impermeabilizante, protegiendo las casas de humedad y goteras.

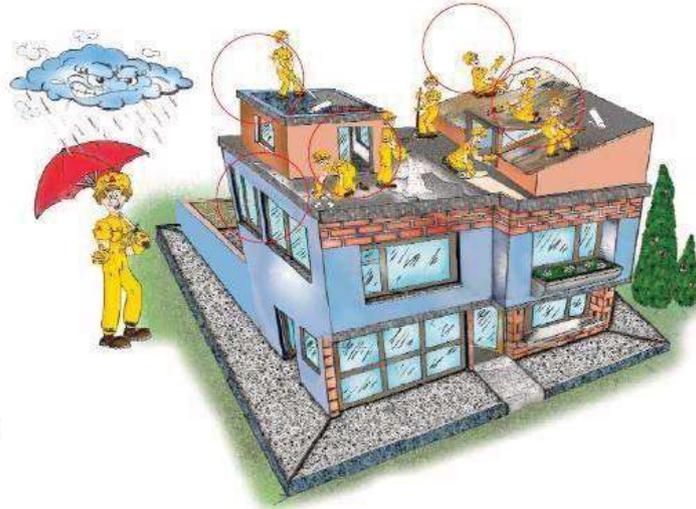


Figura 2.15. Uso como Impermeabilizante

- **Como Pintura.-** 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 aproximadamente 135 metros de superficie.



Figura 2.16. Uso de la Cal como Pintura



II.3.2.2. Restauración.

La restauración y conservación 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: examinación, documentación, tratamiento, prevención y cuidado. Dentro de esta área la cal tiene una importante participación, pues es el único material original que aún a la fecha puede ser obtenido fácilmente y a un costo realmente bajo. En el área de la restauración la cal puede ser utilizada para:

- **Restauración de Inmuebles.-** Dentro de la restauración de inmuebles, la Cal, nos ayuda a dar una terminación superficial a los muros, tabiques, columnas, vigas y losas, tanto en el interior como en la envolvente exterior de los edificios antiguos, con el objeto de asegurar una conservación, protección y acabado adecuados de acuerdo a la función que se les asigne: impermeabilización, terminación estética. La restauración con Cal se puede utilizar en acabados en sí mismos, con color y textura definitivos, o terminaciones que sirven de base a pinturas u otros tratamientos, en cuyo caso se convierte en sustrato o soporte de éstos. Cuando se quiere utilizar la cal en la restauración de inmuebles es necesario que se cuiden algunos aspectos, como son:
 1. Cuidar la calidad de los materiales utilizados.
 2. Cuidar las proporciones de Cal y arena.
 3. Seleccionar la granulometría de la arena de acuerdo a la función que va a cumplir.
 4. Soporte firme, limpio, con humedad y rugosidad adecuadas.
 5. Vigilar la correcta vinculación entre las capas sucesivas.
 6. Curado adecuado.

Debido a la heterogeneidad de su composición, y a la dependencia que su correcta ejecución en obra tiene en relación a su calidad final, el comportamiento de los revoques en base a mezclas de Cal tiene una estrecha relación con su exposición a factores climáticos, de polución ambiental, y de sollicitaciones térmicas e hídricas que deben soportar. Las patologías más comunes son las picaduras, eflorescencias, manchas, grietas, fisuras, abultamientos y descascaramientos.

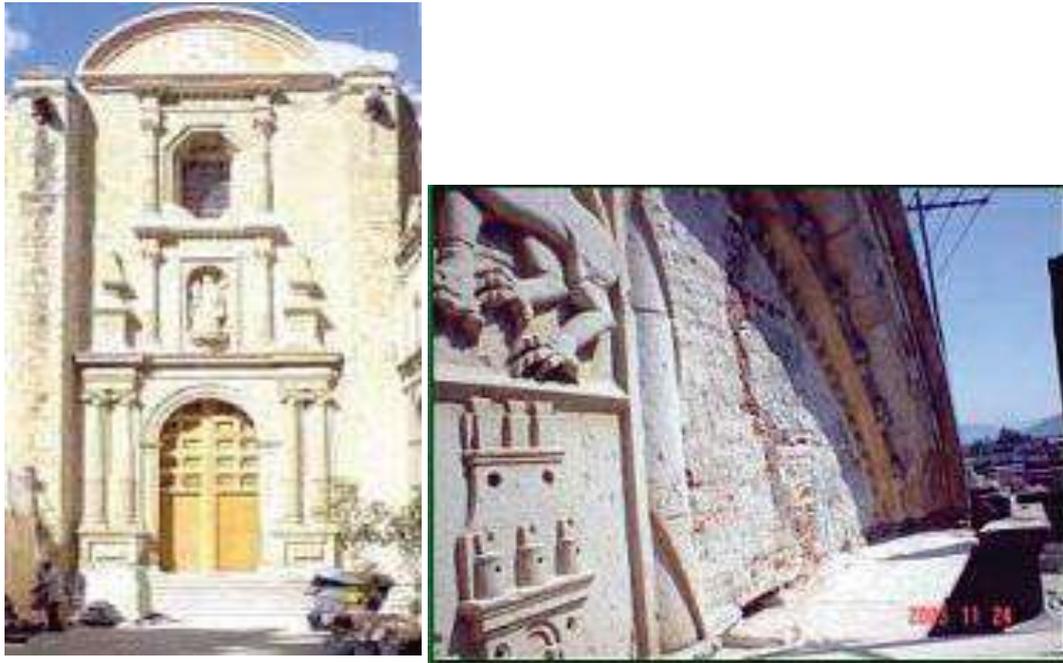


Figura 2.17. Restauración de Inmuebles

- **Restauración de obras de Arte.-** 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 perspectiva.



Figura 2.18.

II.3.2.3. Estabilización.

Dentro del área de la estabilización, el uso más común que se le da a la cal es como estabilizante de suelos en obras en las que se



requiere incrementar la capacidad de carga del mismo. A continuación se harán mención de todos aquellos procesos en los que se puede utilizar la Cal como estabilizante.

- **Estabilización de Suelos.-** En suelos con materiales de base arcillosa, lo apropiado para su estabilización es la Cal, en virtud de que su reacción química y física al mezclarse con la arcilla da por resultado un material estable, óptimo para ser usado en la pavimentación de calles, avenidas, centros comerciales y aeropuertos o cualquier superficie donde se quieran evitar hundimientos debido a la naturaleza arcillosa del terreno.



Figura 2.19. Estabilización de Suelos

- **Estabilización de Terraplenes para Vías del Ferrocarril.-** La lluvia y la humedad son las principales causas del costoso mantenimiento de las vías férreas en todo el mundo; por lo tanto, es muy importante la estabilización de sub-bases o terraplenes con el sistema de inyección profunda de Cal. El procedimiento consiste en inyectar grandes cantidades de agua como lechada de Cal, impidiendo que se corra la humedad en la sub-base. Así mismo, sella las grietas, aumentando la resistencia de los suelos en los planos debilitados.
- **Estabilización de Presas y Canales de Riego.-** La aplicación más contundente de la Cal hidratada como elemento estabilizador es en donde el suelo tratado con este material está sumergido en agua, como en vasos de presas, cabales de irrigación, diques y represas de tierra, desarrollando suficiente resistencia y estabilidad para prevenir reblandecimientos, reducir filtraciones y resistir la erosión causada por el agua.



- **Estabilización de Terracerías, Carreteras y Calles.-** El uso de Cal en la estabilización de las bases para la construcción de calles, avenidas y boulevards, es actualmente lo más conveniente y económico. El procedimiento es sencillo, se esparce la Cal hidratada a granel, en proporción de un 2% a 6%, según se determine con la prueba de Eades y Green; se mezcla con el suelo del lugar por medio de un escarificador; se añade agua con un camión rociador para completar el proceso de curado por 48 horas, con el fin de convertirla en un suelo apto para su computación; finalmente se aplica una capa de sello de asfalto vulcanizado por 72 horas, para dejar una sub-base lista para recibir el material de la siguiente capa, ya sea de asfalto o de concreto hidráulico.



Figura 2.20. Estabilización de Terracerías



II.3.2.4. Usos Industriales.

Muchas industrias en el área de producción han encontrado a la Cal como un gran aliado para mejorar algunos de sus procesos. En este apartado se mencionarán algunas de las industrias que utilizan estos productos y para que sirven.

- **Metalurgia.-** En el campo metalúrgico, la Cal viva encuentra uno de sus usos más extensos como fundente en la purificación del acero y en oxigenación de hornos. También se usa para remover fósforo, azufre y sílice en las plantas acereras.
- **Producción de Acero.-** La Cal tiene múltiples usos en la fabricación de productos de acero. Se usa en la manufactura de alambre estirado, en la fundición de lingotes y escorias de los altos hornos. Así mismo, los productos de acero se bañan en Cal para neutralizar los ácidos adheridos al metal y para protegerlos contra la corrosión.



Figura 2.21. Producción de Acero

- **Fundición de Metales.-** La Cal se emplea en beneficio de metales, incluso desde el proceso de fundición, por ejemplo, en el refinamiento del níquel, del cobre, zinc, plomo y otros minerales ferrosos. En el proceso los metales son sumergidos en agua de Cal para protegerlos contra el Azufre durante la fundición. También se usa como fundente en la fabricación de ferrocromos y otros productos.



Figura 2.22. Fundición de Metales

- **Fabricación de Papel.-** En la fabricación de papel, la Cal es un elemento importante como agente caustificador, como elemento de cocción para disolver material no celuloso, como blanqueador de pulpa. Así mismo, la cal aumenta la calidad de papel y ayuda a regular su brillantez, su color y su textura.
- **Tintas y Colorantes.-** La Cal se usa en la producción de tintas y colorantes ya que su alcalinidad es un factor importante para acelerar las reacciones químicas del proceso y para remover sustancias nocivas como el cloruro, además de ser un agente neutralizador del ácido sulfúrico.
- **Manufactura de Refractarios.-** Mediante la calcinación de roca caliza dolomítica se fabrican los ladrillos refractarios, indispensables para la industria del acero, del cemento y de la propia Cal. Estos ladrillos son usados universalmente para cubrir los hornos de calcinación de estas importantes industrias.
- **Tabiques de Silicato de Calcio.-** Por muchos años, los tabiques de arena y Cal han sido empleados con éxito en la construcción, al igual que otros productos elaborados con procesos similares como blocks huecos, tejas, tubos y también productos de mampostería. Todos estos productos ofrecen alta estabilidad dimensional al constructor.
- **Petróleo.-** La Cal tiene muchos usos en la industria petrolera, por ejemplo, sirve como neutralizador de gases nocivos con lo cual ayuda a evitar la contaminación y la corrosión. Se usa también como acondicionador de lodos en la perforación de pozos; para controlar la coagulación del refinado, para el tratamiento de desperdicios de petróleo y para hacer aceites para motores.



- **Ecología y Medio Ambiente.-** En materia ecológica, la cal es un elemento muy valioso para preservar el medio ambiente y combatir la contaminación ya que, entre otras funciones, ayuda a controlar emisiones y desperdicios industriales, tales como:
 1. Gases de Combustión.- La cal se emplea cada vez más contra la contaminación del aire, eliminando el azufre de los gases de chimeneas de las industrias que operan con combustibles como el carbón o algunos altos en azufre. La cal sirve como depuradora de estos procesos y ofrece una eficiencia del 90 al 100%, bajo costo y beneficio a las comunidades aledañas a dichas plantas.
 2. Tratamiento de Agua.- La cal es la materia principal que se utiliza en el tratamiento de agua potable y aguas industriales por su poderosa acción desinfectante de virus y bacterias nocivas para la salud humana. La cal suaviza y clarifica el agua, elimina sustancias negativas y neutraliza los ácidos del agua, protegiendo las tuberías de la corrosión.
 3. Tratamiento de aguas Negras.- En las plantas de tratamiento de aguas negras la cal ha demostrado sus valiosas características higiénicas, estabilizando lodos de desechos y quitando los malos olores al mantener un pH apropiado y una eficiente oxidación biológica de las aguas negras. El material resultante de este proceso puede regarse sobre terrenos de cultivo ya que es un excelente acondicionador de suelos.
 4. Desechos Industriales.- La Cal, viva o hidratada, es cada vez más utilizada en el tratamiento de muchos desechos industriales, para combatir la contaminación. Se usa en planta de acero y metal, químicos, explosivos, fibras, empacadoras de alimentos y otros importante procesos industriales.
 5. Desechos Sólidos.- Otras de las acciones anticontaminantes que ofrece la Cal es la estabilización de desechos industriales sólidos, los que, tratados con Cal, se utilizan para construir terraplenes y diques de tierra. También se emplea para restaurar pozos de desechos de petróleo, salvaguardando el ambiente del suelo y para secar lagunas de petróleo convirtiéndolas en áreas de tierra útil.

II.3.2.5. Agricultura.

Otro importante campo en el que participa la Cal es en la agricultura. Los vegetales suministran al hombre el 70% de su provisión



de alimentos y el 30% es de origen animal. Por lo tanto, la agricultura es fundamental para la supervivencia del ser humano; sin embargo, en México, anualmente se pierde hasta 30% de la cosecha debido a que son infestadas por insectos, hongos y diversos microorganismos. Por lo tanto, dentro de la agricultura la cal establece su importancia siendo usada como:

- **Insecticida y Fungicida.-** Por sus propiedades alcalinas, la Cal ha sido un importante elemento en la elaboración de insecticidas, fungicidas y desinfectantes para el control de insectos y demás plagas que atacan al hombre y a los cultivos.



Figura 2.23. Uso de la Cal en la Agricultura

- **Neutralizador de Tierras Ácidas.-** Al abonar la tierra con Cal se producen una serie de procesos químicos, físicos y biológicos, tales como descomposición de microorganismos, transformación de sustancias venenosas y dañinas en inocuas, suministro de calcio y magnesio a las plantas, reducción y neutralización de la acidez de la tierra, todo ello en beneficio de una mayor productividad del campo.
- **Desinfectante de Verduras.-** La cal es un poderoso y efectivo desinfectante de verduras y legumbres de uso casero. El proceso para desinfectar verduras con cal es sumamente sencillo, sólo se agrega una cucharada de cal en 1 litro de agua y las verduras ya lavadas se dejan reposar en esta mezcla durante 5 ó 10 minutos, tiempo suficiente para que la mezcla, por su alcalinidad, deje perfectamente desinfectadas las verduras y listas para durar un mayor tiempo sin descomponerse.



- **Conservador de Cosechas.-** La más reciente aplicación de la Cal es el hidrato de Calcio micronizado, el cual permite la conservación de semillas, frutas, legumbres y verduras después de ser cosechadas y almacenadas. El hidrato de Calcio micronizado protege estos productos contra bacterias, hongos, gorgojos y humedad que tanto daño les causa cuando están almacenados.

II.3.2.6. Otros Usos.

Además de todas las aplicaciones antes mencionadas, la Cal puede ser utilizada en otros campos de la producción como pueden ser:

- **En la Industria Lechera.-** En la industria lechera se emplea tanto la cal hidratada como la cal viva en varios procesos; por ejemplo, para producir mantequilla, para que la crema sea separada de la leche se añade agua de cal para neutralizar o reducir la acidez antes de la pasteurización.
- **Manufactura de Cartón.-** Las principales materias primas en la fabricación del cartón de paja o acartonado son la paja y la cal. En este proceso, la paja es cocida en vapor con una lechada de cal en grandes digestores rotatorios, donde la cal disuelve los materiales no celulósicos y desintegra las fibras de paja para la elaboración del cartón.
- **Industria Azucarera.-** En la producción de azúcar de caña, así como de remolacha en crudo, los jugos son reactivados con la Cal, dicho proceso se repite para asegurar una mayor pureza de este importante producto antes de ser cristalizado y empacado.

II.3.3. Mitos y Realidades de la Cal.

Anteriormente, la cal era un producto muy utilizado en la industria de la construcción, sobre todo cuando se trataba de la construcción de mamposterías, ya que ofrece grandes beneficios en cuanto a resistencia y economía. Sin embargo, en la actualidad han surgido varios productos que han venido a desplazar el uso de la cal, entre los cuales encontramos a los morteros, que en realidad son una mezcla de cemento con cal hidratada.

A pesar de todas las ventajas que encontramos en el uso de la cal, la industria ha sido fuertemente golpeada con la incorporación de nuevos productos en el mercado, los cuales han atacado las propiedades



de la Cal, señalando que es un producto de baja calidad y no apto para ser utilizado en las construcciones modernas.

En este apartado se mencionan algunos de los mitos por los cuales la cal ha dejado de ser utilizada en la actualidad.

II.3.3.1. ¿Qué es la Salitre?

Es el resultado generado por sales de nitrato (NaNO_3 ó KNO_3), materia orgánica en descomposición arrastrada a la obra por contaminación de alguno o varios de los componentes, como arenas, tabiques y la incidencia del gradiente hidráulico del nivel freático del agua en los cimientos que, por capilaridad, sube por los muros afectando la obra. Actualmente se cree que la cal es un importante proveedor de estas sales de nitrato, por ello se ha dejado de usar en ciertas construcciones, sin embargo, como se ha mencionado, la salitre no es producida por la cal, sino por otros componentes contaminados.

II.3.3.2. ¿Qué es la Eflorescencia?

Son manchas superficiales o abombamientos internos de los revestimientos o muros generados por la hidratación y cristalización de sales solubles en agua, que son arrastradas y depositadas por efecto de la evaporación del agua de fraguado ó presión de agua por filtraciones.

Estas sales pueden provenir de los componentes (arena y agua), de los aditivos, de los materiales usados en la fabricación del tabique o del suelo.

Sin embargo, se ha determinado que la mayoría de las eflorescencias se presentan por componentes en el tabique, aunque no hay que descartar otros muchos factores que pueden afectar, como son:

- a)** Cementos de mala calidad, con contenidos altos de yeso y ceniza.
- b)** Cales de bajo contenido de hidróxido y gran contenido de caliza molida.
- c)** Tierras con altos contenidos de sales, aguas sucias, cloradas, azufrosas o saladas.

La mayoría de los efectos producidos por la eflorescencia no son peligrosos en la estética de la obra; como son las manchas blancas características o daños a la pintura que pueden ser eliminados y corregidos fácilmente.

Las eflorescencias que son producidas por sulfatos ($-\text{SO}_4$) son bastante nocivas y pueden ser peligrosas, ya que se expanden hasta dañar o botar los recubrimientos y en casos extremos la estructura de la



obra. Éstas tienen su origen en tabiques fabricados en hornos de combustibles o carbón, aguas azufrosas y cementos de mala calidad con exceso de yeso y cenizas.

Para minimizar la presencia de eflorescencias en la obra es importante que se tomen ciertas medidas preventivas como pueden ser:

- Trabajando con materiales de buena calidad y si es posible buscar recomendaciones de experiencias en el uso.
- No utilizar agua y/o arenas contaminadas.
- Almacenar y trabajar en suelos libres de contaminación, como son cenizas, suelos salinos, etc.
- Mantener buenas prácticas de construcción:
 - 1.- Un buen trabajo de preparación y colocación de la mezcla evitará filtraciones de agua que la favorezcan.
 - 2.- Evitar excesos de agua de fraguado.
 - 3.- Proteger la obra de inclemencias del clima durante el fraguado de la mezcla (lluvias, vientos fuertes, calor extremo, etc.).
- Evitar el contacto del agua por fugas o rehumedecer de forma innecesaria la obra terminada.

Un mito acerca de la cal es que, por su contenido de calcio, genera eflorescencias; sin embargo, como lo hemos visto en los párrafos anteriores, este fenómeno puede ser producido por otros componentes contaminados o de mala calidad y, aunque una cal de baja calidad también puede producir eflorescencia, no es un fenómeno exclusivo de este producto.

Por lo tanto, podemos establecer que el uso de una cal de alta calidad puede ser recomendable en ciertas obras ya que, si tenemos cuidado con la calidad de todos nuestros materiales, no se producirá eflorescencia, y en consecuencia, se determina que este fenómeno no es un problema que atañe solo a la cal y que no debe ser un factor para evitar su uso en obra.

II.3.3.3. Otros Mitos.

- **¿Es cierto que la cal hidratada quema las manos? FALSO!!!**
La Cal hidratada o cal apagada tiene como característica natural la absorción de agua o humedad del ambiente, por ello el contacto prolongado de la piel con la Cal durante la jornada de trabajo sin la debida protección, genera resequedad y sensibilidad que al no



ser compensada con la rehidratación de la piel de la impresión de una quemadura.

Debemos tener en cuenta que todos los materiales en polvo que se maneja para realizar la mezcla, tienen estas mismas características y el contacto con ellos también producirá resequedad.

Por lo tanto podemos establecer que la cal hidratada no quema la piel y que podemos usarla sin temer que esto pueda ocurrir, simplemente debemos tener cuidado de rehidratar nuestra piel durante la jornada de trabajo, como lo haríamos con cualquier otro producto en polvo.

- **¿Por qué los lugares donde las tierras son arcillosas o barrosas la Cal no funciona e inmediatamente se salitra y es necesario reparar?**

Por el contrario, el uso de una buena cal con la correcta proporción en suelos arcillosos otorga mayor trabajabilidad, eliminando la consistencia chiclosa de este tipo de tierras y eleva considerablemente la resistencia a la carga, teniendo un efecto aglomerante que aumenta con el tiempo.

Las tierras arcillosas por su naturaleza contienen sales que favorecen la formación de salitre, no atribuible a la cal, sin embargo, este efecto puede disminuirse o eliminarse cuidando el agua y tiempo de fraguado, así como evitar las filtraciones posteriores de agua.

El hecho de reparar con otras mezclas no elimina la posibilidad de la formación de salitre, lo que puede suceder es que una vez quitado el salitre formado para realizar la reparación es menos probable su reincidencia.

II.4. Asociaciones y Productores de Cal.

En este apartado conoceremos las asociaciones de productores de cal, su misión, visión y algo sobre su historia. También mencionaremos a los principales productores de cal en nuestro país y algunas empresas a nivel internacional, así como los productos que ofrecen al usuario.

Mediante la investigación realizada trataremos de hacer una comparación entre la producción de cal y la producción de mortero, que viene a constituir el principal competidor de la cal en la industria de la construcción.



II.4.1. Asociaciones en México.

Sin duda alguna, en nuestro país, la asociación que más reconocimiento merece dentro de la industria de producción de cal es la Asociación Nacional de Fabricantes de Cal (ANFACAL), el cual ha sido establecido como un organismo privado de representación empresarial.

Sus asociados ofrecen productos de la más alta calidad por encontrarse sujetos a las normas vigentes:

- NMX-C-003-1996-ONNCCE-Cal Hidratada.
- NMX-C-004-1991 Oxido de Calcio (Cal Viva).
- NMX-C-005-1996-ONNCCE-Cal Hidráulica.

También es importante señalar que como institución, ANFACAL trabaja actualmente bajo una dinámica denominada “de mejora continua”, lo que significa crecer y mejorar de forma imparable, sin permitir el estancamiento.



Figura 2.24. Asociación Nacional de Fabricantes de Cal

Misión.

- Fomentar el conocimiento de los usos, aplicaciones y beneficios de la Cal en todos los ámbitos de la actividad humana.
- Vigilar que los socios que integran la asociación produzcan Cal de calidad, con un alto sentido de responsabilidad social y ecológica.
- Incrementar permanentemente las relaciones con instituciones gubernamentales y privadas para beneficio de los asociados.



Visión.

La misión de esta asociación es fortalecer y posicionar, en el marco de los valores institucionales, la imagen interna y externa de la misma como un organismo cúpula de la industria de la Cal, por su representatividad y nivel competitivo.

II.4.2. Productores en México.

En México existen muchos yacimientos de Caliza que en la actualidad están siendo aprovechados por diversas empresas, algunas de las cuales mencionaremos en este apartado. Generalmente, en los medios que existen para poder conocer a los productores no se menciona su producción anual, sin embargo, haremos mención de sus productos y de sus políticas de trabajo.

II.4.2.1. Grupo Calidra®.

Durante más de medio siglo de existencia las empresas de Grupo Calidra se han mantenido como líderes de la industria, gracias a sus estrategias y a que han llevado a cabo un exitoso plan de expansión. La suma de esfuerzos y capacidades ha hecho posible la asociación de las empresas que hoy conforman al Grupo Calidra.

Calidra cumple su misión de ser una empresa con un nivel de competitividad internacional que le permite satisfacer las necesidades y las expectativas de sus clientes, de su personal y de los accionistas.

Para ello, además del personal especializado en cada etapa del proceso de explotación de cantera y producción de cal, Grupo Calidra cuenta con un moderno equipo de laboratorio para verificar la calidad de sus productos, realizando análisis precisos, determina los parámetros de referencia nacional que garantizan el cumplimiento de la normatividad con estándares internacionales.

Las marcas que ofrece grupo Calidra dentro de la industria de la construcción son:



Figura 2.25. Marcas de Grupo Calidra: Industria de la Construcción



Como ya sabemos, además de los usos que se le dan a la cal dentro del mercado de la construcción, también tiene aplicaciones dentro de otros sectores productivos, por lo que, Grupo Calidra ha expandido sus horizontes y ha creado nuevas marcas para poder llegar a nuevos sectores. Las principales marcas ofrecidas por este grupo son:



Figura 2.26. Marcas para la Industria Tradicional: Calidra

II.4.2.2. Cal Muro®.



Figura 2.27. Cal Muro



Cal Muro es la empresa productora de Cal del Estado de Michoacán y fue fundada en 1971. Sus yacimientos de piedra caliza cuentan con una reserva para los próximos 30 años, los cuales se encuentran ubicados en Piedras de Lumbre, municipio de Jungapeo, Michoacán.

Los productos que ofrece Cal Muro son:

- Construcción.



Figura 2.28. Cal y Mortero Muro

- Agricultura.



Figura 2.29. Carbonato de Calcio y Dolomita



Figura 2.30. Cal Agrícola Muro



II.4.2.3. Grupo Bertrán®.



Figura 2.31. Grupo Bertrán

Esta empresa, perteneciente a la Asociación Nacional de Fabricantes de Cal ofrece varios productos, siendo sus principales marcas las que se muestran a continuación:



Figura 2.32. Marcas Ofrecidas por Grupo Bertrán

II.4.2.4. CEMEX®.



Figura 2.33. Logotipo CEMEX



Además de la producción de cementos y la elaboración de concretos, CEMEX es una empresa que se dedica a la fabricación y venta de muchos productos más. Dentro de la variedad de productos que ofrecen podemos encontrar lo que ellos conocen como polvos, que incluyen principalmente Cal y Yeso.

Siendo una de las empresas más grandes de México, y contando con instalaciones de primera clase en el área, CEMEX ha tratado de dar importancia a este producto, introduciéndolo en el cemento de albañilería con la finalidad de mejorar las condiciones de plasticidad del mismo.



Figura 2.34. Instalaciones CEMEX

II.4.3. Asociaciones Internacionales.

En este apartado se mencionarán las asociaciones de productores de cal a nivel internacional, así como sus miembros, con la finalidad de poder establecer los lugares en los cuales se elabora este producto.

II.4.3.1. Asociación Europea de la Cal.

La EuLA, por sus siglas en inglés (European Lime Association), representa en este continente:

- Cerca del 95% de la producción de cal en Europa.
- 23 Asociaciones Nacionales.
- Cerca de 100 empresas.
- Más de 200 sitios de producción.



- Alrededor de 600 hornos para la producción de cal.
- Más de 10000 empleados.
- 28.4 Millones de toneladas de cal y cal dolomítica producidas anualmente.
- Una contribución al producto interno bruto Europeo cercano a los €2.5 billones.

Como el principal exponente del sector calero de Europa, sus principales actividades y su misión son:

- Promover los intereses de la industria de la cal en Europa en todos los ámbitos que le conciernen, tales como desarrollo sustentable, legislación del producto, energía, protección del medio ambiente, salud y seguridad, comunicaciones y mejoramiento de su imagen.
- Provee a los miembros con una asistencia competente, ayudándole a tratar con los sistemas legislativos en materia científica y técnica.
- Asegura que la industria de la cal obtenga beneficios compartiendo información entre los miembros y jugando un papel muy importante en la promoción de mejores practicas productivas.

Miembros de la EuLA.

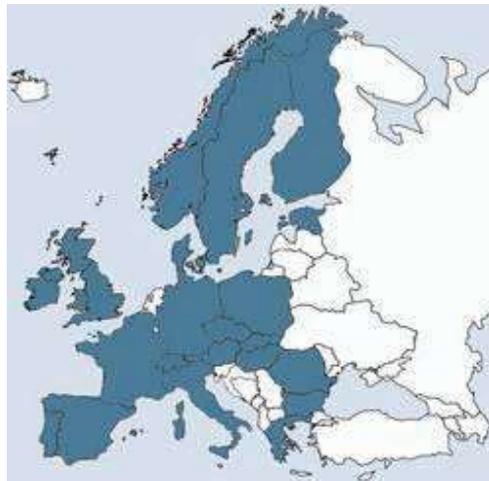


Figura 2.35. Miembros de la EuLA

Los países y empresas que tienen representación en la Asociación Europea de la Cal son:

País	Productores	Sitio Web/Correo Electrónico
Austria	Fachverband der Stein- und keramischen Industrie	http://www.baustoffindustrie.at
Bélgica	FEDIEX - Fédération des	www.fediex.be



	Industries Extractives et Transformatrices de Roches Non Combustibles	
Bulgaria	Plena Bulgaria OOD	plena_bg@tea.bg
República Checa	Czech Lime Association	www.svvpno.cz
Dinamarca	FAXE KALK	kk@faxekalk.dk
Estonia	Nordkalk AS	andres.ramul@nordkalk.com
Finlandia	Finnish Lime Association	bertel.Karlstedt@nordkalk.com
Francia	UP'Chaux - Union des Producteurs de Chaux	syndi.chaux@libertysurf.fr
Alemania	Bundesverband der Deutschen Kalkindustrie e.V.	www.kalk.de martin.ogilvie@kalk.de
Grecia	Hellenic Lime Association	www.lime-association.gr
Hungría	Carmeuse Hungaria Kft	http://www.carmeuse.com
Irlanda	CLOGRENNANE LIME LTD	office@clogrennane.ie
Italia	CAGEMA - Associazione dell'Industria Italiana della Calce, del Gesso e delle Malte	http://www.cagema.net
Noruega	Franzefoss Bruk A/S	sten.solum@franzefoss.no
Polonia	The Polish Lime Association	http://www.wapno-info.pl
Portugal	LHOIST IBERICA LUSICAL	bertrand.lugol@lhoist.com
República de Eslovaquia	Carmeuse Slovakia s.r.o	tomas.netolicka@carmeuse.cz
España	ANCADE - Asociacion Nacional de Fabricantes de Cales y Derivados de España	rfaller@ancade.es
Suecia	Svenska Kalkföreningen (Swedish Lime Association)	www.kalkforeningen.se
Suiza	Kalkfabrik Netstal AG	heinz.marti@kfn.ch
Reino Unido	British Lime Association	www.britishlime.org

II.5. Aditivos.

En la actualidad, la industria de la construcción ha presentado muchos cambios en varios aspectos, desde los procesos constructivos hasta los materiales utilizados en obra.

El mercado de materiales ha comenzado a innovar en sus procesos de producción y gracias a ello se han generado una gran variedad de nuevos productos que presentan mejores características de resistencia. Un gran paso se ha dado con el desarrollo de aditivos.



Un **aditivo** es una sustancia diferente al material cementante (cemento Portland, cal, cemento de albañilería, etc.), agua y agregado, que se utiliza para impartir a una mezcla cierta clase de propiedades que los materiales normales no pueden impartir por sí mismos.

Es importante señalar que, los aditivos no deben ser utilizados en cualquier caso, sino que su empleo se recomienda solo cuando los materiales que normalmente se usan para la elaboración de la mezcla, no impartan las características deseadas.

Durante el desarrollo de este apartado mencionaremos algunos de los principales aditivos que circulan actualmente dentro del mercado, así como las características que buscan mejorar cada uno de ellos.

II.5.1. Aditivos para concreto.

La mayoría de las investigaciones que se han realizado en el campo de los materiales, han sido dirigidas al mejoramiento de ciertas características en el concreto, debido a que, sin duda alguna, se trata del material más utilizado en la industria de la construcción.

La cantidad en que deben emplearse generalmente viene especificada en relación con el cemento que pretenda emplearse, tanto en cantidad como en tipo. A continuación se mencionan algunos tipos de aditivos utilizados para mejorar el concreto.

1. Acelerantes.

Los acelerantes se utilizan para lograr cualquiera de los fines siguientes: a) para aumentar la velocidad de adquisición de resistencia; b) para acortar el tiempo de fraguado del cemento en el concreto.

El beneficio que se tiene al utilizar este tipo de aditivo es la adquisición de altas resistencias a cortas edades, incluye el poder descimbrar a cortas edades; reducir el tiempo de fraguado y protección del concreto; reducir el tiempo necesario para poner en servicio la obra.

El acelerante más empleado es el Cloruro de Calcio (CaCl_2), que se usa en cantidades que varían entre el 0.5% y 2% del peso del cemento.

2. Reductores de Agua.

Algunos compuestos orgánicos o mezclas de compuestos orgánicos e inorgánicos son empleados para reducir la tensión superficial del agua y actuar como dispersante del cemento, reduciendo la cantidad de agua requerida en el concreto. Con ello logramos aumentar la resistencia del concreto endurecido.



Algunos de los materiales que más comúnmente se utilizan para reducir la cantidad de agua requerida, quedan comprendidos en cuatro grupos que son:

- Ácidos lignosulfónicos.
- Modificaciones de los ácidos lignosulfónicos y sus sales.
- Ácidos hidroxílicos y sus sales.
- Modificaciones de los ácidos y sales citados en el punto anterior.

3. Retardantes.

Se utilizan en mezclas donde se desea mantener a éstas sin fraguar durante un tiempo prolongado, como en el caso de concreto bombeado a grandes distancias y en el caso de colados en tiempo de calor intenso. Para ello podemos adicionar algunas arcillas bentoníticas u otros agregados como la limonita, la barita y el hierro en polvo.

4. Inclusores de Aire.

Con este tipo de aditivos se origina la introducción de pequeñísimas burbujas de aire con diámetros de fracción de milímetro, las cuales aumentan la trabajabilidad del concreto y su cohesión, al comportarse como una arena fina con partículas perfectamente esféricas.

Actúan como lubricante de la mezcla y permiten reducir el contenido de agua y por consiguiente aumentar en forma indirecta la resistencia del concreto. El contenido de aire usual es del orden del 3% al 8% como máximo, del volumen absoluto total del concreto.

Entre los agentes inclusores de aire se pueden citar ciertas resinas naturales, algún tipo de jabón neutro y ciertos agentes solubles en agua.

5. Reductores de Aire.

Existen casos en que los materiales pétreos empleados en el concreto arrastran consigo gran cantidad de aire, por lo que es necesario cuando se comprueba este fenómeno, el usar adiciones que reduzcan la presencia de aire en las mezclas.

Los compuestos como el fosfato tributil son ampliamente usados para los fines antes mencionados.

6. Generadores de Gases.

Al fraguar el concreto lentamente, se inicia un movimiento de acomodo de los materiales. Cuando el contenido de agua es excesivo se produce un ascenso de ésta a la superficie lo cual se conoce como exudación o sangrado. Tanto el fenómeno del sangrado como el de



contracción del concreto al endurecer, son factores que afectan el volumen final de los miembros estructurales.

Este tipo de aditivos generan gases que obligan al concreto a rellenar todos los huecos existentes en el molde que lo confina. El polvo de aluminio se utiliza comúnmente cuando se desea obtener un volumen de la pasta cementante. La cantidad en que normalmente se dosifica varía entre el 0.005% y 0.2% del peso del cemento.

7. Expansores.

Originan expansión de volumen en el concreto, ya que durante su periodo de hidratación experimentan un aumento de volumen propio o generado por la reacción con los elementos del cemento. La expansión se puede controlar para que resulte igual o mayor a la contracción que el concreto tenga al fraguar totalmente.

Entre los materiales más empleados se cuenta el polvo de hierro, algunos elementos sulfoaluminosos obtenidos por calentamiento de una mezcla de yeso, bauxita, caliza y otros materiales.

8. Minerales Finamente Molidos.

Se pueden dividir en tres tipos diferentes: los que son químicamente inertes, los que son puzolánicos y los que son cementantes. Tienen una finura igual o mayor que la del cemento, por lo cual ayudan a mejorar la plasticidad de mezclas ásperas. Los materiales finamente molidos que tienen propiedades puzolánicas o cementantes ayudan al desarrollo de la resistencia del concreto.

Los materiales puzolánicos se encuentran constituidos por sílice o alúmina activas, que al combinarse con la cal libre del cemento hidratado adquieren valor cementante.

Los materiales puzolánicos más usados son: el polvo de ciertas arcillas calcinadas, ciertos vidrios volcánicos calcinados, piedra pómez finamente molida y las tierras diatomáceas; estas últimas consisten principalmente de esqueletos de microorganismos y conchas de moluscos e infusorios.

9. Adiciones Impermeabilizantes.

Estos adicionantes incluyen jabones neutros, estearato de butio y ciertos derivados del petróleo. Los jabones incluyen sales de ácidos grasos, como el estearato u oleato.

Este tipo de aditivos impiden la penetración del agua en los poros del concreto cuando éste tiene un contenido razonable de cemento.



Cuando el concreto está elaborado con poco cemento se ha demostrado que la efectividad de este tipo de aditivos es muy reducida.

10. Agentes para Incrementar la Adherencia.

Este tipo de aditivos se utilizan con el fin de aumentar la adherencia entre el concreto viejo y el que se va a colar. Consiste esencialmente de emulsiones de varios materiales orgánicos que se mezclan con el cemento, hule sintético, cloruro de polivinilo, acetato de polivinilo, ciertos acrílicos, etc.

Estos materiales, debido a sus propiedades adherentes se emplean con gran éxito en la elaboración de pinturas.

11. Aditivos Reductores de la Reacción Álcalis-Agregados Pétreos.

Estos aditivos son empleados en mezclas de concreto elaborado con agregados pétreos químicamente reactivos con los álcalis del cemento.

Se ha visto que con el uso de estos compuestos se produce una moderada reducción de las expansiones cuando se han incluido ciertos aditivos inclusores de aire. También se ha comprobado que el empleo de puzolanas reduce apreciablemente las expansiones originadas por la reacción álcalis-agregados.

12. Aditivos para proteger al Acero contra la Corrosión.

Se utilizan con el fin de evitar la corrosión del acero cuando se filtra agua por grietas capilares. Los mejores protectores del acero son ciertos cromatos ligeramente solubles. También el benzonato de sodio resulta un material aceptable para reducir la corrosión del acero; se recomienda emplear el 10% de dicho material con respecto al peso del cemento empleado en la lechada usada como pintura del refuerzo.

13. Agentes Fungicidas, Germicidas e Insecticidas.

Se ha visto que algunos materiales que se pueden moler con el cemento o agregar posteriormente al concreto, tiene propiedades germicidas. Estos materiales incluyen fenoles polihalogenados y ciertos compuestos de cobre.

14. Dispersantes.

Estos aditivos se emplean para reducir la floculación de las partículas de cemento hidratadas, con el fin de aprovechar al máximo su poder cementante y favorecer la cohesividad del concreto.



15. Colorantes.

Se utilizan en forma de polvo inerte, mezclado perfectamente en el agua del concreto o del mortero que se desea colorear. Los colorantes son materiales inertes de origen mineral.

II.5.2. La Cal como Aditivo.

Además de ser utilizada como material cementante la cal ha tenido un gran uso como aditivo en algunos procesos constructivos. En este apartado se mencionan algunos campos en los que la cal cobra gran importancia al ser utilizada como aditivo.

II.5.2.1. Cal Hidratada: Aditivo para la durabilidad de los Pavimentos Asfálticos.

Se ha demostrado que la cal hidratada es la referencia mundial de los modificadores de asfalto para mitigar el daño de la humedad. Sin embargo, como el uso de la cal ha crecido, se han identificado y cuantificado otras ventajas en laboratorio y por parte de las autoridades relacionadas con el transporte. Como resultado de esto, ahora la cal se considera un modificador multifuncional del asfalto.

Algunas de las ventajas que ofrece el uso de la cal hidratada como aditivo en Pavimentos Asfálticos son las siguientes:

- a) Cuando se agrega Cal hidratada al asfalto, reacciona con el árido, consolidando el enlace entre la mezcla y la roca. Además, la cal hidratada reacciona con las moléculas altamente polares del asfalto, bloqueando la formación de jabones solubles en el agua. Estos jabones dan lugar a una fuerza en el enlace más débil, y contribuyen así al daño por la humedad. En vez de esto, la cal promueve la formación de sales basadas en el calcio, que son insolubles y que no atraen el agua al sistema.



Figura 2.36. Resistencia a Tracción Indirecta



- b)** A diferencia de los “fillers” minerales, que son inertes, la cal hidratada es químicamente activa. Cuando la cal se dispersa a través de la mezcla, reacciona con el asfalto, eliminando componentes indeseables mientras que hace que la mezcla asfáltica sea más rígida y resistente a mayores temperaturas. Esto da lugar a una mezcla asfáltica que es más resistente a la formación de roderas y al agrietamiento por fatiga. La adición de cal hidratada, sin embargo, no hará que la mezcla llegue a ser más frágil a bajas temperaturas. A bajas temperaturas, la cal hidratada es menos activa químicamente y se comporta como un “filler”, un mineral inerte.



Figura 7.37. Ensayo de Deformación en Pista

- c)** La cal hidratada reduce el índice de envejecimiento del pavimento del asfalto retardando la oxidación de muchos tipos de betún. Esto es debido a que la cal reacciona con las moléculas altamente polares del asfalto, retardando el índice de cambio de la química del mismo. Por lo tanto, el pavimento sigue siendo más flexible a lo largo del tiempo, y se protege del agrietamiento frágil durante más años que sin la contribución de la cal.



Figura 2.38. Ensayo de Envejecimiento con Cilindro Rotativo



- d) Mientras que los pavimentos envejecen, el agrietamiento comienza a menudo con la formación de microfisuras, que alternadamente, se unen para formar macrofisuras que dañan el pavimento. Las partículas de cal hidratada pueden interceptar y desviar estas microfisuras cuando comienzan a formarse. Además, como "filler" químicamente activo, la cal reduce el agrietamiento más que los "fillers" inactivos. Esto se explica por que la cal reacciona con los elementos dentro del betún, formando partículas más grandes que puedan ser capaces de interceptar y desviar mejor las microfisuras, evitando que crezcan juntas en grietas más grandes, que contribuyen al deterioro del pavimento.



Figura 2.39. Ensayo de Espécimen Restringido de Tensión Térmica

II.5.2.2. Cal Viva: Aditivo para la eliminación de la Contracción del Cemento.

En la actualidad la cal viva ha sido utilizada como un aditivo importante que nos permite prevenir contracciones durante el fraguado del cemento. A continuación se mencionan las ventajas que tiene el uso de la cal viva como aditivo y como trabaja dentro de la mezcla.

- Si ponemos la cal en la mezcla, apenas colocamos el agua, siendo ésta tan ávida de agua (muy higroscópica), es la primera en tomarla y reaccionar, por lo tanto se presentará una expansión dentro de la mezcla misma.
- Entonces podemos decir que, una parte de la cal reacciona durante la mezcla, mientras que los componentes de la mezcla que aún no reaccionan lo hacen un poco después, produciendo así una expansión posterior de la mezcla en lugar de una contracción.



II.5.3. Aditivos Policarboxilatos.

Los policarboxilatos son cadenas de polímeros acrílicos cuyas moléculas tienen una compleja forma tridimensional lo cual, sumado a su composición química genera una acción dispersante de triple efecto: eléctrica, por absorción y por repulsión estérica. Los policarboxilatos se basan en copolímeros de ácido acrílico y grupos éster de ácido acrílico. Crean una capa de absorción de gran volumen alrededor de las partículas de cemento que demoran momentáneamente la formación de etringita en la superficie de dichas partículas y, además, debido a sus largas cadenas laterales impiden la floculación y facilitan la alta fluidez de la pasta de cemento y de mortero.

Los aditivos base policarboxilatos brindan al concreto un gran comportamiento en estado fresco combinado con sobresalientes resultados en estado endurecido (alta reducción de agua; elevada trabajabilidad extendida; mejor comportamiento reológico del concreto en estado fresco; posibilidad de combinar efectos; elevadas resistencias tempranas; altas resistencias finales; baja permeabilidad; bajísimas relaciones agua/cemento y alta relación desempeño/ costo). Las ventajas técnicas de estos aditivos son extraordinarias para cualquier concreto. Sin embargo, paralelamente se está frente a un aditivo de los denominados sensibles; es decir, afectado por los cambios externos, como: las características del cemento, finura y cantidad de arena, temperatura del concreto, cantidad de agua, variaciones en la dosificación, secuencia de mezclado, etc.

Los policarboxilatos son cadenas de polímeros de estructura compleja que pueden diseñarse y adaptarse a cada conjunto de materiales, particularmente a cada tipo de cemento, adición y situación ambiental. Es posible entonces proponer la tecnología del aditivo para cada obra, regulando sus características a fin de satisfacer los requerimientos de la misma, como por ejemplo, la trabajabilidad extendida, la reducción de agua y la resistencia inicial o final. El desempeño del aditivo se evalúa mediante la reducción de agua; la trabajabilidad extendida; el tiempo de fraguado; las resistencias inicial y final; la penetración de agua a presión y absorción; la contracción y la durabilidad. Cabe decir que los policarboxilatos pueden trabajar como altos reductores de agua tanto en concretos de bajo asentamiento, plásticos o fluidos, así como modificar el comportamiento reológico en concretos autocompactantes.



II.5.4. Aditivos para Cal.

Actualmente no se han desarrollado aditivos de uso recomendado para la cal, debido a que su uso no se recomienda cuando se quiere emplear en elementos estructurales. A pesar de ello, es importante señalar que, todos aquellos aditivos que puedan ser utilizados en morteros, es muy posible que puedan encontrar una aplicación en mezclas de cal; sobre todo aquellos aditivos base policarboxilato, que por su composición y al reaccionar con la cal, inducen la formación de un gel que mejora las características de resistencia de la misma.

A pesar de los avances que se han tenido en materia de innovación en materiales, la cal ha sido un producto olvidado casi por completo. Por ello, en este trabajo se tratará de incluir aditivos a la cal, con la finalidad de analizar su comportamiento y establecer mejores condiciones de uso para este producto.



Capítulo III.
Diseño
Experimental





CAPÍTULO III.

DISEÑO EXPERIMENTAL

En este apartado se tratará de explicar el diseño de todas las composiciones que se eligieron para se puestas a prueba durante esta investigación. También se mencionan los materiales utilizados para la elaboración de nuestras mezclas, así como las características más representativas de cada uno de ellos.

III.1. Materiales Utilizados.

A continuación se tratará de describir todos aquellos materiales utilizados durante la investigación, entre los cuales encontramos: Cementantes, Agregados, Aditivos y Agua de Mezcla. Tratará de explicarse también el por qué de la selección de cada uno de ellos y de los porcentajes utilizados en cada composición.

III.1.1. Cal Estándar (cal Muro).

El material más importante, que constituye el centro de esta investigación es la cal. Tratamos de encontrar aquellas composiciones que nos permitan mejorar las características de los morteros en los cuales se utiliza cal como cementante. Las características que se desean mejorar son, las de resistencia a la compresión simple y la adherencia cuando éstos actúan como componentes en unidades de mamposterías.

Como ya sabemos, el principal elemento, que proporciona a la cal sus características es el calcio. Se trata de un mineral muy frágil, el cual tiene una estructura cristalina que por su arreglo proporciona características de la estructura interna poco resistentes y poco favorables para su uso en elementos estructurales dentro del área de la construcción.

Para el desarrollo de esta investigación decidimos utilizar todos aquellos componentes que pudieran ser encontrados en el mercado regional. Para ello, fue necesario utilizar CAL MURO, que constituye la empresa calera más importante en el estado de Michoacán.



Figura 3.1. Cal Muro

III.1.2. Cal Química.

Además de la cal convencional, se utilizó cal química para la elaboración de ciertas composiciones, tanto para el análisis del mortero como una unidad independiente (Prueba de Compresión Simple), como para su estudio siendo un componente de una unidad de mampostería (Compresión Simple y Adherencia).

La cal química presenta características diferentes a las que podemos obtener con la cal convencional, esto se presenta debido a que sus composiciones son diferentes, por lo que esperamos que al reaccionar con el agua obtendremos diferentes comportamientos bajo las mismas condiciones de aplicación de carga.



Figura 3.2. Cal Química



Es importante señalar que, la cal química utilizada fue elaborada por el mismo productor que la cal convencional (Cal Muro). Es importante, durante una investigación, que los materiales utilizados correspondan a los mismos fabricantes para que el análisis comparativo pueda ser el mejor, ya que los procesos de fabricación que se tiene para ambos productos son similares.

III.1.3. Marmolina Tipo 1.

Durante el desarrollo de esta investigación se encontrará que, el agregado utilizado para la elaboración de nuestras mezclas fue Marmolina Tipo 1.

Se trata de un material muy fino, generalmente utilizado en mezclas que no han de ser empleadas en elementos estructurales, sino en otras actividades como el repellado. Sin embargo, se decidió utilizarlo debido a que, se desea tener una mezcla trabajable, lo que es muy factible cuando se tiene un tamaño de partícula muy pequeño.

III.1.4. Agua de Mezcla.

Sin duda alguna, el agua de mezcla es uno de los componentes de una mezcla que deben ser elegidos cuidadosamente, además de que, se deben hacer pruebas preliminares para poder determinar la cantidad de agua requerida para cada mezcla.

En nuestra investigación utilizamos agua corriente, es decir, el agua potable convencional de la ciudad de Morelia, Michoacán, que en condiciones normales tiene buenas características para ser utilizada en estos procesos. La cantidad varía de acuerdo a la compasión utilizada, desde 0.65 hasta 0.85 con respecto al peso del cemento.

III.1.5. Óxido de Aluminio.

El óxido de Aluminio, mejor conocido como Alúmina, es uno de los componentes más importantes en la constitución de las arcillas y los esmaltes, confiriéndoles resistencia y aumentando su temperatura de maduración. Es por ello que se decidió utilizar este compuesto para su análisis, para poder establecer si su uso nos permite obtener un incremento en la resistencia de un mortero de cal.

Propiedades.

Algunas de las propiedades que presenta el óxido de Aluminio se mencionan a continuación:



- Densidad: 3.86 gr./cm³.
- Dureza Vickers: 1500-1650 Kgf·mm².
- Módulo de Elasticidad: 300-400 GPa.

Proceso de Producción.

La industria emplea el proceso Bayer para producir alúmina a partir de la bauxita. La alúmina es vital para la producción de Aluminio (se requieren aproximadamente dos toneladas de alúmina para producir una tonelada de aluminio).

En el proceso Bayer, la bauxita es lavada, pulverizada y disuelta en sosa cáustica (hidróxido de sodio) a alta presión y temperatura; el líquido resultante contiene una solución de aluminato de sodio y residuos de bauxita que contienen hierro, silicio y titanio. Estos residuos se van depositando gradualmente en el fondo del tanque y luego son eliminados. Se les conoce comúnmente como "barro rojo". La solución de aluminato de sodio clarificada es bombeada dentro de un enorme tanque llamado precipitador. Se añaden finas partículas de alúmina con el fin de inducir la precipitación de partículas de alúmina puras (proceso de siembra), una vez que el líquido se enfría. Las partículas se depositan en el fondo del tanque, se remueven y luego son sometidas a 1100°C en un horno o calcinador, con el fin de eliminar el agua que contienen, producto de la cristalización. El resultado es un polvo blanco, alúmina pura. La sosa cáustica es devuelta al comienzo del proceso y usada nuevamente.



Figura 3.3. Óxido de Aluminio



III.1.6. Hiperfluidificante Plastol 4000.

Plastol 4000 es un aditivo hiperfluidificante base policarboxilatos, formulado específicamente para mezclas con baja relación agua/cementante. Cumple con las normas ASTM-494 tipo F, como reductor de agua de alto rango. El Plastol 4000 no contiene iones cloruro adicionados.

Aplicaciones Principales.

Plastol 4000 está especialmente recomendado cuando se requiere:

- Concreto de alta fluidez.
- Mezclas para pisos con baja relación agua/cementante.
- Concretos autoconsolidables.
- Concretos Bombeados.

Beneficios.

- Mejora la durabilidad en el concreto debido a que reduce la permeabilidad.
- Facilita la colocación de la mezcla en el sitio.
- De acuerdo a la dosis, se pueden disminuir los tiempos de acabado en pisos industriales.
- No contiene cloruros ni agentes corrosivos.

Apariencia.

- Es un líquido color ámbar.
- Gravedad específica 1.09 Kg./l.
- Contenido de sólidos: 30% materia activa.

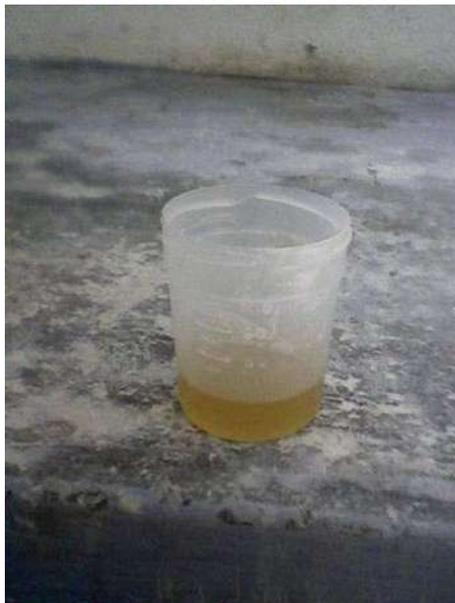


Figura 3.4. Plastol 4000



Instrucciones de Uso.

- Cuando se usa como reductor de agua o agente de flujo, la dosis recomendada es de 2 a 15 cc. por kilogramo de cementante.
- Puede ser adicionado a pie de obra.
- Como fluidificante, se adiciona el aditivo a una mezcla de consistencia normal para obtener unas características de concreto bombeable.
- Como reductor de agua (hasta un 20 o 40%) dosificar en el agua de mezcla final.

III.1.7. Aditivo DK12.

Aditivo proporcionado por SIALATO S.A. de C.V.

III.1.8. Ladrillos.

Un ladrillo es una pieza cerámica obtenida por moldeo, secado y cocción a altas temperaturas de una pasta arcillosa, cuyas dimensiones suelen rondar 24*12*6 centímetros. Se emplea en albañilería para la ejecución de paredes, ya sean muros, tabiques, tabicones, etc.

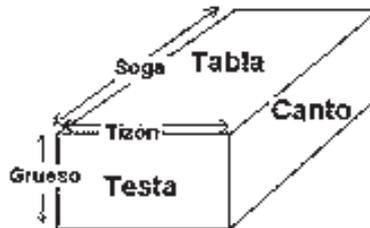


Figura 3.5. Geometría de un Ladrillo

Tipos de Ladrillos.

Según su forma, los ladrillos se clasifican en:

- *Ladrillo Perforado*, que son todos aquellos que tienen perforaciones en la tabla que ocupen más del 10% de la superficie de la misma. Se utilizan en la ejecución de fachadas de ladrillo.
- *Ladrillo Macizo*, aquellos con menos de un 10% de perforaciones en la tabla. Algunos modelos presentan rebajes en dichas tablas y en las testas para ejecución de muros sin llagas.
- *Ladrillo Tejar o Manual*, simulan los antiguos ladrillos de fabricación artesanal, con apariencia tosca y caras rugosas. Tienen buenas propiedades ornamentales.
- *Ladrillo Aplantillado*, aquel que tiene un perfil curvo, de forma que al colocar una hilada de ladrillo conforman una moldura corrida. El



nombre proviene de las plantillas que utilizaban los canteros para labrar las piedras, y que utilizaban para dar la forma al ladrillo.

- *Ladrillo Hueco*, son aquellos que poseen perforaciones en el canto o en la testa que reducen el peso y el volumen del material empleado en ellos, facilitando su corte y manejo. Aquellos que poseen orificios horizontales son utilizados para tabiquería que no vaya a soportar grandes cargas.
- *Ladrillo Caravista*, son aquellos que se utilizan en exteriores con un acabado especial.
- *Ladrillo Refractario*, se coloca en lugares donde debe soportar altas temperaturas, como hornos o chimeneas.

Aparejos.

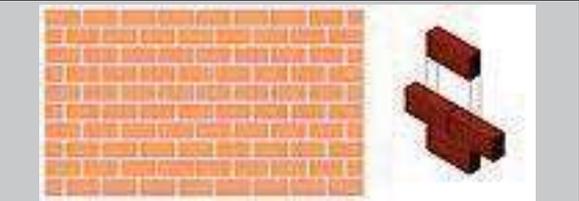
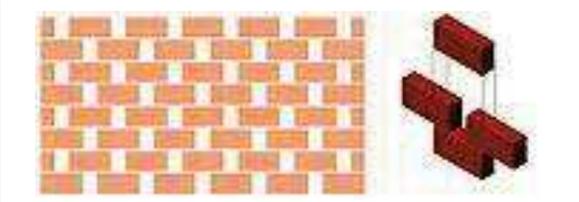
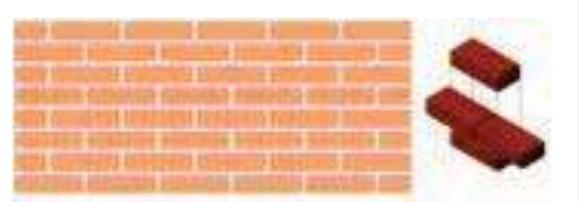
Aparejo Inglés	Aparejo a Panderete
	
Aparejo Palomero	Aparejo a Sogas
	
Aparejo a Tizones	
	

Tabla 3.1. Tipos de Aparejo

Características de los Ladrillos Utilizados.

Las características más importantes a considerar en ladrillos que han de ser utilizados para la elaboración de muros deben ser las siguientes:



- **Dimensiones.** Los ladrillos utilizados fueron obtenidos en un establecimiento de materiales común y corriente, por lo que, las dimensiones de los mismos corresponden a las medidas más comunes en la ciudad de Morelia, las cuales son:

Dimensión	Medida (cm)
Largo Soga	24.0
Largo Tizón	12.0
Espesor Grueso	6.0

Tabla 3.2. Dimensiones de Ladrillos

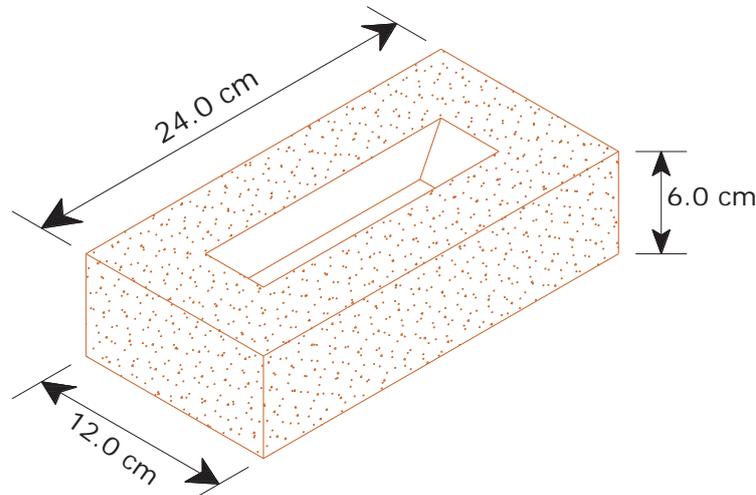


Figura 3.6. Dimensiones de los tabiques

- **Humedad Actual.** Nos permite determinar el contenido de humedad que presentan los tabiques en forma natural. Para determinar esta característica se deben tomar tres muestras de un mismo lote; se pesan y se introducen en el horno aproximadamente a 110°C, durante 24 horas; se sacan del horno y se pesan nuevamente.

$$\% \text{Humedad} = \frac{P_i - P_f}{P_f} * 100$$

Muestra	Peso Inicial (gr.)	Peso Final (gr.)	Humedad (%)
A	2515.0	2465.0	2.028
B	2470.0	2465.0	0.203
C	2455.0	2450.0	0.205
Promedio=			0.812 %

Tabla 3.3. Humedad Actual en Tabiques



- **Humedad de Absorción.** Nos permite determinar la capacidad que tiene un tabique para absorber humedad en por ciento de su peso seco. Se eligen tres muestras representativas, de un mismo lote; se dejan secar en el horno a 110°C y se toma su peso seco (Ps); se colocan en un recipiente con agua durante 24 horas y se pesan nuevamente para obtener el peso húmedo (Ph).

$$\%H.deAbsorción = \frac{Ph - Ps}{Ps} * 100$$

Muestra	Peso Seco (gr.)	Peso Húmedo (gr.)	Humedad (%)
A	2465.0	2960.0	20.081
B	2465.0	2965.0	20.284
C	2450.0	2915.0	18.980
Promedio=			19.782 %

Tabla 3.4. Humedad de Absorción en Tabiques

- **Compresión Simple en Tabiques.** Nos permite determinar el esfuerzo máximo por compresión de un tabique de arcilla recocida (o del material que se vaya a usar en obra). Se obtienen 9 muestras representativas (mitades) y se toman sus medidas (Área); las muestras se deben cabecear con yeso; se colocan en la máquina de pruebas y se les aplica carga (P).

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

Muestra	Área (cm ²)	Carga (Kg.)	Esfuerzo (Kg./cm ²)	Esfuerzo (MPa)
1	144.0	6150.0	42.708	4.188
2	144.0	6600.0	45.833	4.495
3	138.0	6050.0	43.841	4.299
4	139.2	6250.0	44.899	4.403
5	145.1	5950.0	41.006	4.021
6	138.0	6300.0	45.652	4.477
7	144.0	5800.0	40.277	3.950
8	138.1	5600.0	40.550	3.977
9	144.0	6050.0	42.014	4.120
Promedio=				4.214 MPa

Tabla 3.5. Esfuerzo de Compresión en Tabiques



Como se puede observar que el esfuerzo de compresión obtenido para las piezas utilizadas en este trabajo, son relativamente bajos, sin embargo, se decidió usar este tipo de material con la finalidad de poder obtener conclusiones más acertadas de lo que podemos encontrar en la realidad, es decir, bajo las condiciones prevalecientes en obra.

III.2. Diseño de las Mezclas.

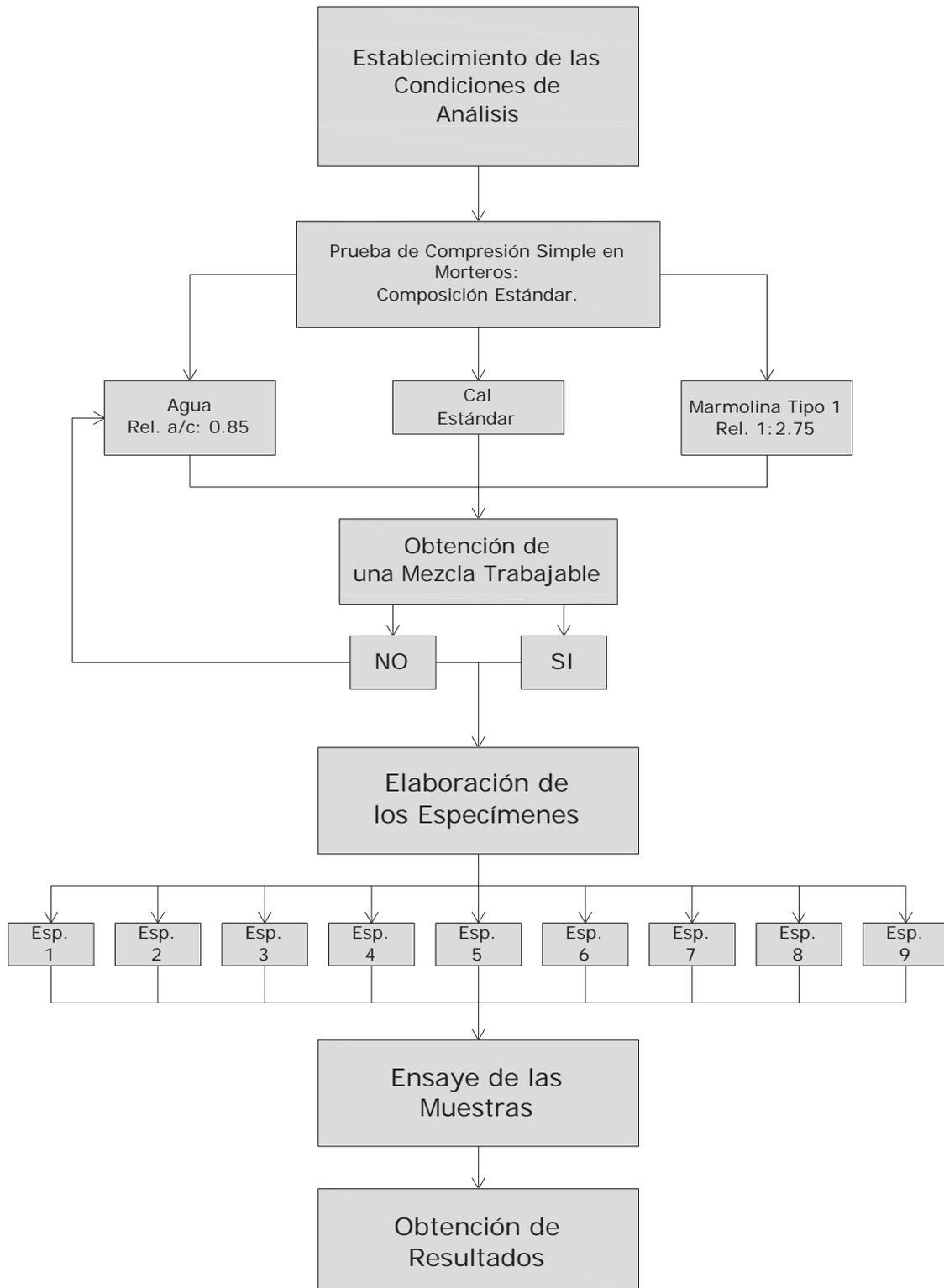
En este apartado se presentan varios diagramas en los que se representa la forma en que se desarrolló la investigación presentada en este trabajo. La finalidad de elaborar dichos diagramas es, mostrar la manera en la que se decidió el proceso de selección de composiciones y de ensayos a realizar, es decir, señalar la parte teórica desarrollada durante un proceso de investigación e innovación tecnológica.

III.2.1. Compresión Simple en Morteros.

El primer ensayo que se debe realizar cuando se realiza una investigación relacionada con los materiales cementantes usados en el campo de la construcción es la Prueba de Compresión Simple en Morteros, la cual nos permitirá establecer las condiciones de uso de cada composición, y nos ayuda a determinar si se les puede dar el uso para el cual están siendo estudiadas, lo cual nos permitirá determinar si la investigación puede tener resultados complacientes o no.

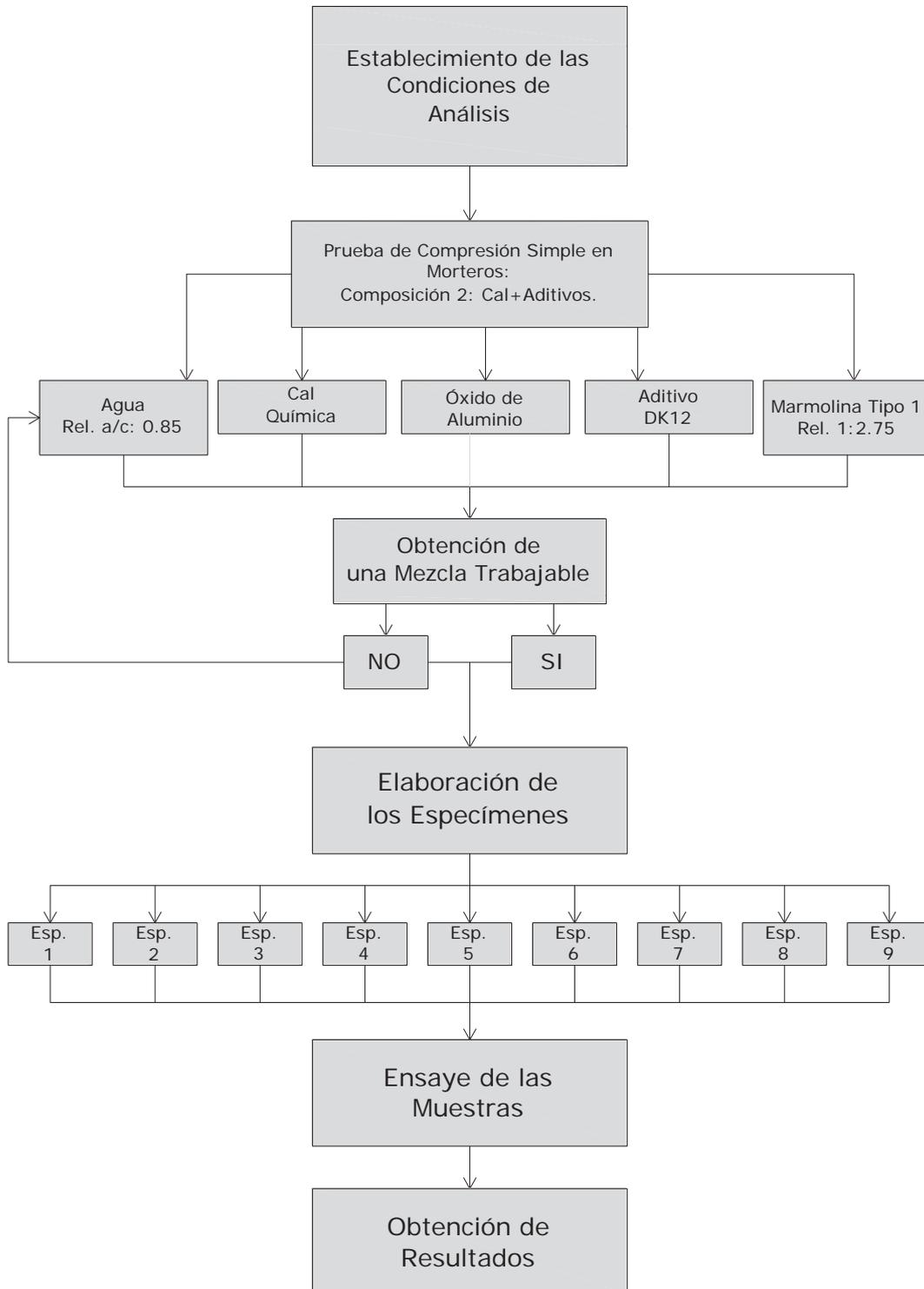


III.2.1.1. Composición 1:



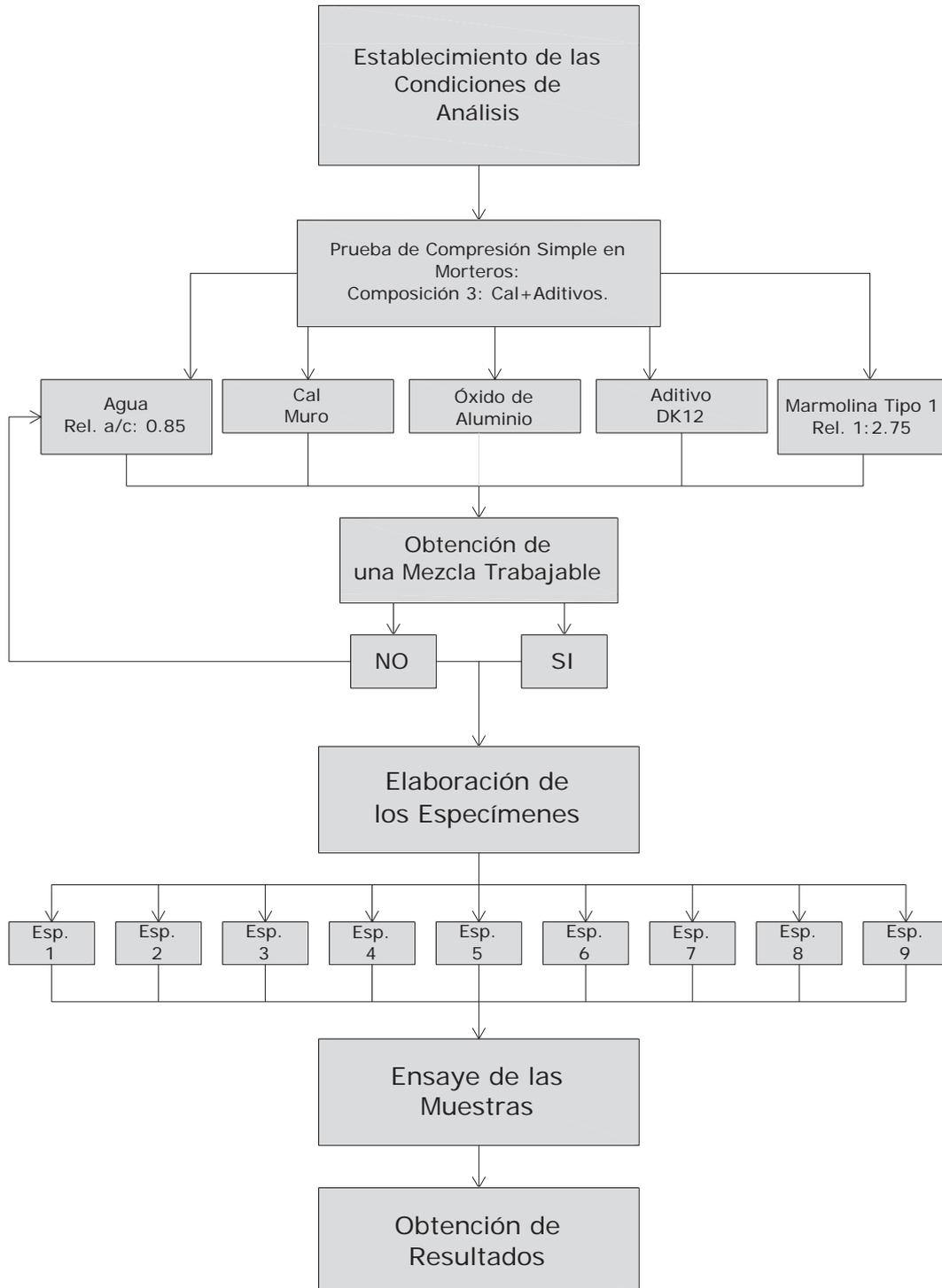


III.2.1.2. Composición 2:



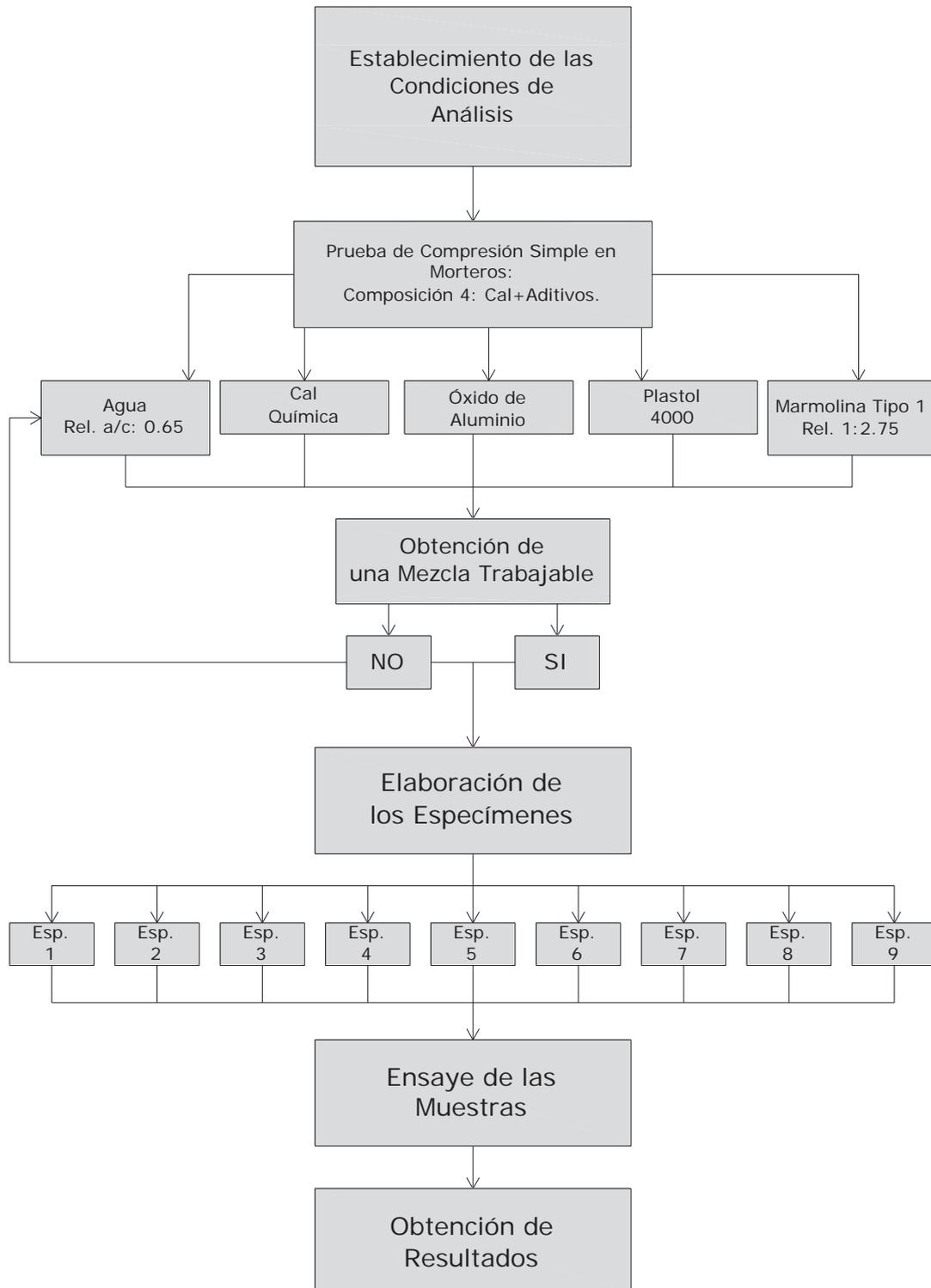


III.2.1.3. Composición 3:



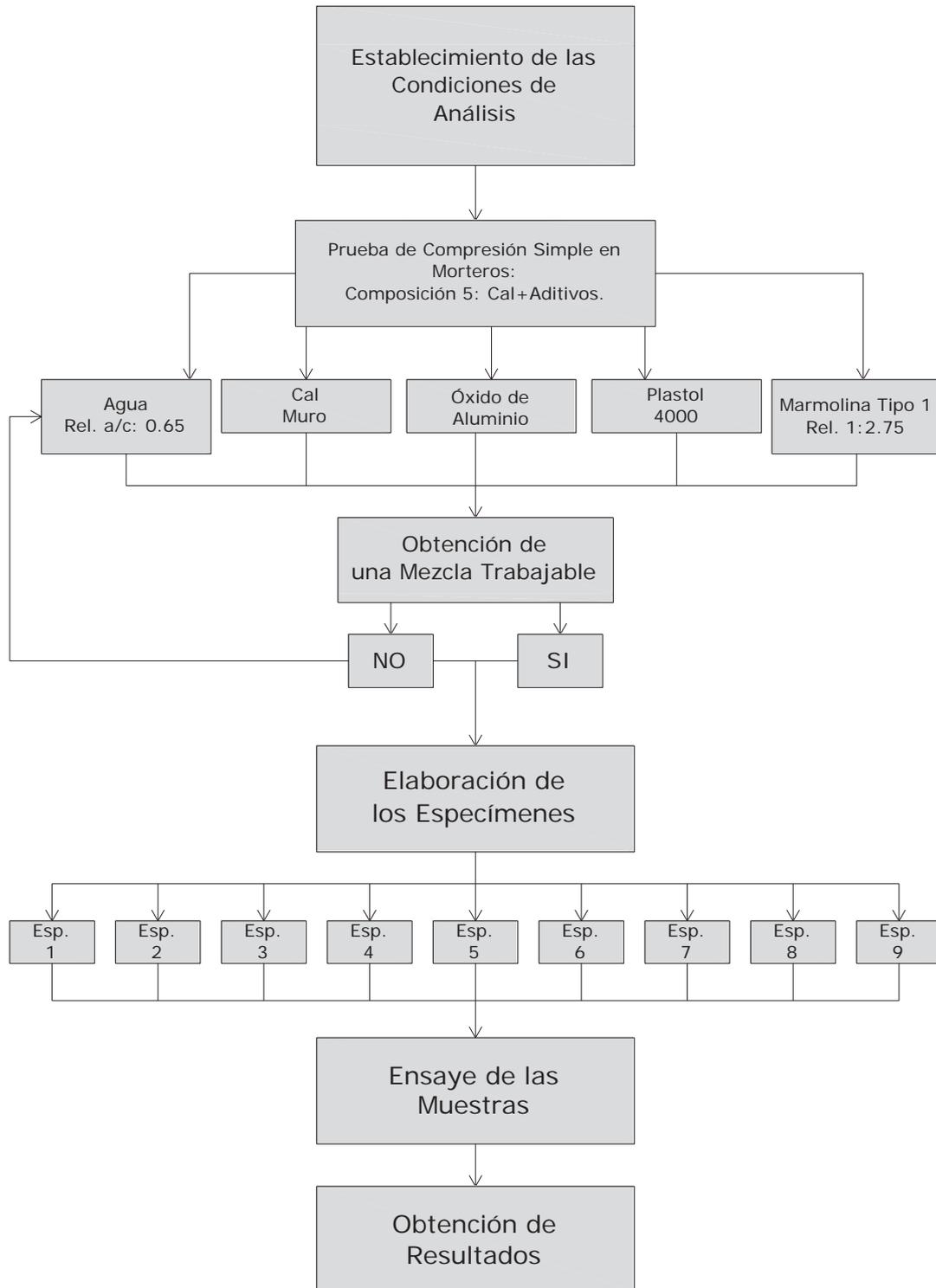


III.2.1.4. Composición 4:





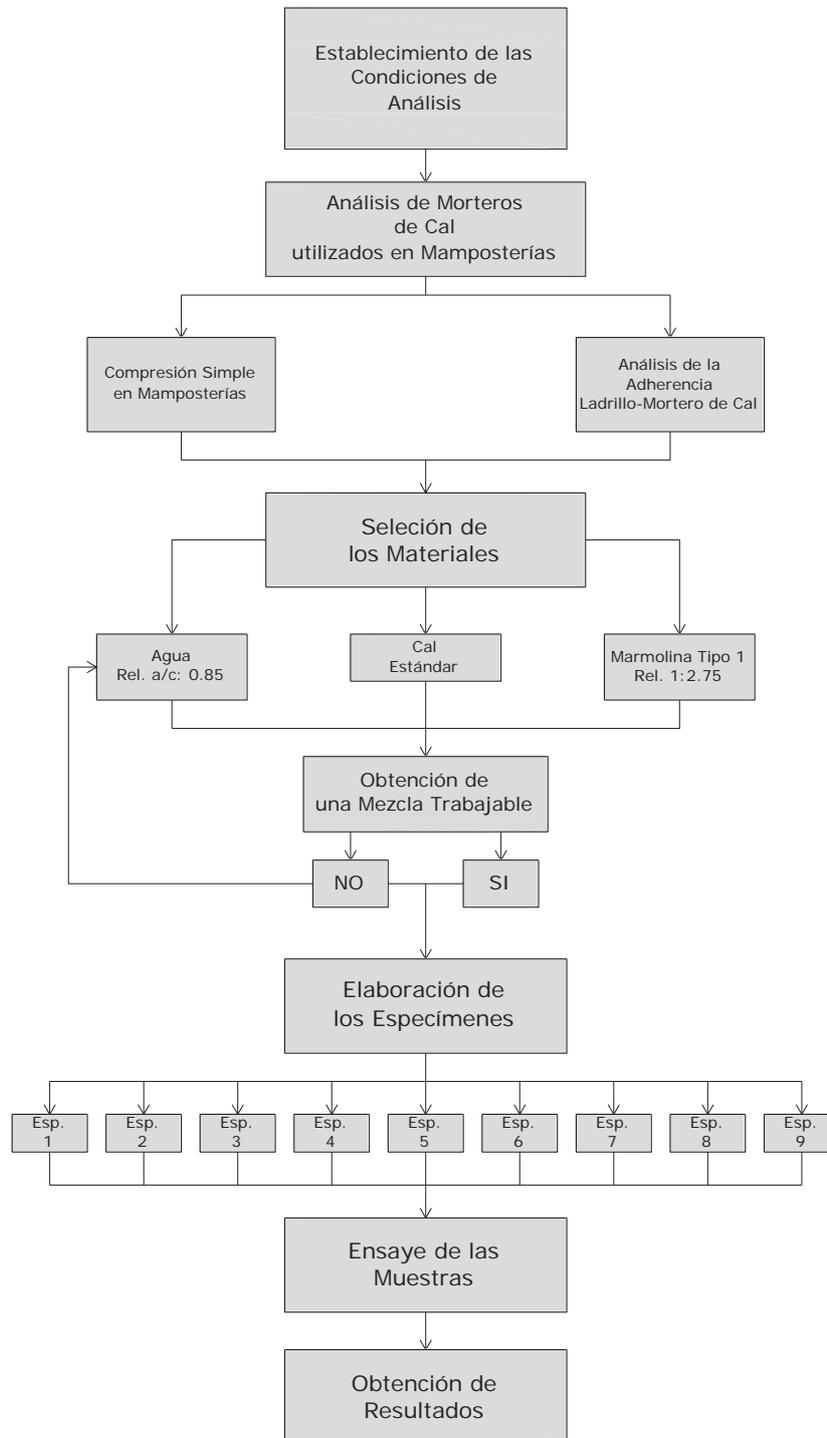
III.2.1.5. Composición 5:





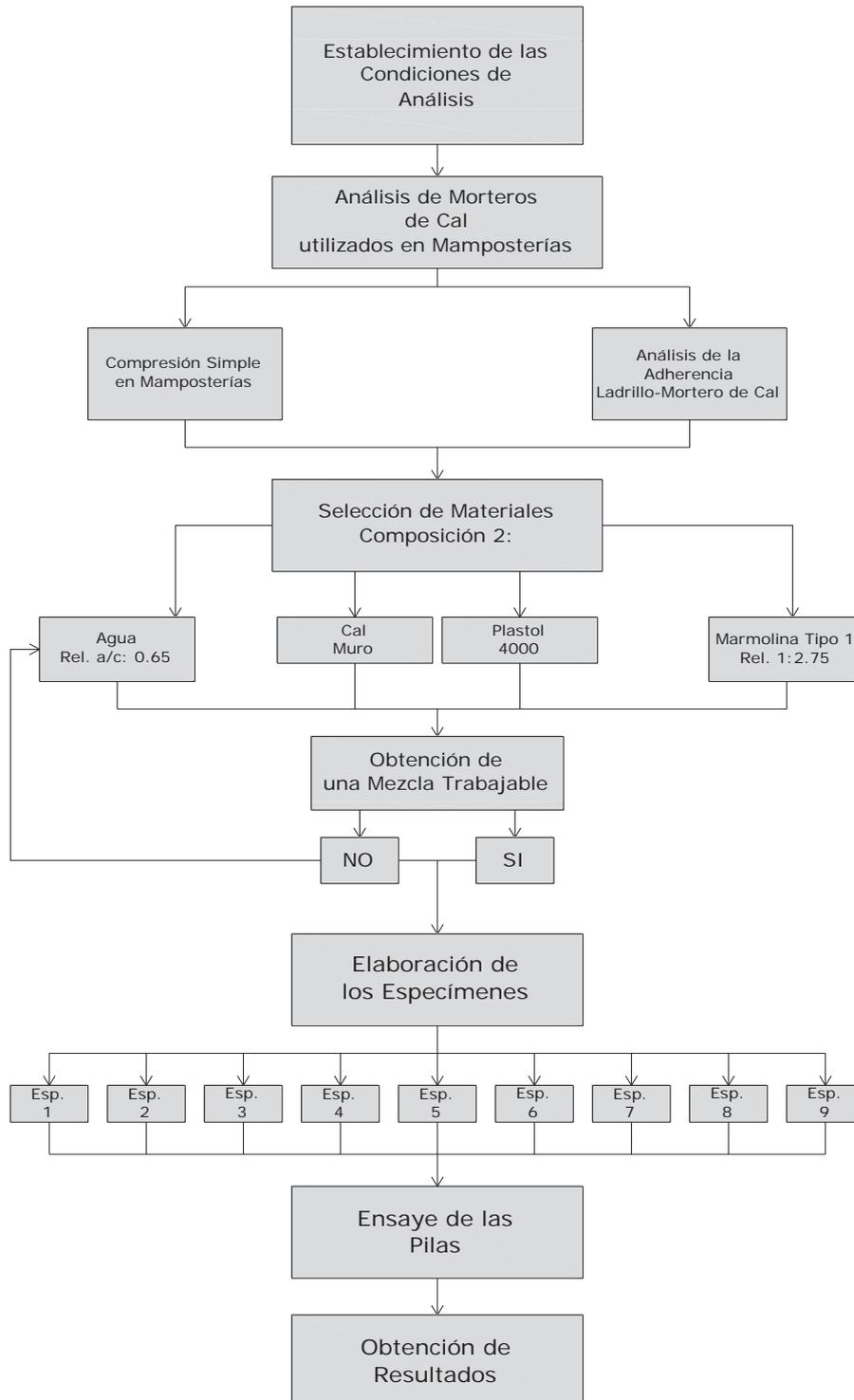
III.2.2. Diseño de las Mezclas Utilizadas en Mamposterías.

III.2.2.1. Composición 1:



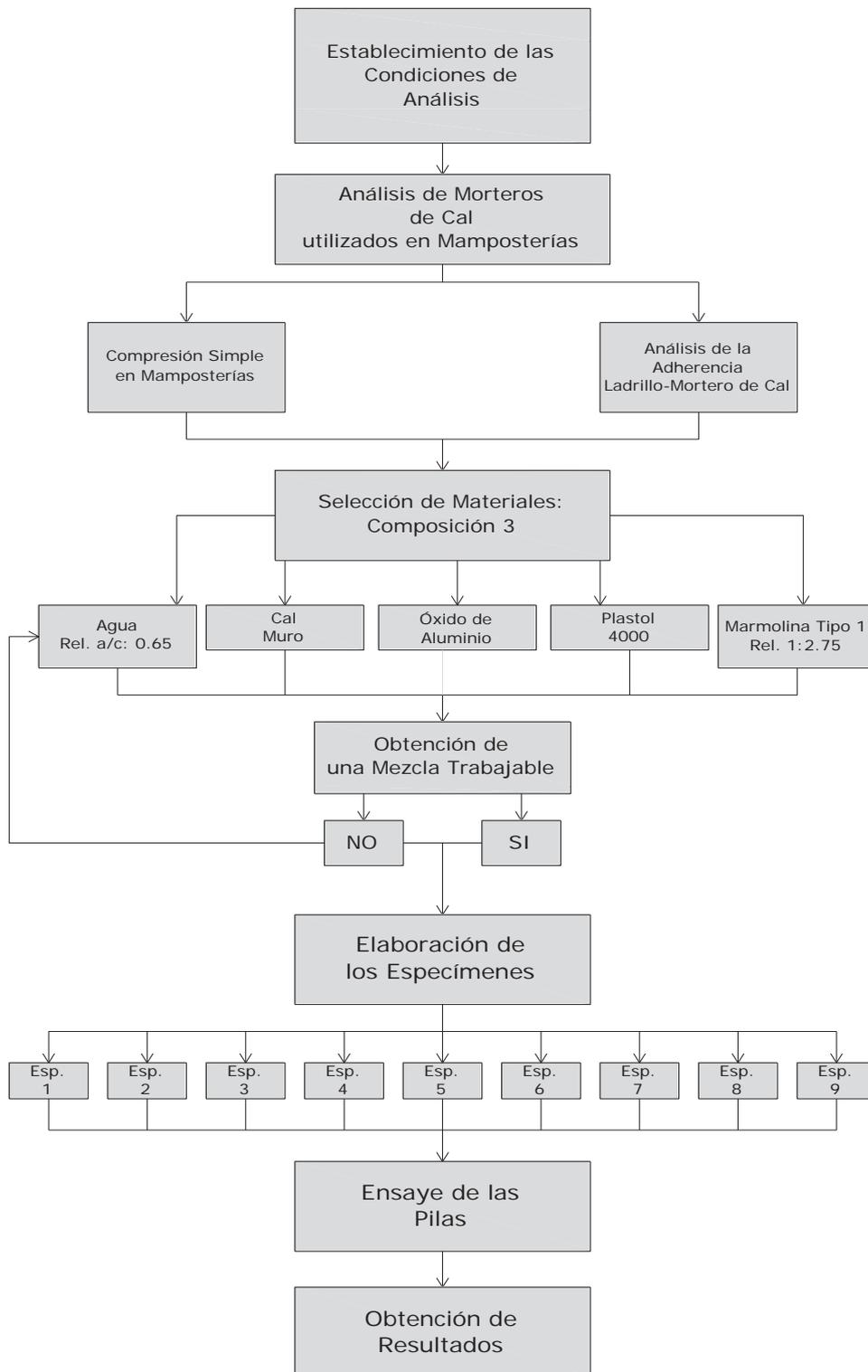


III.2.2.2.Composición 2:



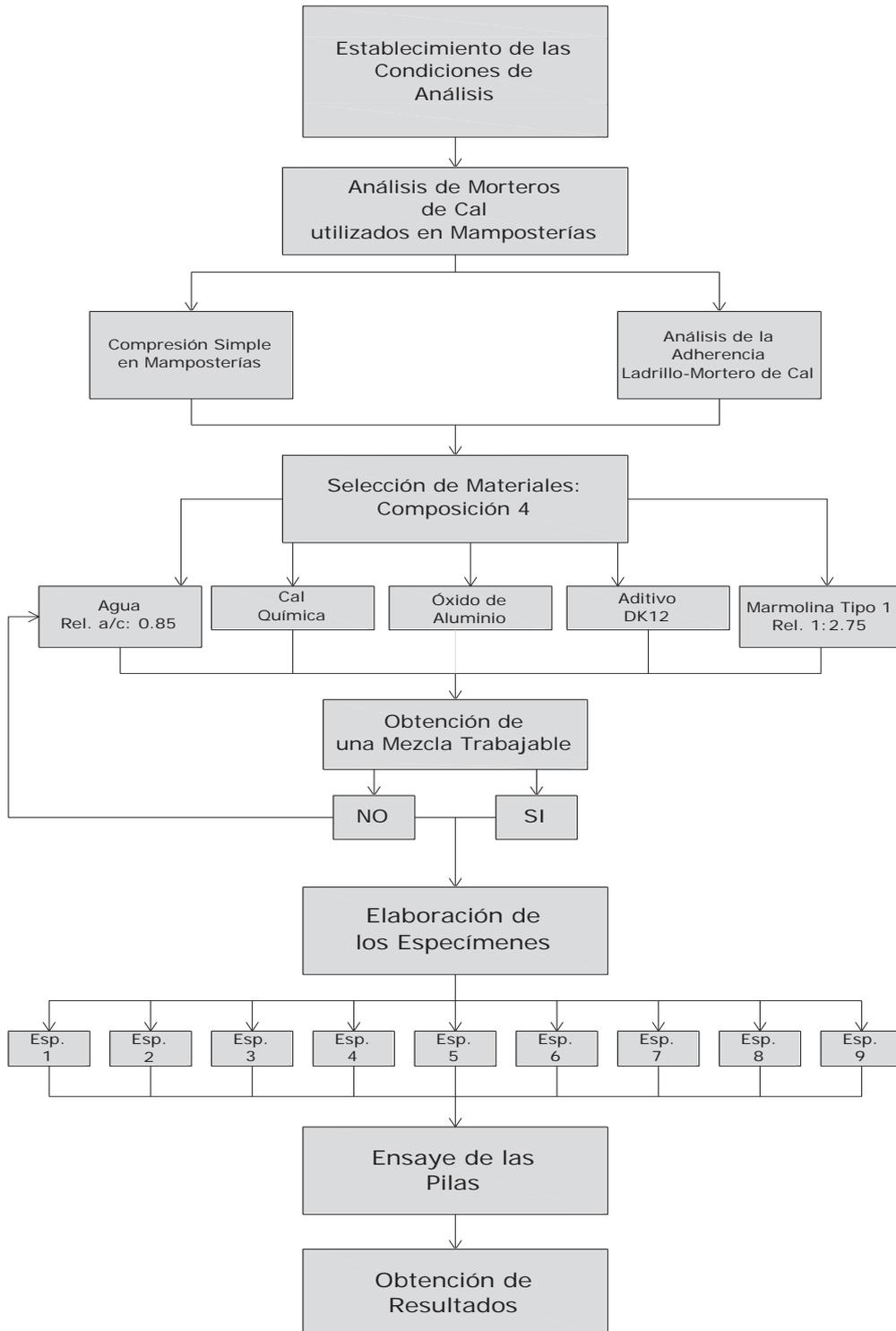


III.2.2.3. Composición 3:





III.2.2.4. Composición 4:





Capítulo IV.
Evaluación física y mecánica de morteros de cal
utilizando aditivos





CAPÍTULO IV.

EVALUACIÓN FÍSICA Y MECÁNICA DE MORTEROS DE CAL UTILIZANDO ADITIVOS

En este capítulo se analizará el comportamiento de morteros de cal utilizando diferentes composiciones. Para ello se elaboraron varias muestras, las cuales fueron probadas a compresión simple en una máquina de pruebas con velocidad regulada.

De acuerdo con las normas establecidas cuando hablamos de pruebas para morteros es indispensable que se hagan por lo menos nueve especímenes para cada composición utilizada. A continuación se mostrarán los resultados obtenidos.

IV.1. Compresión Simple en Morteros.

La prueba de Compresión Simple en Morteros tiene como objetivo determinar la capacidad de carga de las especímenes realizados con las diferentes composiciones seleccionadas para el análisis.

Consiste en tomar los especímenes y colocarlos en una máquina de pruebas que sea capaz de aplicar carga con velocidad controlada. En esta prueba se hace necesario que todas las muestras sean analizadas con la misma velocidad para que los resultados obtenidos sean lo más exactos como sea posible.

Otro aspecto importante que se debe considerar cuando se desea realizar una prueba de compresión simple es que, la velocidad de aplicación de la carga no puede ser muy rápida ya que los especímenes pueden fallar por impacto cuando la velocidad es muy alta, lo que provocará que no tengamos una lectura adecuada de la carga final de ruptura.

IV.1.1. Consideraciones Generales.

Es muy importante que señalemos que los morteros de cal empleados durante esta investigación, están desarrollados principalmente para su uso en mamposterías. Por lo tanto, las consideraciones que se deben hacer para su ensaye deben estar determinadas por las Normas Técnicas Complementarias del Distrito Federal, en su Sección de Mamposterías, las cuales, en el punto "2.5.2. Morteros para pegar piezas", establecen los parámetros necesarios para la prueba:



- a) Su resistencia a la compresión será por lo menos de 4 MPa (40Kg./cm²).
- b) La relación volumétrica entre el agregado y la suma de cementantes se encontrará entre 2.25 y 3. Los especímenes realizados durante nuestra investigación se elaboraron con una relación agregado-cemento de 1:2.75, valor que se encuentra dentro del rango establecido por la norma.
- c) Se empleará la mínima cantidad de agua que dé como resultado un mortero fácilmente trabajable.
- d) Siempre deberán contener cemento en la cantidad mínima indicada en la siguiente tabla:

Tipo de mortero	Partes de cemento hidráulico	Partes de cemento de albañilería	Partes de cal hidratada	Partes de arena ¹	Resistencia nominal en compresión, f _j [*] , MPa (kg/cm ²)
I	1	—	0 a ¼	No menos de 2.25 ni más de 3 veces la suma de cementantes en volumen	12.5 (125)
	1	0 a ½	—		
II	1	—	¼ a ½		7.5 (75)
	1	½ a 1	—		
III	1	—	½ a 1¼		4.0 (40)

¹ El volumen de arena se medirá en estado suelto.

Tabla 4.1. Proporcionamientos, en volumen, recomendados para mortero en elementos estructurales

IV.2. Elaboración de los Especímenes.

El proceso de elaboración de los especímenes para una prueba a Compresión Simple es bastante sencillo y será descrito a continuación:

1. Primero debemos seleccionar las composiciones que se consideren más adecuadas para poder establecer una comparación adecuada y poder determinar cuales son las mezclas más adecuadas para ser utilizadas en pruebas posteriores.
2. Se pesan los materiales necesarios para la mezcla con la que se elaborarán los especímenes. Debe tenerse mucho cuidado cuando



se pesan los materiales con la finalidad de que la composición seleccionada cumpla con las condiciones de resistencia esperados. Para nuestro caso se contó con una balanza electrónica con aproximación al décimo de gramo, lo que ayudó a que los porcentajes establecidos fueran casi exactos.

3. Una vez pesados los materiales, éstos fueron colocados en una charola de albañil donde fueron mezclados hasta obtener una mezcla homogénea, y con las características deseadas.



Figura 4.1. Mezcla para la Elaboración de Especímenes

4. La mezcla obtenida se coloca en moldes de acero, generalmente de dimensiones 5*5*5 centímetros. Los moldes deben ser curados con aceite para evitar que los especímenes queden adheridos a ellos.



Figura 4.2. Colocación de la Mezcla en Moldes

5. Aproximadamente 24 horas después los cubos son descimbrados para posteriormente ser probados a 28 días.

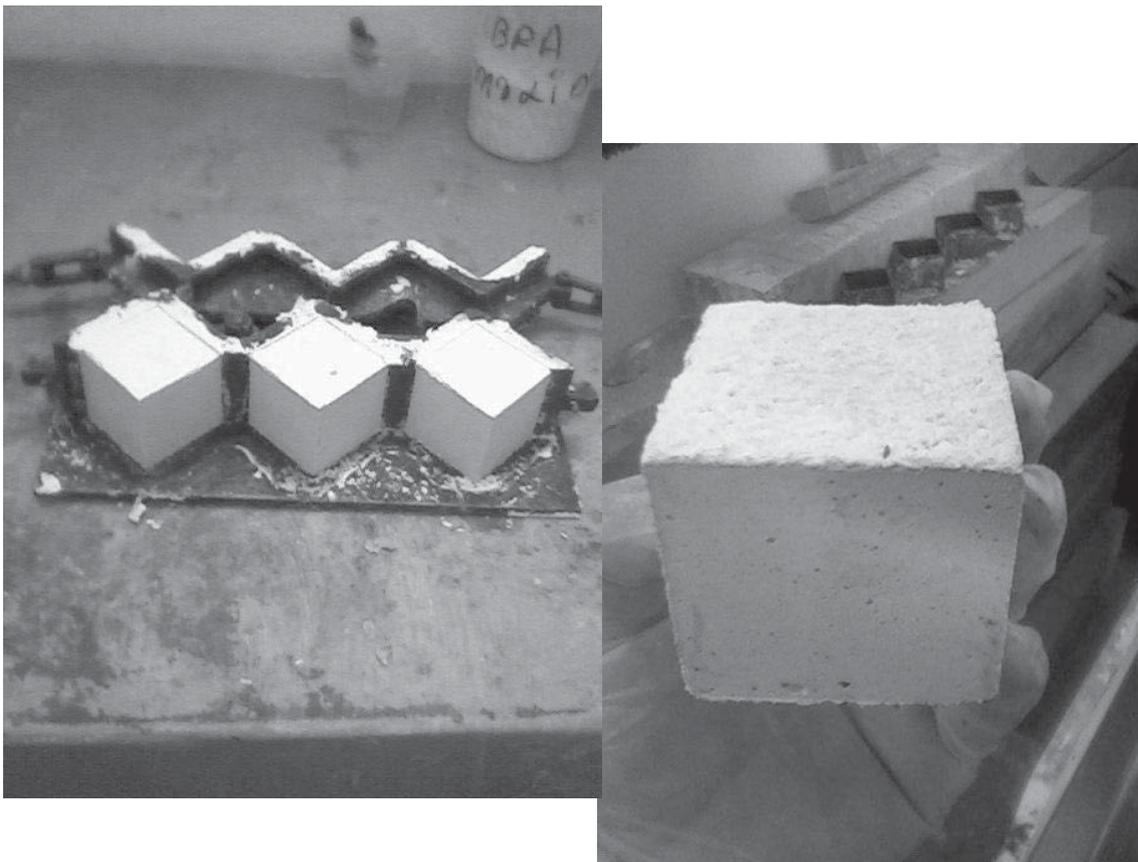


Figura 4.3. Descimbrado de los Especímenes



Una vez elaborados los cubos, se procede a realizar la prueba de Compresión Simple en Morteros, con lo que podemos evaluar la propiedad de resistencia mecánica y, además, seremos capaces de determinar cuales son las composiciones más recomendables para su desarrollo y posterior uso.

IV.3. Composiciones Seleccionadas y Resultados de la Prueba.

Durante la investigación se analizaron varias composiciones, desde mezclas que utilizaban componentes de grado reactivo como aditivos, tales como Carbonato de Calcio y Sulfato de Calcio, las cuales, por la naturaleza de sus componentes, no resultaron económicamente viables; hasta mezclas muy simples, en las que se utilizó cal convencional, muestras que nos sirvieron como parámetro para poder establecer los beneficios que se tienen cuando se utilizan aditivos en los morteros.

IV.3.1. Elaboración de las muestras estándar C1:051010). Bajo las siguientes condiciones: Se elaboraron 9 cubos con la finalidad de verificar su resistencia a la compresión simple.

- Fecha de Elaboración: 05- Octubre- 2010.
- Composición.
 1. 100% Cal Estándar.
 2. Marmolina Tipo 1. Relación 1:2.75
 3. Relación Agua-Cemento 0.85
- Resultados. Los resultados obtenidos para la prueba de Compresión Simple fueron los siguientes:
Fecha de Realización de la Prueba: 03- Noviembre- 2010

No.	L-A (cm)	L-B (cm)	Área (cm ²)
1	5.23	5.21	27.25
2	5.17	5.18	26.78
3	5.10	5.01	25.55
4	5.10	5.03	25.65
5	5.19	5.00	25.95
6	5.15	5.22	26.88
7	5.12	5.03	25.75
8	5.02	5.06	25.40
9	5.08	5.10	25.91

Tabla 4.2. Propiedades Geométricas de las muestras:
Composición 1

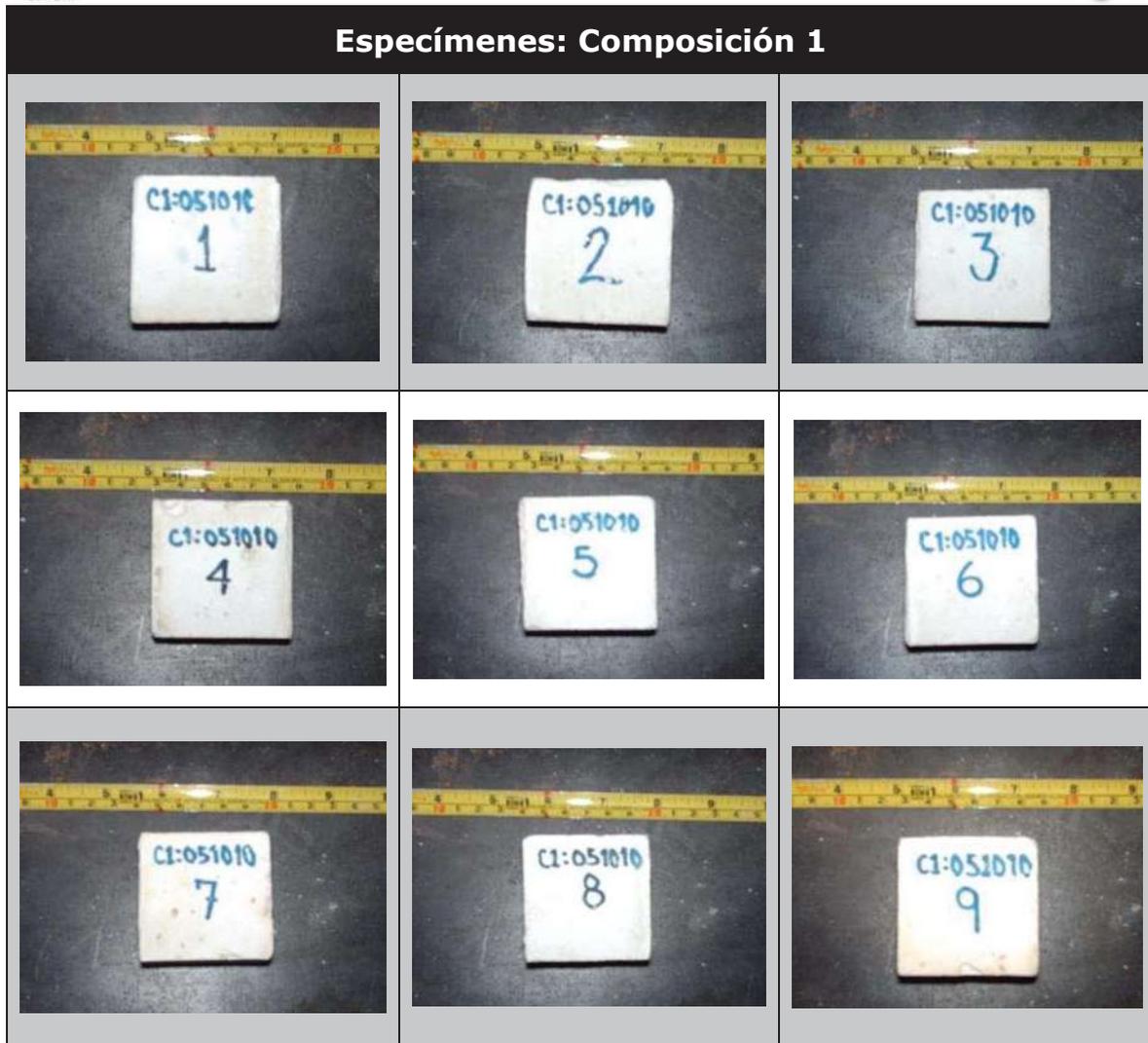


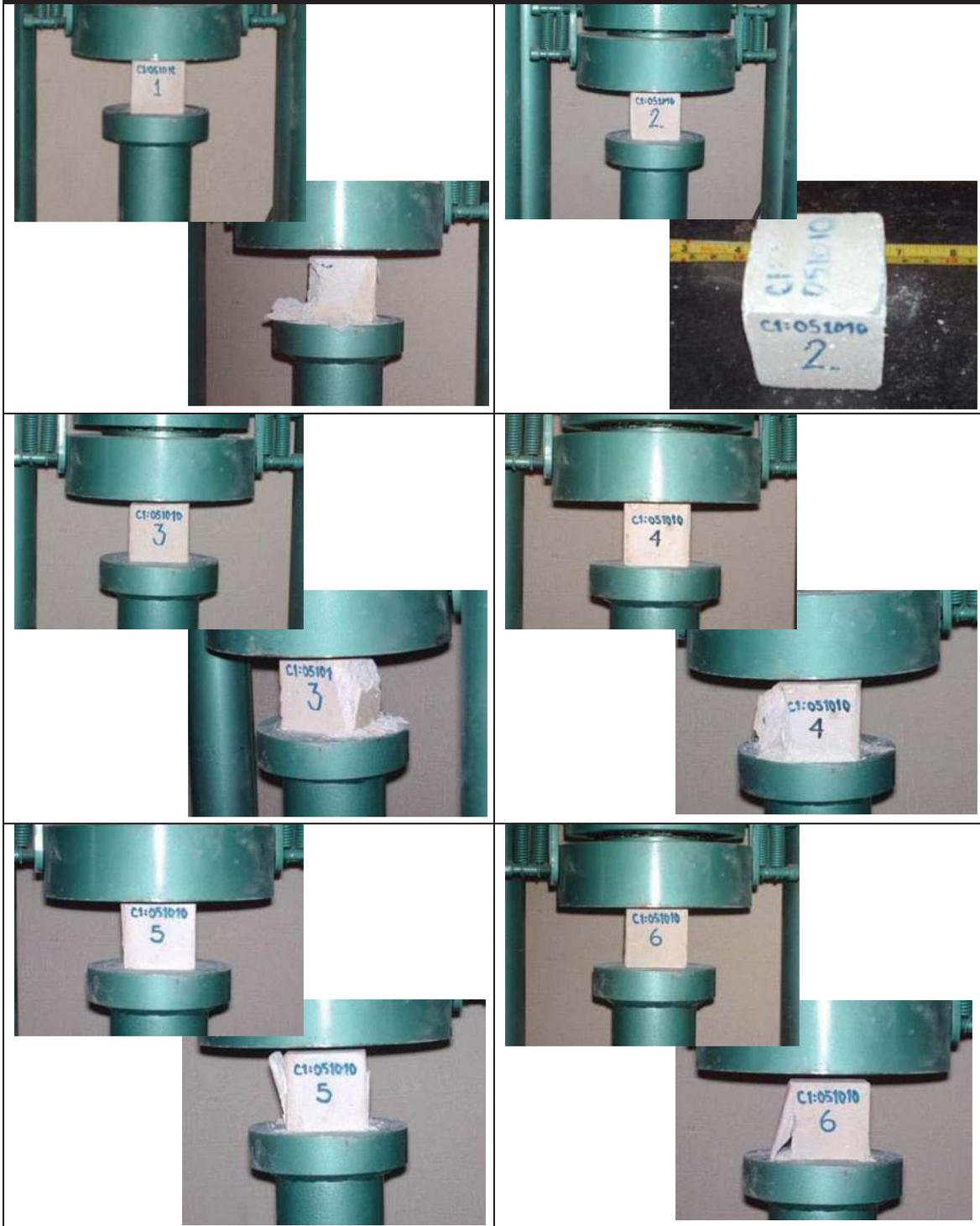
Figura 4.4. Geometría: Composición 1

Muestra	Carga (Kg.)	Esfuerzo (Kg./cm ²)	Esfuerzo (MPa)
1	160	5.872	0.576
2	270	10.082	0.989
3	210	8.219	0.806
4	250	9.745	0.956
5	170	6.551	0.642
6	290	10.787	1.058
7	220	8.542	0.838
8	160	6.299	0.618
9	250	9.650	0.946
Promedio=			0.825 MPa

Tabla 4.3. Compresión Simple en Morteros de Cal: Cal Estándar



Compresión Simple: Composición 1



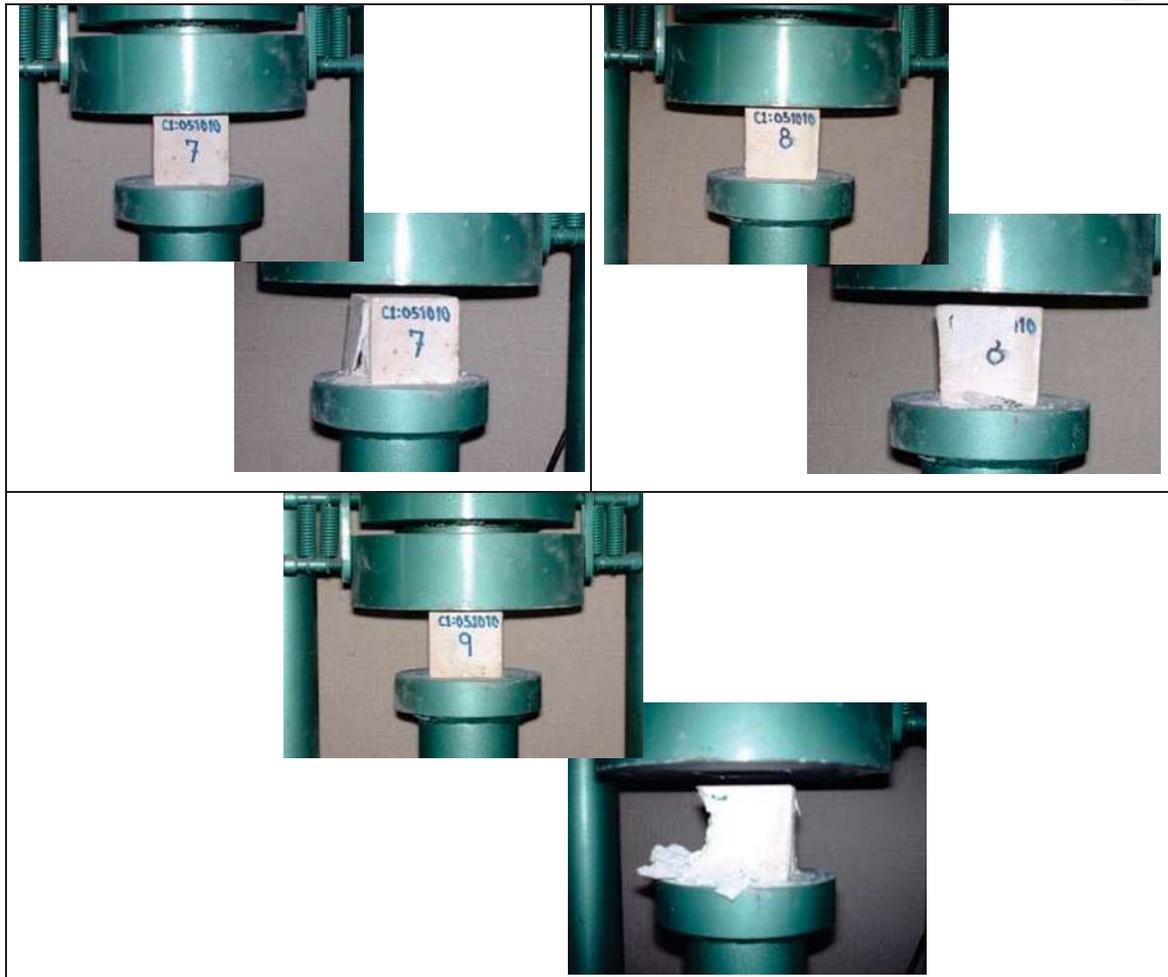


Figura 4.5. Falla por Compresión

IV.3.2. Elaboración de especímenes (C2:071010).

Aditivo DK12 y óxido de Aluminio : Se elaboraron 9 cubos con la finalidad de verificar su resistencia a la compresión simple.

- Fecha de Elaboración: 07- Noviembre- 2010.
- Composición.
 1. 100% Cal Química.
 2. 2% Aditivo DK12.
 3. 2.5% Óxido de Aluminio.
 4. Marmolina Tipo 1. Relación 1:2.75
 5. Relación Agua-Cemento 0.85
- Resultados. Los resultados obtenidos para la prueba de Compresión Simple fueron los siguientes:
Fecha de Realización de la Prueba: 04- Noviembre- 2010



No.	L-A (cm)	L-B (cm)	Área (cm ²)
1	5.21	5.00	26.05
2	5.02	5.00	25.10
3	5.16	5.01	25.85
4	5.04	5.20	26.21
5	5.25	5.08	26.67
6	5.21	5.07	26.41
7	5.00	5.00	25.00
8	5.21	5.00	26.05
9	5.16	5.00	25.80

Tabla 4.4. Propiedades Geométricas de las muestras:
Composición 2

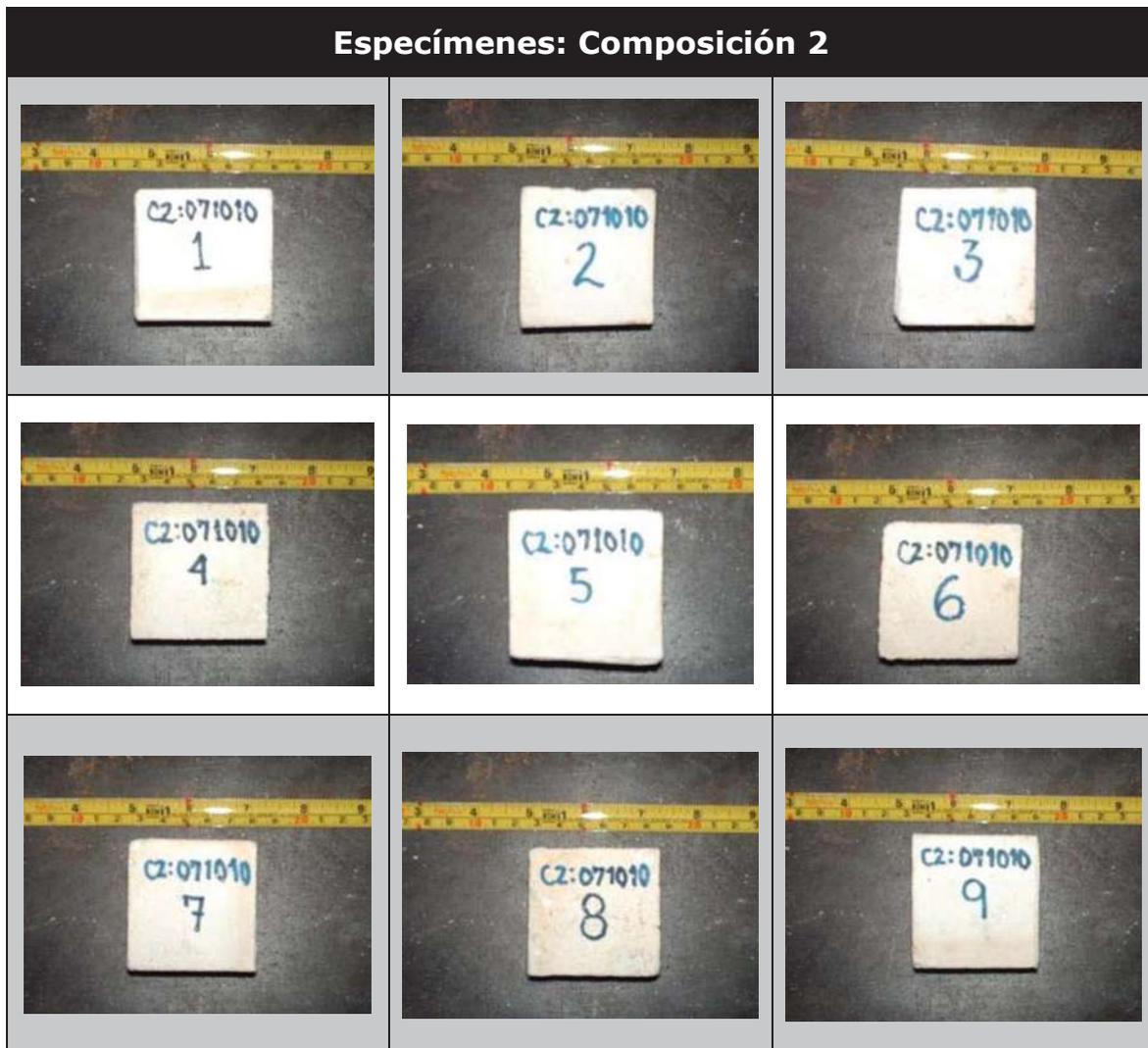


Figura 4.6. Geometría: Composición 2



Muestra	Carga (Kg.)	Esfuerzo (Kg./cm ²)	Esfuerzo (MPa)
1	1080	41.459	4.066
2	750	29.880	2.930
3	780	30.172	2.959
4	890	33.959	3.330
5	820	30.746	3.015
6	1000	37.858	3.713
7	860	34.400	3.373
8	850	32.629	3.200
9	810	31.395	3.079
Promedio=			3.296 MPa

Tabla 4.5. Compresión Simple en Morteros de Cal:
Cal Química + Aditivo DK12



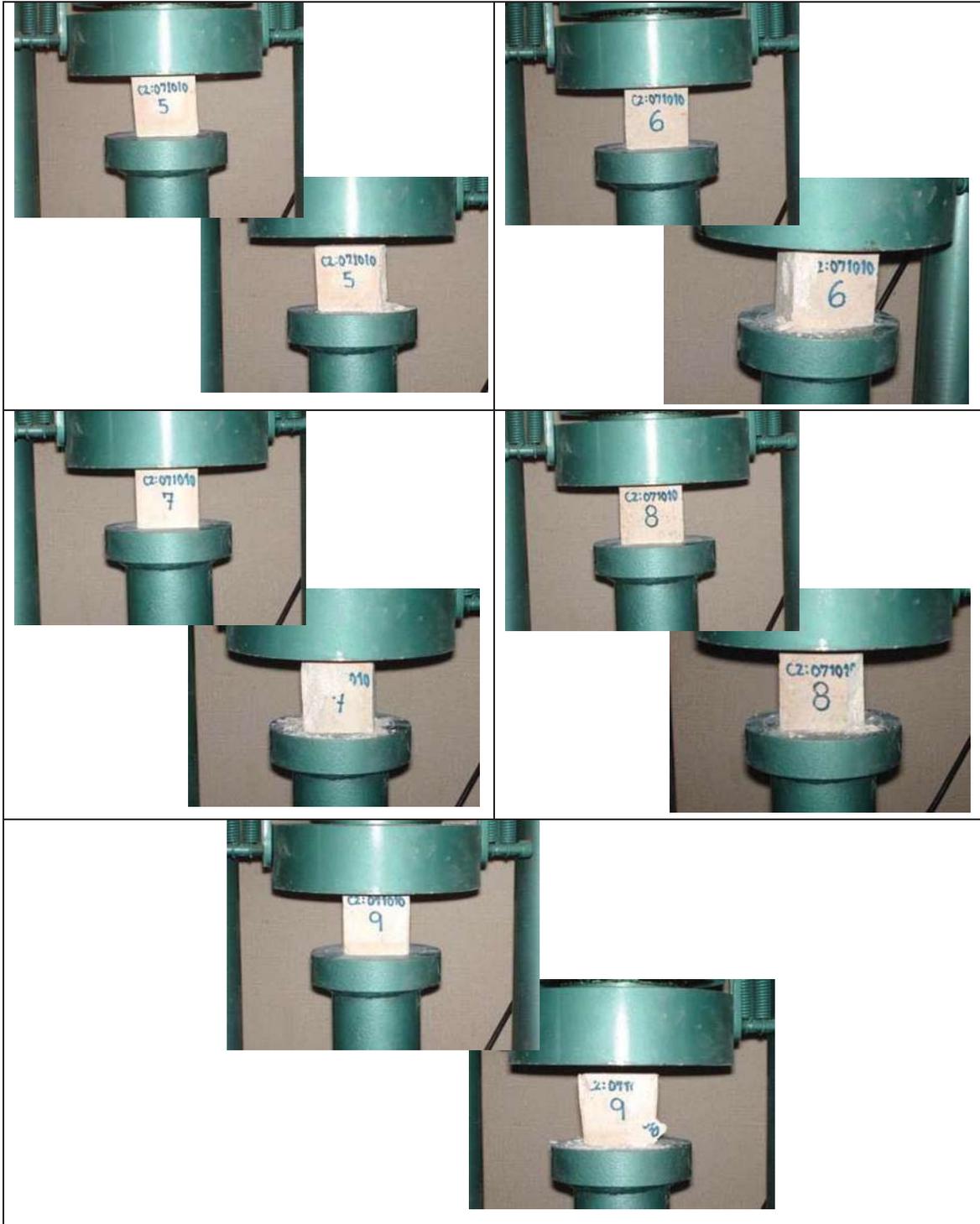


Figura 4.7. Falla por Compresión



**IV.3.3. Elaboración de especímenes (C3:081010):
Aditivo DK12 y óxido de Aluminio Se elaboraron 9 cubos con la
finalidad de verificar su resistencia a la compresión simple.**

- Fecha de Elaboración: 08- Noviembre- 2010.
- Composición.
 1. 100% Cal Estándar.
 2. 2% Aditivo DK12.
 3. 2.5% Óxido de Aluminio.
 4. Marmolina Tipo 1. Relación 1:2.75
 5. Relación Agua-Cemento 0.85
- Resultados. Los resultados obtenidos para la prueba de Compresión Simple fueron los siguientes:
Fecha de Realización de la Prueba: 05- Noviembre- 2010

No.	L-A (cm)	L-B (cm)	Área (cm ²)
1	5.05	5.00	25.15
2	5.20	5.26	27.35
3	5.22	5.21	27.20
4	5.00	5.24	26.20
5	5.03	5.29	26.61
6	5.06	5.00	25.30
7	5.02	5.00	25.10
8	5.00	5.08	25.40
9	5.19	5.00	25.95

Tabla 4.6. Propiedades Geométricas de las muestras:
Composición 3



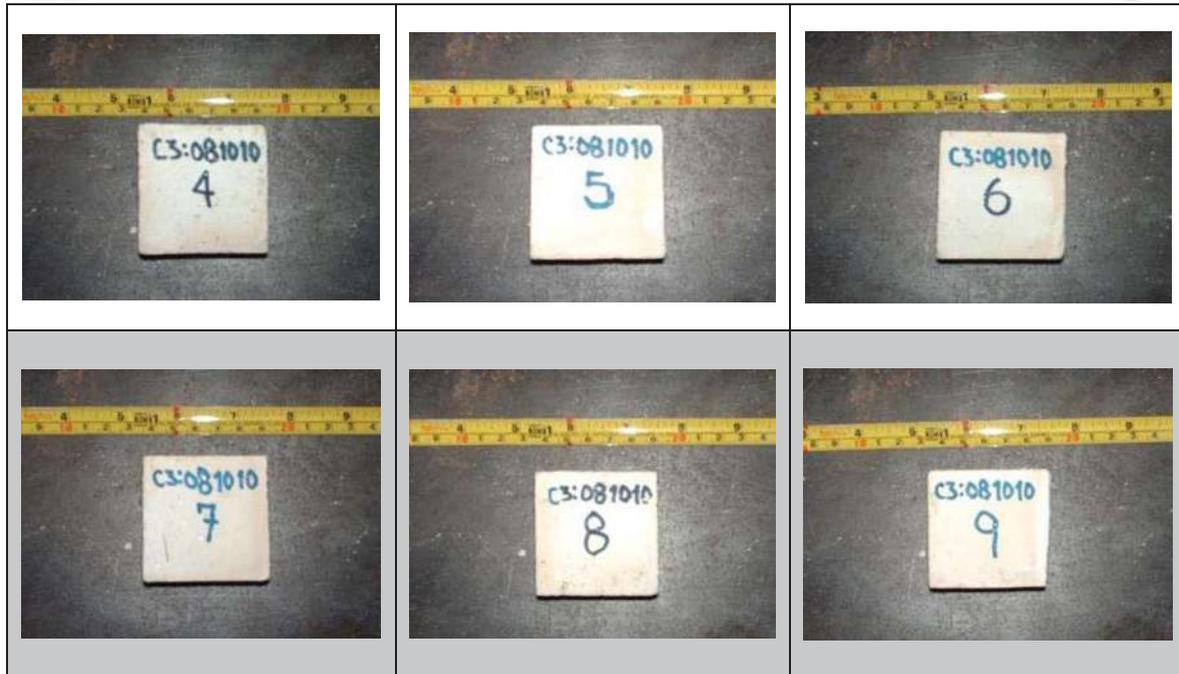


Figura 4.8. Geometría: Composición 3

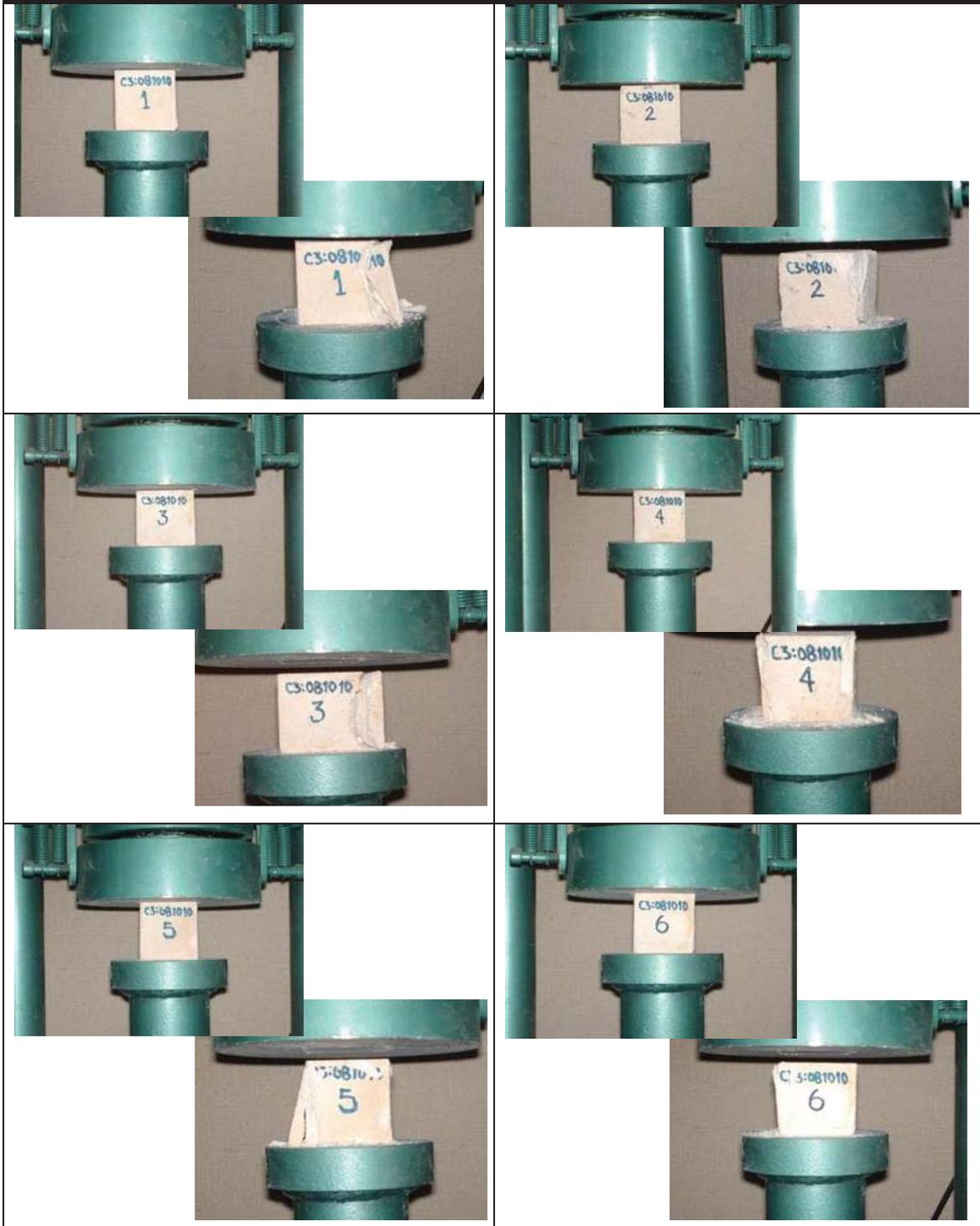
Muestra	Carga (Kg.)	Esfuerzo (Kg./cm ²)	Esfuerzo (MPa)
1	670	26.535	2.602
2	820	29.980	2.940
3	840	30.887	3.029
4	800	30.534	2.994
5	910	34.199	3.354
6	900	35.573	3.489
7	800	31.873	3.126
8	920	36.220	3.552
9	830	31.985	3.137
Promedio=			3.136 MPa

Tabla 4.7. Compresión Simple en Morteros de Cal:
Cal Estándar + Aditivo DK12

A continuación se muestran todos los especímenes de la composición 2, durante la prueba de Compresión, además también se incluyen fotografías en las que se puede observar la manera en que fallaron los cubos por la aplicación de carga.



Compresión Simple: Composición 3



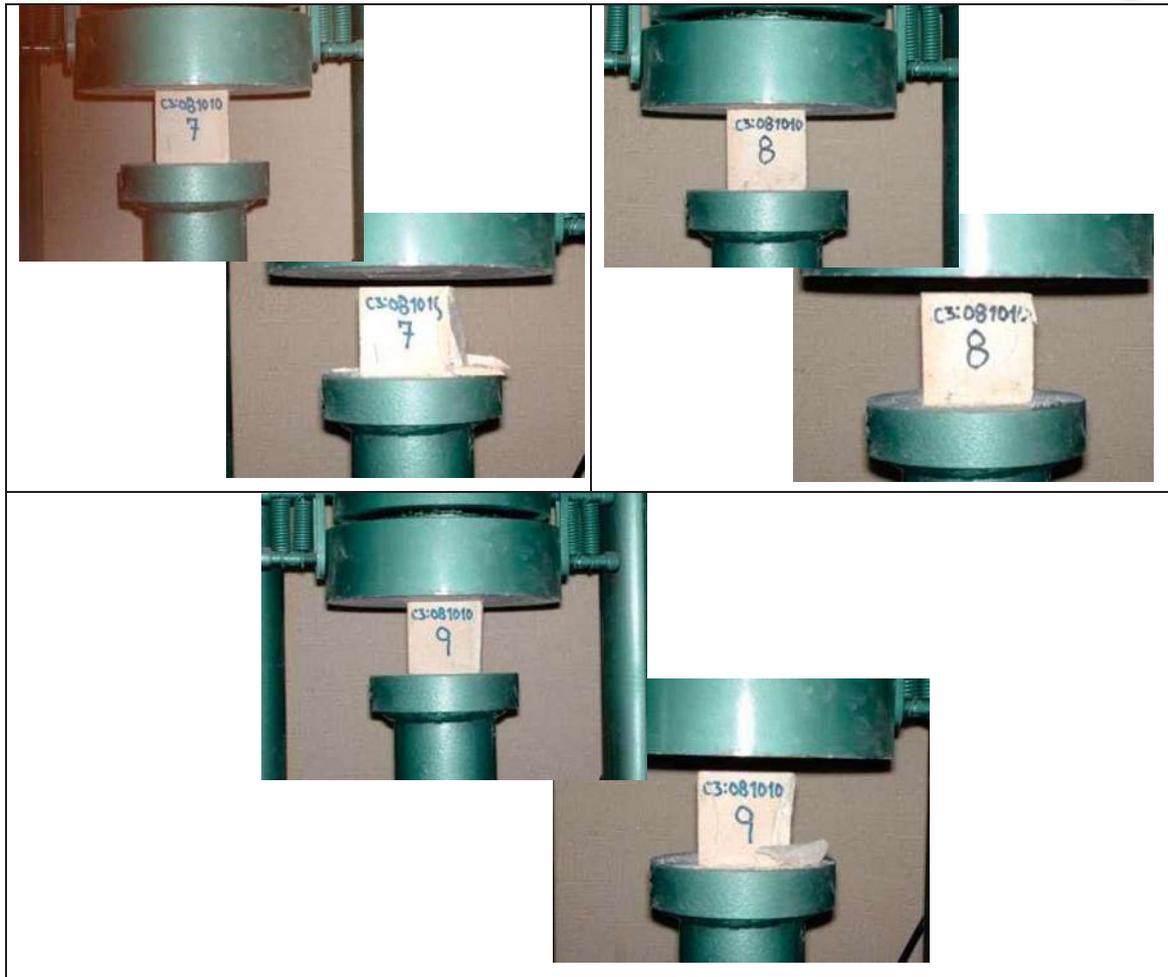


Figura 4.9. Falla por Compresión

**IV.3.4. Elaboración de especímenes (C4:141010):
Cal química, óxido de Aluminio e hiperfluidificante como aditivo:
Se elaboraron 9 cubos con la finalidad de verificar su resistencia
a la compresión simple.**

- Fecha de Elaboración: 14- Noviembre- 2010.
- Composición.
 1. 100% Cal Química.
 2. 2.5% Óxido de Aluminio.
 3. Marmolina Tipo 1. Relación 1:2.75
 4. Relación Agua-Cemento 0.65
 5. Hiperfluidificante Plastol 4000.
- Resultados. Los resultados obtenidos para la prueba de Compresión Simple fueron los siguientes:
Fecha de Realización de la Prueba: 11- Noviembre- 2010



No.	L-A (cm)	L-B (cm)	Área (cm ²)
1	5.18	5.16	26.73
2	5.09	5.11	26.01
3	5.12	5.05	25.86
4	5.06	5.01	25.35
5	5.14	5.00	25.70
6	5.00	5.06	25.30
7	5.00	5.15	25.75
8	5.07	5.15	26.11
9	5.10	5.00	25.50

Tabla 4.8. Propiedades Geométricas de las muestras:
Composición 4

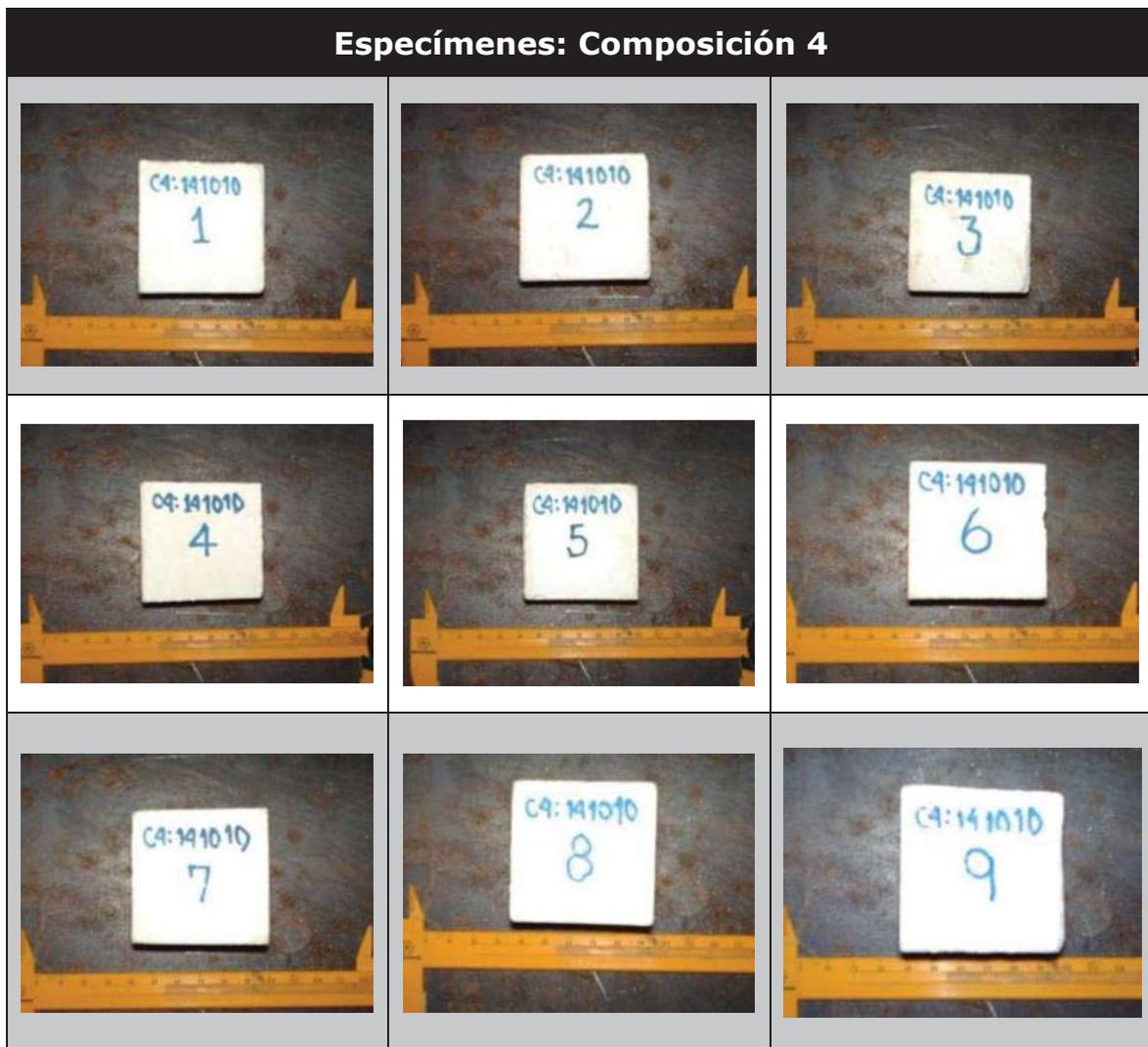


Figura 4.10. Geometría: Composición 4



Muestra	Carga (Kg.)	Esfuerzo (Kg./cm ²)	Esfuerzo (MPa)
1	1090	40.780	3.999
2	1220	46.905	4.599
3	1110	42.930	4.210
4	1030	40.630	3.984
5	950	36.965	3.625
6	980	38.735	3.799
7	900	34.951	3.428
8	1040	39.831	3.906
9	900	35.294	3.461
Promedio=			3.890 MPa

Tabla 4.9. Compresión Simple en Morteros de Cal:
Cal Química + Hiperfluidificante

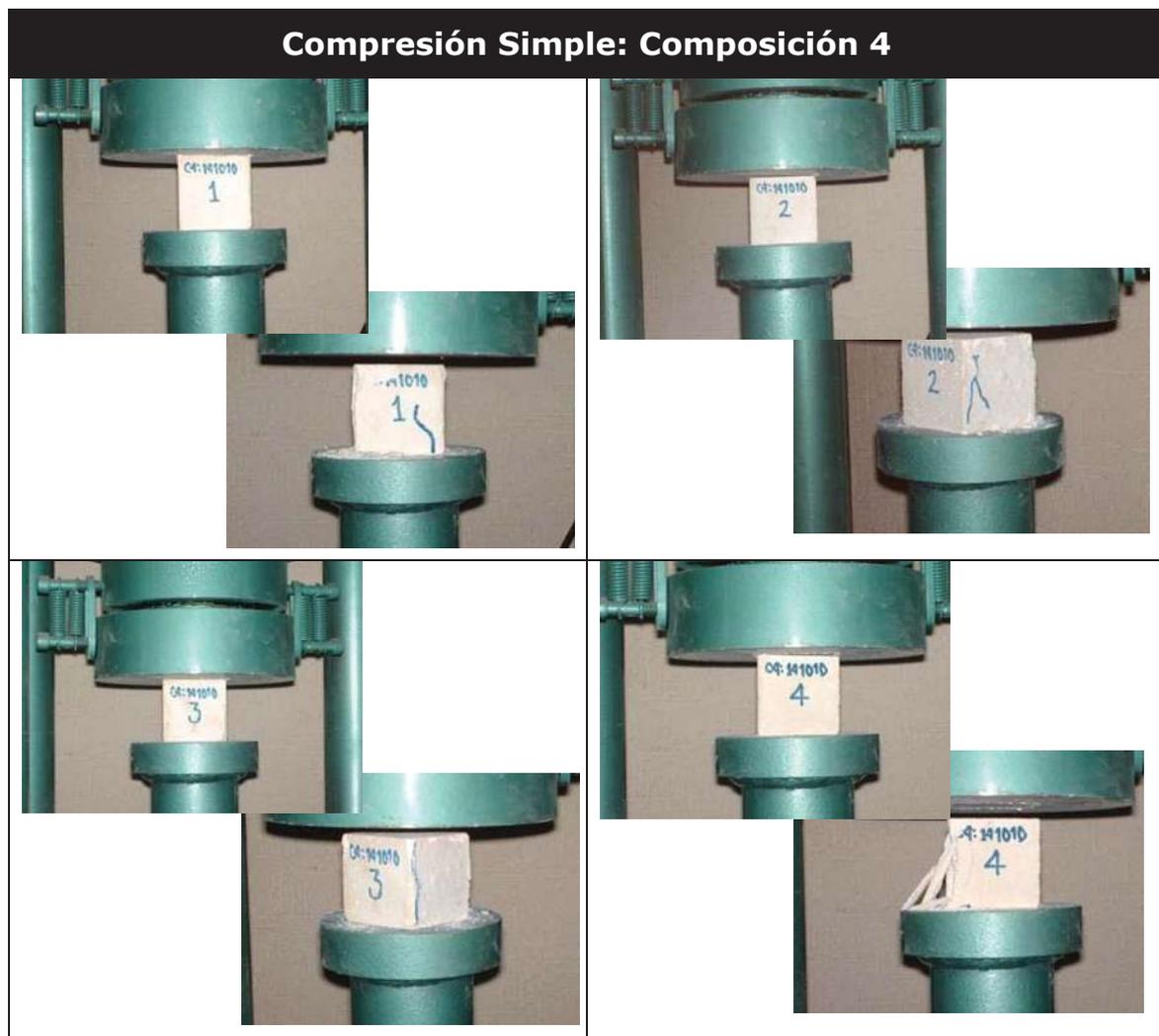




Figura 4.11. Falla por Compresión

IV.3.4. Elaboración de especímenes (C4:141010):



I IV.3.5. Elaboración de especímenes (C5:151010).

Cal estándar, óxido de Aluminio e hiperfluidificante como aditivo: Se elaboraron 9 cubos con la finalidad de verificar su resistencia a la compresión simple.

- Fecha de Elaboración: 15- Noviembre- 2010.
- Composición.
 1. 100% Cal Estándar.
 2. 2.5% Óxido de Aluminio.
 3. Marmolina Tipo 1. Relación 1:2.75
 4. Relación Agua-Cemento 0.65
 5. Hiperfluidificante Plastol 4000.
- Resultados. Los resultados obtenidos para la prueba de Compresión Simple fueron los siguientes:
Fecha de Realización de la Prueba: 12- Noviembre- 2010

No.	L-A (cm)	L-B (cm)	Área (cm ²)
1	5.03	5.20	26.16
2	5.20	5.10	26.52
3	5.11	5.00	25.55
4	5.05	5.03	25.40
5	5.15	5.15	26.52
6	5.13	5.00	25.65
7	5.12	5.03	25.75
8	5.14	5.10	26.21
9	5.15	5.00	25.75

Tabla 4.10. Propiedades Geométricas de las muestras:
Composición 5





Figura 4.12. Geometría: Composición 5

Muestra	Carga (Kg.)	Esfuerzo (Kg./cm ²)	Esfuerzo (MPa)
1	900	34.409	3.374
2	850	32.051	3.143
3	960	37.573	3.685
4	880	34.643	3.397
5	800	30.163	2.958
6	800	31.189	3.059
7	730	28.346	2.780
8	750	28.611	2.806
9	850	33.010	3.237
Promedio=			3.160 MPa

Tabla 4.11. Compresión Simple en Morteros de Cal:
Cal Estándar + Hiperfluidificante

A continuación se presentan varias fotografías en las que se pueden observar todos los especímenes mientras se encontraban en la máquina de pruebas, además podemos observar como fallaron los cubos y su apariencia después de ser sometidos a la aplicación de carga constante.



Compresión Simple: Composición 4

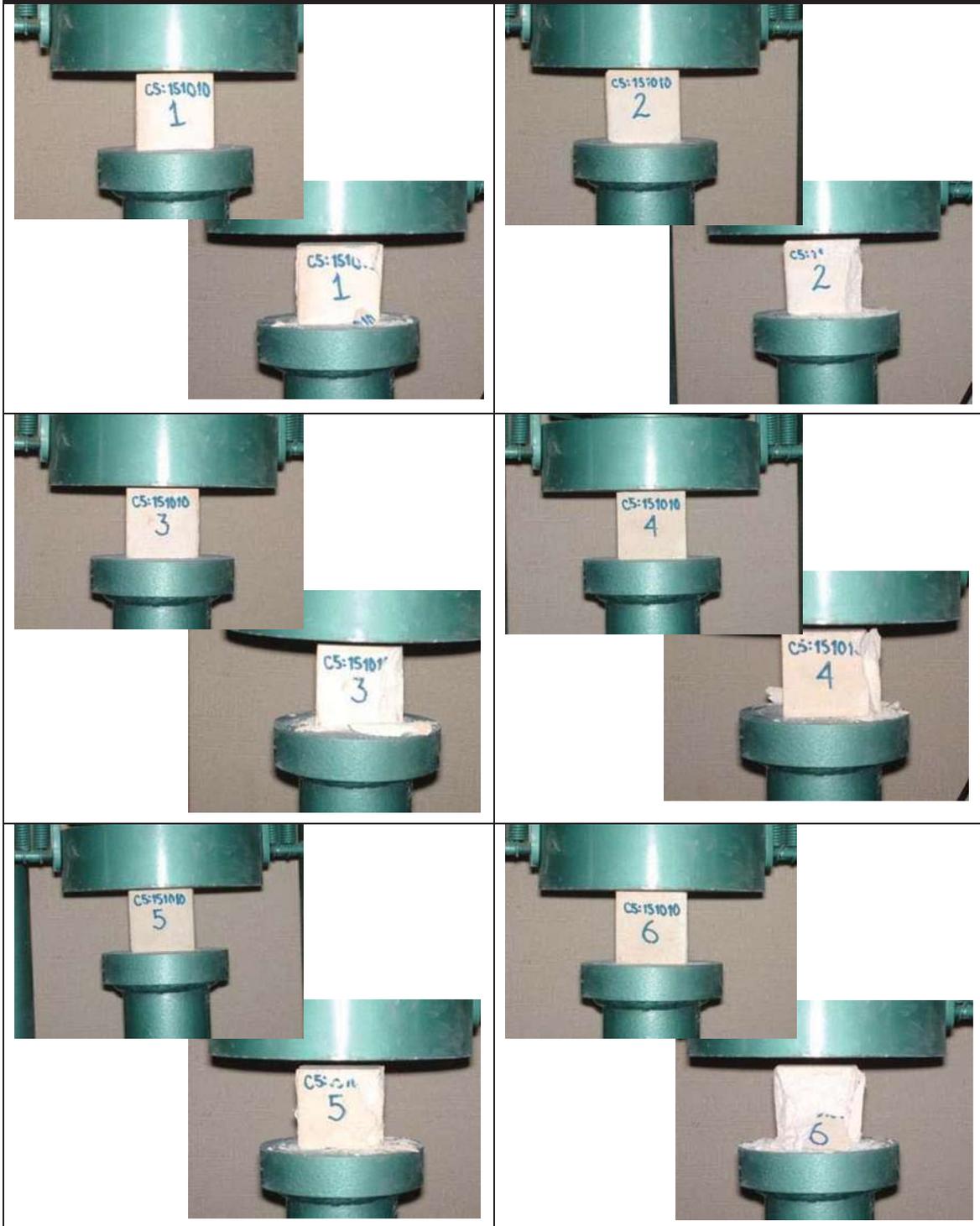




Figura 4.13. Falla por Compresión

Nota.- Los resultados de todas las pruebas que se realizaron y que fueron mostrados en este capítulo, serán sometidos a un riguroso análisis, el cual se desarrollará en el Capítulo VII del presente trabajo.



Capítulo V.
Evaluación a compresión de pilas de
mampostería de cal





CAPÍTULO V.

EVALUACIÓN A COMPRESIÓN DE PILAS DE MAMPOSTERÍAS DE CAL

En este capítulo se analizarán diversas composiciones de morteros de cal utilizados en mamposterías. El principal objetivo será establecer cual de las composiciones presenta mayores beneficios cuando son utilizadas en mamposterías.

Anteriormente la cal era el producto más utilizado en viviendas que basaban su construcción en mamposterías, sin embargo, en la actualidad su uso se ha visto limitado por la presencia de nuevos productos el mercado. Por ello, en esta investigación se ha tratado de crear un producto que ofrezca mejores condiciones de uso y calidad a los usuarios y, sobre todo, a un precio mucho más accesible que otros productos que se encuentren al alcance del constructor.

V.1. Compresión Simple en Mamposterías.

La prueba de Compresión Simple en Mamposterías consiste en elaborar "pilas" unidas con los morteros deseados y analizadas con ayuda de una máquina de pruebas que aplique una carga constante y a una velocidad controlada.

En el reglamento de construcciones para el Distrito Federal, en su Sección de Mamposterías se establecen ciertas condiciones que son indispensables para cumplir las condiciones óptimas para este tipo de pruebas. Algunas de las consideraciones que se deben hacer son:

- 1.** Los especímenes realizados deben cumplir con la condición de que, sin importar las dimensiones de los ladrillos utilizados para su elaboración, estarán formados por lo menos con tres piezas sobrepuestas. En nuestro caso se elaboraron pilas con 4 piezas sobrepuestas, de manera que cumplimos con lo establecido.
- 2.** Para poder llevar a cabo la prueba es necesario que la pila sea colocada en la máquina sobre una cama de arena; además de la cama inferior también debe colocarse una capa superior. Estas capas de arena ayudarán a que la carga sea distribuida uniformemente sobre toda la superficie de aplicación de la carga.
- 3.** Además de la capa superior de arena se debe colocar una placa metálica que nos permite definir un espesor adecuado de la capa



de arena, y también nos permite nivelar la muestra para que no se presenten variaciones al momento de aplicación de la carga.

4. Para que la prueba presente resultados lo más apegados a las condiciones reales que encontramos en obra, las pilas se ensayarán a la edad de 28 días.
5. La relación altura a espesor de la pila estará comprendida, en cualquier caso entre dos y cinco. De acuerdo con los materiales utilizados, en los que incluimos ladrillos de barro cocido, de 6*12*24 centímetros, y los especímenes construidos, tenemos que, la relación altura-espesor es de 2.5, por lo tanto, cumple con lo establecido en las Normas.

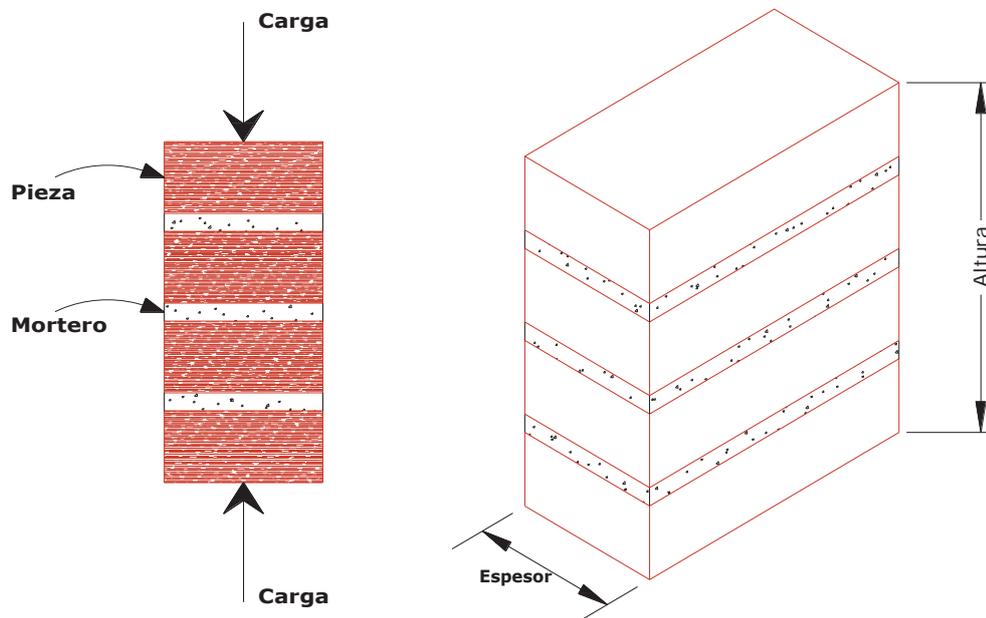


Figura 5.1. Consideraciones para la Prueba de Compresión Simple en Mamposterías

6. La determinación del esfuerzo a compresión se hará en un mínimo de 9 pilas en total, además, el esfuerzo medio obtenido, calculado sobre el área bruta, se corregirá multiplicándolo por los factores de la siguiente tabla:



Relación altura a espesor de la pila ¹	2	3	4	5
Factor correctivo	0.75	0.90	1.00	1.05

¹ Para relaciones altura a espesor intermedias se interpolará linealmente.

Tabla 5.1. Factores correctivos para las resistencias de pilas con diferentes relaciones altura-espesor

Todas las consideraciones mencionadas anteriormente se establecen en diversas normas y reglamentos de México, entre las cuales tenemos:

- Normas Técnicas Complementarias del Distrito Federal. Sección de Mamposterías.
- Norma Mexicana NMX-C-061-ONNCCE.

V.2. Elaboración de los Especímenes.

En este apartado se describe el proceso que se siguió para la elaboración de los especímenes que se sometieron a la prueba de Compresión Simple en Mamposterías:

1. En primer lugar se deben pesar los materiales. Durante el proceso realizado en esta investigación pudimos contar con una balanza electrónica para el pesado de los materiales, la cual tiene una aproximación al décimo de gramo. El uso de este tipo de balanzas nos permite que la cantidad de material que se utiliza para hacer la mezcla sea la adecuada de acuerdo a los porcentajes establecidos.
2. En una charola de albañil se mezclan los materiales hasta obtener una mezcla homogénea y con las condiciones de trabajabilidad que nos permitan manejarla adecuadamente.



Figura 5.2. Elaboración de la Mezcla para Mamposterías

3. Una vez obtenida la mezcla deseada, ésta se coloca en los ladrillos para construir las pilas que han de ser probadas. En este trabajo se fabricaron pilas de cuatro ladrillos de altura.



Figura 5.3. Construcción de Pilas



4. Durante la elaboración de las pilas es muy importante que se tenga cuidado en la nivelación de las mismas, ya que si no se hace correctamente estaremos afectando la aplicación de la carga durante la prueba.



Figura 5.4. Nivelación de Pilas

5. Una vez terminado cada espécimen, se dejaron reposar para posteriormente ser probados a 28 días. Es muy importante que procuremos que los especímenes no se sometan a movimientos bruscos y que no se coloque ningún tipo de objeto sobre ellos, esto con la finalidad de evitar que sufran daños que capaces de afectar su resistencia.

V.3. Composiciones Seleccionadas y Resultados de la Prueba.

Para poder realizar una prueba que nos brinde resultados aceptables y, sobre todo, confiables, es muy importante que se tenga mucho cuidado cuando se seleccionan las composiciones que han de ser analizadas.

En primer lugar debemos tener una composición que nos sirva como referencia para poder llevar a cabo una comparación adecuada en lo que se refiere al comportamiento que tengan los diferentes especímenes con respecto a las condiciones estándar.

En nuestro caso se eligieron cuatro composiciones que nos permitieron tener diferentes tipos de características, y que tuvieron diferentes comportamientos cuando se les aplicó carga constante.



V.3.1. Composición 1.

Se elaboraron 9 pilas para ser sometidas a la prueba de Compresión Simple en Mamposterías. Las condiciones de elaboración de los especímenes fueron las siguientes:

- Fecha de Elaboración: 08 y 09- Septiembre- 2010.
- Composición.
 1. 100% Cal Estándar.
 2. Marmolina Tipo 1. Relación 1:2.75
 3. Relación Agua-Cemento 0.85

Muestra	H (cm)	B (cm)	b (cm)	Espesor Junta (cm)
1	31.0	25.0	12.0	2.0
2	30.0	24.5	12.0	2.0
3	29.5	25.0	12.0	2.0
4	30.0	24.5	12.0	2.0
5	29.0	24.5	12.0	2.0
6	30.0	24.5	12.0	2.0
7	30.0	25.0	12.0	2.0
8	30.0	25.0	12.0	2.0
9	29.5	24.5	12.0	2.0

Tabla 5.2. Características Geométricas: Composición 1



Figura 5.5. Mamposterías: Cal Estándar



- Resultados. Los resultados obtenidos para la prueba de Compresión Simple en Mamposterías fueron los siguientes:
Fecha de Realización de la Prueba: 06 y 07- Octubre- 2010

Muestra	Carga (Kg.)	Esfuerzo (Kg./cm ²)	Esfuerzo (MPa)
1	1610	4.328	0.424
2	2040	5.667	0.556
3	2580	7.288	0.715
4	2490	6.917	0.678
5	2650	7.614	0.747
6	2450	6.806	0.667
7	2170	6.028	0.591
8	2870	7.972	0.782
9	2840	8.023	0.787
Promedio=			0.661 MPa

Tabla 5.3. Resultados: Composición 1



Figura 5.6. Ensayo de Pilas: Composición 1

V.3.2. Composición 2.

Se elaboraron 9 pilas para ser sometidas a la prueba de Compresión Simple en Mamposterías. Las condiciones de elaboración de los especímenes fueron las siguientes:

- Fecha de Elaboración: 13 y 14- Septiembre- 2010.



- Composición.
 1. 100% Cal Estándar.
 2. Marmolina Tipo 1. Relación 1:2.75
 3. Relación Agua-Cemento 0.65
 4. Hiperfluidificante Plastol 4000.

Muestra	H (cm)	B (cm)	b (cm)	Espesor Junta (cm)
1	27.0	25.0	12.0	1.5
2	28.5	25.0	12.0	1.8
3	29.0	25.0	12.0	1.8
4	28.5	25.0	12.0	1.8
5	29.0	24.5	12.0	1.8
6	29.0	24.5	12.0	1.8
7	27.5	25.0	12.0	1.5
8	29.0	24.5	12.0	1.8
9	29.0	25.0	12.0	1.8

Tabla 5.4. Características Geométricas: Composición 2



Figura 5.7. Mamposterías: Cal+Plastol 4000

- Resultados. Los resultados obtenidos para la prueba de Compresión Simple en Mamposterías fueron los siguientes:
Fecha de Realización de la Prueba: 11 y 12- Octubre- 2010



Muestra	Carga (Kg.)	Esfuerzo (Kg./cm ²)	Esfuerzo (MPa)
1	5890	18.179	1.783
2	4180	12.222	1.199
3	4640	13.333	1.308
4	3610	10.556	1.035
5	3330	9.569	0.938
6	3400	9.770	0.958
7	6520	19.758	1.938
8	4430	12.730	1.248
9	4620	13.276	1.302
Promedio=			1.301 MPa

Tabla 5.5. Resultados: Composición 2

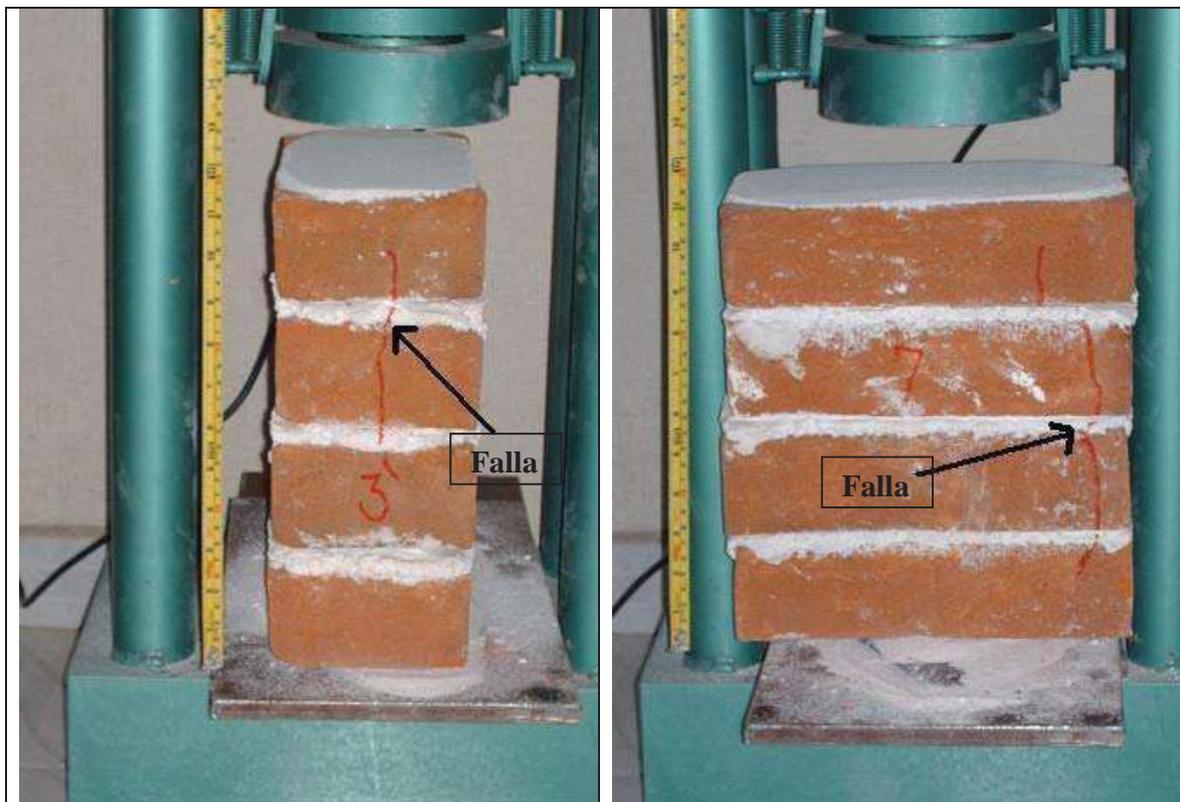


Figura 5.8. Ensayo de Pilas: Composición 2

V.3.3. Composición 3.

Se elaboraron 9 pilas para ser sometidas a la prueba de Compresión Simple en Mamposterías. Las condiciones de elaboración de los especímenes fueron las siguientes:



- Fecha de Elaboración: 23 y 27- Septiembre- 2010.
- Composición.
 1. 100% Cal Estándar.
 2. 2.5% Óxido de Aluminio.
 3. Marmolina Tipo 1. Relación 1:2.75
 4. Relación Agua-Cemento 0.65
 5. Hiperfluidificante Plastol 4000.

Muestra	H (cm)	B (cm)	b (cm)	Espesor Junta (cm)
1	29.0	24.5	12.0	2.0
2	29.0	25.0	12.0	2.0
3	29.5	24.5	12.0	2.0
4	28.0	24.5	12.0	2.0
5	29.0	24.5	12.0	2.0
6	29.0	25.0	12.0	2.0
7	29.0	24.5	12.0	2.0
8	28.0	25.0	12.0	2.0
9	29.0	24.5	12.0	2.0

Tabla 5.6. Características Geométricas: Composición 3



Figura 5.9. Mamposterías: Cal+Plastol 4000+Alúmina



- Resultados. Los resultados obtenidos para la prueba de Compresión Simple en Mamposterías fueron los siguientes:
Fecha de Realización de la Prueba: 21 y 25- Octubre- 2010

Muestra	Carga (Kg.)	Esfuerzo (Kg./cm ²)	Esfuerzo (MPa)
1	5460	15.690	1.539
2	5790	16.638	1.632
3	5550	15.678	1.537
4	4610	13.720	1.345
5	3540	10.172	0.998
6	5890	16.925	1.660
7	5160	14.828	1.454
8	5320	15.833	1.553
9	4780	13.736	1.347
Promedio=			1.452 MPa

Tabla 5.7. Resultados: Composición 3

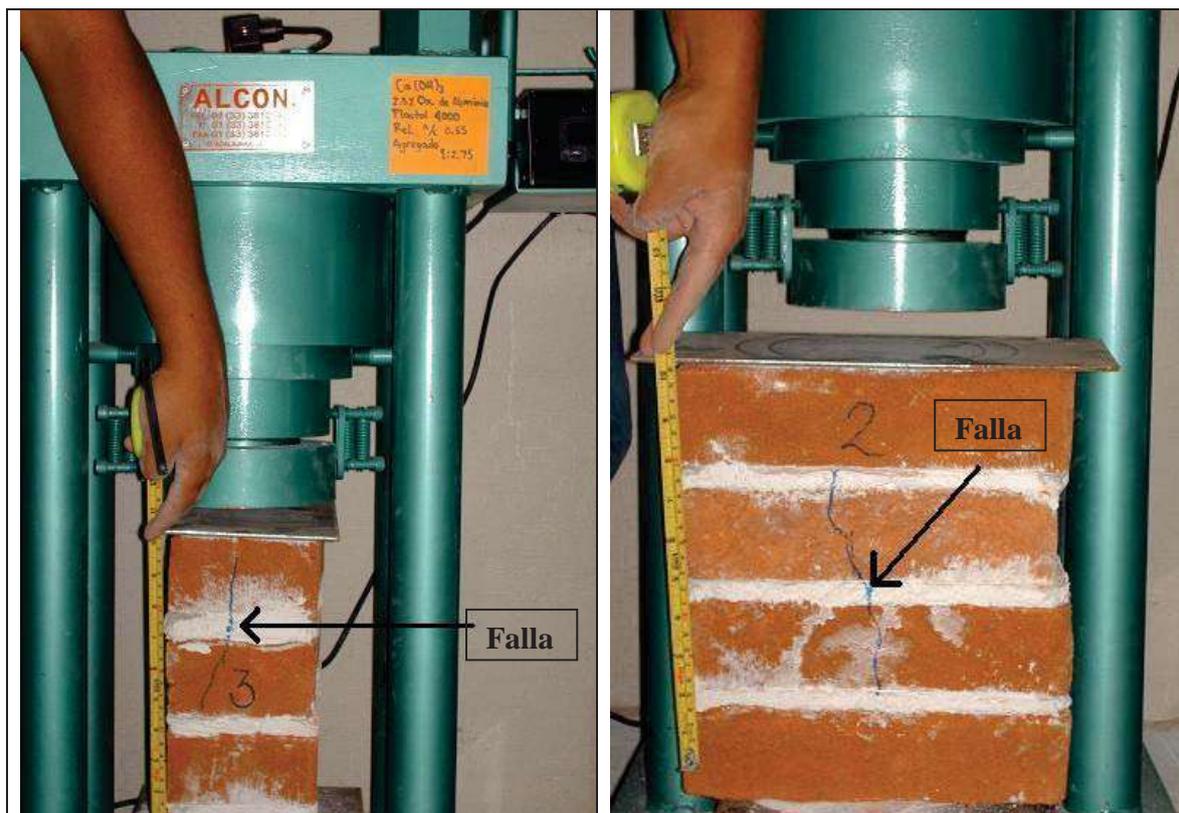


Figura 5.10. Ensayo de Pilas: Composición 3



V.3.4. Composición 4.

Se elaboraron 9 pilas para ser sometidas a la prueba de Compresión Simple en Mamposterías. Las condiciones de elaboración de los especímenes fueron las siguientes:

- Fecha de Elaboración: 05 y 06- Octubre- 2010.
- Composición.
 1. 100% Cal Estándar.
 2. 2% Aditivo DK12
 3. 2.5% Óxido de Aluminio.
 4. Marmolina Tipo 1. Relación 1:2.75
 5. Relación Agua-Cemento 0.85.

Muestra	H (cm)	B (cm)	b (cm)	Espesor Junta (cm)
1	30.0	24.5	12.0	2.0
2	30.0	25.0	12.5	2.0
3	30.5	25.0	12.5	2.0
4	30.0	25.0	12.0	2.0
5	29.5	24.5	12.0	2.0
6	30.5	24.5	12.0	2.0
7	30.0	24.5	12.0	2.0
8	30.0	25.0	12.5	2.0
9	29.5	25.0	12.5	2.0

Tabla 5.8. Características Geométricas: Composición 4



Figura 5.11. Mamposterías: Cal+Alúmina+DK12



- Resultados. Los resultados obtenidos para la prueba de Compresión Simple en Mamposterías fueron los siguientes:
Fecha de Realización de la Prueba: 02 y 03- Noviembre- 2010

Muestra	Carga (Kg.)	Esfuerzo (Kg./cm ²)	Esfuerzo (MPa)
1	4850	13.472	1.321
2	4810	12.827	1.258
3	4550	11.934	1.170
4	3850	10.694	1.049
5	3870	10.932	1.072
6	3510	9.590	0.940
7	4490	12.472	1.223
8	4350	11.600	1.138
9	3900	10.576	1.037
Promedio=			1.134 MPa

Tabla 5.9. Resultados: Composición 4

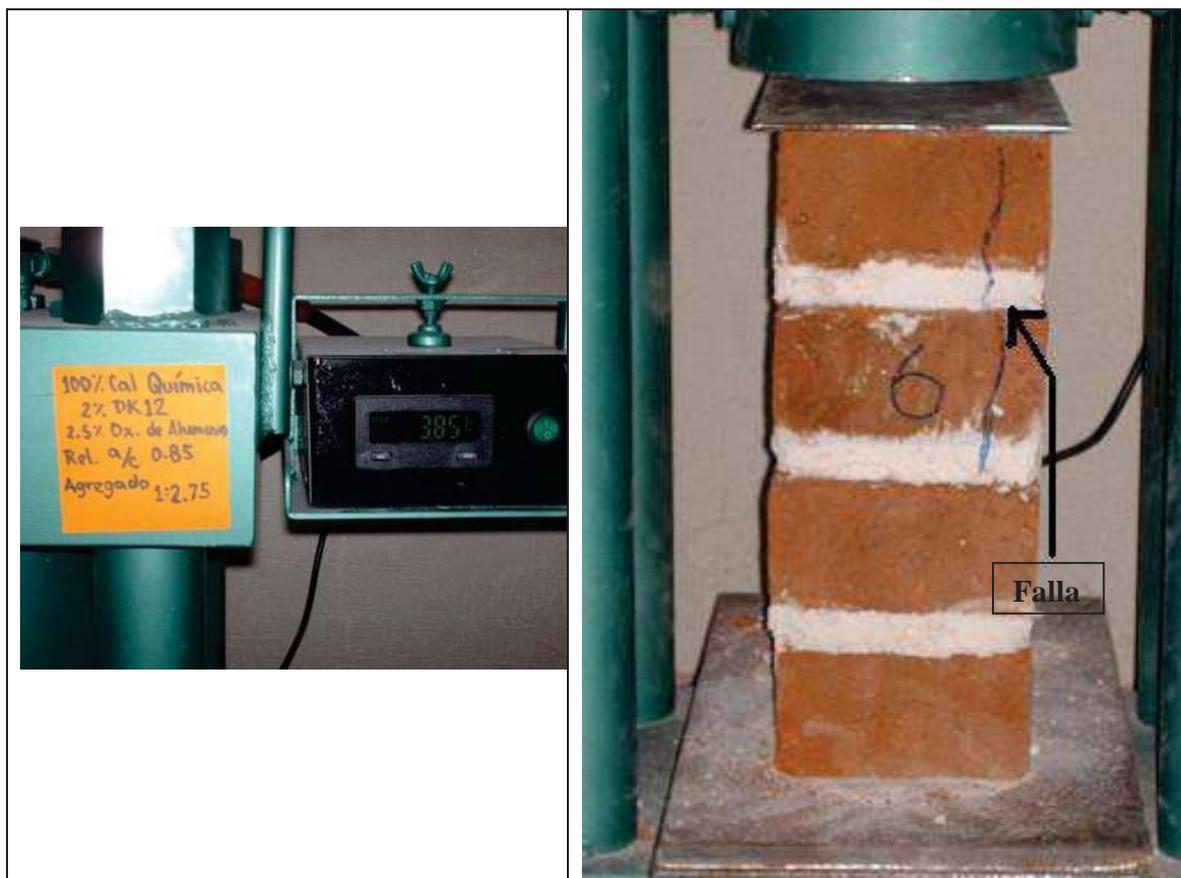


Figura 5.12. Ensayo de Pilas: Composición 4



Nota.- Los resultados obtenidos mediante el desarrollo del ensaye de Compresión Simple en Pilas serán analizados posteriormente en el Capítulo VII del presente trabajo.

V.4. Resistencia de Diseño.

De acuerdo con lo establecido en las Normas Técnicas Complementarias del Distrito Federal, en su sección de Mamposterías, la resistencia de diseño se determinará como sigue:

$$f_m^* = \frac{\overline{f_m}}{1 + 2.5c_m}$$

Donde:

- $\overline{f_m}$ = Media de la resistencia a compresión de las pilas, corregida por su relación altura a espesor y referida al área bruta. De acuerdo con las pilas que se elaboraron tenemos una relación de 2.5, por lo tanto, y tomando en cuenta los valores establecidos en la Tabla 5.1, debemos interpolar, y obtenemos un valor de **0.825**.
- c_m = Coeficiente de variación de la resistencia a compresión de las pilas de mampostería, que en ningún caso se tomará inferior a 0.15. Para este ejemplo se tomará el valor mínimo permitido (**0.15**).

Por lo tanto, la resistencia de diseño para cada una de las composiciones utilizadas será señalada en la siguiente tabla:

Composición	Media (MPa)	$\overline{f_m}$ (MPa)	c_m	Esfuerzo Diseño (Mpa)	Esfuerzo Diseño (Kg./cm²)
1	0.661	0.545	0.15	0.396	4.042
2	1.301	1.073	0.15	0.780	7.957
3	1.452	1.198	0.15	0.871	8.885
4	1.134	0.936	0.15	0.681	6.941

Tabla 5.10. Resistencia de Diseño

Nota.- Como podemos ver, la resistencia de diseño es muy baja, por lo que el uso de estos morteros en elementos estructurales queda a criterio del constructor, aunque no es muy recomendable.



Capítulo VI.

Evaluación de la adherencia ladrillo-mortero de cal modificado





CAPÍTULO VI.

EVALUACIÓN DE LA ADHERENCIA

LADRILLO-MORTERO DE CAL MODIFICADA

En este capítulo se describe el proceso que se siguió para poder establecer la capacidad de adherencia que se tiene con cada una de las composiciones que se utilizaron.

En construcciones que basan su resistencia en muros de mamposterías es muy importante que se tenga una buena adherencia del mortero y el ladrillo, es decir, se requiere que el esfuerzo cortante soportado por el mortero sea suficiente para soportar los esfuerzos a los que estará sometido durante su vida útil. Este aspecto tiene mucho más importancia en zonas donde la actividad sísmica es más alta.

Es por eso que, en este trabajo, además de simplemente analizar la capacidad de carga que podrían tener muros realizados con mamposterías de morteros de cal, también analizamos las condiciones de adherencia de los mismos, con la finalidad de ofrecer un producto que brinde total confianza al usuario.

VI.1. Análisis de la Adherencia en Mamposterías.

En nuestro país, basamos la construcción de las casas habitación en el uso de mamposterías. El cemento es el componente más utilizado en la actualidad, sin embargo, a lo largo del tiempo la cal ha demostrado que su valía en la construcción de muros, sobre todo por la plasticidad que ofrece, aumentando la adherencia entre el ladrillo y el mortero de Cal.

Además de que la Cal nos ofrece buenas propiedades de resistencia al esfuerzo cortante, debido a su buena adherencia, con el uso de aditivos se espera que dichas propiedades mejoren considerablemente, lo que nos permitirá obtener un producto de calidad y confiabilidad.

El proceso que se siguió para determinar el esfuerzo cortante en las mamposterías no es muy complicado y será descrito a continuación.

- 1.** En primer lugar se deben elaborar los especímenes que han de ser probados. De acuerdo con lo establecido en las normas, en este caso nos basamos en las Normas Técnicas Complementarias del Distrito Federal en la sección de Mamposterías, se deben elaborar



como mínimo nueve muestras de cada composición, por lo tanto, se tuvieron que elaborar un total de 36 especímenes.

2. Una vez elaborados los especímenes es importante que tomemos las medidas correspondientes para poder determinar el esfuerzo cortante resistente. Para las muestras que se elaboraron en esta investigación se tomaron como medidas primordiales:
 1. Espesor de la junta.
 2. Longitud de la junta.
3. Las muestras serán analizadas en una máquina de pruebas con aplicación de carga constante y velocidad controlada. Con ello podremos determinar la resistencia al esfuerzo cortante que tiene cada una de las composiciones que se utilizaron.

VI.2. Elaboración de los Especímenes.

El proceso de elaboración de los especímenes para la elaboración de la prueba de adherencia en nuestras mezclas se describe a continuación:

1. En primer lugar se hicieron algunas pruebas preeliminares para poder establecer la composición que mejores resultados podrían ofrecer. Lo más importante es obtener una mezcla plástica, de fácil manejo y que sea adecuada para ser colocada sobre los ladrillos. En primer lugar se hicieron variaciones en la relación agua cemento, así como de agregado.



Figura 6.1. Mezclas Preeliminares



2. Una vez establecida la composición que mejores características ofrece se procede a pesar los materiales, preferiblemente en una balanza electrónica que nos permita tener una buena aproximación, que nos permita tener la cantidad exacta de cada uno de los componentes requeridos.



Figura 6.2. Componentes de la Mezcla

3. Una vez que tenemos los materiales se colocan en una charola de albañil y se mezclan hasta obtener la mezcla con la consistencia deseada; por ello es muy importante que se tenga cuidado durante el pesaje de los materiales, si no se pesan correctamente no obtendremos las características que se observaron en las pruebas preliminares y, por lo tanto, es posible que no obtengamos los resultados deseados.



Figura 6.3. Elaboración de la mezcla para Especímenes

4. Cuando se tiene la mezcla adecuada se procede a elaborar los especímenes para llevar a cabo el análisis de las diferentes composiciones y poder determinar cual de ellas presenta las mejores condiciones de uso.



Figura 6.4. Elaboración de los Especímenes:
Análisis de adherencia



Figura 6.5. Nivelación de Especímenes

VI.3. Composiciones Seleccionadas y Resultados de la Prueba.

En este apartado describiremos las composiciones que se eligieron para ser analizadas. Como ya se mencionó anteriormente, en primer lugar es muy importante que se haga una mezcla que nos permita establecer las ventajas o desventajas que se tienen con el uso de aditivos, es decir, debemos elaborar una mezcla estándar que contenga solamente los componentes fundamentales (en este caso: Cal, agregado y agua).

Con la finalidad de establecer las ventajas que obtenemos con el uso de aditivos, en lo que se refiere al incremento de la resistencia del esfuerzo cortante, pusimos a prueba tres componentes, que fueron:

- Aditivo DK12.
- Hiperfluidificante Plastol 4000.
- Óxido de Aluminio.

Además de establecer las composiciones utilizadas, también mostraremos los resultados obtenidos en la prueba, los cuales serán analizados más profundamente en capítulos subsecuentes.



VI.3.1. Composición 1.

Se elaboraron 9 especímenes para ser sometidos a la prueba de Análisis de la Adherencia ó Resistencia al Esfuerzo Cortante. Las condiciones de elaboración fueron las siguientes:

- Fecha de Elaboración: 21- Septiembre- 2010.
- Composición.
 1. 100% Cal Estándar.
 2. Marmolina Tipo 1. Relación 1:2.75
 3. Relación Agua-Cemento 0.85

Muestra	Espesor ¹ (cm)	Espesor ² (cm)	Longitud Junta ¹ (cm)	Longitud Junta ² (cm)
1	2.0	2.0	20.5	20.5
2	2.0	2.0	20.5	20.5
3	2.0	2.0	20.0	20.0
4	2.0	2.0	20.5	20.5
5	2.0	2.0	20.5	20.5
6	2.0	2.0	20.0	20.0
7	2.0	2.0	20.0	20.0
8	2.0	1.8	20.5	20.5
9	2.0	2.0	20.5	20.5

Tabla 6.1. Características Geométricas: Composición 1



Figura 6.6. Ensaye de Especímenes: Composición 1



- Resultados: Los resultados obtenidos tras la realización de la prueba de Adherencia de Morteros de Cal utilizados en Mamposterías fueron:

Fecha de Realización de la Prueba: 19- Octubre- 2010

Muestra	Carga (Kg.)	Esfuerzo (Kg./cm ²)	Esfuerzo (MPa)
1	230	5.610	0.550
2	160	3.902	0.383
3	230	5.750	0.564
4	330	8.049	0.789
5	290	7.073	0.694
6	280	7.000	0.686
7	210	5.250	0.515
8	230	5.905	0.579
9	250	6.098	0.598
Promedio=			0.595 MPa

Tabla 6.2. Resultados: Composición 1

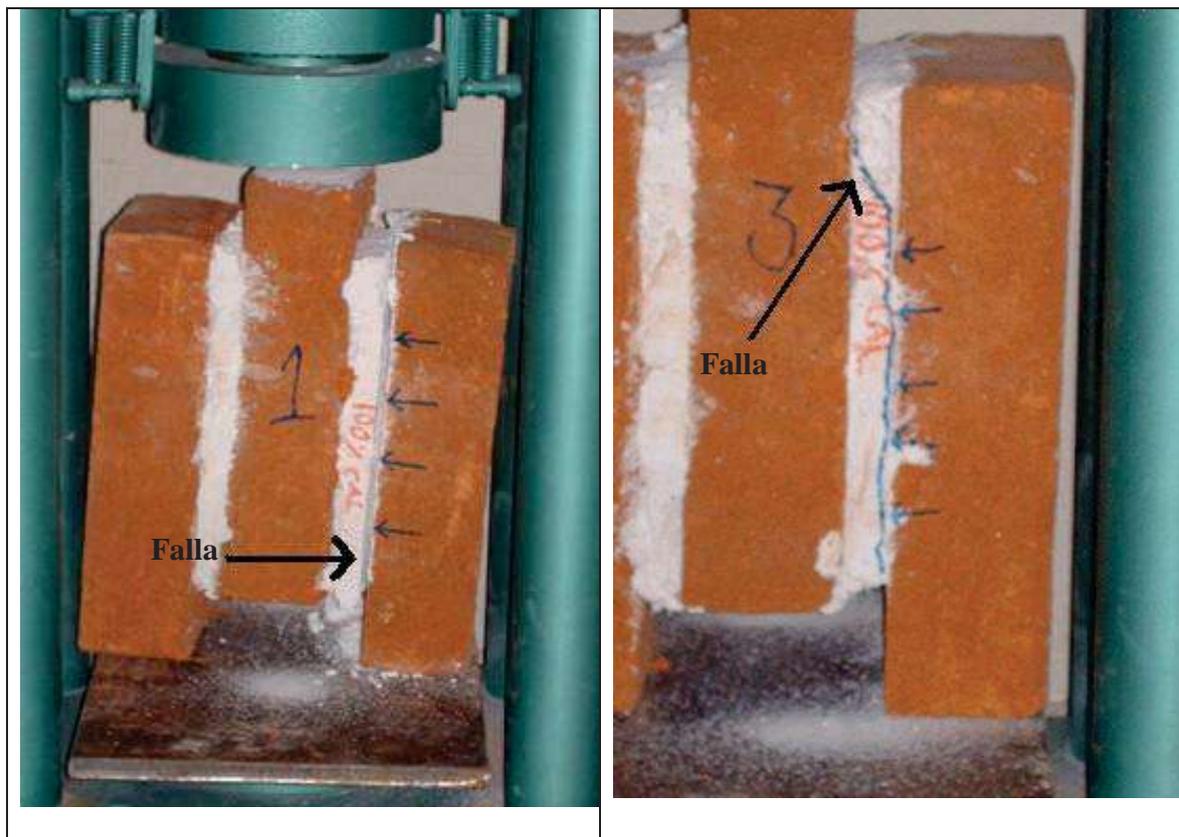


Figura 6.7. Falla de las Muestras: Composición 1



VI.3.2. Composición 2.

Se elaboraron 9 especímenes para ser sometidos a la prueba de Análisis de la Adherencia ó Resistencia al Esfuerzo Cortante. Las condiciones de elaboración fueron las siguientes:

- Fecha de Elaboración: 22- Septiembre- 2010.
- Composición.
 1. 100% Cal Estándar.
 2. Marmolina Tipo 1. Relación 1:2.75
 3. Relación Agua-Cemento 0.65
 4. Hiperfluidificante Plastol 4000.

Muestra	Espesor ¹ (cm)	Espesor ² (cm)	Longitud Junta ¹ (cm)	Longitud Junta ² (cm)
1	1.5	1.5	20.0	20.0
2	1.5	1.5	20.5	20.5
3	1.5	1.5	20.5	20.5
4	1.5	1.5	20.0	20.0
5	1.5	1.5	20.0	20.0
6	1.5	1.5	20.5	20.5
7	1.5	1.5	20.0	20.0
8	1.5	1.5	20.0	20.0
9	1.5	1.5	20.5	20.5

Tabla 6.3. Características Geométricas: Composición 2



Figura 6.8. Ensaye de Especímenes: Composición 2



- Resultados: Los resultados obtenidos tras la realización de la prueba de Adherencia de Morteros de Cal utilizados en Mamposterías fueron:

Fecha de Realización de la Prueba: 20- Octubre- 2010

Muestra	Carga (Kg.)	Esfuerzo (Kg./cm ²)	Esfuerzo (MPa)
1	420	14.000	1.373
2	450	14.634	1.435
3	330	10.732	1.052
4	420	14.000	1.373
5	670	22.333	2.190
6	490	15.935	1.563
7	470	15.667	1.536
8	430	14.333	1.406
9	450	14.634	1.435
Promedio=			1.485 MPa

Tabla 6.4. Resultados: Composición 2

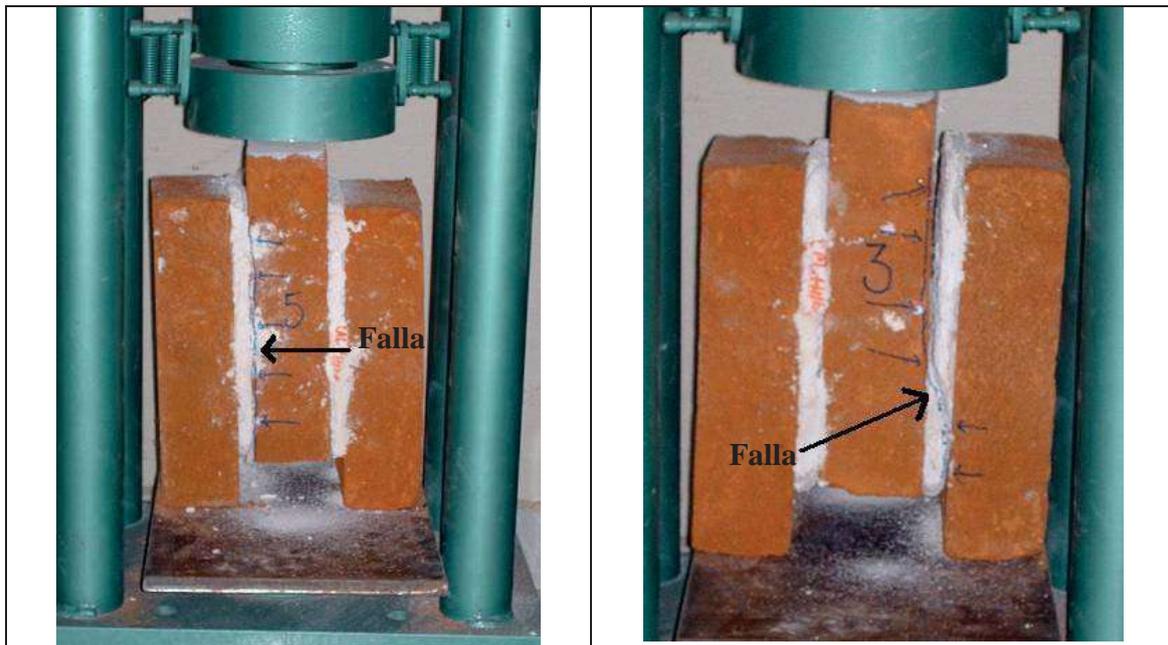


Figura 6.9. Falla de las Muestras: Composición 2

VI.3.3. Composición 3.

Se elaboraron 9 especímenes para ser sometidos a la prueba de Análisis de la Adherencia ó Resistencia al Esfuerzo Cortante. Las condiciones de elaboración fueron las siguientes:



- Fecha de Elaboración: 28- Septiembre- 2010.
- Composición.
 1. 100% Cal Estándar.
 2. 2.5% Óxido de Aluminio
 3. Marmolina Tipo 1. Relación 1:2.75
 4. Relación Agua-Cemento 0.65
 5. Hiperfluidificante Plastol 4000.

Muestra	Espesor ¹ (cm)	Espesor ² (cm)	Longitud Junta ¹ (cm)	Longitud Junta ² (cm)
1	1.5	1.5	20.5	20.5
2	2.0	1.8	20.0	20.0
3	2.0	2.0	20.0	20.0
4	2.0	1.8	20.5	20.5
5	2.0	1.5	20.5	20.5
6	2.0	2.0	20.0	20.0
7	2.0	2.0	20.0	20.0
8	1.8	1.8	20.5	20.5
9	2.0	1.8	20.0	20.0

Tabla 6.5. Características Geométricas: Composición 3



Figura 6.10. Ensayo de Especímenes: Composición 3



- Resultados: Los resultados obtenidos tras la realización de la prueba de Adherencia de Morteros de Cal utilizados en Mamposterías fueron:

Fecha de Realización de la Prueba: 26- Octubre- 2010

Muestra	Carga (Kg.)	Esfuerzo (Kg./cm ²)	Esfuerzo (MPa)
1	790	25.691	2.519
2	420	11.053	1.084
3	320	8.000	0.785
4	990	25.417	2.493
5	250	6.969	0.683
6	470	11.750	1.152
7	750	18.750	1.839
8	380	10.298	1.010
9	790	20.789	2.039
Promedio=			1.511 MPa

Tabla 6.6. Resultados: Composición 3

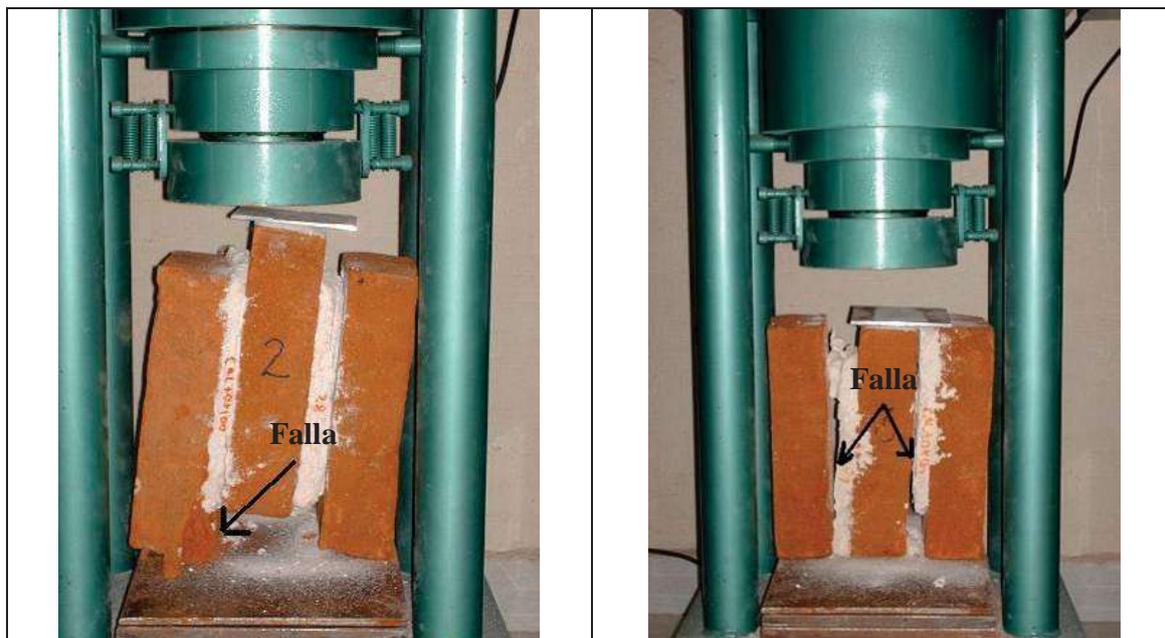


Figura 6.11. Falla de las Muestras: Composición 3

VI.3.4. Composición 4.

Se elaboraron 9 especímenes para ser sometidos a la prueba de Análisis de la Adherencia ó Resistencia al Esfuerzo Cortante. Las condiciones de elaboración fueron las siguientes:



- Fecha de Elaboración: 07- Octubre- 2010.
- Composición.
 1. 100% Cal Estándar.
 2. 2% Aditivo DK12.
 3. 2.5% Óxido de Aluminio.
 4. Marmolina Tipo 1. Relación 1:2.75
 5. Relación Agua-Cemento 0.65

Muestra	Espesor ¹ (cm)	Espesor ² (cm)	Longitud Junta ¹ (cm)	Longitud Junta ² (cm)
1	2.0	2.0	20.0	20.0
2	2.0	2.0	21.0	21.0
3	2.0	1.8	20.0	20.0
4	1.8	2.0	20.0	20.0
5	2.5	2.0	20.0	20.0
6	2.0	2.0	20.5	20.5
7	2.0	2.0	20.5	20.5
8	2.0	2.0	20.0	20.0
9	2.0	1.8	20.0	20.0

Tabla 6.7. Características Geométricas: Composición 4



Figura 6.12. Ensayo de Especímenes: Composición 4

- Resultados: Los resultados obtenidos tras la realización de la prueba de Adherencia de Morteros de Cal utilizados en Mamposterías fueron:
Fecha de Realización de la Prueba: 04- Noviembre- 2010



Muestra	Carga (Kg.)	Esfuerzo (Kg./cm ²)	Esfuerzo (MPa)
1	360	9.000	0.883
2	380	9.048	0.887
3	370	9.737	0.955
4	340	8.947	0.877
5	420	9.333	0.915
6	360	8.780	0.861
7	400	9.756	0.957
8	350	8.750	0.858
9	360	9.474	0.929
Promedio=			0.902 MPa

Tabla 6.8. Resultados: Composición 4

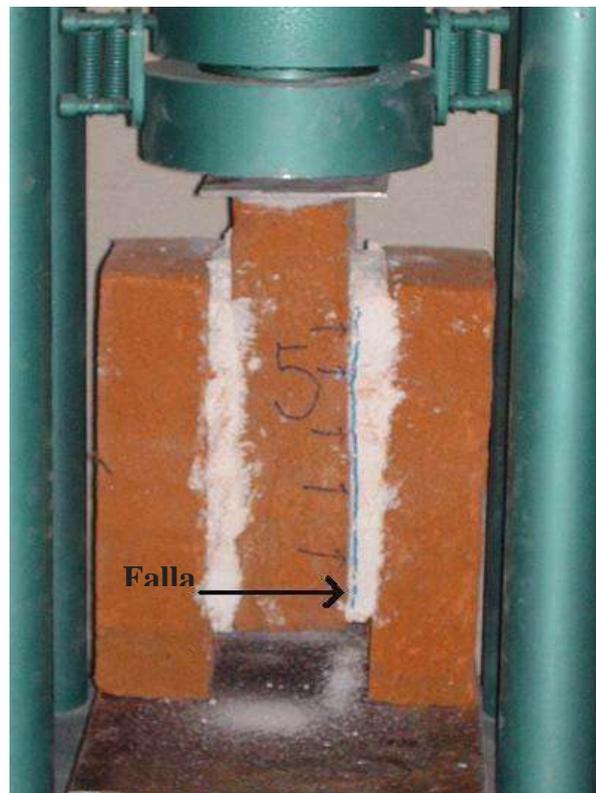


Figura 6.13. Falla de las Muestras:
Composición 4

Nota.- Los resultados de la prueba de adherencia en mamposterías, utilizando morteros de cal, serán analizados posteriormente durante el desarrollo de este trabajo de investigación.



Capítulo VII. Análisis De resultados





CAPÍTULO VII.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Una vez realizados los ensayos necesarios para conocer el comportamiento de los morteros utilizados, ya sean como unidad independiente o como componentes de otras unidades, es importante que se realice un análisis profundo de los datos obtenidos. Con ello podremos establecer las características de cada una de las mezclas utilizadas y podremos determinar si se mejoraron las características del producto.

En este apartado se presentarán gráficas representativas de los resultados de las pruebas, así como las observaciones más importantes de acuerdo al comportamiento observado en cada una de las composiciones que se utilizaron, desde el momento del mezclado hasta las pruebas correspondientes.

En general, las composiciones utilizadas presentarán mejores características de las proporcionadas por una cal convencional. Todo esto será explicado más a detalle durante el desarrollo de este capítulo.

VII.1. Gráficas de Resultados.

Una vez desarrollados los ensayos correspondientes se procedió a elaborar gráficas en donde se presentan los valores obtenidos de acuerdo a la prueba realizada.

En primer lugar se presenta una comparación entre los valores obtenidos para cada uno de los especímenes, posteriormente se comparan los promedios obtenidos para cada una de las composiciones, con ello podremos establecer cual de ellas es la que presenta un mejor comportamiento bajo las condiciones de carga que se aplicaron.

Es importante señalar que, estas gráficas toman gran importancia en el proceso de toma de decisiones, ya que nos permitirán determinar cual de nuestros productos es el que presenta una mayor factibilidad de uso, es decir, la que presenta mejores resultados.

VII.2. Ensayo: Compresión Simple en Morteros de Cal.

Antes de utilizar los morteros como parte de otro tipo de unidades (pilas, muretes, etc.), es importante que sean ensayados independientemente con la finalidad de establecer sus propiedades mecánicas, y así poder hacer un análisis acerca de los beneficios que puede presentarnos el uso de los mismos.



Durante nuestra investigación elaboramos muestras cúbicas para ser ensayadas, nueve especímenes de cada una de las composiciones elegidas, de acuerdo con lo establecido en las normas.

Además, se eligieron 5 composiciones, las cuales presentaron diferente comportamiento durante el ensaye. A continuación se presentan los resultados.

VII.2.1. Composición 1 (Cal Estándar).

Muestra	Esfuerzo (MPa)
1	0.576
2	0.989
3	0.806
4	0.956
5	0.642
6	1.058
7	0.838
8	0.618
9	0.946

Tabla 7.1. Compresión Simple en Morteros de Cal: Composición 1

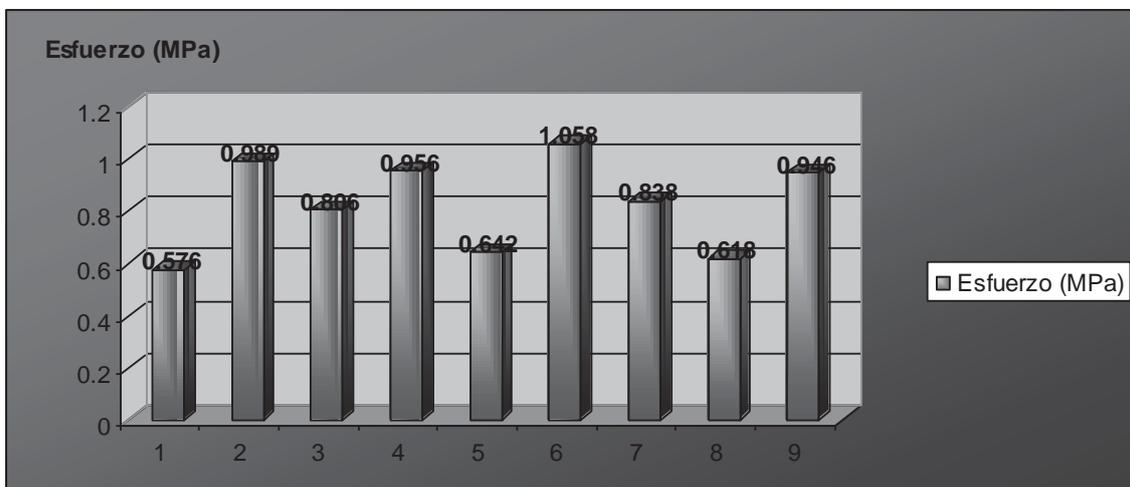


Figura 7.1. Esfuerzo de Compresión: Composición 1

Observaciones.

La composición 1 constituye la muestra estándar, es decir, aquella elaborada bajo las condiciones normales de construcción; se utiliza un mortero de cal convencional y su ensaye nos permitirá establecer los parámetros comparativos con las demás composiciones.



De acuerdo con la composición seleccionada, encontramos que, los porcentajes y relaciones de cada uno de los componentes de la mezcla fueron los adecuados, ya que nos proporcionaron una mezcla trabajable y con buenas condiciones para la colocación en los moldes.

Las Normas Técnicas Complementarias del Distrito Federal establecen que las muestras cúbicas estarán bajo las mismas condiciones de curado que las unidades de las cuales formarán parte (pilas, muretes, etc.). En nuestro caso, dichas unidades no fueron sometidas a ningún tipo de curado, por lo que, los cubos tampoco fueron sometidos a este proceso.

En general, los especímenes que fueron sometidos a la prueba presentaron una resistencia a la compresión muy baja, por lo que se determinan como muestras frágiles; durante el desarrollo del ensaye se pudo observar que las muestras fueron, casi por completo, destruidas. De acuerdo con lo establecido en la norma mexicana NMX-C-061-ONNCCE, en la que se presentan los parámetros de resistencia que deben tener los morteros que han de ser utilizados para unir piezas, esta composición no cumple con los requerimientos de resistencia a la compresión necesarios para su uso en obra.

VII.2.2. Composición 2 (Cal Química+Aditivo DK12+Alúmina).

Muestra	Esfuerzo (MPa)
1	4.066
2	2.930
3	2.959
4	3.330
5	3.015
6	3.713
7	3.373
8	3.200
9	3.079

Tabla 7.2. Compresión Simple en Morteros de Cal:
Composición 2

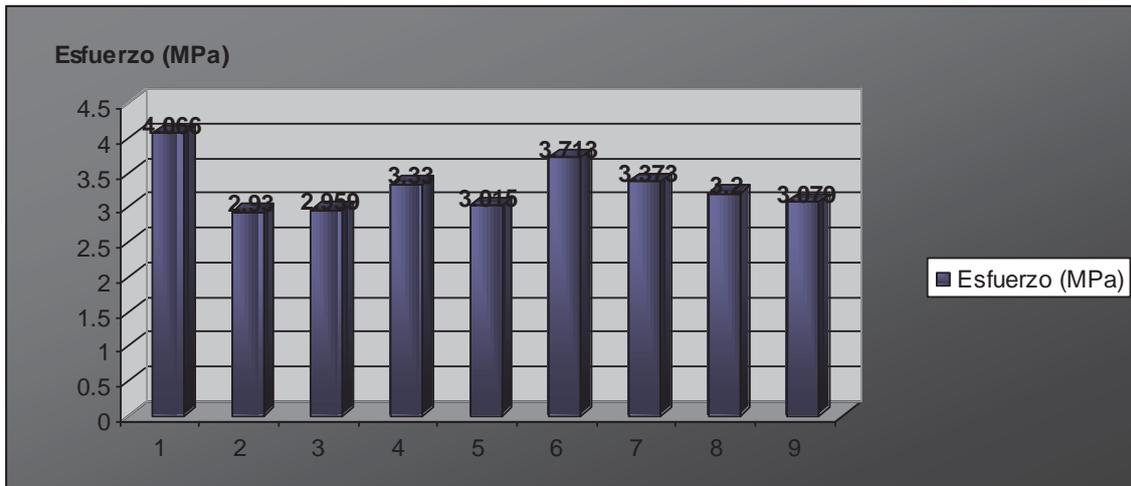


Figura 7.2. Esfuerzo de Compresión: Composición 2

Observaciones.

Las muestras no fueron sometidas al proceso de curado debido a que, las unidades de las cuales formaran parte, tampoco fueron curadas y se establece que deben presentarse las mismas condiciones para todos los especímenes de cualquier ensaye.

En esta composición se presenta el uso de aditivos, con lo que se espera que las características del mortero sean mejores que las presentadas por las muestras estándar. El aditivo utilizado fue: "ADITIVO DK12", el cual fue proporcionado por una empresa privada y apenas se está analizando su funcionamiento en este tipo de morteros. Además, fue utilizada una cal química, que presenta diferentes condiciones de pureza con respecto a una cal convencional.

La composición 2 presentó un mejor comportamiento, en comparación con lo observado en la composición 1. Se incrementó la resistencia a la compresión y, al ser sometidas a la aplicación de carga, sufrieron fuertes rupturas pero no fueron destruidas como las muestras de la composición anterior.

A pesar del incremento en la resistencia que presentaron los especímenes de esta composición, no se cumplen con las condiciones requeridas en las normas mexicanas, de acuerdo a las características esperadas en morteros utilizados en la construcción de mamposterías.



VII.2.3. Composición 3 (Cal Estándar+Aditivo DK12+Alúmina).

Muestra	Esfuerzo (MPa)
1	2.602
2	2.940
3	3.029
4	2.994
5	3.354
6	3.489
7	3.126
8	3.552
9	3.137

Tabla 7.3. Compresión Simple en Morteros de Cal:
Composición 3

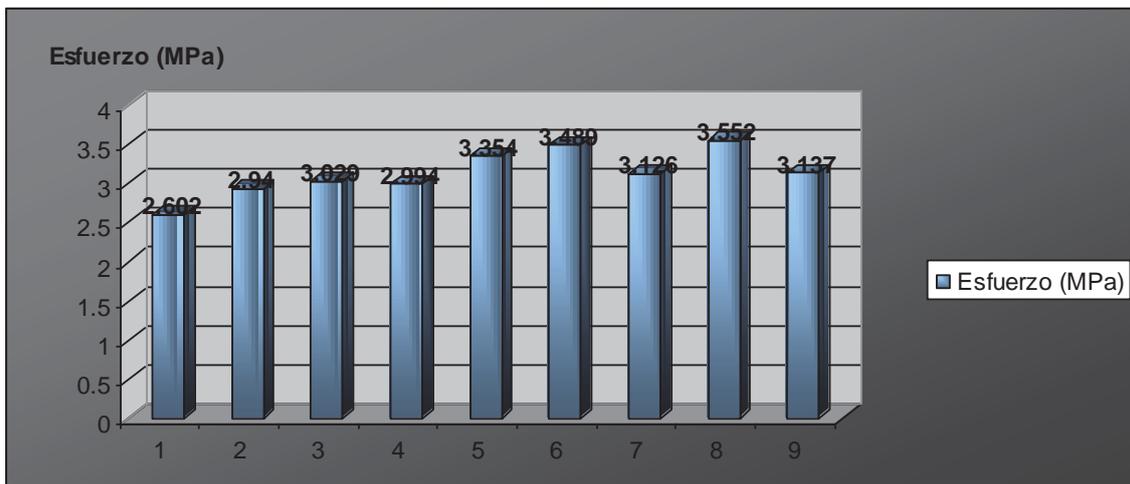


Figura 7.3. Esfuerzo de Compresión: Composición 3

Observaciones.

Se observa que la cal química si tiene un efecto positivo cuando se incluye en este tipo de morteros, además de que el uso del aditivo también mejora las características del mortero. En esta composición se utilizó cal convencional y aditivo DK12; podemos observar que los valores del esfuerzo de compresión mejoraron en comparación con la composición estándar, sin embargo, no fueron tan buenos como los obtenidos bajo las mismas condiciones de elaboración pero utilizando cal química.



Las condiciones de trabajabilidad de la mezcla, de acuerdo a los porcentajes incluidos de cada uno de los componentes, fueron buenas y nos permitió en fácil colado de los cubos.

VII.2.4. Composición 4 (Cal Química+Plastol 4000+Alúmina).

Muestra	Esfuerzo (MPa)
1	3.999
2	4.599
3	4.210
4	3.984
5	3.625
6	3.799
7	3.428
8	3.906
9	3.461

Tabla 7.4. Compresión Simple en Morteros de Cal:
Composición 4

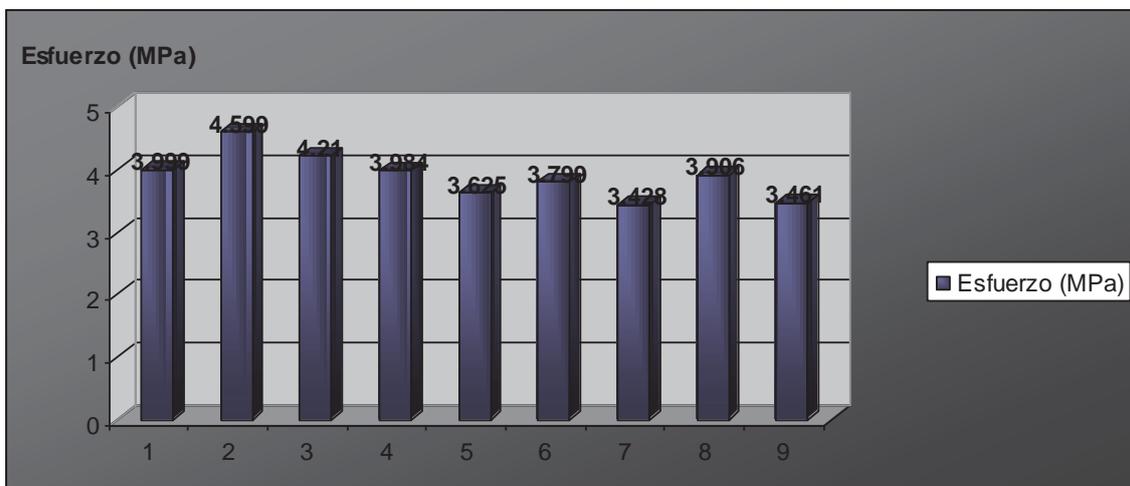


Figura 7.4. Esfuerzo de Compresión: Composición 4

Observaciones.

Las muestras elaboradas con al composición 4 presentan mejores condiciones de resistencia, incluso mejores que las proporcionadas con el uso del aditivo DK12; aún así es importante que se revisen los parámetros de calidad establecidos en las normas correspondientes, con ello podremos establecer las condiciones de uso del producto.



Como podemos observar, es estricto apego a las normas, las muestras elaboradas con esta composición no cumplen con las condiciones de resistencia requeridas.

Durante el proceso de elaboración del ensaye se pudo observar que las líneas de falla en los cubos eran apenas visibles, es decir, las muestras quedaron casi intactas.

VII.2.5. Composición 5 (Cal Estándar+Plastol 4000+Alúmina).

Muestra	Esfuerzo (MPa)
1	3.374
2	3.143
3	3.685
4	3.397
5	2.958
6	3.059
7	2.780
8	2.806
9	3.237

Tabla 7.5. Compresión Simple en Morteros de Cal:
Composición 5

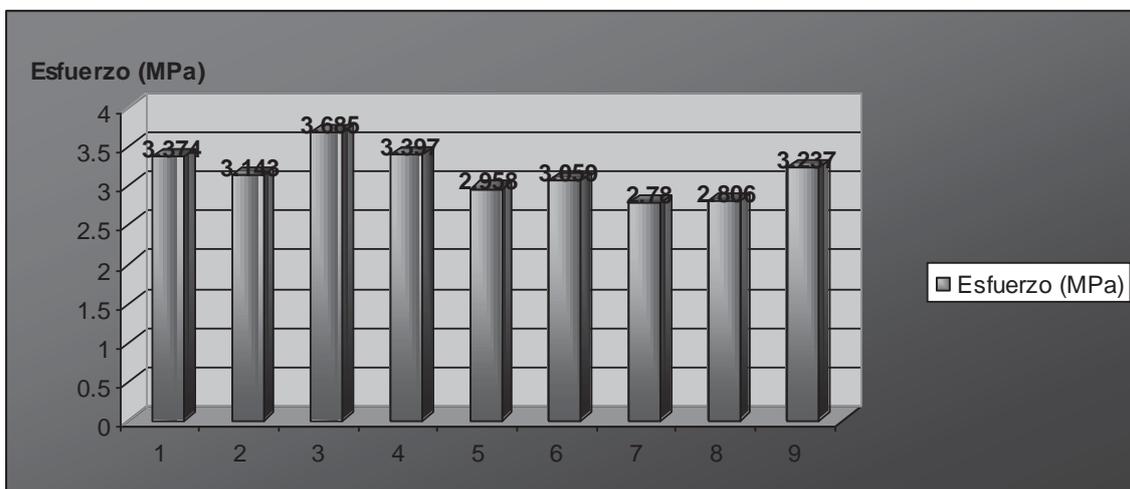


Figura 7.5. Esfuerzo de Compresión: Composición 5

Observaciones.

Una vez más comprobamos que las características que se presentan con la cal química son mejores que utilizando cal estándar. En



la composición 5 se utilizó cal estándar y los valores de resistencia al esfuerzo de compresión disminuyeron en comparación con la composición anterior; sin embargo, los resultados siguen siendo mejores que cuando se utiliza un mortero de cal sin aditivos.

Al igual que en la composición anterior, las líneas de falla fueron casi imperceptibles, los especímenes quedaron completos, excepto en un par de casos donde las esquinas se fracturaron.

VII.2.6. Comparación entre las diversas composiciones.

Composición	Esfuerzo (MPa)
1	0.825
2	3.296
3	3.136
4	3.890
5	3.160

Tabla 7.6. Compresión Simple en Morteros de Cal: Promedios por Composición

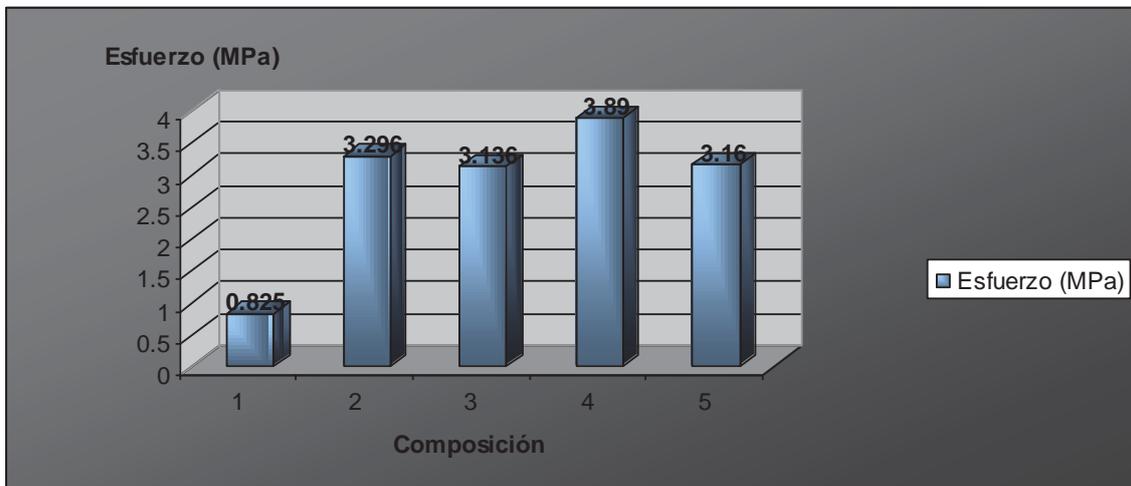


Figura 7.6. Esfuerzo de Compresión: Promedios por Composición

Observaciones.

Como podemos observar en la gráfica, la composición estándar tiene muy bajas características de resistencia al esfuerzo de compresión en comparación con las demás.



De acuerdo con lo señalado en las Normas Técnicas Complementarias del Distrito Federal en su sección de Mamposterías, los morteros que vayan a ser utilizados en elementos estructurales deben ser del Tipo I, II ó III. Esta clasificación se encuentra en función de la capacidad de resistencia a la compresión del mortero y tiene como valor mínimo 4 MPa. Por lo tanto, la composición que más se acerca a los valores recomendados es la Composición 4 (Cal Química+Plastol 4000). Esto no quiere decir que las otras composiciones no deban ser utilizadas, simplemente podemos utilizarlas en elementos que no tengan tanta importancia, es decir, elementos no estructurales.

Las composiciones en las cuales utilizamos aditivos tuvieron mejor comportamiento en comparación con la cal estándar. Esa mejoría se mostró en el incremento de la resistencia en los siguientes porcentajes:

Composición	Incremento de la resistencia (%)
C1: Cal Estándar	-----
C2: Cal Química+Aditivo DK12	400
C3: Cal Estándar+Aditivo DK12	380
C4: Cal Química+Plastol 4000	472
C5: Cal Estándar+Plastol 4000	383

Tabla 7.7. Incremento de la Resistencia al Esfuerzo de Compresión

La tabla anterior nos muestra la gran diferencia que se presenta cuando usamos morteros de cal con aditivos; con el uso de éstos tenemos un mortero con mejores características y un mejor comportamiento bajo las condiciones de aplicación de carga, incrementando la resistencia más de 4 veces en ciertas composiciones.

VII.3. Ensaye: Compresión Simple en Pilas elaboradas con Morteros de Cal.

Una vez realizado el ensaye de compresión simple en morteros podemos seleccionar las mezclas que mejores resultados nos hayan brindado, con el fin de analizar las propiedades que pueden presentar al ser usados como componentes en unidades de mampostería. Para el desarrollo de esta investigación se eligieron 4 composiciones para ser



sometidas a la prueba de Compresión Simple en Mamposterías, las cuales nos permitieron realizar una comparación adecuada entre el uso de una cal convencional, de cal química y además la inclusión de aditivos en las mezclas.

El ensaye fue realizado conforme a lo establecido en las normas correspondientes, de donde obtuvimos los resultados que se muestran en los siguientes apartados.

VII.3.1. Composición 1 (Cal Estándar).

Muestra	Esfuerzo (MPa)
1	0.424
2	0.556
3	0.715
4	0.678
5	0.747
6	0.667
7	0.591
8	0.782
9	0.787

Tabla 7.8. Compresión Simple en Mamposterías:
Composición 1



Figura 7.7. Esfuerzo de Compresión en Pilas:
Composición 1



Observaciones.

En todos los especímenes se observó un comportamiento semejante, la falla se produjo tanto en el ladrillo como en la junta, por lo que determinamos que la adherencia del mortero y el ladrillo es buena.

Los valores del esfuerzo a la compresión que se obtuvieron mediante el uso de la composición 1 fueron muy bajos, aunque era un resultado esperado debido a que, el mortero utilizado, solamente tenía cal convencional, que es un material relativamente frágil.

El primer espécimen nos presentó un valor muy bajo, creemos que esto ocurrió debido a que, por falta de experiencia en el uso de la máquina de pruebas, fue ensayado a una velocidad muy elevada por lo que la aplicación de la carga fue muy rápida y la pila falló antes de lo esperado.

VII.3.2. Composición 2 (Cal Estándar+Plastol 4000).

Muestra	Esfuerzo (MPa)
1	1.783
2	1.199
3	1.308
4	1.035
5	0.938
6	0.958
7	1.938
8	1.248
9	1.302

Tabla 7.9. Compresión Simple en Mamposterías:
Composición 2

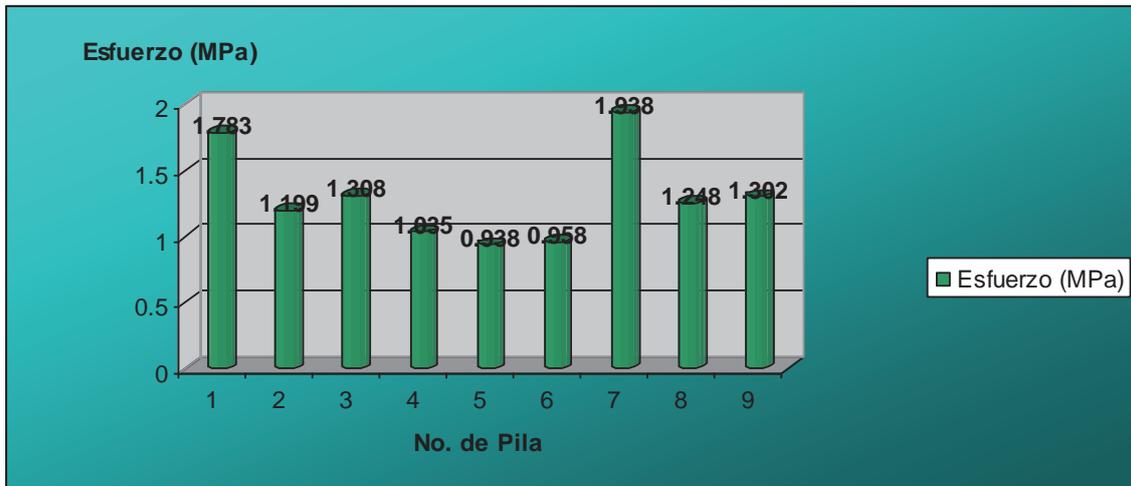


Figura 7.8. Esfuerzo de Compresión en Pilas:
Composición 2

Observaciones.

En general, todos los especímenes de la composición 2 tuvieron el mismo comportamiento, lo que dio como resultado valores de resistencia a la compresión semejantes; sin embargo, en la gráfica podemos observar que dos especímenes tuvieron una resistencia mayor. Si observamos la tabla de propiedades geométricas de las pilas, que se encuentra en el Capítulo V de este trabajo, encontramos que el espesor de la junta de dichas pilas fue menor que lo presentado en las demás pilas. Por lo tanto, podemos determinar que, el espesor de la junta en una unidad de mampostería, influirá directamente en la resistencia a la compresión de dichas unidades, esto debido a que las cargas deben pasar a través de una capa más delgada y se distribuyen de una mejor manera en toda el área de aplicación.

Los valores de resistencia a la compresión obtenidos para la composición 2 siguen siendo muy bajos de acuerdo a lo establecido en las normas.

VII.3.3. Composición 3 (Cal Estándar+Plastol 4000+Alúmina).

Muestra	Esfuerzo (MPa)
1	1.539
2	1.632
3	1.537
4	1.345



5	0.998
6	1.660
7	1.454
8	1.553
9	1.347

Tabla 7.10. Compresión Simple en Mamposterías:
Composición 3

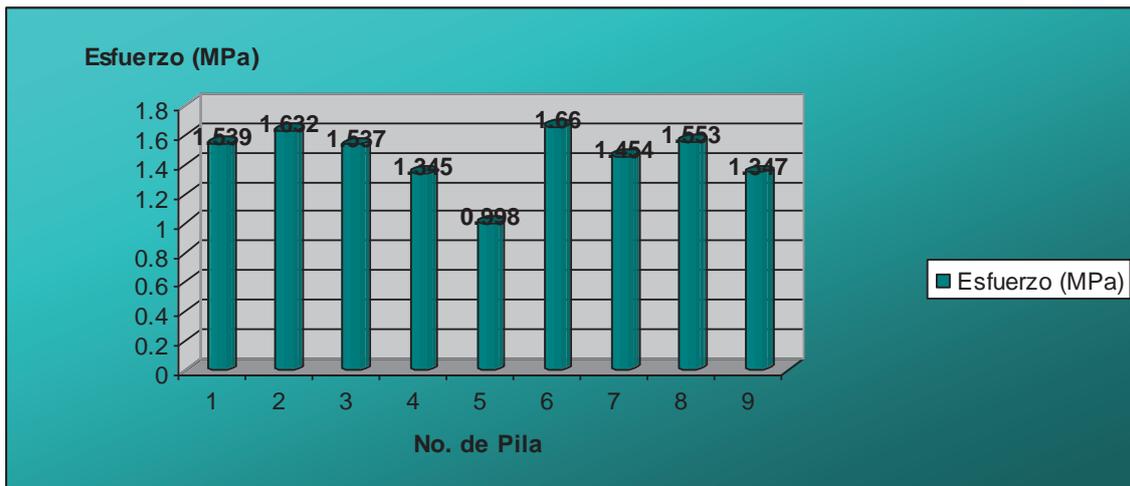


Figura 7.9. Esfuerzo de Compresión en Pilas:
Composición 3

Observaciones.

Durante el desarrollo del ensaye de los especímenes no hubo observaciones trascendentales, sin embargo, debemos señalar que se presentó un buen comportamiento de las pilas en cuanto a que se presentó una falla de la unidad en conjunto, es decir, la falla se produjo en los dos elementos que conforman la unidad: Ladrillo y Mortero de Cal.

Además del hiperfluidificante Plastol 4000 se incluyó Alúmina (Óxido de Aluminio) como aditivo, con la finalidad de estudiar los beneficios que se podrían presentar con su uso. Al final, se pudo observar que la resistencia se incrementó, por lo que definimos que la Alúmina es un componente benéfico en morteros de Cal.



VII.3.4. Composición 4 (Cal Química+Aditivo DK12+Alúmina).

Muestra	Esfuerzo (MPa)
1	1.321
2	1.258
3	1.17
4	1.049
5	1.072
6	0.94
7	1.223
8	1.138
9	1.037

Tabla 7.11. Compresión Simple en Mamposterías:
Composición 4

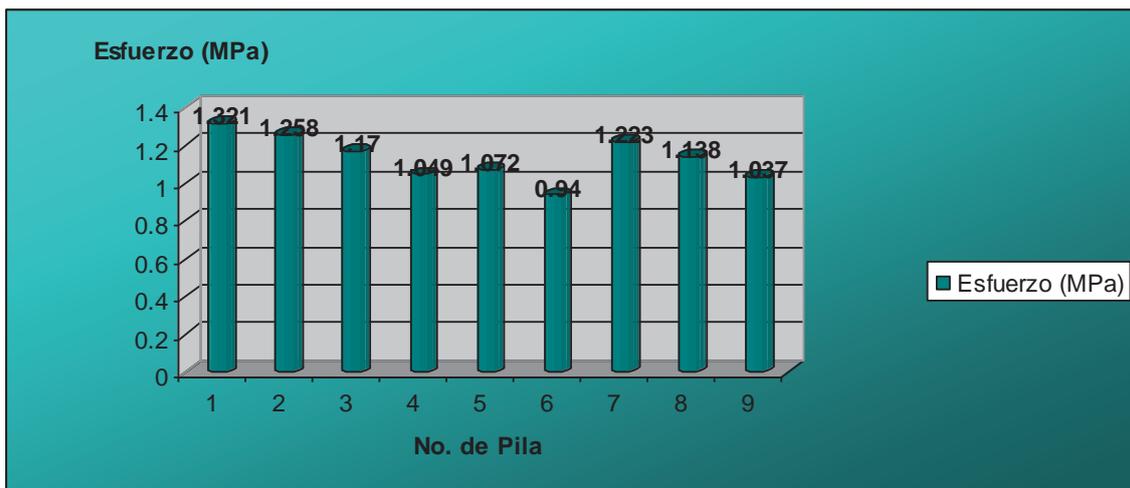


Figura 7.10. Esfuerzo de Compresión en Pilas:
Composición 4

Observaciones.

La resistencia a la compresión en comparación con la composición estándar se incrementó, sin embargo, los resultados no fueron mejores que los obtenidos con la composición 4. Con este ensaye confirmamos lo observado en la prueba de Compresión Simple en Morteros:

La resistencia a la compresión, utilizando el aditivo DK12 se mejora, sin embargo, el mejor comportamiento es el obtenido con el uso de hiperfluidificante Plastol 4000.



Todos los especímenes tuvieron las mismas características de falla, en donde, todos los componentes fallaron de igual forma, es decir, el ladrillo y la junta fallaron al mismo tiempo.

VII.3.5. Comparación de Pilas utilizando diferentes Composiciones.

Composición	Esfuerzo (MPa)
1	0.661
2	1.301
3	1.452
4	1.134

Tabla 7.12. Compresión Simple en Mamposterías:
Promedios por Composición

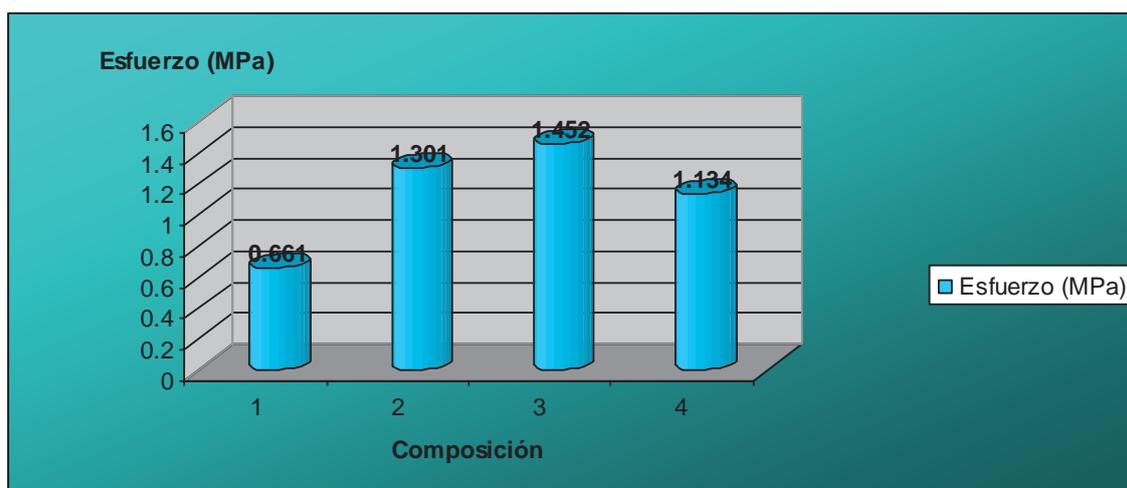


Figura 7.11. Esfuerzo de Compresión en Pilas: Promedio por Composición

Observaciones.

Las condiciones de falla fueron semejantes para todas las composiciones. En todas se presentó una falla de los componentes en conjunto, por lo que podemos decir que se tuvo una buena adherencia entre el ladrillo y el mortero de Cal. Más adelante podremos determinar si en verdad ocurrió lo antes mencionado, con la prueba de adherencia que se llevó a cabo.



Nuevamente pudimos observar que los elementos construidos con la composición estándar presentan bajas características de resistencia bajo las condiciones de carga aplicadas, mientras que el uso de aditivos nos proporciona un producto que, en conjunto con el ladrillo, nos ofrece elementos con buenas características. A continuación se presenta la tabla de incremento de la resistencia a la compresión de cada una de las composiciones en comparación con las muestras estándar:

Composición	Incremento de la resistencia (%)
C1: Cal Estándar	-----
C2: Cal Estándar+Plastol 4000	197
C3: Cal Estándar+Plastol 4000+Alúmina	220
C4: Cal Química+Aditivo DK12+Alúmina	172

Tabla 7.13. Incremento de la Resistencia: Esfuerzo de Compresión en Pilas

De la tabla anterior podemos observar que la alúmina es un elemento que ayuda a incrementar las características de resistencia de los elementos en los que se incluye. En la composición 2 no se utilizó Alúmina, solo el hiperfluidificante, mientras que en la composición 3 si se utilizó, por lo que, si hacemos una comparación entre ambas obtenemos un incremento del 111% de la resistencia.

Un aspecto importante que debemos mencionar es que, una vez realizado el ensaye, las pilas se mantuvieron bien adheridas, es decir, a pesar de que habían fallado, las piezas seguían unidas y no se observaban indicios de falla paralela a la junta.

VII.4. Ensaye: Análisis de la Adherencia Ladrillo-Mortero de Cal.

A continuación se mostrarán los resultados obtenidos con respecto a la adherencia que presentan los diferentes morteros de Cal que se desarrollaron en esta investigación. Las composiciones seleccionadas fueron las mismas que se emplearon en la prueba de Compresión Simple en Mamposterías.



Se mencionó anteriormente que los especímenes que fueron sometidos a la prueba de compresión habían tenido buenos resultados de adherencia, ya que, a pesar de la falla las piezas se mantuvieron unidas; en este apartado trataremos de establecer si lo que se supuso es correcto.

En este caso no encontramos una norma que nos especifique los parámetros que debemos cumplir para desarrollar un producto de calidad, por lo que nos limitaremos a presentar los resultados y presentar lo deducido durante el desarrollo de la prueba.

VII.4.1. Composición 1 (Cal Estándar).

Muestra	Esfuerzo (MPa)
1	0.55
2	0.383
3	0.564
4	0.789
5	0.694
6	0.686
7	0.515
8	0.579
9	0.598

Tabla 7.14. Análisis de Adherencia:
Composición 1

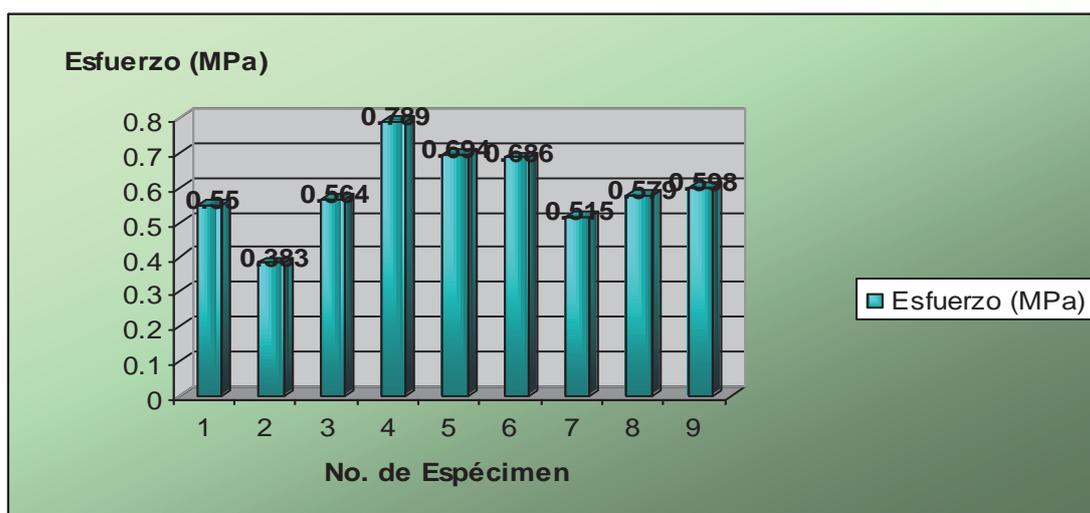


Figura 7.12. Adherencia en Mamposterías: Composición 1



VII.4.2. Composición 2 (Cal Estándar+Plastol 4000).

Muestra	Esfuerzo (MPa)
1	1.373
2	1.435
3	1.052
4	1.373
5	2.19
6	1.563
7	1.536
8	1.406
9	1.435

Tabla 7.15. Análisis de Adherencia:
Composición 2

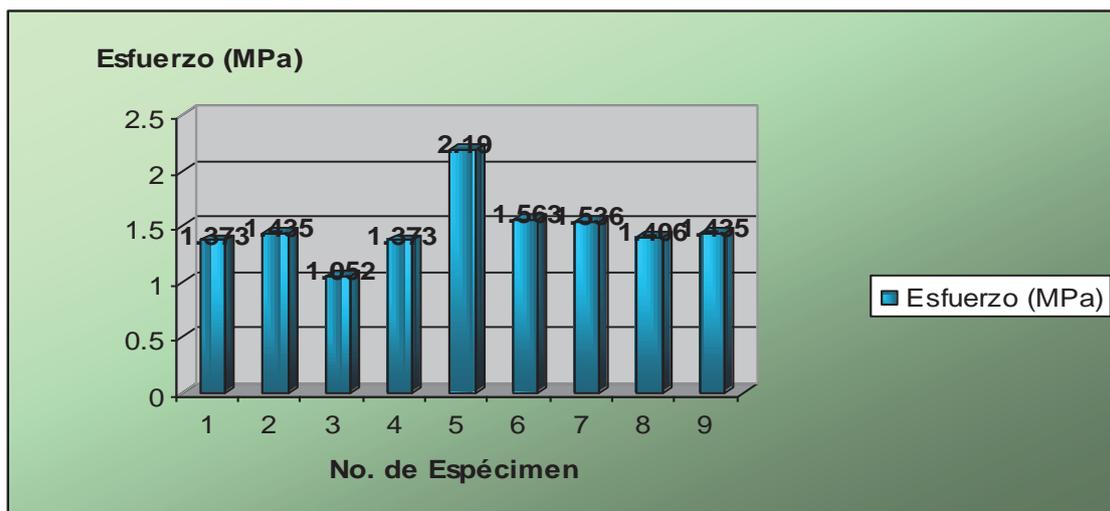


Figura 7.13. Adherencia en Mamposterías: Composición 2

VII.4.3. Composición 3 (Cal Estándar+Plastol 4000+Alúmina).

Muestra	Esfuerzo (MPa)
1	2.519
2	1.084
3	0.785
4	2.493
5	0.683



6	1.152
7	1.839
8	1.010
9	2.039

Tabla 7.16. Análisis de Adherencia:
Composición 3

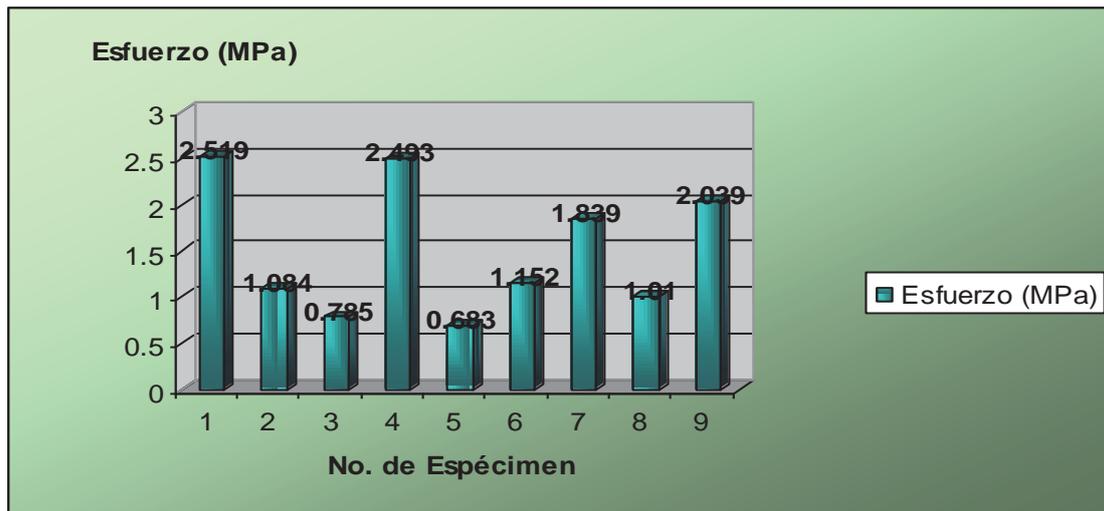


Figura 7.14. Adherencia en Mamposterías: Composición 3

VII.4.4. Composición 4 (Cal Química+Aditivo DK12+Alúmina).

Muestra	Esfuerzo (MPa)
1	0.883
2	0.887
3	0.955
4	0.877
5	0.915
6	0.861
7	0.957
8	0.858
9	0.929

Tabla 7.17. Análisis de Adherencia:
Composición 4

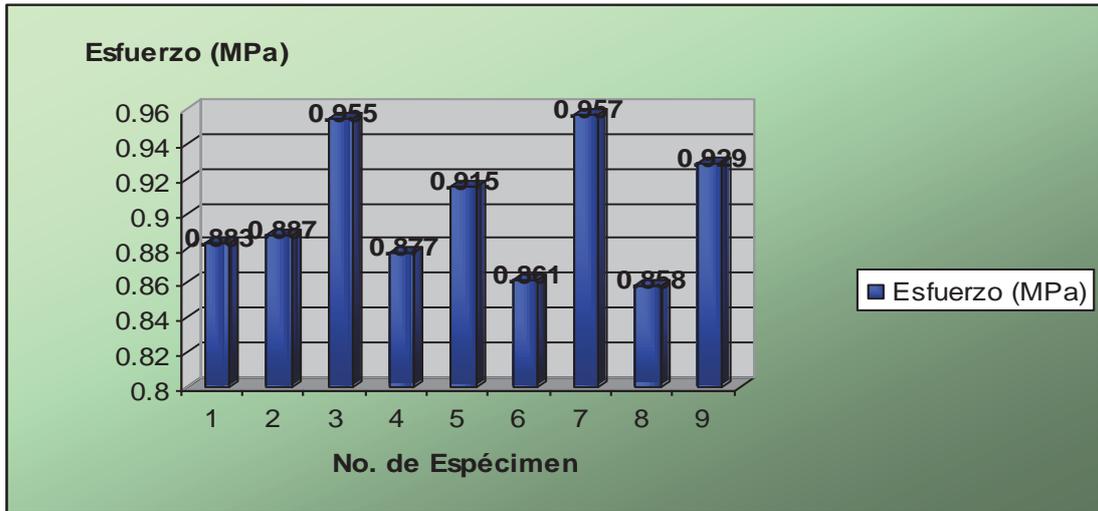


Figura 7.15. Adherencia en Mamposterías: Composición 4

VII.4.5. Comparación de la Adherencia entre las composiciones utilizadas.

Composición	Esfuerzo (MPa)
1	0.595
2	1.485
3	1.511
4	0.902

Tabla 7.18. Análisis de la Adherencia: Todas las Composiciones

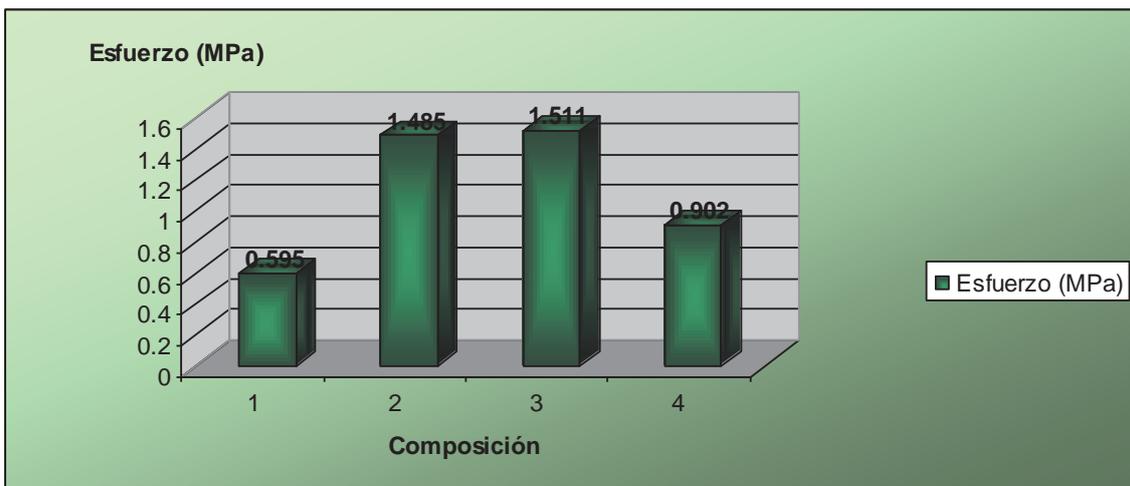


Figura 7.16. Adherencia en Mamposterías: Todas las Composiciones



Observaciones.

Durante el ensaye denominado “Análisis de la Adherencia Ladrillo-Mortero de Cal”, se observó que casi todos los especímenes, de todas las composiciones, presentaron el mismo tipo de falla. La falla fue paralela a la colocación de las piezas y, generalmente, solo ocurrió en una de las piezas.

Nuevamente, las peores condiciones de uso fueron presentadas por la composición estándar. Por lo tanto, podemos establecer que los aditivos utilizados, además de incrementar la resistencia a la compresión, también mejoran la adherencia al ser utilizados en unidades de mampostería. A continuación se presenta la tabla de incremento de adherencia, comparando la composición estándar con el resto de las muestras:

Composición	Incremento de la resistencia (%)
C1: Cal Estándar	-----
C2: Cal Estándar+Plastol 4000	250
C3: Cal Estándar+Plastol 4000+Alúmina	254
C4: Cal Química+Aditivo DK12+Alúmina	152

Tabla 7.19. Incremento de la Resistencia: Adherencia en Unidades de Mampostería

En la tabla podemos observar que el incremento más considerable se tiene con la composición 3. Sin embargo, debemos mencionar que, durante el desarrollo del ensaye se observó algo muy distinto a lo mostrado en la tabla, ya que, en casi todos los especímenes se tuvo una mala adherencia, no obstante, tres de las muestras presentaron una resistencia muy alta por lo que el promedio se incrementó. Si eliminamos las muestras con mayor resistencia el promedio obtenido para los especímenes restantes sería de 1.092 MPa, que es menor al obtenido (1.511 MPa).

Para poder determinar, de una manera más adecuada, si en realidad la composición 3 tiene la mejor adherencia es importante que se hagan estudios de estructura interna para conocer las características



del material, así como microscopias que nos permitan observar la unión ladrillo-mortero. Desafortunadamente en esta investigación no se realizaron dichos estudios, por lo que, los datos presentados en la tabla serán los establecidos como resultados finales.



Figura 7.17. Adherencia: Composición 3

En la figura 7.17 se muestra el efecto que se mencionó anteriormente para la composición 3. Creemos que algunos de los factores que pueden afectar en la adherencia, para esta composición son: 1) Falta de humedad en los ladrillos; 2) Por la adición del hiperfluidificante obtenemos una mezcla demasiado plástica, por lo que sus partículas, que se encuentran muy compactas, no pueden penetrar en el ladrillo.

También es importante señalar que algunos especímenes no presentaron resultados dudosos debido a que, durante la prueba se presentaron ciertas complicaciones al colocar las muestras en la máquina de pruebas, ya fuera por defectos en las piezas utilizadas (bordes dispares) o bien por fallas en la nivelación. Por lo tanto, para futuras pruebas se recomienda tener cuidado con los aspectos mencionados.



VII.5. Observaciones para la Elaboración de las Mezclas: Todas las Composiciones.

En este apartado se presentarán todas aquellas observaciones importantes que se tuvieron durante el proceso de fabricación de las muestras para el desarrollo de esta investigación, es decir, se mencionarán todas las características de las composiciones que influyeron en el proceso de elaboración de los especímenes para todos los ensayos.

1. La muestra estándar, para la cual se utilizó una relación agua-cemento de 0.85, presentó las mejores condiciones de trabajabilidad de todas las composiciones.
2. Las composiciones en las cuales se utilizó como aditivo el hiperfluidificante Plastol 4000, presentaron condiciones de trabajabilidad muy difíciles. La relación agua-cemento utilizada fue de 0.65. En principio, cuando se hacían estas mezclas, se formaban grumos que hacían parecer que la mezcla necesitaba más agua, si embargo, cuando se seguía mezclando presentaba mejores condiciones de plasticidad. Al final pudimos mejorar el proceso de elaboración de las mezclas, ya que se observó que cuando la mezcla era vibrada adquiría las características de trabajabilidad requeridas.



Figura 7.18. Características de la mezcla antes y después del Vibrado:
Cal+Plastol 4000

3. Las características de plasticidad que se originaban por el uso del hiperfluidificante provocaron que la colocación del mortero en los ladrillos fuera más difícil, ya que tiende a caer de las piezas; además, provocó que se tuvieran juntas de menor espesor que las obtenidas con otras composiciones.



4. Como se mencionó, la composición estándar requirió una relación agua-cemento de 0.85, misma que se necesitó para la elaboración de las mezclas de Cal+Aditivo DK12+Alúmina, de donde observamos que el aditivo y la alúmina no absorben mucho agua, permitiéndonos mantener la relación agua-cemento establecida e incrementando la resistencia del mortero.
5. Las mezclas elaboradas con Plastol 4000 presentaron un mayor rendimiento que la demás, es decir, se requirió una menor cantidad de mezcla para elaborar los especímenes en comparación con la cantidad utilizada con otras composiciones.

VII.6. Tipos de Fallas en Mamposterías.

Una vez realizados los ensayos correspondientes, es muy importante que se haga un análisis acerca del tipo de fallas que se presentan en los especímenes, ya que con ello podremos establecer ciertos criterios que nos permitirán conocer la forma en que cada unidad de mampostería se comporta durante la aplicación de la carga.

Conociendo el tipo de falla podemos establecer si el proceso de elaboración de las muestras fue el adecuado o no.

VII.6.1. Falla en Pilas.

De acuerdo con los estudios que se han hecho hasta ahora, los dos tipos de falla mas comunes que se pueden presentar en una unidad de mampostería sometida a carga axial son:

1. Fallas por tracción lateral. Son las más comunes, se presentan debido a la tensión que se genera internamente por la aplicación de la carga. Se distingue por la aparición de grietas verticales por tracción lateral en los costados, comenzando en el material más resistente (en general el tabique), hasta extenderse al mortero.
2. Fallas por aplastamiento. Se presenta cuando se produce una concentración de esfuerzos en los extremos debido a un mal acomodo de las pilas al momento del ensaye, o bien, por una mala colocación de las piezas (ladrillos) durante la elaboración de los especímenes.

En el caso de los especímenes realizados para llevar a cabo este trabajo, se pudo observar que, en general, todas las pilas presentaron fallas por tracción lateral, lo que indica que se presentó un daño en ambos elementos (mortero y ladrillo) de la unidad.



A continuación se muestran algunos de los especímenes más representativos de cada composición, en donde podemos observar la forma en que fallaron.

Composición 1



a) Falla por tracción lateral



b) Falla por tracción lateral

Composición 2



a) Falla por tracción lateral



b) Falla por tracción lateral

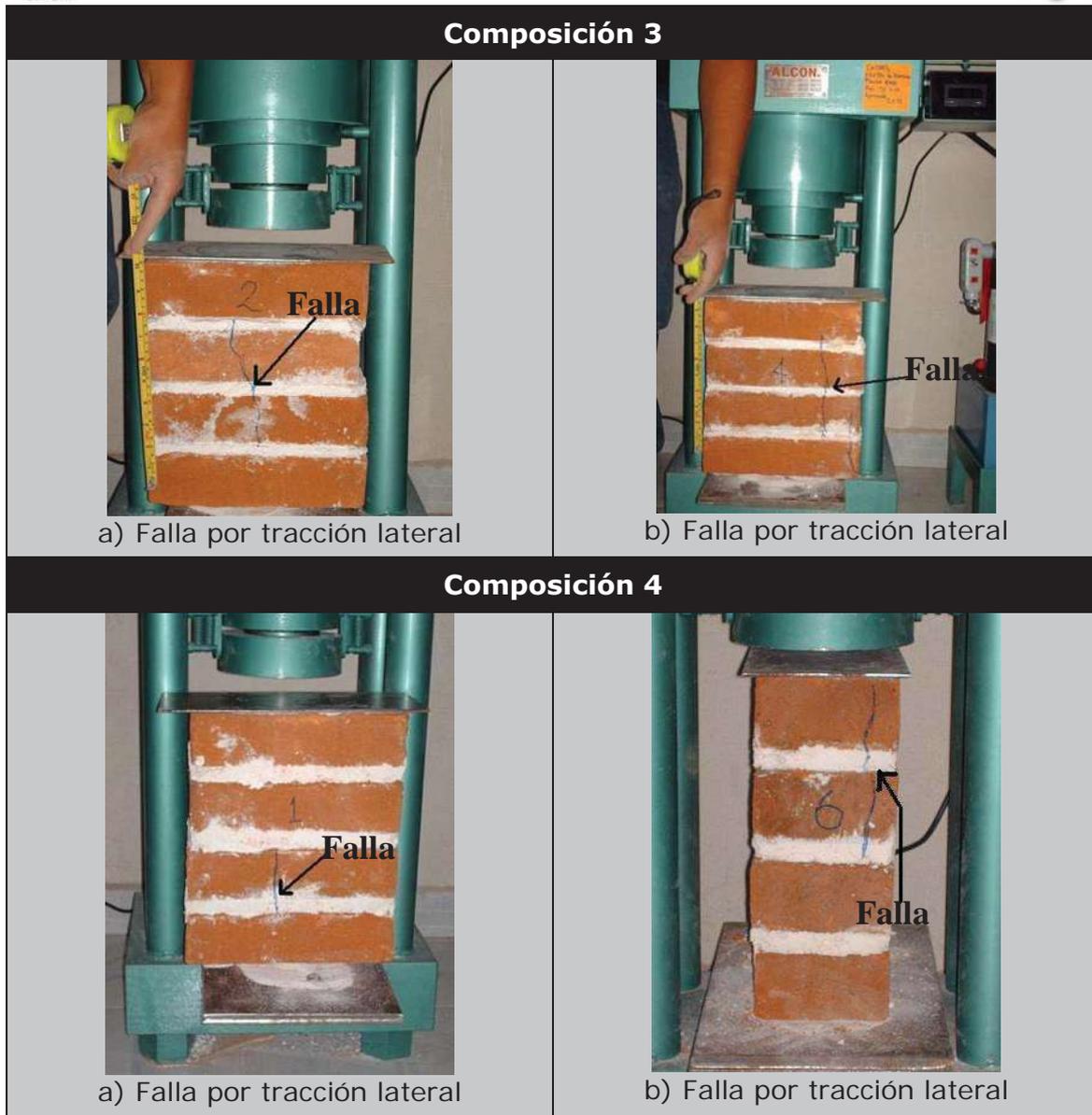


Tabla 7.20. Tipos de Falla en Pilas

Como se puede observar, todas las composiciones tuvieron comportamiento similares, y en todas se presentó falla por tracción lateral; por ello establecemos que los términos bajo los cuales se desarrolló la prueba fueron adecuados.

VII.6.2. Adherencia: Tipo de Falla.

A diferencia de lo establecido para ciertas unidades de mampostería, tales como pilas y muretes, no se tiene una clasificación exacta acerca del tipo de falla que se puede presentar en los especímenes que se realizaron para el análisis de la adherencia. Sin



embargo, se explica lo observado y se trata de establecer el porque del tipo de falla.

Una vez realizado el ensaye para cada composición, se pudo observar que se presentaron dos tipos de fallas. A continuación se muestran las imágenes de cada uno de ellos, dando una breve explicación de lo ocurrido.

1. El primer tipo de falla que se observó, y que además, se presentó en casi todos los especímenes de todas las composiciones, fue aquel en el que se pudo observar que el plano de falla se formaba paralelamente a la dirección de la junta de mortero. Cuando se tiene una baja adherencia entre el ladrillo y el mortero es factible que se presente este tipo de falla, una de las piezas queda sin mortero, es decir, no se adhiere de forma adecuada.

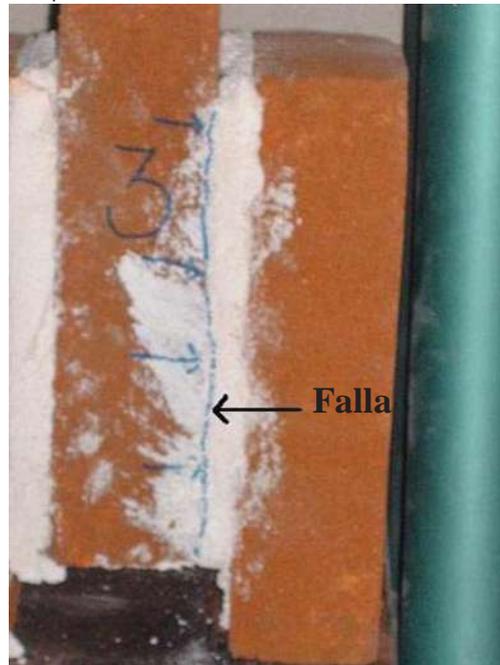


Figura 7.19. Tipo de Falla 1

2. El segundo tipo de falla que se presentó, en primera instancia paralelo al acomodo de la junta de mortero, igual que en el caso anterior, sin embargo, se llegó un momento en el que la falla era perpendicular a la junta. Cuando se tiene una buena adherencia se presenta este tipo de falla, gracias a que la unión impide que se despeguen los ladrillos; la única forma de deshacer esa unión es rompiendo la junta. Por ello establecemos que cuando se presenta este tipo de falla es cuando se tienen las condiciones de adherencia óptimas.



Figura 7.20. Tipo de Falla 2

Nota.- Los dos tipos de falla que se mencionaron anteriormente, fueron los únicos observados durante el ensaye para todas las composiciones.

VII.7. Análisis de la Estructura Interna en Morteros e Interfase Ladrillo- Mortero de Cal.

Para poder establecer un análisis que arroje resultados contundentes, siempre será muy importante que se estudie la estructura interna de las muestras, con la finalidad de establecer que es lo que está ocurriendo con la adición de cada uno de los componentes seleccionados.

En el caso de la investigación realizada para el desarrollo de este trabajo, uno de los objetivos principales fue establecer la viabilidad de los materiales desarrollados para su uso en la elaboración de mamposterías, por ello, es indispensable poder establecer las condiciones bajo las cuales se presenta la interfase ladrillo-mortero. En este apartado, se mostrarán imágenes que nos permiten comprender mejor las ventajas o desventajas obtenidas con la adición de ciertos compuestos en morteros de cal.

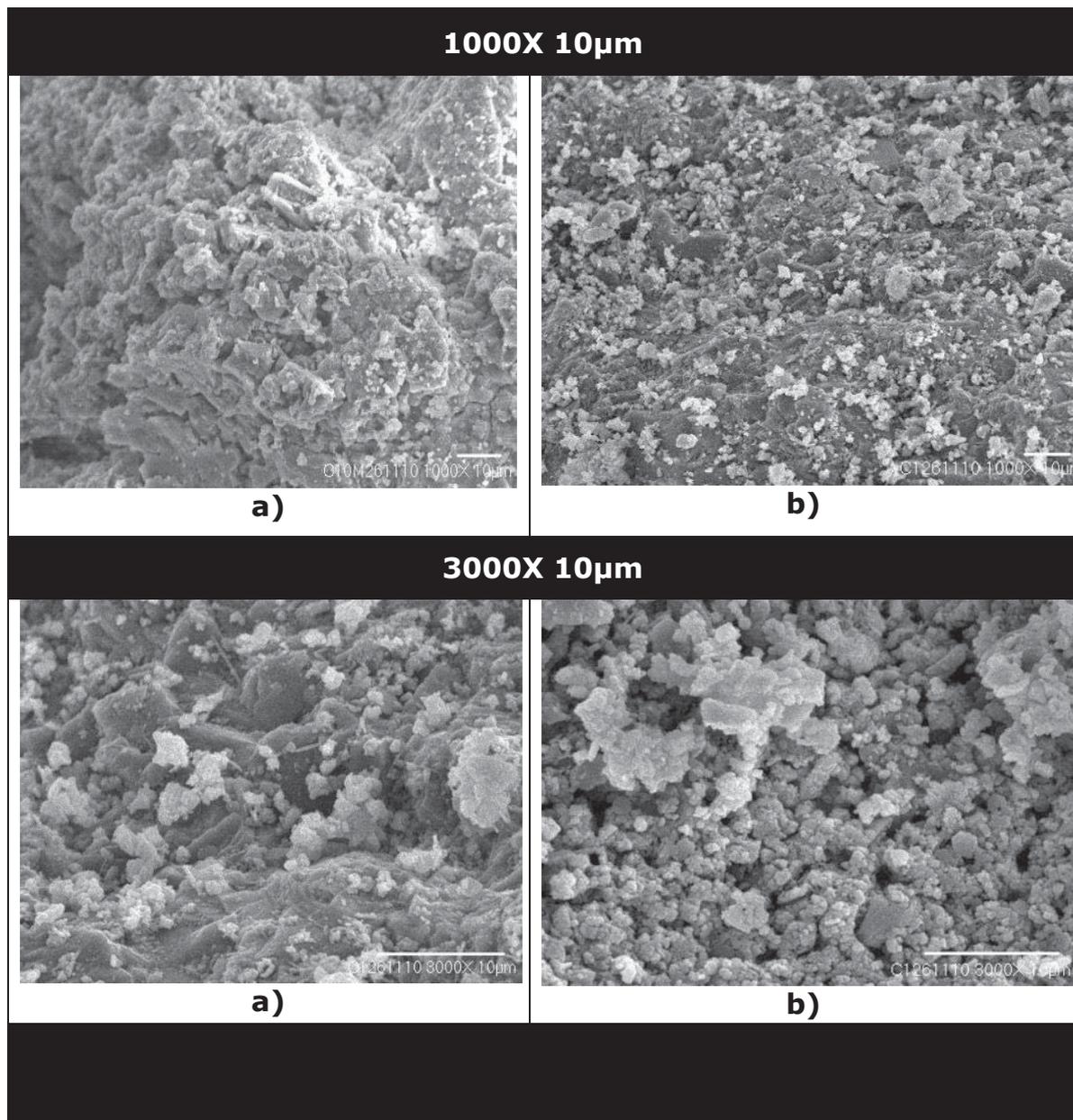


VII.7.1. Análisis de las Lechadas de Morteros de Cal.

Lo que podremos observar en las siguientes imágenes será el arreglo interno de un mortero de cal por sí solo, sin la adición de componentes para mejorar sus características, ni agregado pétreo.

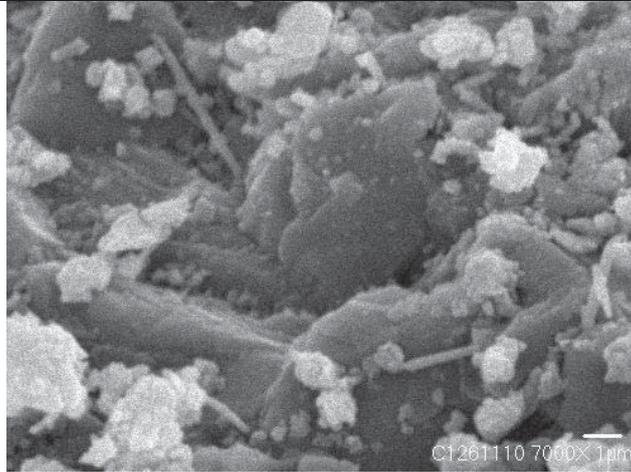
Composición 1 (C1:261110).

- 100% Cal Muro.
- Relación Agua-Cemento 0.85





7000X 1 μ m



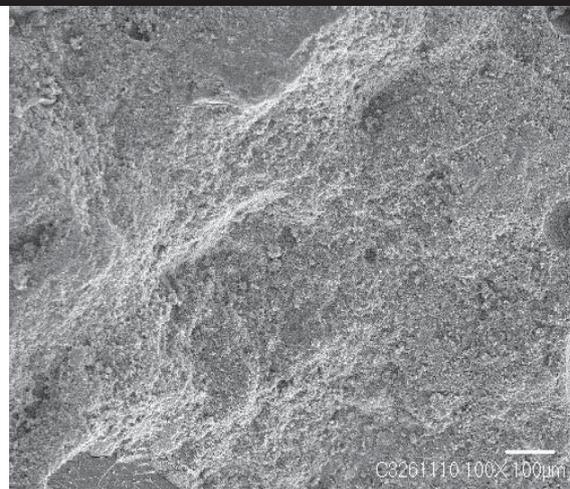
a)

Tabla 7.21 Estructura Interna: Composición 1

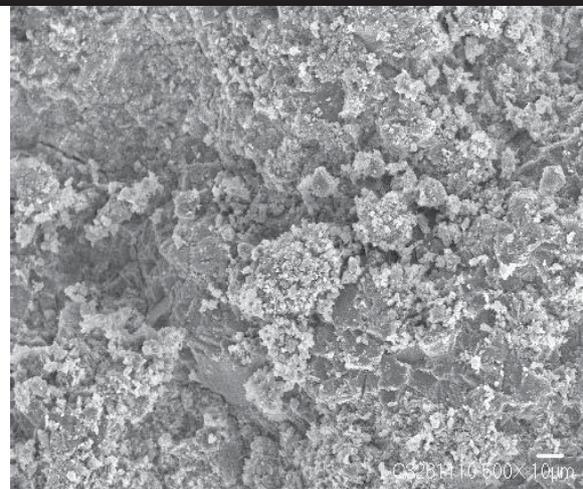
Composición 3 (C3:261110).

- **100% Cal Química.**
- **Relación Agua-Cemento 0.85**

100X 100 μ m



500X 10 μ m



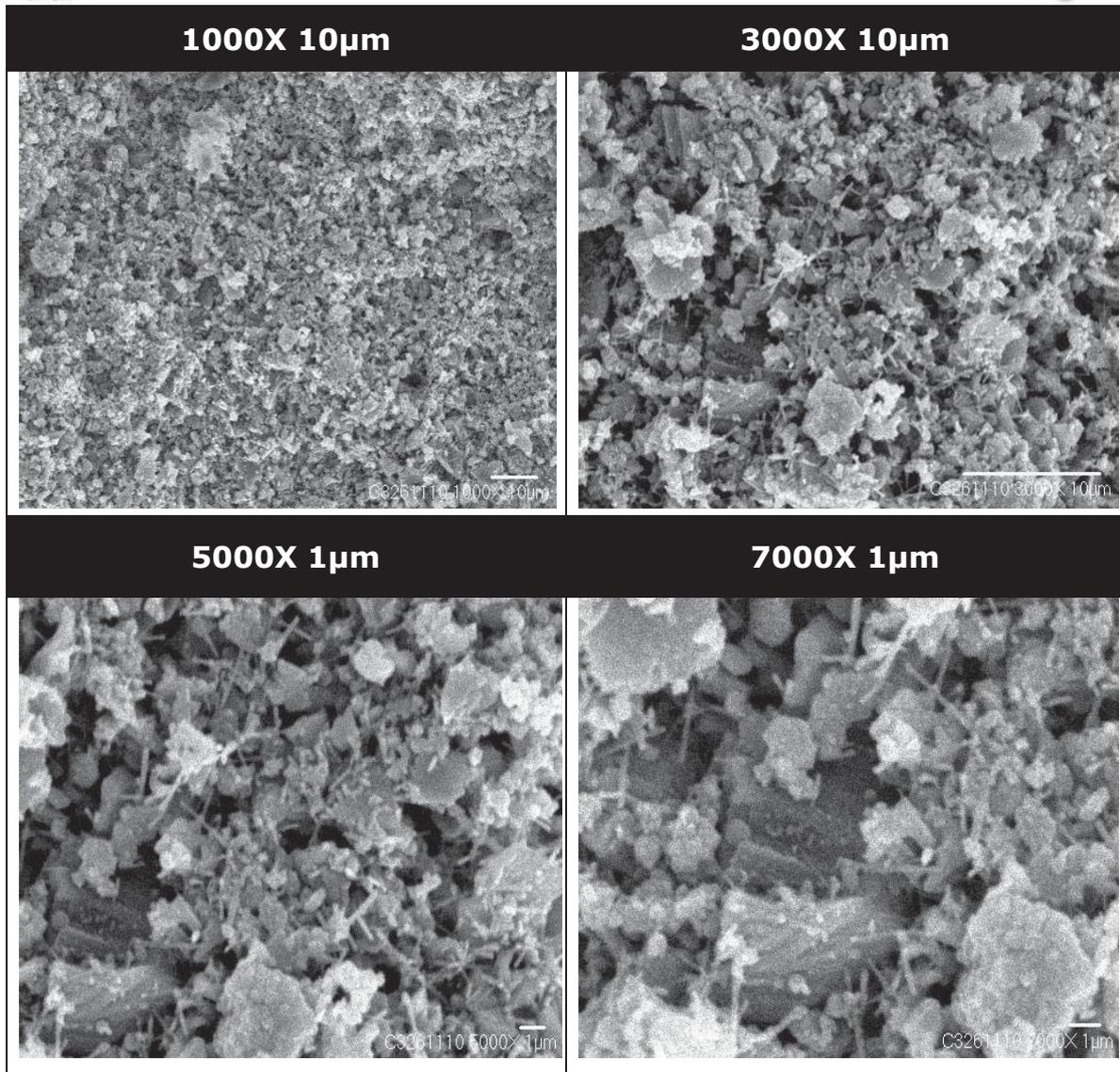
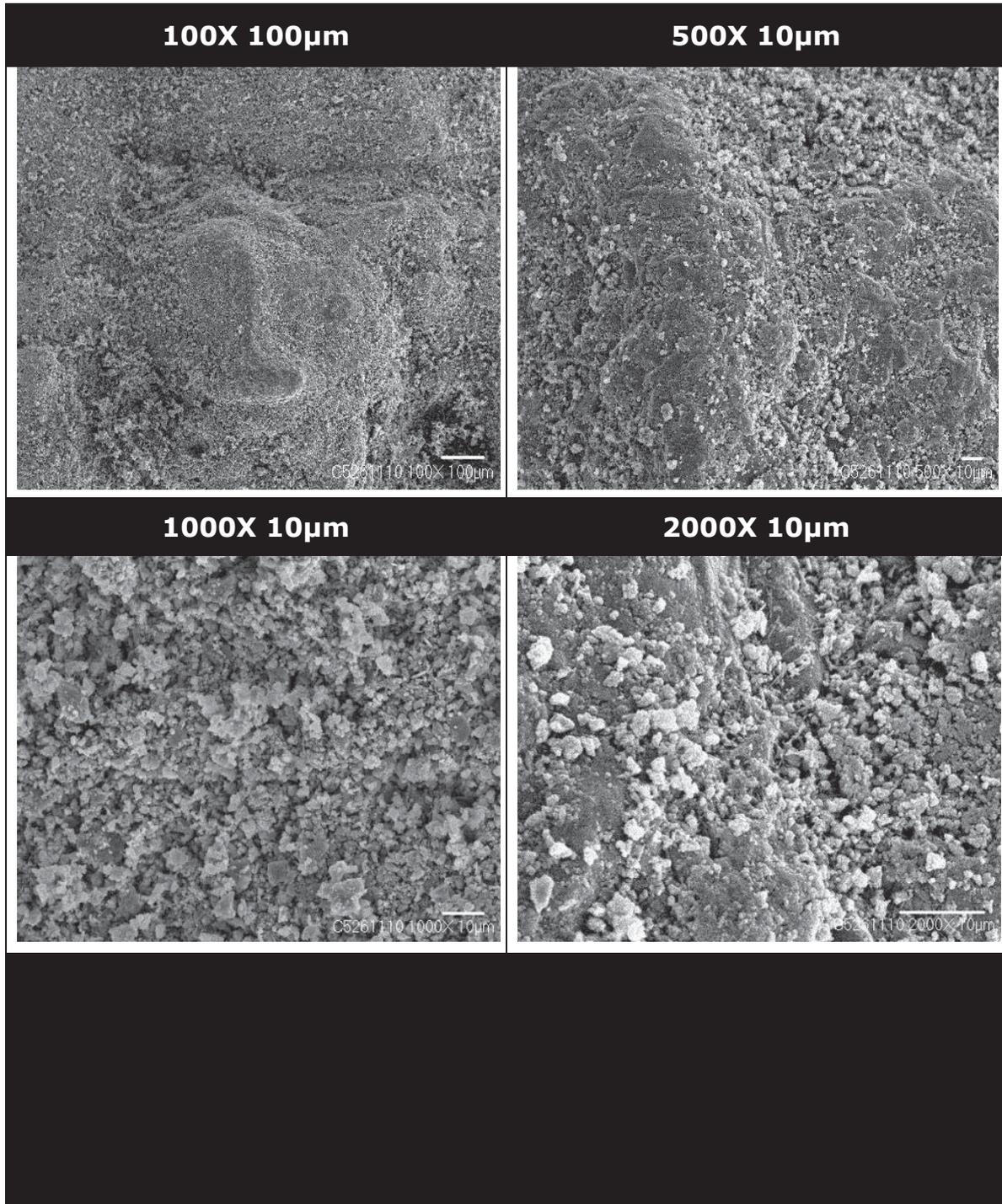


Tabla 7.22. Estructura Interna: Composición 3

Composición 5 (C5:261110).

- **100% Cal Muro.**
- **2.5% Óxido de Aluminio,**
- **Plastol 4000**
- **Relación Agua-Cemento 0.65**



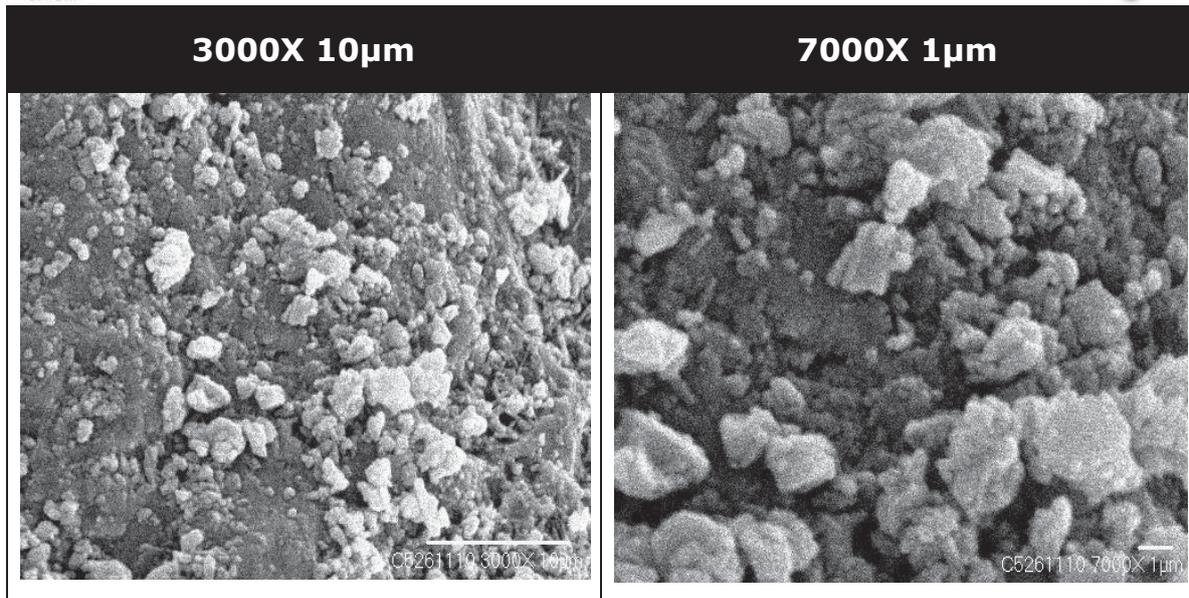
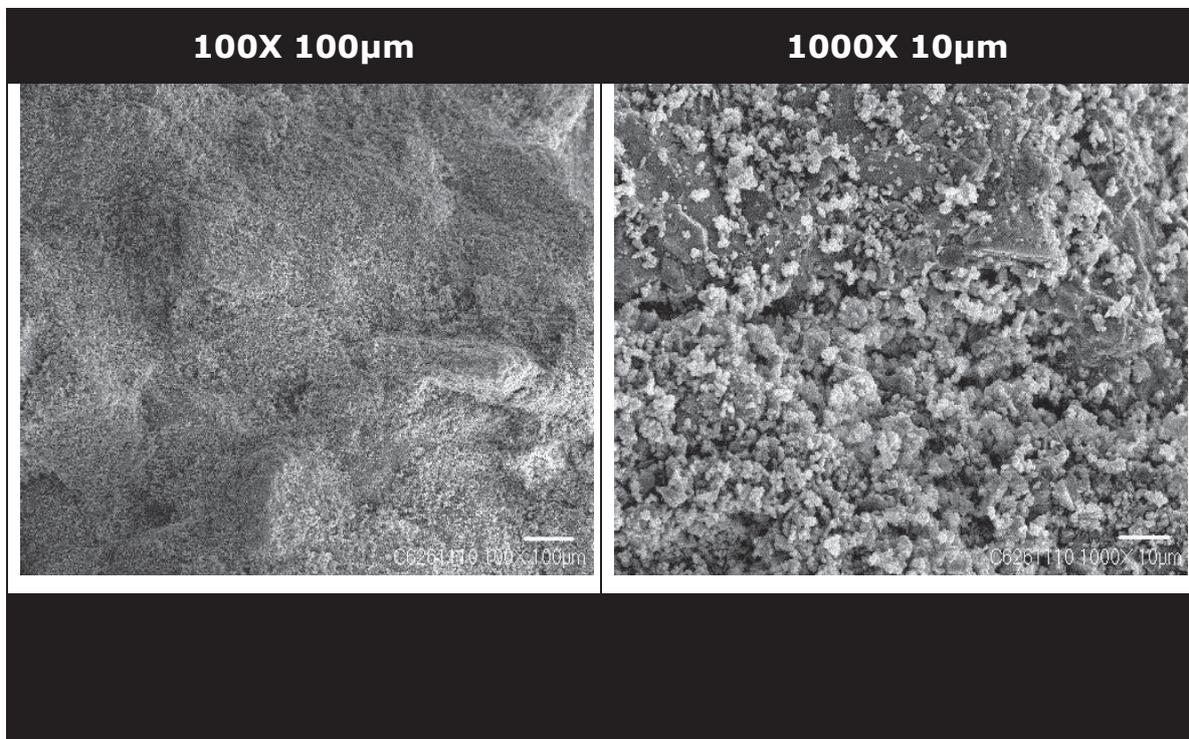


Tabla 7.23. Estructura Interna: Composición 5

Composición 6 (C6:261110).

- 100% Cal Química.
- 2.5% Óxido de Aluminio.
- Plastol 4000
- Relación Agua-Cemento 0.65



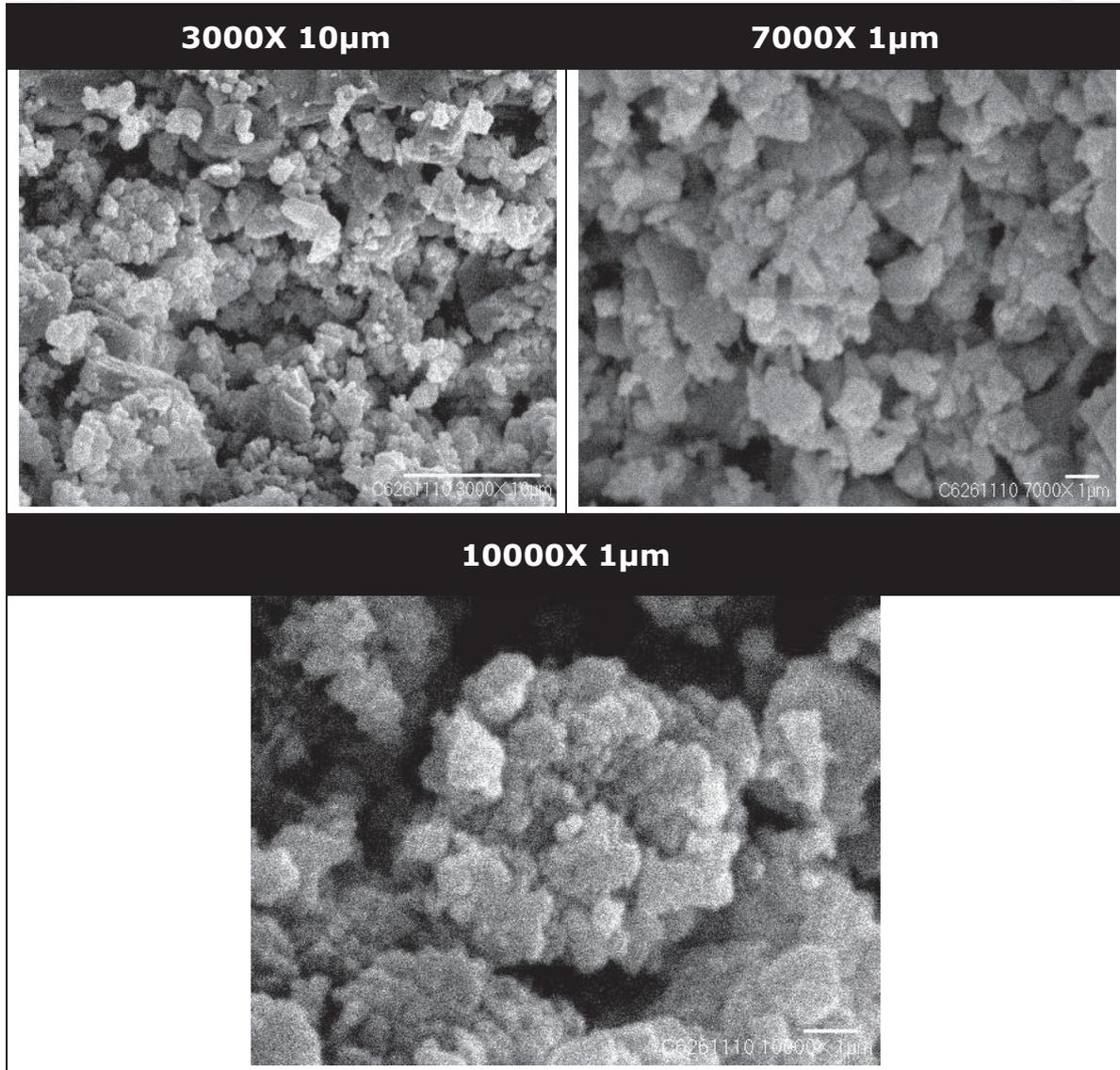


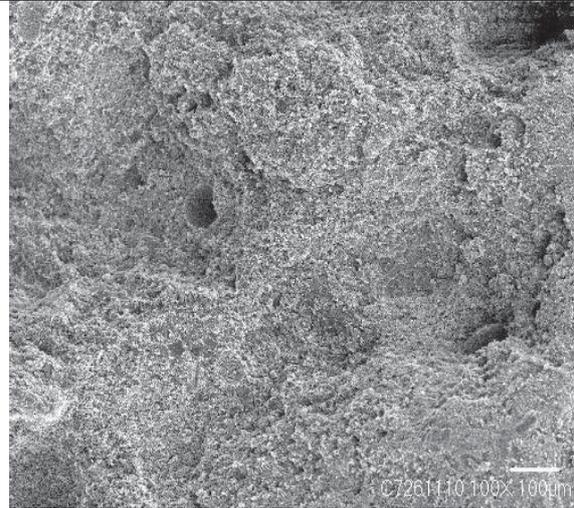
Tabla 7.24. Estructura Interna: Composición 6

Composición 7 (261110).

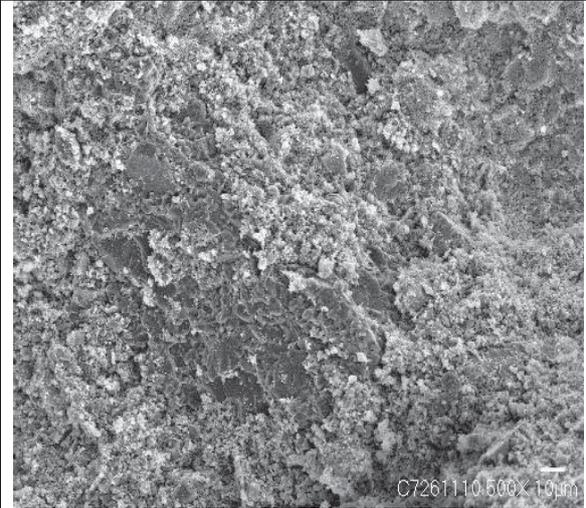
- **100% Cal Muro.**
- **2.5% Óxido de Aluminio.**
- **2% Aditivo DK12.**
- **Relación Agua-Cemento 0.85**



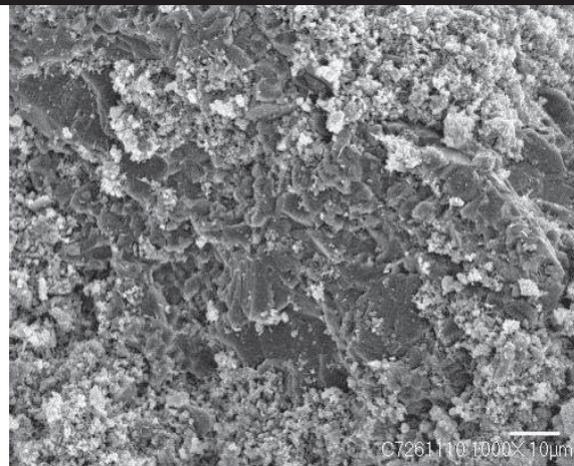
100X 100µm



500X 10µm



1000X 10µm



2000X 10µm



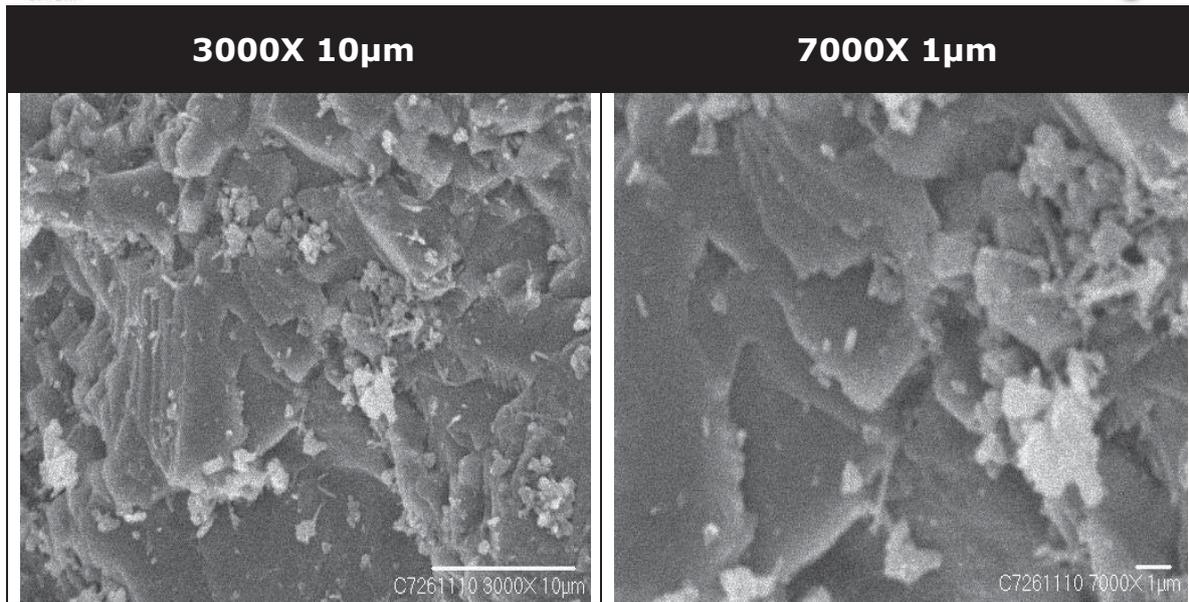
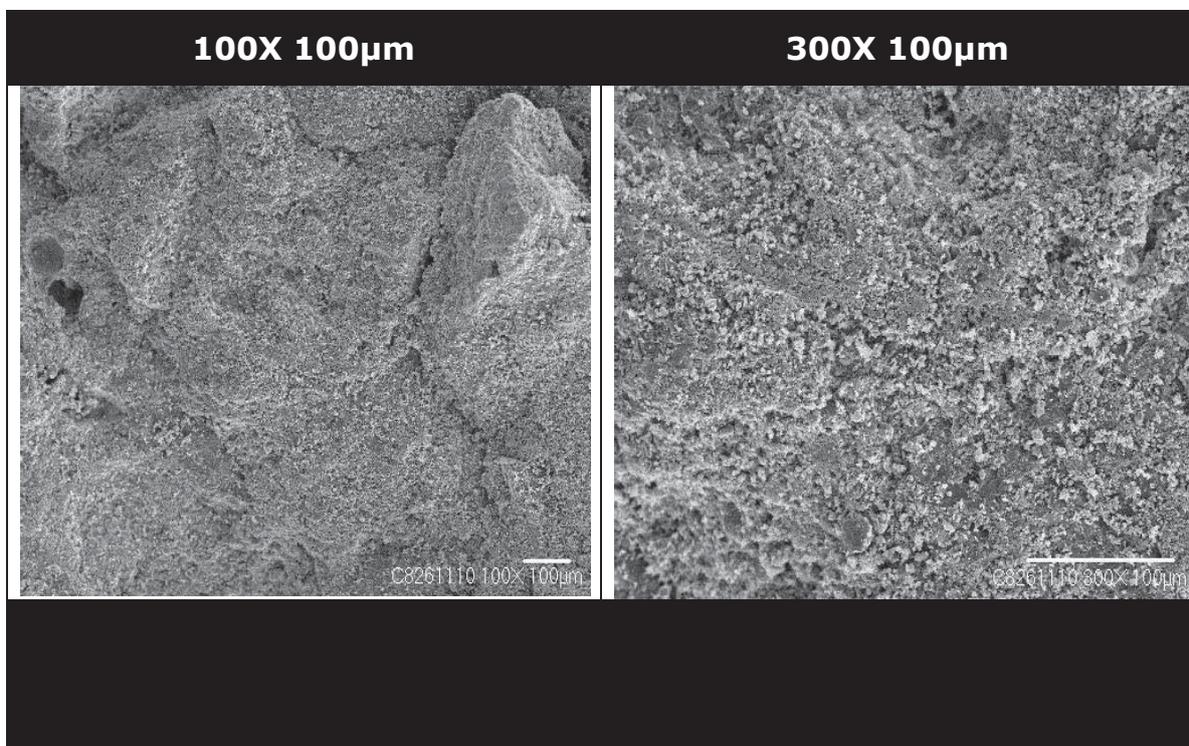


Tabla 7.25. Estructura Interna: Composición 7

Composición 8 (C8:261110).

- 100% Cal Química.
- 2.5% Óxido de Aluminio.
- 2% Aditivo DK12.
- Relación Agua-Cemento 0.85



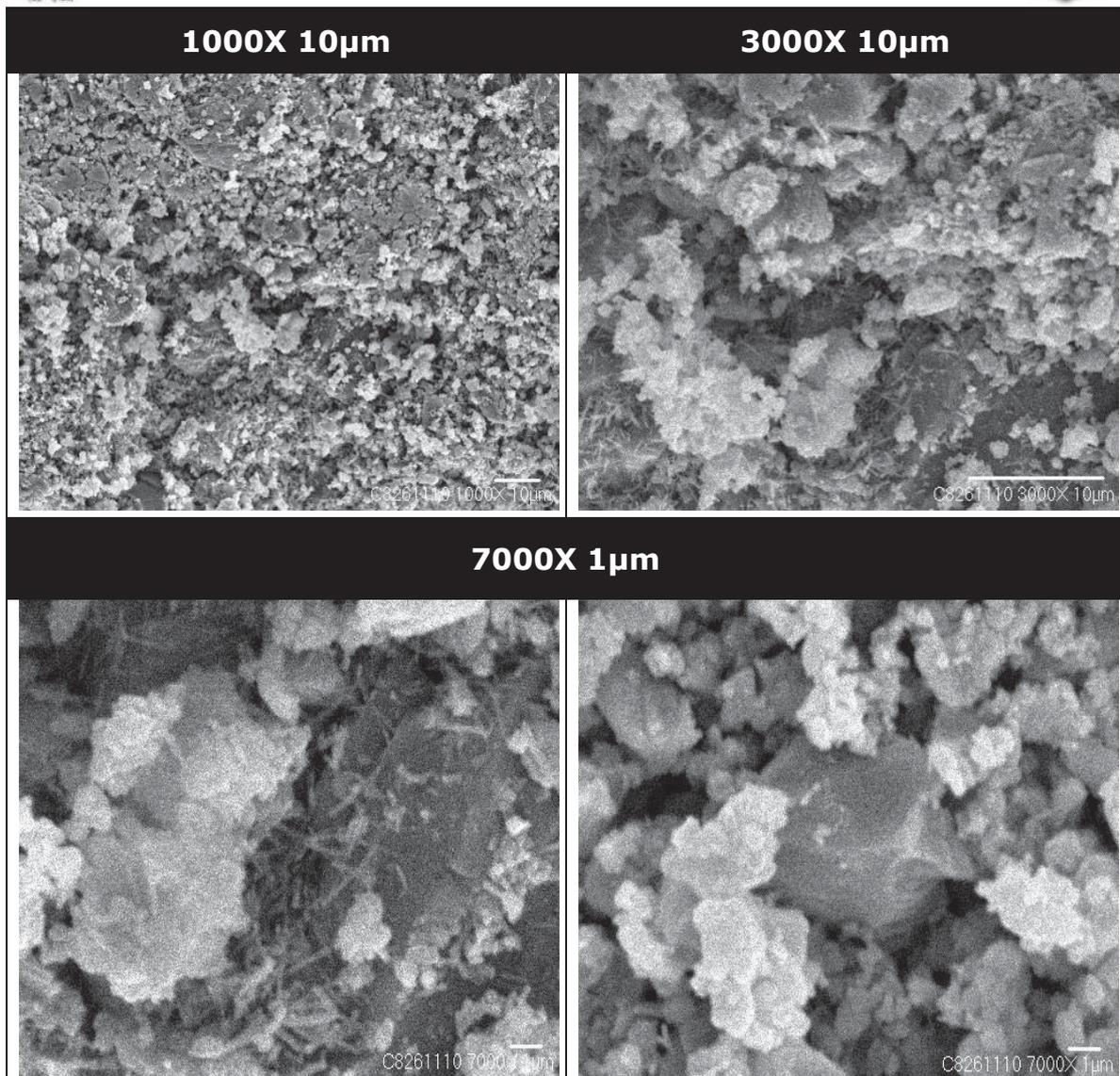


Tabla 7.26. Estructura Interna: Composición 8

VII.7.2. Análisis de la Interfase.

A continuación podremos observar la interfase ladrillo mortero que se presentó en las muestras elaboradas para la prueba de adherencia en mamposterías. Las composiciones que aquí se muestran fueron las mismas que se utilizaron para la elaboración de especímenes para prueba de compresión simple y de adherencia. Con ello podremos establecer nuevos parámetros acerca de la viabilidad de la creación de nuevos morteros de cal, con la inclusión de aditivos.



Composición 2 (C2:261110).

- **100% Cal Muro.**
- **Marmolina Tipo 1. Relación 1:2.75**
- **Relación Agua-Cemento 0.85**

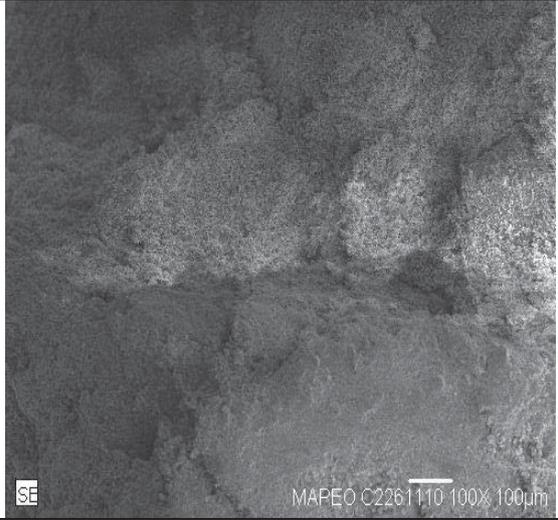
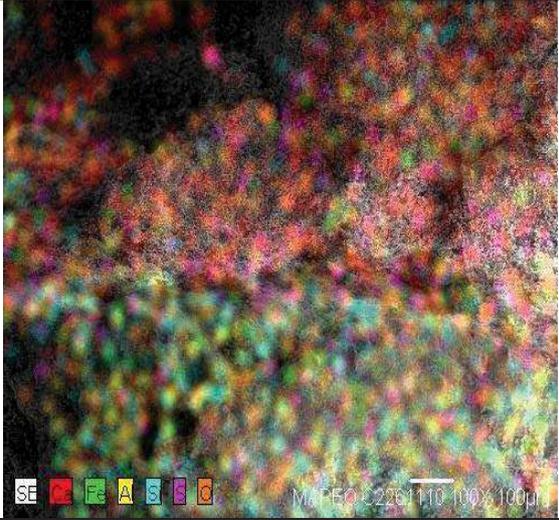
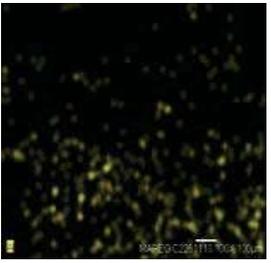
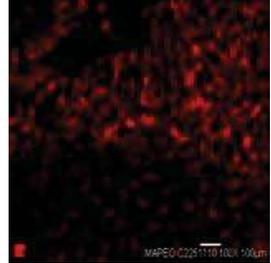
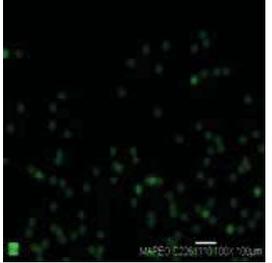
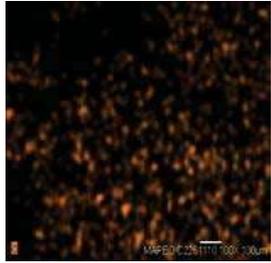
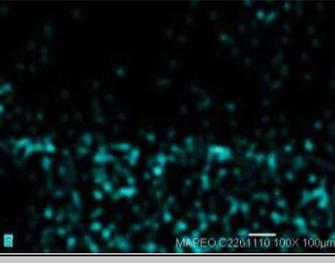
C2:261110			
			
			
Aluminio (Al)	Calcio (Ca)	Fierro (Fe)	Oxígeno (O)
			
Azufre (S)		Silicio (Si)	

Tabla 7.27. Interfase Ladrillo-Mortero y Mapeo:
Composición 2



Composición 4 (C4:261110).

- 100% Cal Muro.
- Marmolina Tipo 1. Relación 1:2.75
- Plastol 4000
- Relación Agua-Cemento 0.65

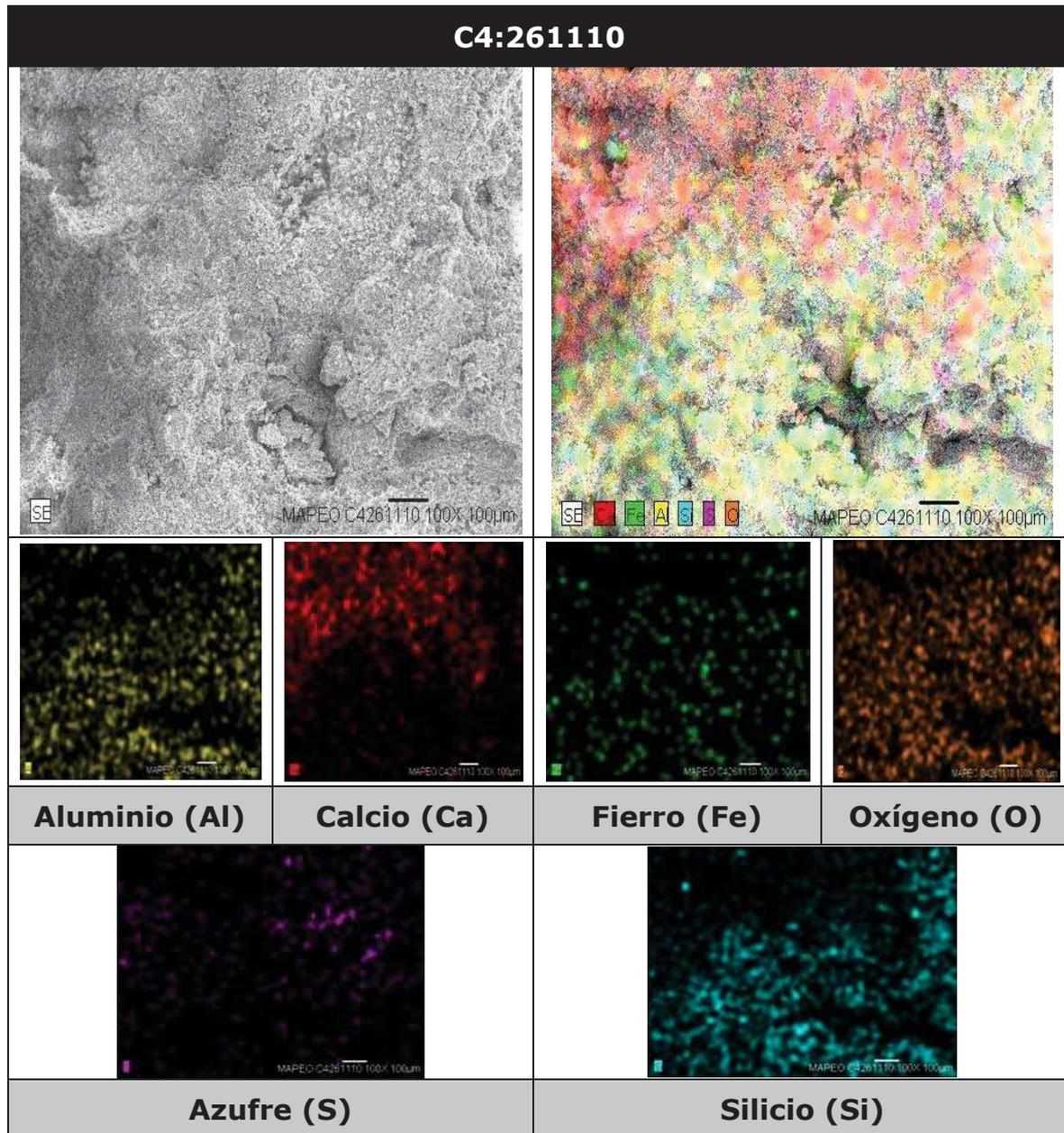


Tabla 7.28. Interfase Ladrillo-Mortero y Mapeo:
Composición 4



Composición 9 (C9:261110).

- **100% Cal Muro.**
- **2.5% Óxido de Aluminio.**
- **Marmolina Tipo 1. Relación 1:2.75**
- **Plastol 4000.**
- **Relación Agua-Cemento 0.65**

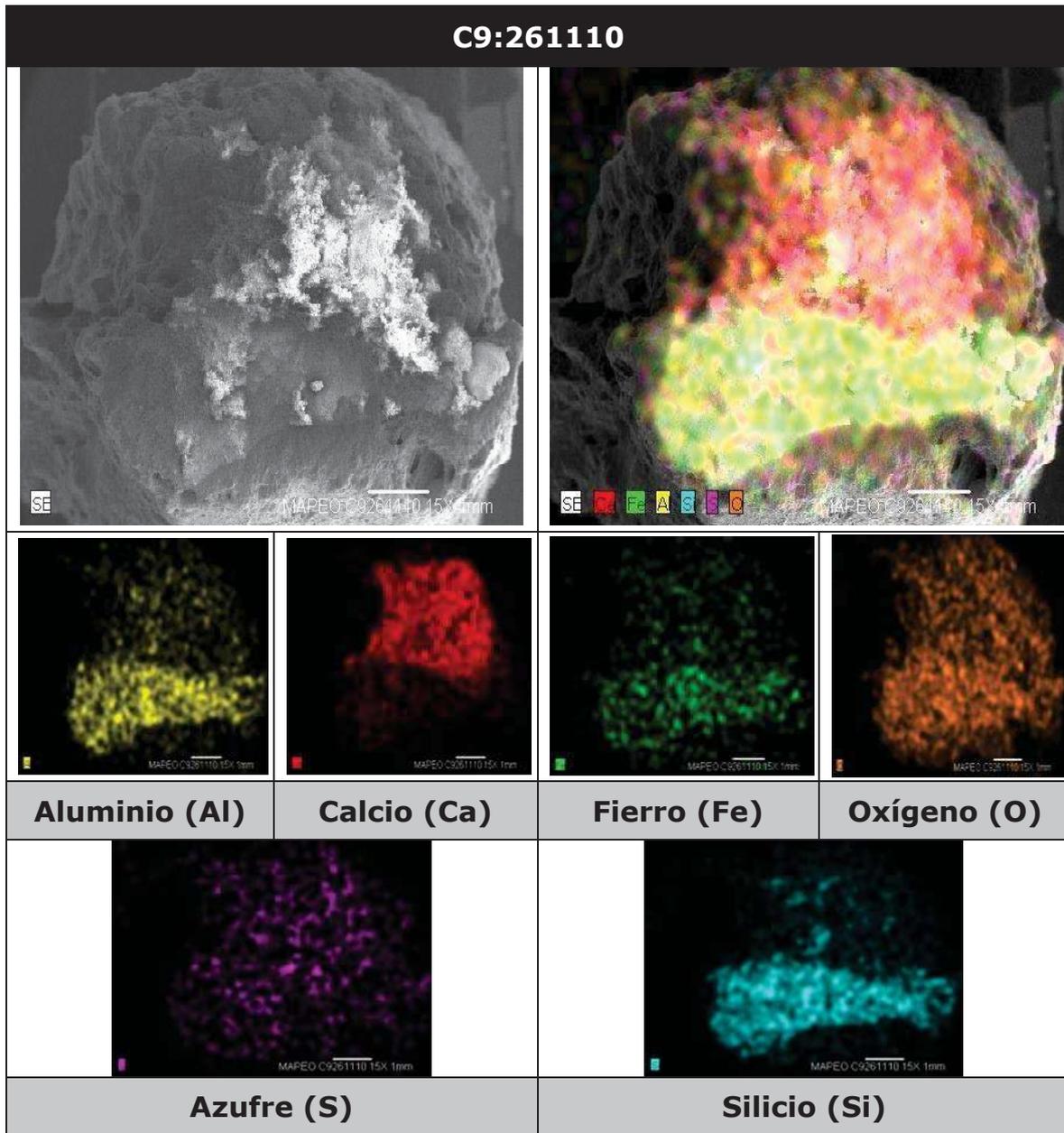


Tabla 7.29. Interfase Ladrillo-Mortero y Mapeo:
Composición 9



Composición 10 (C10:261110).

- 100% Cal Química.
- 2.5% Óxido de Aluminio.
- 2% Aditivo DK12.
- Marmolina Tipo 1. Relación 1:2.75
- Relación Agua-Cemento 0.85

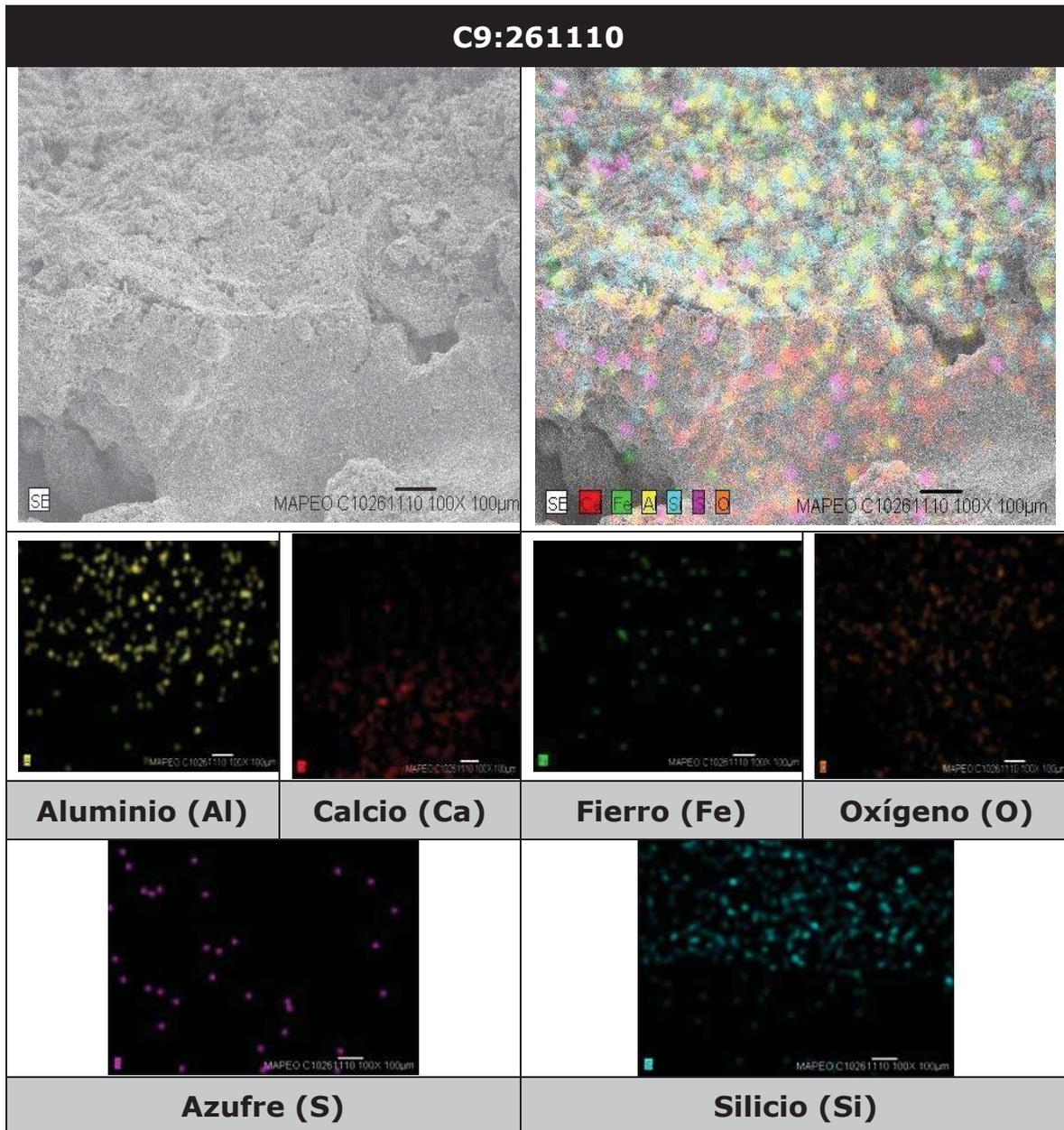


Tabla 7.30. Interfase Ladrillo-Mortero y Mapeo:
Composición 10



Capítulo VIII. Estudio de Factibilidad Económico





CAPÍTULO VIII. ESTUDIO DE FACTIBILIDAD ECONÓMICO

Para el desarrollo de este capítulo se hizo un estudio económico que nos permite establecer la viabilidad del desarrollo de nuevos productos utilizando los materiales que se estudiaron durante el desarrollo de los apartados anteriores. Para ello fue necesario consultar y obtener los precios de los materiales, de acuerdo a lo ofrecido en el mercado.

En primer lugar, se hace una comparación representativa de acuerdo a las cantidades de cada material que se utilizaron para la elaboración de los especímenes que se necesitaron durante el proceso de investigación. Posteriormente, se muestra un análisis más detallado, de acuerdo a las condiciones que se podrían presentar en obra, y así determinar si los gastos de construcción con nuevos materiales son compensados por los beneficios obtenidos.

VIII.1. Muestreo Representativo.

En este apartado, analizaremos los costos que tuvieron los especímenes para cada una de las composiciones utilizadas en la prueba de Compresión Simple en Mamposterías. Para ello, necesitaremos los precios de cada uno de los materiales que se utilizaron, los cuales fueron:

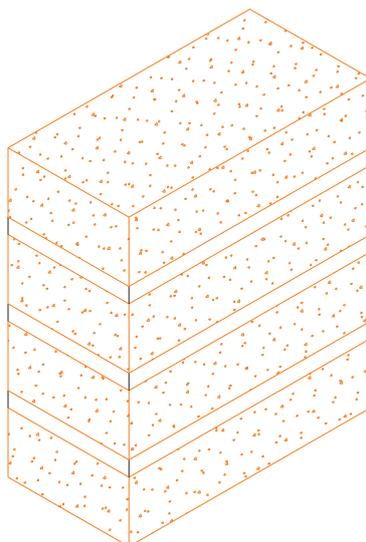


Figura 8.1. Especímenes para Muestreo Representativo



Material	Precio (\$)
Cal Estándar	\$1,250. ⁰⁰ /ton.
Cal Química	\$1,400. ⁰⁰ /ton.
Óxido de Aluminio	\$15,000. ⁰⁰ /ton.
Aditivo DK12	\$15. ⁰⁰ /Kg.
Marmolina Tipo 1	\$2,000. ⁰⁰ /ton.
Plastol 4000	\$100. ⁰⁰ /Kg.
Material	Precio Millar (\$/Millar)
Ladrillos	\$1,500. ⁰⁰

Tabla 8.1. Precio de los Materiales Utilizados

Precio de un espécimen: Composición 1.

Material	Cantidad (Kg.)	Precio/Kg. (\$)	Precio/Material (\$)
Cal estándar	0.800	1.25	1.00
Marmolina Tipo 1	2.200	2.00	4.40
Material	Cantidad (Pza.)	Precio/Pza. (\$)	Precio/Material(\$)
Ladrillo	4	1.50	6.00
Total=			\$11.⁴⁰

Tabla 8.2. Precio total: Composición 1

Precio de un espécimen: Composición 2.

Material	Cantidad (Kg.)	Precio/Kg. (\$)	Precio/Material (\$)
Cal estándar	0.800	1.25	1.00
Marmolina Tipo 1	2.200	2.00	4.40
Plastol 4000	0.012	100.00	1.2
Material	Cantidad (Pza.)	Precio/Pza. (\$)	Precio/Material(\$)
Ladrillo	4	1.50	6.00
Total=			\$12.⁶⁰

Tabla 8.3. Precio total: Composición 2



Precio de un espécimen: Composición 3.

Material	Cantidad (Kg.)	Precio/Kg. (\$)	Precio/Material (\$)
Cal estándar	0.800	1.25	1.00
Óxido de Aluminio	0.020	15.00	0.30
Marmolina Tipo 1	2.200	2.00	4.40
Plastol 4000	0.012	100.00	1.2
Material	Cantidad (Pza.)	Precio/Pza. (\$)	Precio/Material(\$)
Ladrillo	4	1.50	6.00
Total=			\$12.⁹⁰

Tabla 8.4. Precio total: Composición 3

Precio de un espécimen: Composición 4.

Material	Cantidad (Kg.)	Precio/Kg. (\$)	Precio/Material (\$)
Cal Química	0.800	1.40	1.12
Óxido de Aluminio	0.020	15.00	0.30
Marmolina Tipo 1	2.200	2.00	4.40
Aditivo DK12	0.016	15.00	0.24
Material	Cantidad (Pza.)	Precio/Pza. (\$)	Precio/Material(\$)
Ladrillo	4	1.50	6.00
Total=			\$12.⁰⁶

Tabla 8.5. Precio total: Composición 4

Como podemos observar, todas las composiciones incrementaron su costo en comparación con la mezcla estándar, lo cual es lógico tomando en cuenta la inclusión de aditivos como el hiperfluidificante y DK12, sin embargo, los precios no fueron extraordinarios, es decir, siguen siendo precios accesibles.

La composición que tuvo un mayor incremento en el precio fue la No. 3, a la cual se le adicionó Óxido de Aluminio e Hiperfluidificante; aunque dicho aumento no fue muy grande, solamente \$1.50 más que la composición estándar.

Podemos observar que, con los cálculos realizados en las tablas anteriores, establecemos una comparación entre los diferentes morteros de cal que se utilizaron, sin embargo, aún no podemos determinar si el uso de estos productos es viable o no, para ello deben ser analizados y



comparados con su principal competencia en el mercado. Este análisis se muestra en los siguientes apartados.

VIII.2. Comparación con los Productos de Competencia.

Para poder determinar la viabilidad económica de un producto en desarrollo siempre es necesario realizar un estudio de mercado, en él conoceremos a los productos existentes en el área de análisis y que constituyen la principal competencia para el desarrollo de nuestro proyecto. El conocimiento de dichos productos, así como de sus características y comportamiento en obra, nos permitirá realizar una comparación adecuada con las condiciones de uso del nuestro.

En el caso de la cal, los productos con los cuales hemos de competir en el mercado de los materiales de construcción son, principalmente, el cemento y el mortero (cemento de albañilería). Como hemos observado, en la mayoría de las normas establecidas en México, con respecto al diseño estructural, los rangos mínimos permisibles en cuanto a la resistencia de las mezclas, han sido establecidos de acuerdo a las características obtenidas con un concreto de cementos estándar (cemento gris Portland), por ello, la cal generalmente no cumple con las características de calidad requeridas; por lo cual se decidió incorporar aditivos. A continuación se muestra el análisis económico y comparativo de morteros de cal, morteros convencionales y mezclas de cemento Portland.

VIII.2.1. Análisis Económico.

Para poder realizar el análisis económico deseado, necesitamos establecer los materiales y sus precios. A continuación se muestran cada uno de ellos:

Material	Precio (\$)
Cal Estándar	\$1,250. ⁰⁰ /ton.
Cal Química	\$1,400. ⁰⁰ /ton.
Óxido de Aluminio	\$15,000. ⁰⁰ /ton.
Aditivo DK12	\$15. ⁰⁰ /Kg.
Marmolina Tipo 1	\$2,000. ⁰⁰ /ton.
Plastol 4000	\$100. ⁰⁰ /Kg.
Cemento Gris (Tolteca)	\$2,020. ⁰⁰ /ton.



Mortero (Tolteca)	\$1,520. ⁰⁰ /ton.
Material	Precio Millar (\$/Millar)
Ladrillos	\$1,500. ⁰⁰

Tabla 8.6. Precio de Materiales para análisis comparativo:
(Cal, Cemento y Mortero)

Para el análisis se considerará la construcción de un muro de mampostería de tabique rojo recocido, se utilizarán los precios señalados en la tabla anterior, y las dimensiones se señalan en la siguiente figura.

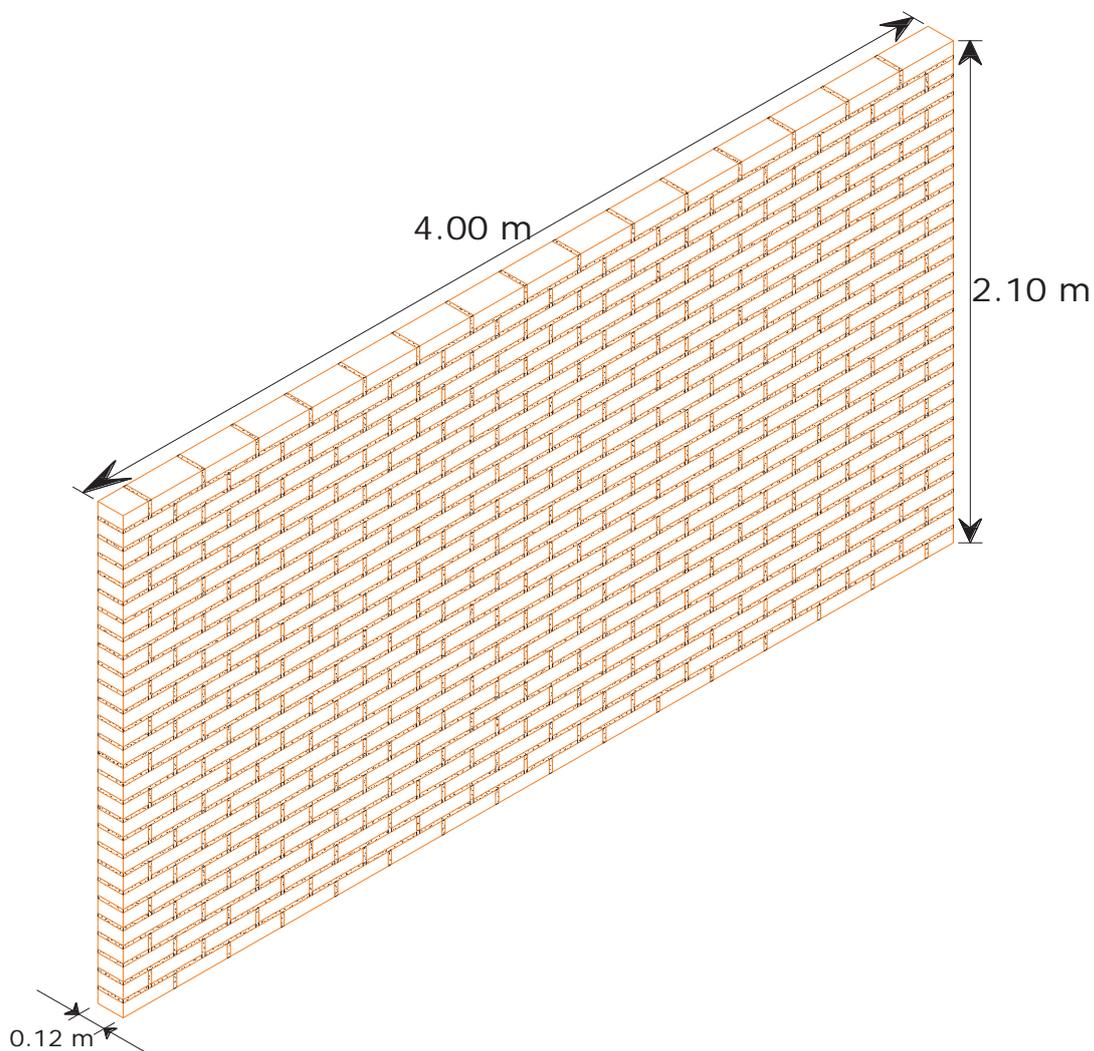


Figura 8.2. Dimensiones de un muro:
Análisis de Factibilidad Económico



Para poder llevar a cabo el cálculo del costo para la construcción de un muro como el que se muestra en la figura anterior, primero debemos hacer el cálculo del costo de un metros cuadrado de muro, de acuerdo al material que se esté utilizando, ya sea cal, cemento o mortero.

A continuación se presentan las tablas en las que se calculó el precio del metro cuadrado de muro, para cada una de las composiciones y cada uno de los materiales.

Nota.- Durante la construcción del muro se considerarán juntas estándar (2 cm.) para todas las composiciones, excepto para aquellas en las que se observó un comportamiento diferente, donde se redujo el espesor de la junta a 1.5 cm.

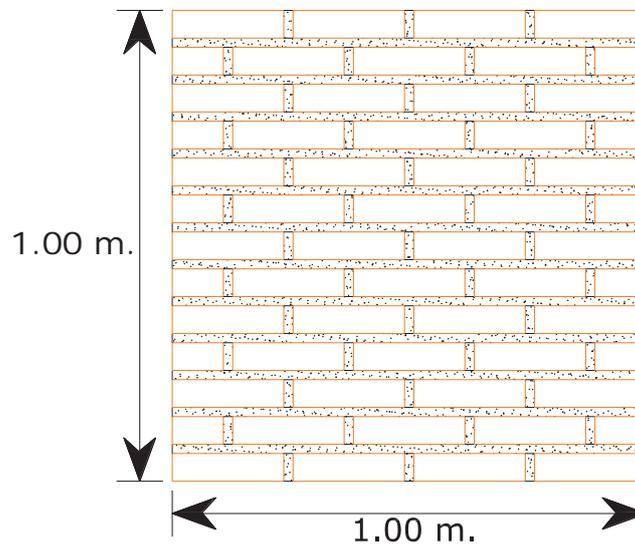


Figura 8.3. Metro Cuadrado de Muro

Precio por Metro Cuadrado de Muro: Composición 1.

Material	Cantidad (Kg.)	Precio/Kg. (\$)	Precio/Material (\$)
Cal estándar	5.600	1.25	7.00
Marmolina Tipo 1	15.400	2.00	30.80
Material	Cantidad (Pza.)	Precio/Pza. (\$)	Precio/Material(\$)
Ladrillo	52	1.50	78.00
Precio/m²=			\$115.⁸⁰

Tabla 8.7. Precio por Metro Cuadrado: Composición 1



Precio por Metro Cuadrado de Muro: Composición 2.

Material	Cantidad (Kg.)	Precio/Kg. (\$)	Precio/Material (\$)
Cal estándar	5.600	1.25	7.00
Marmolina Tipo 1	15.400	2.00	30.80
Plastol 4000	0.084	100.00	8.40
Material	Cantidad (Pza.)	Precio/Pza. (\$)	Precio/Material(\$)
Ladrillo	52	1.50	78.00
Precio/m²=			\$124.²⁰

Tabla 8.8. Precio por Metro Cuadrado: Composición 2

Precio por Metro Cuadrado de Muro: Composición 3.

Material	Cantidad (Kg.)	Precio/Kg. (\$)	Precio/Material (\$)
Cal estándar	5.600	1.25	7.00
Óxido de Aluminio	0.140	15.00	2.10
Marmolina Tipo 1	15.400	2.00	30.80
Plastol 4000	0.084	100.00	8.40
Material	Cantidad (Pza.)	Precio/Pza. (\$)	Precio/Material(\$)
Ladrillo	52	1.50	78.00
Precio/m²=			\$126.³⁰

Tabla 8.9. Precio por Metro Cuadrado: Composición 3

Precio por Metro Cuadrado de Muro: Composición 4.

Material	Cantidad (Kg.)	Precio/Kg. (\$)	Precio/Material (\$)
Cal química	5.600	1.40	7.84
Óxido de Aluminio	0.140	15.00	2.10
Marmolina Tipo 1	15.400	2.00	30.80
Aditivo DK12	0.112	15.00	1.68
Material	Cantidad (Pza.)	Precio/Pza. (\$)	Precio/Material(\$)
Ladrillo	52	1.50	78.00
Precio/m²=			\$120.⁴²

Tabla 8.10. Precio por Metro Cuadrado: Composición 4



Precio por Metro Cuadrado de Muro: Cemento Gris Tolteca.

Material	Cantidad (Kg.)	Precio/Kg. (\$)	Precio/Material (\$)
Cemento Gris	5.600	2.02	11.31
Marmolina Tipo 1	15.400	2.00	30.80
Material	Cantidad (Pza.)	Precio/Pza. (\$)	Precio/Material(\$)
Ladrillo	52	1.50	78.00
Precio/m²=			\$120.¹¹

Tabla 8.11. Precio por Metro Cuadrado: Cemento Gris

Precio por Metro Cuadrado de Muro: Mortero Tolteca.

Material	Cantidad (Kg.)	Precio/Kg. (\$)	Precio/Material (\$)
Mortero	5.600	1.52	8.51
Marmolina Tipo 1	15.400	2.00	30.80
Material	Cantidad (Pza.)	Precio/Pza. (\$)	Precio/Material(\$)
Ladrillo	52	1.50	78.00
Precio/m²=			\$117.³¹

Tabla 8.12. Precio por Metro Cuadrado: Mortero

VIII.2.2. Comparación de Costos.

Una vez que tenemos el precio por metro cuadrado de muro, simplemente debemos calcular el área total del muro y multiplicarla por el precio obtenido en las tablas anteriores para cada composición.

Es importante señalar que, en las composiciones en las cuales se incluyó el aditivo hiperfluidificante, por las características de plasticidad que se obtuvieron, se produjo una contracción en la mezcla, lo que generó una reducción en el espesor de la junta. Dicha reducción no influye en la cantidad de material necesario para la construcción de un metro cuadrado de muro, en comparación con el resto de las mezclas. Sin embargo, si tomamos en cuenta las dimensiones que se presentaron en la Figura 8.2, tenemos que:

- Altura del Muro: 2.10 metros.
- Hiladas necesarias con juntas de 2.0 cm. utilizadas en todas las composiciones, excepto en aquellas que se utilizó Plastol 4000: 27 hiladas.



- Hiladas necesarias para las composiciones en las que se utilizó Plastol 4000, donde se tuvieron juntas de 1.5 cm.: 28 hiladas.
- Largo del Muro: 4.00 metros.
- Número de ladrillos necesarios por hilada: Aprox. 16 ladrillos.
- Área Total: 8.40 m².

Como podemos ver, se requiere por lo menos una hilada más para aquellas composiciones en las que se incluyó hiperfluidificante, lo cual incrementará el costo de construcción por el empleo de una mayor cantidad de materiales. A continuación se muestran los resultados finales en cuanto al costo de construcción del muro mostrado en la Figura 8.2.

Cantidades Extra de Material necesario para Las composición 2: Espesor de Junta= 1.5cm.			
Material	Cantidad (Kg.)	Precio/Kg. (\$)	Precio/Material (\$)
Cal estándar	3.850	1.25	4.81
Marmolina Tipo 1	10.590	2.00	21.18
Plastol 4000	0.058	100.00	5.80
Material	Cantidad (Pza.)	Precio/Pza. (\$)	Precio/Material(\$)
Ladrillo	16	1.50	24.00
Precio Adicional por reducción de Juntas (1.5cm.)=			\$55.⁷⁹

Tabla 8.13. Precio por Metro Cuadrado: Composición 2

Por lo tanto, el incremento en el precio por metro cuadrado, para la composición número 2 será:

$$\text{Incremento} = \frac{\$55.79}{8.4\text{m}^2} = \$6.64/\text{m}^2$$

Y el costo por metro cuadrado para la composición 2 será:

$$\text{Costo}/\text{m}^2 = 124.2 + 6.64 = \$130.84/\text{m}^2$$

Entonces, el costo de construcción de un muro de 4*2.10 metros, será:

Composición	Precio/m² (\$)	Área Total (m²)	Costo Total (\$)
Composición 1: Cal Estándar	115.80	8.4	972.⁷²
Composición 2: Cal+Plastol 4000	130.84	8.4	1,099.⁰⁶
Composición 3:	126.30	8.4	1,060.⁹²



Cal+Plastol 4000+Alúmina			
Composición 4: Cal Química+DK12+Alúmina	120.42	8.4	1,011.⁵³
Mezcla con Cemento Gris Tolteca	120.11	8.4	1,008.⁹²
Mezcla con Mortero Tolteca	117.31	8.4	985.⁴⁰

Tabla 8.14. Costo Total de Construcción

De acuerdo con lo observado en la tabla anterior, podemos establecer que, los precios que se tienen en morteros de cal utilizando aditivos son muy similares a los que se tienen en mezclas de cemento y mortero, sin embargo, si analizamos las condiciones de uso y las características de resistencia de cada una de las mezclas podremos observar que, la cal no presenta propiedades similares a las del cemento o el mortero, por el contrario, la resistencia es muy baja como pudimos observar en los capítulos de análisis que se presentaron anteriormente.

Por lo tanto, el uso de estos materiales no puede competir con el cemento o el mortero cuando se requiere su uso en elementos estructurales, sin embargo, pueden ser utilizados como componentes en unidades que no requieran mucha capacidad de carga, ya que presentan otras características aceptables, como es la adherencia.



Capítulo IX. Conclusiones





CAPÍTULO IX.

CONCLUSIONES

Una vez terminada la investigación correspondiente, y habiendo realizado todas las pruebas correspondientes podemos llegar a ciertas conclusiones, las cuales son:

- A lo largo de la historia, la cal ha sido uno de los cementantes más utilizados, por lo que podemos encontrar construcciones antiguas elaboradas con este material. La cal nos ha demostrado su gran valía con el paso del tiempo, manteniéndose como el producto natural que más aplicaciones tiene, no solo en el campo de la construcción, sino en muchas otras áreas, convirtiéndose en parte esencial en diversos procesos de producción o en el mejoramiento de las características de otros productos.
- En la actualidad, el uso de la cal ha venido a menos, esto debido a la aparición de nuevos productos en el mercado, con características de resistencia mucho mejores que las de la cal. Sin embargo, uno de los factores que más ha influido para que se deje de usar este producto es la presencia de ciertos mitos acerca de posibles perjuicios que se tienen cuando usamos la cal. Por ejemplo, se tiene la idea de que la cal quema la piel, lo cual es totalmente falso, aunque el usuario no lo sabe, evitando su uso por dicha razón.
- Durante el proceso de investigación y de elaboración del Marco Teórico, pudimos determinar que, en México, la principal razón por la cual la cal ha dejado de ser un producto de gran demanda es debido a que, las normas que nos rigen actualmente en materia de construcción establecen ciertos valores de resistencia, los cuales no pueden ser alcanzados por estos productos. Desde que ocurrió el terremoto en la Ciudad de México, en el año de 1985, los diseñadores de estructuras se dieron a la tarea de elaborar normas de diseño que permitieran tener un margen de seguridad mucho mayor de lo que se tenía anteriormente. Fue entonces cuando surgieron las Normas Técnicas Complementarias del Distrito Federal, las cuales contienen varias secciones en las que se establecen las condiciones de construcción y diseño para diferentes tipos de estructuras (Mamposterías, Estructuras de Concreto, de Acero, Diseño por Sismo, por Viento, etc.). Estas normas han sentado las bases para el desarrollo de Reglamentos Estatales, por lo que las condiciones de diseño son muy semejantes a las establecidas en las Normas Técnicas, es por eso



que en casi todo el territorio Nacional, la cal se ha convertido en un producto que, aunque se conocen sus buenas características, no cumple con los requerimientos de calidad necesarios para su uso en la construcción. Es por ello también, que los miembros de la industria de la cal, se han dado a la tarea de mejorar sus productos o de establecer otros campos de uso.

- La adición de ciertos compuestos, cuando se elaboran morteros de cal, nos permite mejorar las características del mismo, modificando así sus condiciones de uso. Las ventajas más significativas se pudieron observar cuando los morteros fueron sometidos a Compresión, donde las mezclas en las cuales se integró alguno de los aditivos seleccionados, tuvieron una resistencia mucho mayor que la presentada con un mortero de cal convencional, lo cual nos indica que esta investigación va por buen camino, aunque aún falta mucho por desarrollar.
- En la actualidad, el uso de aditivos para el mejoramiento de las mezclas utilizadas en la construcción ha tenido un crecimiento importante. La necesidad de mejorar ciertas características en las mezclas, de acuerdo a las condiciones presentes en una obra, han tenido como consecuencia, el desarrollo de ciertos compuestos (aditivos) que nos permiten obtener o acercarnos a dichas características; por ejemplo, en zonas muy calurosas donde el clima influye en la aceleración del proceso de fraguado, necesitamos la inclusión de un elemento que nos permita retrasar dicho proceso. A pesar del avance que se ha tenido en el área de desarrollo de aditivos, aún no se han desarrollado compuestos que nos permitan mejorar la calidad de la cal, es por ello que este trabajo toma mayor importancia, ya que trata de sentar un precedente para futuras investigaciones con respecto al desarrollo de productos para la obtención de mejores características en la cal.
- Las mejores condiciones obtenidas con la inclusión de aditivos se presentaron en aquellas composiciones en las que se incluyó un hiperfluidificante (Plastol 4000); esto fue debido a que, por las características de plasticidad que proporciona dicho compuesto, los cristales de calcio presente en la mezcla se mantienen más compactos, provocando así que sean menos frágiles que cuando cristalizan en una mezcla de cal convencional; además como ya sabemos, este producto nos permite reducir el agua necesaria para la mezcla, lo cual permite mejorar las características de resistencia. No obstante, se debe mencionar que, aunque con



mejores características, el uso de estas composiciones puede ser restringido debido a que, durante el proceso de mezclado se presentan ciertas características no deseadas. La cal, en un principio se comporta como un material que absorbe toda el agua, provocando una aparente deshidratación de la mezcla, sin embargo, sometiendo la mezcla a un proceso de vibrado, ésta obtiene las características de fluidez y trabajabilidad requeridas. Si en obra se presentan estas características se presentan en la obra, es lógico pensar que los trabajadores asumirán que la mezcla no sirve, por lo que, se requiere que el encargado verifique que el proceso de elaboración sea el adecuado, lo que tiene como consecuencia un incremento en los tiempos de construcción; además el vibrado requerido para obtener una mezcla adecuada también aumenta dicho tiempo.

- Por medio del análisis de la microestructura de los morteros y de la interfase ladrillo-mortero de cal, se pudo observar la forma en que la inclusión de aditivos mejora el acomodo interno en cada composición. Como ya sabemos, la cal, durante su proceso de fraguado, genera la formación de cristales de calcio, los cuales, en general, son muy frágiles debido al acomodo de los mismos; si embargo, con el uso de aditivos, además de la presencia de cristales se pudo observar la formación de un gel que permitía que el calco se mantuviera más compacto y mejorando las características de resistencia del mortero. Por otro lado, se pudo observar también que, la presencia de dicho gel producía mayor plasticidad, que a su vez no permitía que la mezcla penetrara en el ladrillo disminuyendo así la adherencia ladrillo-mortero de cal.
- Con respecto al factor económico se puede determinar que, se obtienen mejores resultados cuando se utilizan mezclas con cemento o mortero, ya que los precios no aumentan mucho en comparación con los morteros de cal y la inclusión de aditivos y, sin embargo, las características de éstas son mucho mejores que cuando se utiliza cal. Sin embargo, se cree que en futuras investigaciones se pueden desarrollar ciertas composiciones cemento-cal, en diferentes proporciones que nos permitan la obtención de mejores condiciones de uso, y que nos ayuden a reducir los costos de construcción; pero esto quedará pendiente para futuros trabajos.



Capítulo X. Referencias





CAPÍTULO X. REFERENCIAS

- Normas Técnicas Complementarias del Distrito Federal. Sección de Diseño de Mamposterías.
- Norma Mexicana NMX-C-061-ONNCCE. "Determinación de la resistencia a Compresión de Cementantes Hidráulicos".
- Norma Mexicana NMC-CH-027-1996. "Industria de la Construcción-Métodos para la verificación de la Máquina de Pruebas"
- David Hume (1688). History of England.
http://www.gutenberg.org/files/19212/19212-h/19212-h.htm#2H_4_0002.
- Croddy, Eric (2002). *Chemical and biological warfare: a comprehensive survey for the concerned citizen*. Springer. p. 128. ISBN 0387950761.
<http://books.google.com/books?id=MQMGhInCvlgC&pg=PA128>.
- http://es.wikipedia.org/wiki/%C3%93xido_de_calcio
- <http://www.chemcosystems.net/>
- <http://www.cheresources.com/quicklime.shtml>
- <http://www.carmeuse.com/page.asp?id=62&langue=EN>
- <http://www.luzrasante.com/el-ciclo-de-la-cal/>
- <http://www.jtbaker.com/msds/englishhtml/c0462.htm>
- <http://www.arqhys.com/construccion/cal-tipos.html>
- http://www.cemexmexico.com/pr/pr_po_ca.html
- <http://www.techosmas.com/mystore/esp/catalogo.php?mode=1&pn=4&id=4>
- <http://www.anfacal.org/espaniol.htm>



- <http://www.contactopyme.gob.mx/guiasempresariales/guias.asp?s=14&guia=91&giro=11&ins=247>
- <http://www.fortunecity.com/campus/hull/661/>
- <http://www.comsacal.com/>
- [http://es.wikipedia.org/wiki/Carbonato de calcio](http://es.wikipedia.org/wiki/Carbonato_de_calcio)
- [http://es.wikipedia.org/wiki/Hidr%C3%B3xido de calcio](http://es.wikipedia.org/wiki/Hidr%C3%B3xido_de_calcio)
- <http://www.eula.be/10.html>
- <http://www.eula.be/178.html#>
- [http://es.wikipedia.org/wiki/Aparejo \(construcci%C3%B3n\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Aparejo_(construcci%C3%B3n))
- <http://es.wikipedia.org/wiki/Al%C3%BAmina>
- <http://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=2515920>
- <http://www.imcyc.com/revistacyt/nov10/posibilidad.htm>
- http://www.smis.org.mx/rsmis/n76/Tena_SMIS_76_2.pdf
- <http://calidra.clicker360.com/wp-content/uploads/pdf/estabilical.pdf>
- <http://www.calmuro.com.mx/>
- www.bertran.com.mx
- <http://www.rebasa.com.mx/galeria/RebEq7.jpg>
- <http://www.eucomex.com.mx>
- U.S. Census Bureau, 2008a, Annual value of construction put in place: U.S. Census Bureau. (Accessed May 9, 2008, at <http://www.census.gov/const/C30/total.pdf>.)