



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE  
SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**

**“EFECTO DEL MUCÍLAGO DE CACTUS OPUNTIA  
ADICIONADO EN MORTEROS DE CAL, EN LA  
ABSORCIÓN CAPILAR POR EL MÉTODO FAGERLUND”**

**TESIS**

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

**PRESENTA:  
ALFREDO ACHA PALOMARES**

**ASESOR DE TESIS:  
M. A. ING. WILFRIDO MARTÍNEZ MOLINA**

**COASESOR DE TESIS:  
DR. ALEJANDRO MANZANO RAMÍREZ**

**MORELIA, MICHOACÁN, MARZO DE 2009**



## CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN	1
1.1.	El nopal pasó de símbolo patrio a vigía del patrimonio	7
2.	MORTEROS	8
2.1.	Definición de Mortero	8
2.1.1.	Clasificación de morteros según el tipo de aglomerante	8
2.1.2.	Clasificación de morteros según el tipo de fraguado	9
2.1.3.	Alteraciones más características de los morteros	10
2.1.4.	Evolución de la fabricación de morteros	11
2.2.	Composición de morteros	12
2.2.1.	Características que debe tener un mortero	13
2.2.2.	Las propiedades de los morteros	13
3.	MATERIALES	14
3.1.	Aglutinantes	14
3.2.	Material inerte	15
3.3.	Líquido de amasado o solvente	17
3.4.	Diseño de mezcla	18
3.5.	Descripción de materiales para las probetas	19
3.5.1.	Cal Apagada	19
3.5.1.1.	Calidad del aglutinante	20
3.5.2.	Ceniza volcánica	21
3.5.2.1.	Calidad del agregado fino: ceniza volcánica	21
3.5.3.	Agregado pétreo fino: arena	22
3.5.3.1.	Calidad del agregado fino: arena	22
3.5.4.	Elaboración del líquido de amasado	23

3.6.	Descripción de las mezclas realizadas	24
3.7.	Agentes agresivos en morteros	25
3.7.1.	Aceleración de deterioro de obras monumentales en ambientes contaminados	25
3.7.2.	Ataque ácido	26
3.7.3.	Dióxido de carbono	28
3.7.4.	Compuestos de azufre	30
3.7.5.	Óxidos de nitrógeno	30
3.7.6.	La costra negra	31
3.7.7.	Partículas en suspensión	31
3.7.8.	Cristalización de sales como mecanismo de deterioro	33
3.7.9.	La colonización biológica	35
3.7.10.	Los suelos	35
4.	POROSIDAD EN MORTEROS	35
4.1.	Técnicas de medida de la porosidad en la pasta de cal, mortero	36
4.1.1.	Porosimetría de mercurio	37
4.1.2.	Adsorción de nitrógeno	38
4.1.3.	Análisis de imágenes	39
4.1.4.	Picnometría y flujo de helio	39
4.1.5.	Colorimetría a baja temperatura	39
4.2.	Relación propiedades - estructura porosa	39
4.3.	Fase acuosa contenida en los poros del mortero	40
4.4.	Variables que influyen en la permeabilidad al agua	40
4.5.	Absorción capilar	41
4.6.	Fundamentos de la absorción capilar	41
4.7.	Métodos para calcular el coeficiente de absorción capilar	44

4.7.1.	Teoría de Kunzel	44
4.8.	Factores que influyen en la absorción capilar	48
4.8.1.	Estructura porosa discontinua del material	48
4.8.2.	Contenido inicial de agua	48
4.8.3.	Temperatura	48
4.8.4.	Fluido absorbido	48
5.	PRUEBAS	49
5.1.	Porosidad	49
5.2.	Ensayo de absorción capilar	50
5.2.1.	Criterios de evaluación de la absorción capilar	62
5.3.	Ensayo de porosidad	62
5.3.1.	Criterios de evaluación	65
6.	RESULTADOS	66
6.1.	Gráficas de esfuerzos de compresión	66
6.2.	Gráficas de esfuerzos de flexión	67
6.3.	Gráficas de esfuerzos de Tensión	69
7.	CONCLUSIONES	73
8.	BIBLIOGRAFÍA	75

## 1. INTRODUCCIÓN

En las primeras etapas de la prehistoria, el hombre primitivo disponía exclusivamente de su cuerpo para desarrollar sus actividades, esta situación prevaleció aún en el paleolítico medio, durante el cual se atestigua el uso del fuego. Al final del periodo paleolítico superior, etapa durante la cual el hombre primitivo desaparece bruscamente y su lugar es ocupado por el hombre moderno, la humanidad realizó grandes progresos culturales y empezó a desarrollar mejores instrumentos para la caza, utilizando algunos materiales disponibles para elaborar utensilios, herramientas y armas, cuya utilidad residía en aumentar la capacidad de trabajo y los recursos defensivos del organismo humano. Un hueso afilado o un fragmento de obsidiana cortaban mejor que las uñas de las manos; una porra de madera o un pedazo de piedra sujeta a un mango de madera o hueso, hacía más daño al golpear que las manos solamente [Rivera, 2002].

Los materiales utilizados en herramientas o armas debían seleccionarse con precaución, buscando los más duros, tenaces y pesados, de esta forma los huesos más útiles resaltaban por ser los más largos y compactos; las rocas preferidas eran pedernales, las cuarcitas, las calizas compactadas, los vidrios volcánicos y algunas variedades de rocas ígneas. En un principio empleaban la piedra prácticamente en su forma natural, después le daban la forma adecuada labrando y puliendo los fragmentos, para mejorar sus características y obtener puntas de lanza, rascadores, etc. [Yepez, 2008].

Los materiales que utilizaban como protección contra la intemperie, resultaban igualmente primitivos. Si el grupo era nómada, se transportaban pieles de animales y piezas ligeras de madera para armar sus alojamientos temporales. La existencia de las cuevas o grutas resolvía sus necesidades por el tiempo necesario. Los bosques brindaban lo indispensable para la construcción de refugios de madera, ramas y hojas, con frecuencia los combinaban con lodo.

El descubrimiento de la agricultura, marcó nuevos rumbos a las actividades de grupos errantes, ya que era necesaria la presencia de los labriegos primitivos en las siembras, por lo menos durante el tiempo necesario para cuidar los cultivos y levantar las cosechas. Si estas resultaban abundantes, se aseguraba la alimentación y por consiguiente ya no se buscaba la misma, y así podía establecerse en el lugar, si satisfacía otras necesidades como el agua, madera para combustible y otros materiales [Yepez, 2008].

Las habitaciones y almacenes debían elaborarse como alojamientos y obras de defensa. Se protegía así al individuo y sus riquezas (alimentos). Se usaba cualquier material disponible en el lugar para edificar muros y techos; se ensayaba con troncos y arboles jóvenes, también se combinaba las ramas de los arbustos con lodo. Se probaba la arcilla moldeada y seca, también los fragmento de piedra [Ruelas, 1990].

En el periodo neolítico el hombre se hizo sedentario y comenzaron a aparecer los primeros refugios rudimentarios en diferentes partes del mundo, prueba de ello son los numerosos restos de monumentos funerarios y cavernas artificiales que aún existen, donde emplearon roca, madera y lodo como material de construcción, también aprendieron a utilizar el fuego para calentar bloques de piedra con el fin de facilitar su trabajo, para alterar el color de los pigmentos de los minerales y cocer figuras de arcilla [Miranda, 1972].

Es así como comienza el avance del hombre por buscar nuevos y mejores materiales para la construcción de obras adecuadas a sus propósitos, agradables a la vista y capaces de provocar un valor estético, perfeccionando los materiales y las técnicas constructivas. Las construcciones monumentales (pirámides) de los egipcios, tanto civiles como religiosos de grandes dimensiones que se distinguían por medio de una mastaba (banco de adobe) de planta rectangular con muros de talud, que evolucionó a la pirámide escalonada y más tarde a la pirámide de caras planas, construidos a base de

bloques colosales de piedra caliza y granito nos dan una vista, a los avances que fue teniendo la raza humana, en el uso de los materiales para la construcción de sus obras.

Periodo antiguo, Mesopotamia 6000 a.C. Durante esta etapa, las cales aéreas eran apagadas y mezcladas con tierras, dando origen a morteros que eran utilizados en los aplanados. En Grecia (2000 a.C.) las cales apagadas se mezclaban con “tierras de Santorini” para producir morteros que eran utilizados en la pavimentación.

Al inicio del siglo III a.C. en Roma, comenzó a generalizarse el empleo de mortero de cal-arena, por influencia de Grecia. Vitrubio, arquitecto e ingeniero romano, constructor en la época de l Emperador Cesar Augusto, escribió un tratado de arquitectura en 10 libros en papel pergamino, su concepto de la arquitectura es el mismo expuesto antes por Platón que en su tomo II cita “... la cal debe provenir del calcinado de la piedra caliza, ya suave, ya dura, pero necesariamente blanca. La cal fabricada con piedra de grano fino, del tipo más duro, resultará buena para las partes estructurales.

La cal de piedras porosas servirá como estuco, la proporción para arena excavada de banco será de tres partes de arena y una de cal; si se usare arena de río o arena de playa marina, se usarán dos partes de arena y una de cal...”, esto mismo, actualmente ha sido usado con éxito como argamasa de mamposterías naturales y artificiales [Yepez, 2008].

Los romanos propagaron el uso del mortero de cal y lograron perfeccionarlo adicionándole puzolanas [Callebaut et al, 2001], produciendo su carbonatación sin necesidad de exposición atmosférica y al contacto con el agua, dando lugar a un endurecimiento en menor tiempo [Meli, 1971].

Entre el 600 y el 800 d. C. en América los Incas desarrollaron la producción de cal para morteros y revocos a partir de la caliza y de conchas.

En Montalbán, Oaxaca, México se empleó el mortero de cal en el preclásico superior (600 a.C. a 100 d.C.) en pisos [Alonso et al, 2002]: los mayas también lo emplearon es sus estucos murales [Alonso et al, 2002].

Los naturales Mexicanos ante la imposibilidad de calcinar totalmente las calizas idearon la adición de aditivos y/o fibras para mejorar la resistencia mecánica de los morteros.

En 1549 en Morelia, se construyó el primer edificio de cal y canto (mampostería), el convento de San Miguel y en 1550 el Virrey ordenó se situaran unas calderas al norte del valle de Guayangareo, cerca de Cuitzeo para la calcinación de la cal [Bravo, 1991].

El nopal es originario del continente americano; se le encuentra distribuido desde el Canadá hasta la Argentina y perfectamente en todas las zonas áridas y semiáridas. Y se cultiva en más de 30 países. Dadas las características morfológicas y fisiológicas que presenta esta planta, le permite soportar condiciones ambientales desde escasa precipitación hasta altas y bajas temperaturas.

La composición química del nopal y en general de las cactáceas, varía en distintas especies y también dentro de la misma especie. El medio ambiente, la humedad, el tipo de nutrientes del suelo, el grado de contaminación, son los orígenes del contenido de cenizas, calcio, hierro, cobre, fósforo, magnesio y sílice; proteínas en base húmeda, carbohidratos [Granados, 1991]. Los cactus son tan importantes para nosotros los mexicanos que incluso forman parte de nuestra bandera.

El nopal requiere como condiciones para su producción una temperatura media anual entre los 18 a 25 °C; las temperaturas extremas que soporta y que pueden limitar su producción e incluso la sobrevivencia de la planta en tiempos prolongados es de 45 °C la máxima y de -2 °C la mínima, requiriendo de terrenos con pendientes menores al tres por ciento y bien drenadas [Flores, 2004].

México ha sido un centro de establecimiento y diferenciación muy importante para esta familia de plantas, encontrándose una gran cantidad de endemismos y una variación increíble de formas, adaptaciones y tipos biológicos, acordes con la gran diversidad climática del país [Mandujano, 2006].

Granados (1999) cita la teoría mas aceptada sobre el origen de las cactáceas que es la de Buxbaum, que establece que en formas ancestrales fueron plantas foliadas que vivieron en territorios emergidos del Caribe y que actualmente están extinguidas. Plantas mesófilas que a finales del terciario habitaban regiones con climas subtropicales más o menos cálidos húmedos y que generalmente fueron adquiriendo sus características xerófilas, al ir disminuyendo la humedad y formándose los desiertos.

La importancia de estas especies en la vida de diversas civilizaciones y tribus de México quedó manifiesta en sus códices; como alimento, para sus usos medicinales y otros usos, como representaciones simbólicas y en ceremonias simbólicas [Granados 1999].

Existen alrededor de 100 especies principalmente del género *Opuntia*, del cual se obtienen frutos comestibles y su cultivo se logra en terrenos áridos. Mexico se considera centro del origen genético del género *Opuntia* [Pimienta-Barrios, 1994].

Los aztecas llamaban al nopal *nochtli* o *nopalli*. Es un arbusto que forma parte de la familia de las cactáceas, que conforman alrededor de mil seiscientas especies en 122 géneros. El nombre cactus se deriva del griego *kaktos*, genero descrito por Carlos Linneo.

Los más serios procesos de deterioro, que afectan a los materiales de edificación y restauración, son los debidos al movimiento del agua dentro del material. La cantidad de agua absorbida, la velocidad con que el agua puede desplazarse en el material, el tamaño de los espacios dónde puede guardarse. Son importantes parámetros que determinan el grado de deterioro [Winkler, 1997].

Estos parámetros dependen particularmente de las condiciones externas, pero estrechamente relacionadas con el espacio del poro, del material en cuestión. La expresión espacio-poro es usada para resumir todas las propiedades de los espacios vacíos en un material sólido: la cantidad de espacios, su tamaño, la distribución de los tamaños, la conectividad entre estos.

Existen varios métodos para la examinación y caracterización de esas propiedades pero su eficacia muchas veces depende del material mismo [Kovacs et al, 2008].

El estudio de la absorción de agua en materiales se comenzó en la década de los años 70, siguiendo las directrices marcadas por los estudios de física del suelo. De este modo, la teoría de flujo insaturado, en la cual la absorción desempeña un papel importante, se empezó a aplicar a concretos y hormigones. Actualmente, se ha encontrado que los ensayos de absorción capilar son reproducibles y que se obtienen resultados coherentes con la composición y la historia del curado.

La absorción de agua tiene una especial importancia en propiedades que afectan a la durabilidad de morteros y concretos tales como: resistencia, penetración de dióxido de carbono y sulfatos entre otros.

Los efectos que la contaminación atmosférica produce sobre los materiales, con los que están contruidos los monumentos, tiene importantes repercusiones a nivel social, ya que producen daños irreparables que provocan pérdidas de parte de nuestra historia, también lleva consigo un coste económico importante al generar una disminución del valor patrimonial del edificio y ocasionar gastos elevados de mantenimiento en sus fachadas.

La contaminación atmosférica es un agente de deterioro de los materiales, y ha existido desde tiempos antiguos [Fort, 2007].

El centro histórico de la ciudad de Morelia, Michoacán, México, es un ser vivo con personalidad propia, en él está la ciudad [Yepez, 2008].

Catedrales y templos correspondieron a una ideología religiosa; los palacios a un estatus político social; las casas a una condición de vida. Cada piedra, mosaico o ladrillo expresa las costumbres y los sentimientos que lo que ahí vivimos, por lo que nuestra generación es un eslabón más en la construcción de la ciudad [Yepez, 2008].

### 1.1. EL NOPAL PASÓ DE SÍMBOLO PATRIO A VIGÍA DEL PATRIMONIO [Yepez, 2008].

El nopal, la planta cactácea símbolo patrio de México y parte esencial de la dieta de los mexicanos, se ha revelado en excelente conservante del patrimonio arqueológico mexicano.

La sustancia viscosa albergada en el interior de la hoja de este cactus comestible, que ocupa un lugar privilegiado en el escudo y bandera de México, se utiliza en innumerables prospecciones para conservar restos arqueológicos.

“Con el nopal se ha logrado una sustancia fácil de manipular, que no cambia el color de la superficie en la que se aplica”. Algunos de estos edificios restaurados con esta técnica son la Parroquia de San Juan Bautista en Tiripetio, Morelia Michoacán, el Templo de San Nicolás Tolentino en Chucandiro, Morelia Michoacán [Bedolla, 2008].

Este exitoso precedente ha extendido el uso del extracto de nopal a otros edificios históricos, como uno de los palacios ubicados en las pirámides arqueológicas de Teotihuacán, en las cercanías de la capital mexicana, o en el recinto religioso de Ixtapalapa, en el sur de esta metrópolis.

Para elaborar el compuesto con el que se restauran los edificios es necesario deshidratar, calentar y fermentar las hojas de la cactácea en un proceso que se prolonga más de un mes.

“Las mejores hojas son las viejas, aquellas que tienen más de 10 años, pues son las que presentan un mejor mucílago”.

El nopal tiene además amplias perspectivas de crecimiento comercial debido a sus cualidades medicinales, farmacéuticas, alimenticias y para el forraje animal.

## 2. MORTEROS

### 2.1. DEFINICIÓN DE MORTERO

La palabra mortero se deriva del latín Mortarius, que es el nombre que se le dió “al caldero que se usó para cocer la cal” [Rivera, 2002].

Es un material plástico, el cual es una mezcla de arena, algún aglutinante, como la cal, un líquido de amasado, como el agua y en ocasiones un aditivo, que al unirse forman una masa pastosa y moldeable que se endurece en un tiempo aproximado de 24 horas ya sea en el aire o en el agua, formando así una roca artificial, cuyas características y calidades varían según sea necesario (resistencia, forma, tamaño, densidad, porosidad, color, textura, etc.). El producto obtenido debe ser trabajable capaz de unir mampuestos (ladrillos, bloques de adocreto) entre sí. El mortero es un material que usamos en la albañilería.

#### 2.1.1. SEGÚN EL TIPO DE AGLOMERANTE USADO TENEMOS TRES TIPOS DE MORTEROS

- a) Morteros de cal.- Los morteros de cal contienen como aglomerante principal la cal. Compuesto que se obtiene por calcinación de la roca caliza. Existen varios tipos de cales en el mercado que no debemos confundir: Óxido de calcio o cal viva, hidróxido de calcio o cal apagada, Cal fraguada o carbonato de calcio, las que se describirán más adelante. Los morteros en base al tipo de cal, hidráulica o hidratada:

1.-El mortero de cal hidráulica se clasifica como mortero químico hidráulico pues endurece por medio de una reacción química, fragúa en lugares húmedos y en contacto con agua disminuye su tiempo de fraguado, debido a la presencia de

silicatos y aluminatos de cal, que dan la característica hidráulica a los morteros, su resistencia está vinculada directamente con el agua de mezclado [Alonso et al, 2002].

2.-El mortero de cal hidratada es un mortero químico aéreo, pues endurece gracias a una reacción química y a la intemperie. El fraguado no se da en lugares húmedos ni en presencia de agua, la dosificación es determinante en su elaboración, pues al presentar mayores contracciones por la evaporación del agua de amasado en los morteros de cal hidráulica que los morteros de cal hidráulica, debe emplearse un árido que absorba los cambios volumétricos por temperatura y que favorezcan el incremento de  $\text{CO}_2$ , para que se carbonate el hidróxido de carbonato del interior; proceso muy lento que puede durar meses y años [Carbonell, 1993].

- b) Morteros de tierra o barro.- Los morteros de barro o tierra como su nombre lo indica, poseen una arcilla como aglomerante principal. Es un tipo de mortero común en construcciones populares o artesanales actualmente, a la cual se le añadía un poco de cal con el fin de ser más consistente el mortero final.
- c) Morteros de cemento portland o hormigón.- Este tipo de mortero tiene el cemento portland o sus derivados como aglomerante.
- d) Mortero bituminoso. Se emplea bitumen (asfalto, hidrocarburo) en su elaboración.

#### 2.1.2. POR EL TIPO DE FRAGUADO, LOS MORTEROS PUEDEN CLASIFICARSE COMO:

- a) Mortero físico. El fraguado se da sin recursos químicos, se lleva a cabo en morteros de barro, de suelo refractario, asfaltos y resinas.

- b) Mortero químico. El fraguado se lleva a cabo por medio de una reacción química, por ejemplo los morteros de cal, cemento, yeso y mortero comercial.

De acuerdo con su origen, los morteros pueden ser premezclados en planta, premezclados secos, o elaborados en obra. El mortero puede tener funcionamiento estructural, o no tenerla.

Varios morteros con la misma relación 1:n y con igual manejabilidad, pueden arrojar diferentes resistencia a compresión a los 28 días, en razón de la arena utilizada [Salamanca, 1984].

Los morteros de cal, junto con los morteros de barro y yeso, han sido uno de los materiales más utilizados, en todas las culturas a lo largo de la historia, debido a sus cualidades altamente protectoras y a sus infinitas posibilidades de acabado, textura y color. Los agentes de alteración de los morteros como se describirán en capítulos siguientes son: las sales, la colonización biológica y presiones mecánicas entre otros.

### 2.1.3. LAS ALTERACIONES MÁS CARACTERÍSTICAS DE LOS MORTEROS SON LAS SIGUIENTES:

- a) Fisuración.- Definimos a una fisura como una discontinuidad en la superficie del mortero sin que esta discontinuidad implique una separación cuantitativa de ambas partes.
- b) Fracturación.- Es una discontinuidad en la superficie de un mortero donde se evidencia una separación cuantitativa de ambas partes.
- c) Fragmentación.- Cuando existe una separación total de porciones de su volumen. Las fisuras, fracturas y fragmentaciones son originadas por agentes que imprimen una fuerza o presión sobre la superficie del mortero, mayor a sus propiedades de flexión, tensión o compresión.

- d) Pulverización.- Es la pérdida de adhesión del árido y el aglomerante desprendiéndose de forma espontánea o con ayuda mecánica. La pulverización está asociada a ciclos de cristalización de sales de tipo cloruro.
- e) Alteraciones cromáticas superficiales.- Corresponden a un cambio de color de la superficie de los materiales. Cabe mencionar dos situaciones:
- e.1.- Envejecimiento natural de los materiales que se corresponde con la formación de una pátina constituida por la alteración de los materiales que se constituye la superficie de la roca.
- e.2.- Pátinas artificiales intencionadas, son pátinas que aportan una cierta coloración a la superficie original motivada por la presencia de un pigmento o tinte. Las pátinas artificiales constituyen un elemento decorativo más, y en muchos casos son aplicadas durante la construcción del edificio.
- f) Grafitis o pinturas.- Intencionadas o fortuitas constituyen un daño estético sobre los morteros o elementos arquitectónicos constituidos con este material.

#### 2.1.4. EVOLUCIÓN DE LA FABRICACIÓN DE MORTEROS

- Primeras construcciones de mampostera elaboradas con piedras y mortero de barro.
- Utilización de morteros de arcilla.
- Descubrimiento de la cal apagada hecha a partir de la cal viva para elaboración de morteros.
- Morteros de cal y arena usados de la aparición del cemento Pórtland a mediados del siglo XIX; son morteros convencionales de baja trabajabilidad, pero de excelente resistencia a la compresión y fraguado rápido.
- Morteros modernos elaborados con cal, arena y cemento Pórtland, beneficiándose de las propiedades de cada uno de los componentes.

## 2.2. COMPOSICIÓN DE MORTEROS

La composición general de los morteros es básicamente la misma, ya que todos los morteros satisfacen las siguientes propiedades:

MORTERO = AGLUTINANTE + MATERIAL ÁRIDO + LÍQUIDO DE AMASADO O SOLVENTE

Más generalmente se puede describir de la siguiente manera Tabla 1 [Artigas, 2002]:

**Tabla 1: Resumen de la composición de un mortero [Artigas, 2002].**

	FASES	COMPONENTES
MORTERO	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PASTA</li> </ul>	AGLOMERANTE
		AGUA
		ADITIVOS y ADICIONES ACTIVAS
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• AGREGADO FINO</li> </ul>	ARENA
		Aire incorporado naturalmente
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• AIRE</li> </ul>	Aire incorporado intencionalmente

En lo que varían los morteros es en las propiedades de cada material componente del mortero, el uso al que se ha destinado, los materiales utilizados y disponibles, el presupuesto económico y otros factores presentes en obra, la dosificación aglutinante-agregado, las características y granulometría del material inerte y de la calidad y cantidad del líquido de amasado. Por lo cual se explica en que consiste cada uno de los materiales que componen un mortero. Además variables como: la preparación de la cal, su composición y frescura, la minuciosidad de la mezcla [Aguilar, 2005].

### 2.2.1. LAS CARACTERÍSTICAS QUE DEBE DE TENER UN MORTERO SON LAS SIGUIENTES:

a) Plasticidad.

Propiedad del mortero fresco de la que depende la mayor o menor aptitud para poder aplicarlos y rellenar completamente las juntas. De la plasticidad depende lograr una buena unión entre los elementos constructivos cuando colocamos mampuestos así como disminuir la penetración del agua en los cerramientos terminados [28].

b) Resistencia a la compresión.

Es la propiedad más indicativa del comportamiento del mortero, la resistencia debe ser lo más elevada posible aunque es recomendable que sea inferior a los elementos de albañilería que va a unir [28].

c) Adherencia.

La adherencia puede entenderse debido a la penetración de la pasta del mortero en el elemento de albañilería-mampuesto. Le proporciona la capacidad de absorber tensiones normales o tangenciales a la superficie de la interface mortero/elemento de albañilería. Los mecanismos de la adherencia actúan en las fases de mortero fresco y del mortero endurecido, tienen que ver con la reología de la pasta en estado fresco. Influye en la naturaleza de la base: porosidad, rugosidad [28].

### 2.2.2. LAS PROPIEDADES DE LOS MORTEROS SE DIVIDEN EN DOS GRUPOS BIEN DEFINIDOS.

- 1.- Las propiedades en estado fresco entendiéndose en ellas las que los hacen trabajable, deformable plásticamente bajo la acción de pequeños esfuerzos [28].
- 2.- Las propiedades mecánicas que se adquieren en estado endurecido cuando tiene la edad necesaria para adquirir resistencia [28].

El mortero de cal endurece por secado y carbonatación, este proceso es lento y avanza desde la superficie hacia adentro de la masa. En ambiente húmedo se retrasa el secado.

### 3. MATERIALES

#### 3.1. AGLUTINANTES

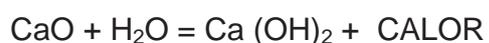
Los aglutinantes son materiales que mezclados con agua o algún solvente se hacen plásticos y al endurecer logran alcanzar un grado de resistencia mecánica, puede ser cal, cemento, yeso, arcilla, entre otros, sustancias o materiales que sirven para aglomerar, adherir, unir. De acuerdo con sus características proporcionan al mortero: resistencia, tiempo de fraguado, durabilidad y economía diferentes, como los aglutinantes puros (aparte del yeso de estuco) presentan cambios volumétricos, se agrietan durante el endurecimiento, por lo consiguiente habrá que mezclarlos con arenas a porcentajes determinados para proporcionarles estabilidad volumétrica [Rivera, 2002].

Cales.- Pueden ser aéreas o hidráulicas según las características de su fraguado.

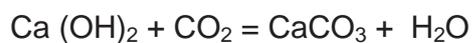
Proceso de producción y utilización de las cales aéreas.



CALCINACIÓN



HIDRATACIÓN o APAGADO



RECARBONATACIÓN

Origen: la materia prima para la fabricación de la cal es la piedra caliza que cuando es pura está enteramente constituida enteramente por carbonato de calcio y al ser calcinada dá origen a las cales aéreas. Cuando presenta impurezas arcillosas es la roca adecuada para la obtención de las cales hidráulicas.

La piedra sufre un proceso de preparación para la cocción. Se tritura cociéndose luego hasta una temperatura del orden de aproximadamente de 1000 °C (calcinación) que es la temperatura a la que se produce la disociación del óxido de calcio y el anhídrido carbónico.

La etapa posterior para su utilización es el apagado de la cal, mediante el que se combina el óxido de calcio con el agua dando lugar al hidróxido de calcio, desprendiendo vapor y aumento de volumen. Cuando el agua añadida es la indispensable para la formación del hidróxido se obtiene un producto pulverulento que recibe el nombre de cal en polvo. Si se sigue agregando agua se obtiene la cal en pasta.

### 3.2. MATERIAL INERTE

El 100% de los concretos y morteros que se elaboran en México ocupan para su fabricación agregados que pueden ser obtenidos de dos fuentes: en depósitos de origen natural (ríos, playas, bancos etc.) y como productos de trituración de la roca.

Desde el punto de vista de su tamaño, los agregados se dividen en dos grupos: los agregados finos y agregados gruesos. Los primeros consisten en arenas naturales o manufacturadas con tamaños de partículas que van desde 5 mm hasta mayores de 60  $\mu\text{m}$ ; los segundos son aquellos cuyas partículas son mayores de a 5 mm y hasta 125 mm [Neville, 1999].

De acuerdo a su peso específico, los agregados se dividen en ligeros, normales y pesados. Otras importantes propiedades físicas son: la forma y textura de las partículas, la porosidad, la absorción, la densidad, la adherencia y la resistencia. También es de suma importancia la distribución granulométrica de los agregados.

La absorción es quizás la propiedad del agregado que más influye en la consistencia del mortero, puesto que las partículas absorben agua directamente de la mezcla, disminuyendo la manejabilidad de la mezcla. Otros factores secundarios importantes en la consistencia de la mezcla tales como la forma, tamaño y graduación de los pétreos.

La forma de los agregados tiene incidencia sobre la trabajabilidad del mortero fresco. Las formas básicas de estos se pueden simplificar en 4 tipos, que son: equidimensional o esférica, prismática, tabular o elíptica, e irregular. Los agregados se pueden clasificar por su forma, en base a su grado de redondez y esfericidad, a mayor grado de redondez menor relación de vacíos; un menor valor de este parámetro reduce la capacidad de compactación [Neville, 1999].

En el agregado fino hay dos elementos que deben ser considerados, por un lado el módulo de finura (M.F.), y por el otro la continuidad en los tamaños, ya que algunas arenas pueden tener módulos de finura aceptables (entre 2.2 y 3.1) y carecer de alguna clase granulométrica.

La capacidad de absorción de un material incide directamente sobre el grado de alteración que este último puede sufrir; la cantidad de espacios vacíos como los poros y fisuras, y la permeabilidad, son factores que influyen sobre la durabilidad de cualquier estructura.

Una propiedad de los agregados que resulta ser de vital importancia es la densidad, ya que si se emplea un material con una buena densidad ( $\geq 2.25$ ) el mortero resultante podría ser mayor o igualmente denso, lo cual tendría una influencia directa sobre el peso volumétrico y la resistencia a la compresión del mismo.

El material inerte utilizado para la elaboración de morteros es arena de origen volcánico; el más comúnmente utilizado es la arena negra triturada proveniente del basalto, también la arena de río o las calizas, el material inerte se usa para cumplir varias funciones dentro del mortero:

- Proporciona resistencia mecánica.
- Para reducción al mínimo de los cambios volumétricos que se originan al fraguar el aglutinante.
- Permitir la entrada de  $\text{CO}_2$ , favoreciendo la etapa de carbonatación (endurecimiento) del mortero de la cal hidratada.

En los morteros, el material inerte, una mezcla de arena de varios tamaños, se encuentran unidos por la pasta de cal apagada.

Una adecuada granulometría del material inerte resulta esencial para conseguir un mortero de adecuada compacidad. Parámetros tales como el coeficiente de forma y la distribución del tamaño de partículas (curva granulométrica) influyen directamente en la resistencia, compacidad y trabajabilidad del mortero, y por tanto en su durabilidad.

La arena al mezclarse con los aglomerantes constituye “el soporte” para el mortero y su resistencia a la compresión. La arena debe estar limpia, lavada, sin lodos, ni impurezas orgánicas.

Las arenas de granos redondeadas proporcionan un mortero más fácil de trabajar que con las arenas trituradas [Rivera, 2002].

### 3.3. LÍQUIDO DE AMASADO O SOLVENTE.

El líquido de amasado es un componente en los morteros, que bien puede ser agua solamente, agua mezclada con algún aditivo (líquido o sólido) o algún otro líquido de características adecuadas para el amasado de los morteros.

Con respecto a los aditivos, son sustancias inorgánicas u orgánicas que se añaden en estado sólido o líquido a los componentes habituales de la mezcla de los morteros, en proporción inferior al 5% en peso de la cal apagada.

Los aditivos que se le adicionan al líquido de amasado son para mejorar una o varias propiedades de los morteros por vía física, química o fisicoquímica.

Los aditivos, al influir sobre determinadas propiedades de los morteros pueden modificar sustancialmente su abertura del poro y su fase acuosa, afectando, en tanto, significativamente su porosidad.

Respecto a los aditivos orgánicos, Sickels (1981) realizó una recopilación y estudio de los efectos de algunos de estos aditivos orgánicos y los clasifica por el efecto que producen:

- Plastificantes, que tienen el propósito de hacer más trabajable el mortero y reducir la cantidad de agua necesaria. Lo que produce disminuciones de la retracción de secado. Mejoran su resistencia y su durabilidad. Se han empleado para este propósito clara de huevo, cola animal, leche, aceite vegetal, etc.
- Estabilizantes de volumen, reducen la contracción por fraguado del mortero como: yema de huevo, aceites, grasas, y ceras.
- Impermeabilizantes, reducen la absorción del agua del mortero: cola animal con ácido tánico, emulsión de ceras, aceite mineral y cera de abeja.
- Adhesivos, que aumentan la adherencia del mortero con la piedra: gelatina, cola animal y vegetal, caseína y resinas.
- Inclusores de aire, para aumentar la durabilidad del mortero (aunque pueden afectar la resistencia): cerveza, orina, pellejo animal, detergentes.
- Refuerzos, que dan unión a la mezcla y mejoran la durabilidad del mortero: pelo de animal, paja, algodón, copra, etc.
- Retardadores de fraguado, que aumentan el tiempo en que se puede trabajar una mezcla: azúcar, sangre, clara de huevo [Rivera, 2002].

#### 3.4. DISEÑO DE MEZCLA.

El diseño de una mezcla consiste en encontrar una dosificación adecuada de materiales, para obtener propiedades físicas y mecánicas de la mezcla que sean ideales para un determinado uso. Para diseñar mezclas de mortero, no existe un método internacionalmente aceptado que determine cantidades exactas de materiales que debemos utilizar para que satisfaga las necesidades requeridas. Los criterios de diseño utilizados en la elaboración de las mezclas de morteros se basan en la experiencia y conocimiento empírico de los operadores, dejando en duda su resistencia y durabilidad. La dosificación de un mortero se expresa indicando el número de partes en peso de sus

componentes, primero el aglomerante o los aglomerantes y por ultimo las partes de arena.

### 3.5. DESCRIPCIÓN DE MATERIALES PARA LAS PROBETAS.

La conservación de todo edificio histórico, resto arqueológico o yacimiento debe comenzar con el análisis de los materiales que lo constituyen: poco se hará en beneficio de un objeto patrimonial si previamente no se conoce el material que lo forma, sus características, desperfectos y las causas que generaron su destrucción.

#### 3.5.1. CAL APAGADA.

Las cales constituyen el material de construcción elaborado más antiguo que se conoce, siendo en la actualidad el más valorado para rehabilitación de patrimonio histórico-artístico, en eco y bioconstrucción tanto para morteros como revestimientos.

Para elaborar las probetas para este estudio se utilizo la cal apagada proporcionada por el Arq. Alberto Bedolla, Profesor de la Facultad de Arquitectura U.M.S.N.H.

Cuando se apaga un determinado volumen de cal cualquiera, se puede almacenar en algún recipiente de metal o plástico, durante años, dejando que se siga realizando el proceso de apagado, Figura 1. El período mínimo que debe de transcurrir es de dos meses antes de que ser utilizada; mientras más tiempo de reposo tenga la cal, mejor comportamiento tendrá, carbonatándose de forma optima al utilizarse en morteros, Figura 2.



Figura 1.- Cal apagándose en recipiente metálico.

Figura 2.- Cal apagada para utilizarse en morteros.

No todas las canteras de cal ofrecen la misma calidad de producto y cuanto mayor porcentaje de carbonato de calcio tenga una cal, mejor calidad tendrá la cal apagada, siendo las ideales las que se acercan a la composición del mármol [Aguilera, 2005].

El aglutinante utilizado en la elaboración de la mezcla de estudio, es la roca caliza proveniente del banco de “Piedras de Lumbre”, Michoacán. Se utilizó la cal apagada por ser la usada en los trabajos de albañilería donde emplean morteros de cal y por que la utilizaron nuestros antepasados en la construcción de monumentos [Yepez, 2008].

#### 3.5.1.1. CALIDAD DEL AGLUTINATE

TIPO DE MATERIAL:

Cal apagada.

PROCEDENCIA:

Piedras de Lumbre, Michoacán

USO:

Elaboración de morteros con mucílago de cactus como aditivo.

**Tabla 2: Resultados de las pruebas realizadas a la cal apagada [Yepez, 2008].**

PRUEBAS REALIZADAS A LA CAL APAGADA	RESULTADOS
Finura de la cal apagada	9.21 % retenido
Peso volumétrico	0.57 gr/cm <sup>3</sup>
% de agua de consistencia normal de la cal apagada	58.5 % del peso de cal apagada. Penetración 19 mm.

### 3.5.2. CENIZA VOLCÁNICA

La ceniza volcánica es material pétreo que ha sido convertido en polvo o arena por la actividad volcánica, tiene un tamaño inferior a 2mm, es cohesiva, la ceniza usada para estos morteros fue tamizada para sólo usar los finos y desechar los gruesos a pesar de ser un material fino.

El agregado utilizado en este estudio para la elaboración de morteros de cal apagada, es de origen volcánico, la ceniza se utilizó limpia, sin lodos ni impurezas orgánicas. La granulometría de la ceniza fue estudiada cuidadosamente, presentaba uniformidad en sus tamaños y con poco contenido de material orgánico, Acámbaro, Guanajuato.

#### 3.5.2.1. CALIDAD DEL AGREGADO FINO: CENIZA VOLCÁNICA

MATERIAL ANALIZADO:	Ceniza Volcánica.
PROCEDENCIA:	Acámbaro, Guanajuato.
USO:	Elaboración de morteros con cal apagada con mucilago de cactus como aditivo.

**Tabla 3: Resultados de las pruebas realizadas a el agregado fino: ceniza volcánica [Yepez, 2008].**

NORMAS	PRUEBAS REALIZADAS A LA CENIZA VOLCÁNICA	RESULTADOS
ASTM C 29-97	Peso volumétrico seco suelto	1.314 gr/cm <sup>3</sup>
ASTM C 29M-27	Peso volumétrico seco varillado	1.40 gr/cm <sup>3</sup>
ASTM C 128-97,2000	Absorción	10.07 %
ASTM C 128-97,2000	Densidad	2.14
ASTM C 40-99	Colorimetría	Muestra sin lavar, N°. de color (C. colorimetría) 2.0, límite 3
	Sedimentación	No rebasó la marca de 444 ml, en tanto es aceptable
ASTM C 117	Material que pasa la malla No. 200	19.47 %
ASTM C 33	Terrones de Arcilla	2.09 %
	% de grava en la muestra	0.0 %
ASTM D 2419	Equivalente de ceniza	72.82 %
ASTM C 139-96 <sup>a</sup> ,2000	Módulo de finura, M.F.	1.46

### 3.5.3. AGREGADO PÉTREO FINO: ARENA

Para la elaboración de los morteros de este estudio se utilizó una arena natural que se clasifica con respecto al tipo de yacimiento como arena volcánica, roca ígnea extrusiva, y no presenta contenido de materia orgánica por lo cual se considera ideal para trabajos en la construcción.

La arena proviene del banco de materiales "Joyitas" que se ubica cerca de la ciudad de Morelia, km 14+000 carretera Morelia – Quiroga.

#### 3.5.3.1. CALIDAD DEL AGREGADO FINO: ARENA

MATERIAL ANALIZADO:	Arena Volcánica.
PROCEDENCIA:	Joyitas, Morelia Michoacán.
USO:	Elaboración de morteros con cal apagada con mucilago de cactus como aditivo.

**Tabla 4: Resultados de las pruebas realizadas a el agregado fino: arena volcánica [Yepez, 2008].**

NORMAS	PRUEBAS REALIZADAS A LA ARENA VOLCÁNICA	RESULTADOS
ASTM C 29-97	Peso volumétrico seco suelto	1.225 gr/cm <sup>3</sup>
ASTM C 29M-27	Peso volumétrico seco varillado	1.336 gr/cm <sup>3</sup>
ASTM C 128-97,2000	Absorción	2.24 %
ASTM C 128-97,2000	Densidad	2.40
ASTM C 40-99	Colorimetría	Muestra sin lavar, N°. de color (C. colorimetría) 2.0, límite 3
	Sedimentación	No rebasó la marca de 444 ml, en tanto es aceptable
ASTM C 117	Material que pasa la malla No. 200	3.60 %
ASTM C 33	Terrones de Arcilla	2.48 %
	% de grava en la muestra	0.0 %
ASTM D 2419	Equivalente de ceniza	95 %
ASTM C 139-96 <sup>a</sup> ,2000	Modulo de finura, M.F.	2.30

### 3.5.4. ELABORACIÓN DEL LÍQUIDO DE AMASADO

Se llevó a cabo en el laboratorio donde se hizo el estudio, Laboratorio de Materiales “Ing. Luis Silva Ruelas”, de la Facultad de Ingeniería Civil de la U.M.S.N.H. el mezclado se hacía de tal manera que al utilizarlo fuera uniforme. Para este estudio de mortero de albañilería para restauración, de base orgánica, se utilizó un líquido de amasado compuesto de agua y mucílago de cactácea. El agua que se empleó fue potable.

El mucílago de cactácea (nopal), es un aditivo que se elaboró con agua y nopales, Figura 3, en la siguiente proporción: en 60 litros de agua se ponen a hervir durante 15 minutos 30 kg de nopal picado.



**Figura 3.- Cactus Opuntia.**

La composición química del nopal y en general de las cactáceas, varía en distintas especies y también dentro de la misma especie.

### 3.6. DESCRIPCIÓN DE LAS MEZCLAS REALIZADAS [Yepez, 2008].

Las proporciones para determinar las cantidades del mortero en el laboratorio fueron dosificadas en peso, como lo señala la norma ASTM C 109-63 y otros proyectos de investigación.

En trabajos anteriores realizados por el Arq. Alberto Bedolla se observó que funcionaban mejor las mezclas proporcionadas en peso: cal apagada-arena-ceniza volcánica en la siguiente relación 1:1.25:0.75, por presentar buena trabajabilidad y resistencia. Se realizaron 4 mezclas diferentes Tabla 5:

**Tabla 5: Diferentes mezclas realizadas [Yepez, 2008].**

Mezcla	Cal Apagada	Arena Volcánica	Ceniza Volcánica	Mucilago de Cactus
M1	X	X	X	X
M2	X	X	X	
M3	X	X		X
M4	X	X		

Las mezclas M1 y M2 están proporcionadas 1:1.25:0.75, las mezclas M3 y M4 por la relación 1:2.

Se elaboraron cubos, vigas y briquetas de mortero en dos diferentes porcentajes de aditivo (mucílago de cactus), 0.4 para las M1 y M2, 0.3 en M3 y M4.; para la elaboración se siguió el procedimiento descrito por la norma ASTM C 109-63. Las muestras se probaron a compresión, tensión ASTM C 190-59 y flexión ASTM C 1018-97, a edades de 3, 7, 14, 21, 28 y 45 días.

### 3.7. AGENTES AGRESIVOS EN MORTEROS

Los agentes agresivos en los morteros son muy similares a los de las rocas y más propiamente a la cerámica por su mayor porosidad, entre los que destacan medio ambiente contaminado, ataque de ácidos, costas negras, colonización biológica.

#### 3.7.1. ACELERACIÓN DE DETERIORO DE OBRAS MONUMENTALES EN AMBIENTES CONTAMINADOS.

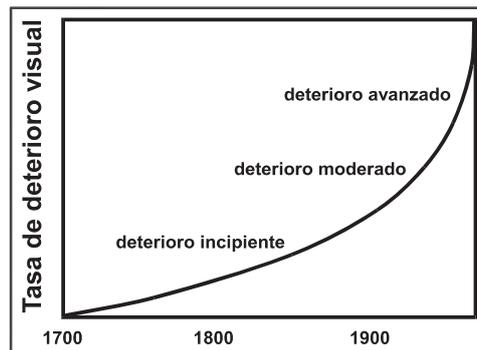
Las modificaciones del medio ambiente atmosférico introducidas en los últimos decenios por la actividad humana, esencialmente debidas a la combustión de carburantes naturales, son una de las razones del rápido deterioro observado en el patrimonio monumental de los países industrializados, Figura 4. En numerosos monumentos de estos países han sido observados fuertes deterioros de los materiales pétreos desde principios de siglo XX, lo cual es indicio de que el grado de alteración se ha incrementado exponencialmente, Figura 5 [Fort, 2007].

Es reconocido que los materiales más susceptibles a alterarse por la acción de los agentes contaminantes son los carbonatados (calizas, mármoles, morteros). Estos materiales están constituidos por minerales carbonatados (calcita y/o dolomía), cuya solubilidad aumenta fuertemente en soluciones ácidas.

Existe otro tipo de deterioro que afecta a todo tipo de material localizado en áreas urbanas e industrializadas, no relacionado con los procesos de disolución sino con la depositación de materia en suspensión sobre las superficies pétreas expuestas a la atmósfera.



**Figura 4.- Deterioro acelerado en ambientes contaminados. Escultura de arenisca del Castillo de Herten, Recklinghausen, localizado en la cuenca del Rhin (Alemania) y construido en 1702. Aspecto del motivo en 1908, mostrando deterioro moderado, y en 1969, Prácticamente destruido [Winkler, 1997].**



**Figura 5.- Estimación visual de la tasa de deterioro de la escultura de la Figura 4. [Winkler, 1997].**

### 3.7.2. ATAQUE ÁCIDO

El ataque ácido sobre los materiales pétreos proviene de la presencia en cantidades importantes de gases (generalmente óxidos) contaminantes en la atmósfera. Estos gases se oxidan, reaccionan con el agua atmosférica y se forman ácidos que se encuentran dispersos en forma de aerosoles como  $\text{NO}_x$  y  $\text{SO}_x$ .

Para el caso de la durabilidad de los morteros hay que recordar que pueden experimentar alteraciones como consecuencia de la acción de agentes agresivos internos o externos, los cuales se caracterizan por producir efectos nocivos que se manifiestan en formas de erosiones, fisuras, expansiones, etc.

La actuación de los agentes agresivos externos depende del entorno en donde se encuentran y de la velocidad de penetración, según sea su mecanismo de transporte y las condiciones en las que se realice. Estos agentes agresivos pueden estar en estado gaseoso, líquido o formando parte de suelos adyacentes al mortero.

Los contaminantes atmosféricos proceden de dos fuentes de contaminación, Figura 6: antropogénica (tráfico, calefacciones, industrias, centrales térmicas, etc.) y naturales (erupciones volcánicas, incendios forestales, descomposición de materia orgánica, etc.)

La emisión antrópica puede clasificarse en tres grandes grupos [Fort, 2007]:

- Fuentes móviles (industria del transporte). Además del CO<sub>2</sub>, se producen óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), monóxidos de carbono (CO) e hidrocarburos (HC), es decir, compuestos volátiles y no volátiles, partículas en suspensión y ozono (O<sub>3</sub>).
- Fuentes fijas (empresas, hogares, etc.). Generan principalmente CO<sub>2</sub>, dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>), los óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), los hidrocarburos (HC), partículas de hollín, clorofluorcarbonos (CFC) y el metano.
- Fuentes por generación de energía. CO<sub>2</sub>, dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y partículas en suspensión.

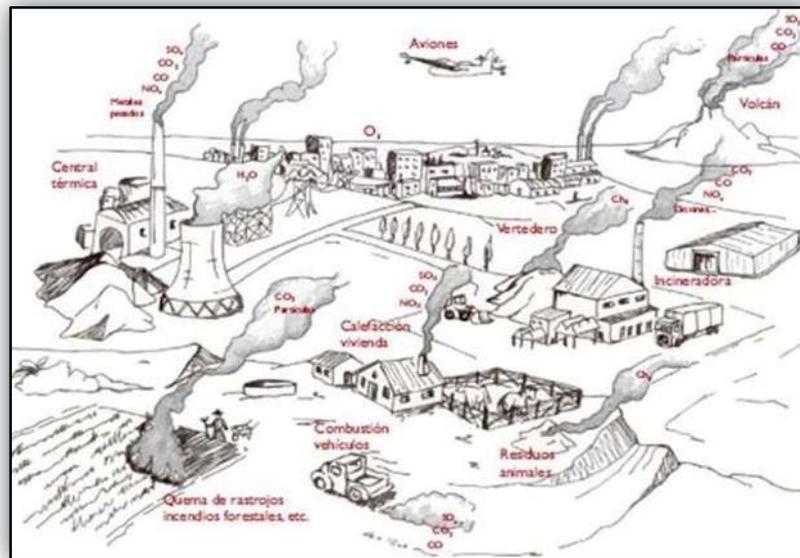


Figura 6.- Fuentes de emisión de los contaminantes atmosféricos [Winkler, 1997].

### 3.7.3. DIÓXIDO DE CARBONO.

El CO<sub>2</sub> se encuentra de forma natural en las capas inferiores de la atmósfera en una concentración media de 0.03% y 0.04% en volumen. Pudiendo ser mayor en ambientes urbanos e industriales. Pero su contenido ha aumentado de forma importante (más de un 14%) desde inicio de siglo, Figura 7. Fundamentalmente debido a la actividad humana. También puede proceder de la oxidación del monóxido de carbono generado en combustiones incompletas de carbones e hidrocarburos de calefacciones o de centrales térmicas. La actividad industrial es la causa más importante, ya que la combustión del carbón, petróleo y derivados del gas natural para obtener energía, libera grandes cantidades de CO<sub>2</sub>. Puede destacarse la combustión de la gasolina por los coches, que llega a generar el 60% del total de CO<sub>2</sub> emitido de origen industrial, Figura 8.

El dióxido de carbono es muy soluble en agua, dando lugar al ácido carbónico, produciéndose la lluvia ácida. Esta lluvia no tiene en pH neutro sino que es inferior a 5.6, aumentando la agresividad del agua sobre los materiales.

El dióxido de carbono actúa fundamentalmente sobre las rocas carbónicas produciendo mecanismos de disolución por aguas cargadas de  $\text{CO}_2$  que hacen que las calizas y dolomitas poco solubles en agua, se transformen en bicarbonato cálcico fácilmente soluble. El bicarbonato de calcio está disuelto en agua y lixiviado por las aguas de escorrentía, puede penetrar en el interior de la piedra, a través de su sistema poroso y precipitar en los poros, generando presiones internas que desmenuzan y degradan el material.

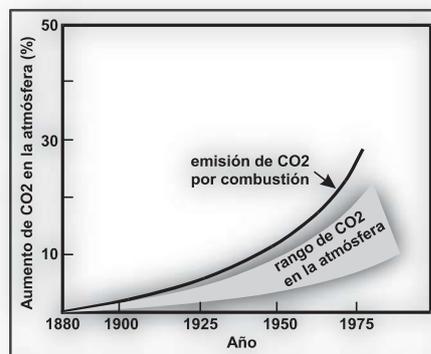


Figura 7.- Incremento mundial de  $\text{CO}_2$  debido a la combustión de carburantes fósiles [Winkler, 1997].

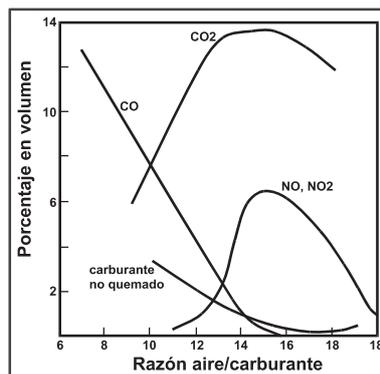


Figura 8.- Cantidades de  $\text{CO}_2$  y  $\text{NO}_x$  emitidos por la combustión de la gasolina [Winkler, 1997].

### 3.7.4. COMPUESTOS DE AZUFRE.

La presencia de compuestos de azufre en el entorno atmosférico es uno de los más dañinos para la conservación de las piedras [Amoroso, 1983]. En la atmosfera, el  $\text{SO}_2$  tiende a oxidarse mediante diversos mecanismos, o la presencia de ozono  $\text{O}_3$ , sufre un proceso de oxidación que dá lugar a la formación de trióxido de azufre, el cual reacciona con el agua para formar ácido sulfúrico, que se encontrará como aerosol o en la disolución [Benner et al, 1985].

La cantidad de ácido sulfúrico que se puede generar depende de la concentración de  $\text{SO}_2$  y de la humedad ambiente existente en el entorno, Figura 9.

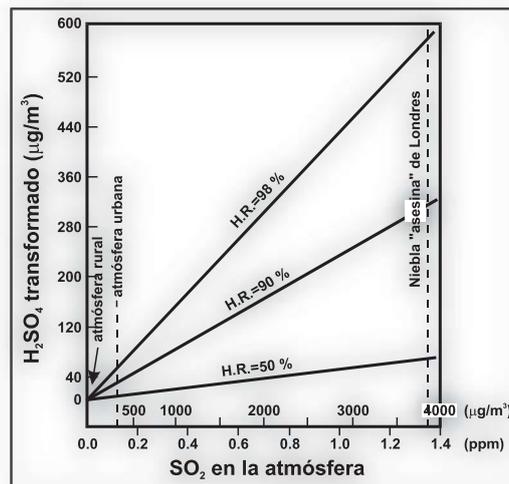


Figura 9.- Conversión de  $\text{SO}_2$  en ácido sulfúrico en la atmósfera Bajo distintas condiciones de humedad relativa [Winkler, 1997].

### 3.7.5. ÓXIDOS DE NITRÓGENO

Dentro de estos componentes se encuentran el monóxido de nitrógeno y dióxido de nitrógeno. Los compuestos de nitrógeno favorecen los procesos de degradación de las piedras de monumentos.

### 3.7.6. LA COSTRA NEGRA

Las costras son alteraciones esencialmente estéticas aunque en ciertos casos pueden favorecer la aparición de escamaciones o desplazamientos.

Cualquier superficie expuesta al medio ambiente es susceptible de ser afectada por recubrimientos de partículas solidas adherentes presentes en suspensión en el aire. Las superficies toman entonces tonos y coloraciones distintas a las originales, que en general sufrirán un oscurecimiento. Los depósitos de costras pueden presentar un grosor, grado de adherencia y morfología muy variadas, los grosores oscilan entre 0.5 y 2-3 mm, aunque en algunos casos pueden llegar hasta 1 cm. La adherencia al sustrato es alta y su morfología es de superficies más o menos lisas, que cubren uniformemente al material respetando los relieves, superficies rugosas.

La presencia de costras puede asociarse casi sistemáticamente con procesos de deterioro del material pétreo. Con el tiempo las costras adquieren más dureza, que incrementa las propiedades fisicoquímicas entre la misma y el material pétreo, por lo que aumentan el proceso de deterioro. Las costras están compuestas por sustancias muy variadas, aunque en su mayor parte son compuestos de carbono (hidrocarburos) y biota.

### 3.7.7. PARTÍCULAS EN SUSPENSIÓN.

El aire, además de contener los contaminantes gaseosos indicados, lleva partículas en suspensión. Estas partículas son de naturaleza muy variada, pudiendo estar formadas por una mezcla compleja de diferentes tamaños y formas. Las partículas de un diámetro superior a 10  $\mu\text{m}$  tienden a sedimentarse en un tiempo corto, mientras que las partículas en suspensión de diámetros inferiores a 10  $\mu\text{m}$  se mantienen en suspensión durante largo periodo de tiempo.

Las partículas de mayor tamaño están generalmente formadas por el humo y el polvo de los procesos industriales, agricultura, construcción y tráfico rodado, aunque también proceden del polen de las plantas y de otras fuentes naturales. Las partículas más

pequeñas tienen su origen en la combustión de los combustibles fósiles. Estas partículas incluyen el hollín de los motores diesel y van acompañadas de otros contaminantes gaseosos y elementos sólidos como Si, Ca, Na, Al, Fe, Mg, Cu, Zn, V, Mn. En general, son compuestos orgánicos de C de gran superficie específica que favorecen la formación de núcleos de condensación, haciendo más agresivo el neblumo en donde se encuentran, degradando los componentes minerales de las rocas y morteros que forman los monumentos y edificios.

Las partículas mas pequeñas, de tamaño inferior a  $0.1 \mu\text{m}$ , constituyen los aerosoles, los cuales pueden viajar largas distancias desde el foco emisor y que están formados por los sulfatos y nitritos ligeros, que se forman cuando el  $\text{SO}_2$  y el óxido de nitrógeno se condensan en la atmósfera, por cloruros procedentes de emisiones industriales o del aerosol marino [Torfs, 1997].

Las partículas carbonáceas que se depositan en la superficie de los materiales presentan morfologías esféricas de superficie rugosa y abundantes poros. Se generan por la combustión de derivados del petróleo, mientras que las partículas que proceden de la combustión del carbón presentan superficies lisas de alta densidad.

La materia en suspensión es perjudicial para el patrimonio arquitectónico y escultural que se encuentra a la intemperie, puesto que tiende a depositarse en la superficie [Del monte, 1981].

Estas partículas producen el ensuciamiento de las superficies, con contrastes cromáticos antiestéticos y, sobre todo, producen las condiciones favorables para la oxidación del dióxido de azufre [Boke et al, 1999].

También estas partículas sirven de nucleacion para los procesos de sulfatación y ayudan a la formación de las costras negras.

### 3.7.8. CRISTALIZACIÓN DE SALES COMO MECANISMO DE DETERIORO

Estos pequeños compuestos iónicos son los causantes de igual forma, de la mayoría de las patologías en morteros, a causa de sus ciclos de hidratación y deshidratación durante los cuales experimentan fuertes variaciones de tamaño desencadenando fuertes presiones en los espacios intergranulares creando fisuras que fracturan o disgregan el mortero.

La durabilidad de la roca depende de la ubicación del edificio y de su colocación del mismo, y de sus propias características. Por ello, estimamos los diferentes mecanismos de degradación que pueden sufrir un mortero o una roca, y así, poder valorar cual es la más adecuada para una ubicación determinada.

La alteración de los morteros esta estrechamente relacionada con el balance del agua en el interior de la roca que depende del sistema poroso del material, de las disoluciones que se encuentren en los poros y, de las condiciones ambientales que llevan asociadas ciclos de temperatura y humedad relativas [Vos, 1976].

La presencia de estas disoluciones favorece diferentes procesos de deterioro que van a condicionar la durabilidad de estos materiales.

Por su importancia y frecuencia se pueden destacar los siguientes procesos fisicoquímicos: la disolución de los minerales que constituyen los materiales pétreos, por el agua y/o disoluciones acidificadas por la adsorción de gases contaminantes (depositación de humedad); la reacción de gases con el mortero en ambientes no saturados en vapor de agua (depositación de seca); ciclos de humedad-sequedad; presión de cristalización de sales solubles y del hielo; dilatación térmica de diferentes minerales; y el biodeterioro físico de y químico producido por la acción de microorganismos, plantas superiores y animales. En particular, la cristalización de sales y del hielo es uno de los mecanismos de alteración más importantes y agresivos que pueden sufrir las rocas utilizadas en patrimonios. Este mecanismo puede producir la

degradación de los materiales pétreos de diversas formas, como eflorescencias, costras, escamas, depositaciones superficiales, picaduras, disgregación granular, fisuración [Esbert et al, 1997].

En consecuencia, la acción mecánica de cristalización produce un cambio en el sistema poroso y una pérdida de adherencia entre los granos y la pasta de cal, por lo que las propiedades petrofísicas pueden disminuir considerablemente.

Además, los ciclos de disolución-cristalización de las sales producen un deterioro superficial visible y una pérdida de masa. Esta pérdida de masa,  $\Delta M$ , es un parámetro ampliamente utilizado para estimar la durabilidad de las rocas porosas frente a la cristalización. La cristalización de sales es un mecanismo muy complejo que depende de un gran número de variables tanto del sistema poroso como de la naturaleza del mineral que precipita. En rocas porosas, la presión de cristalización depende del sistema poroso, grado de saturación de la sal, y la energía entre el cristal y la superficie de un poro, si existe una película de salmuera sobresaturada entre el cristal y la superficie del poro [Scherer, 1999]. Esta película de salmuera es necesaria para el crecimiento mineral, y se sostiene bajo presión, si la sobresaturación es suficiente. Por otro lado, cuando un cristal está creciendo en el interior de un poro, éste tocará su superficie si la energía interfacial cristal-superficie del poro es mayor que la suma de la que tiene el cristal-salmuera y la salmuera-superficie del poro. Por el contrario, si la energía interfacial cristal-superficie del poro es menor, se formará una película de salmuera entre ambos sólidos. Dicha energía interfacial está estrechamente relacionada con la estructura de las moléculas de agua alrededor del cristal, como por ejemplo ha sido observado en el crecimiento del hielo [Scherer, 1999]. La formación de esta película genera una interacción contra la superficie del poro produciendo la denominada presión de decohesión. Por lo tanto, el cristal genera una presión de cristalización sobre la superficie del poro si se tiene energía suficiente (sobresaturación) para vencer la presión de decohesión (la energía interfacial cristal-superficie del poro).

### 3.7.9. LA COLONIZACIÓN BIOLÓGICA.

El asentamiento de determinados organismos ya sean animales o vegetales sobre los paramentos y elementos arquitectónicos colaboran de dos formas esenciales en la alteración de morteros.

1.- Mecánica, mediante presiones ejercidas entre los resquicios del mortero que provocan a largo plazo la fracturación y fisuración de los mismos.

2.-Estética, pues el asentamiento de plantas o la presencia de sustratos vegetales o excrementos sobre los paramentos o elementos arquitectónicos, impiden la correcta visualización de los mismos.

### 3.7.10. LOS SUELOS

Los suelos son perjudiciales sólo si contienen compuestos que pueden formar disoluciones agresivas. Se pueden diferenciar tres grupos importantes de suelos: suelos con sulfatos solubles, suelos pantanosos (pueden contener sustancias orgánicas) y basureros (con elevado contenido de acidez y sulfuros). Las principales disoluciones, en cuanto a su agresividad para los morteros son: aguas (puras, carbonatadas, marinas, residuales, industriales, negras, duras, grises, ácidas).

## 4. POROSIDAD DE MORTEROS

Por porosidad de morteros, se entiende la dada por los macroporos de los morteros que representan entre 1% y 3% del volumen después de la mezcla, más la porosidad de la pasta de cal apagada y la correspondiente a los áridos. Dando una graduación del tamaño de los poros. La porosidad de los áridos suele ser menor que la porosidad capilar de la pasta de la cal apagada aunque la permeabilidad puede ser la misma.

El tipo de poros que resulta relevante para los fenómenos de durabilidad en morteros son los poros capilares que, constituyen alrededor de 2/3 de la porosidad total en

morteros. Estos son los poros que inciden en mayor medida en todos los fenómenos de transporte, debido a la existencia de fuerzas capilares y de tensión superficial que aceleran determinados procesos ya que es el medio por donde penetran los agentes agresivos externos.

El volumen de los poros capilares decrece en el sentido del mortero, por lo que se puede pensar que los áridos producen una gran porosidad en el rango entre  $2\mu$  y  $50\text{ nm}$ , que difícilmente se pueden llenar con productos de hidratación.

La formación de poros capilares depende además del grado de hidratación, de la relación agua/cal hidratada utilizada.

#### 4.1. TÉCNICAS DE MEDIDA DE LA POROSIDAD EN LA PASTA DE CAL, MORTERO.

Existe una amplia variedad de técnicas para evaluar el tamaño de poros y su distribución en los materiales. Así, encontramos en la literatura comparaciones e innovaciones de estas técnicas. Se pueden dividir en dos grupos:

- Directas
- Indirectas

Las primeras son técnicas microscópicas y dan información sobre la disposición de las distintas fases en la estructura, así como, de la distribución, forma y tamaños de poros. Las técnicas indirectas, como la porosimetría de mercurio y la absorción de metanol, no informan de la disposición en el espacio, pero tienen la ventaja de dar información cuantitativa.

Los métodos de análisis descritos en los apartados 4.1.1. al 4.1.6., describen otros métodos que se pueden utilizar para determinar la porosidad en morteros, se mencionan por que no se pudo realizar una comparación en la obtención de datos, la

---

finalidad de mencionarlos es que posteriormente se puedan realizar otros métodos de análisis para la obtención de la porosidad en morteros.

#### 4.1.1. POROSIMETRÍA DE MERCURIO

Dentro de la configuración de un sistema poroso es importante conocer no sólo el volumen de poros sino su distribución porométrica y el grado de interconexión entre los mismos, características que condicionan en buena medida su durabilidad. El conocimiento previo de la configuración del sistema poroso puede, igualmente, ayudar a predecir la viabilidad de un posible tratamiento de consolidación.

Una de las técnicas indirectas más empleadas en la caracterización del sistema poroso es la porosimetría de mercurio, la cual ofrece un amplio espectro de información al respecto (volumen de poros, porometría, superficie específica, etc.) obtenido sobre un volumen representativo de muestra.

Presenta, sin embargo, una serie de limitaciones: una de ellas es la dificultad para caracterizar los poros en “cuello de botella” (poros a los que se accede a través de microscopios).

La segunda limitación deriva de asumir, en los modelos teóricos empleados para el cálculo, una forma de poro cilíndrico, muy distante de la realidad ya que el sistema poroso se configura habitualmente como un sistema tridimensional extremadamente complejo.

La mayor parte de los procesos de alteración que tienen lugar en las rocas aparecen vinculados por el agua que, introduciéndose en el sistema poroso, induce por ella misma o a través del aporte de contaminantes procesos de alteración química, cristalización de sales, hielo, etc. En este sentido es de vital importancia obtener un conocimiento detallado de la fábrica porosa y sus interrelaciones con los procesos de deterioro.

Los porosímetros de mercurio se basan en los fenómenos de capilaridad que gobiernan la penetración de los líquidos en los poros pequeños. La presión necesaria para introducir el mercurio es inversamente proporcional al diámetro de los poros.

En el caso de un líquido que, como el mercurio, no moja y asumiendo un modelo de poro cilíndrico, el proceso está reflejado por la ecuación de Washburn:

$$D = - \left( \frac{1}{P} \right) 4\gamma \cos\phi$$

Donde D = diámetro de poro

P = presión aplicada

$\gamma$  = tensión superficial

$\phi$  = ángulo de contacto

La relación inversa entre el diámetro de poro y la presión aplicada es llamada ecuación de Washburn, la cual nos permite relacionar el diámetro de poro y presión, con la presión superficial y el ángulo de contacto del mercurio.

Los ensayos de porosimetría de mercurio proporcionan pares de valores de presión de intrusión y volumen de mercurio intruido que, mediante la fórmula citada permite establecer relaciones entre el diámetro de poros y volumen poroso [Navarro, 2007].

#### 4.1.2. ADSORCIÓN DE NITRÓGENO.

Esta técnica con la adsorción de metanol y la de rayos X de bajo ángulo, es la que da la mejor información de poros pequeños de rango en el rango de 10 Å a 500 Å.

El método consiste en la medida de la cantidad de gas adsorbido por la muestra a diferentes presiones. El gas se adsorbe sobre la superficie de los poros por condensación capilar. Las curvas de adsorción o desorción sirven para calcular la distribución del tamaño de poros aplicando la ecuación de Kelvin. Método ampliamente usado para medir la porosidad de la pasta.

#### 4.1.3. ANÁLISIS DE IMÁGENES EMPLEANDO LA TÉCNICA DE MICROSCOPIA ELECTRÓNICA.

La principal ventaja de este método de análisis de imágenes es la posibilidad de obtener información cuantitativa, a partir de imágenes, de formas, tamaños de poros. La técnica también da una mayor resolución de poros y fases que las técnicas convencionales.

#### 4.1.4. PICNOMETRÍA Y FLUJO DE HELIO.

Técnica aplicada a medidas de porosidad y densidad. Inicialmente se mide el volumen sólido de la muestra por picnometría, y posteriormente, se mide la velocidad de penetración de helio en las probetas, a una presión de 2 atmósferas durante 40 horas. La técnica permite medir cambios de la estructura en probetas en las que el agua ha sido total o parcialmente extraída. Por ello esta técnica se emplea para estudiar la estructura de la pasta de cal apagada en estado húmedo.

#### 4.1.5. CALORIMETRÍA A BAJA TEMPERATURA.

Esta técnica se ha empleado muy poco en el estudio de la pasta de cal. Consiste en la medida del flujo de calor de una probeta en su calentamiento y enfriamiento a varias velocidades. Presenta la ventaja de poder aplicarse a probetas saturadas con agua.

### 4.2. RELACIÓN PROPIEDADES - ESTRUCTURA POROSA

La mayoría de las propiedades mecánicas y las que afectan a la durabilidad dependen de la estructura porosa de morteros. Así se conoce que la resistencia a compresión de la pasta de cal apagada mantiene una relación lineal con la porosidad capilar, potencial en función del tipo de cal, si se trata de la fracción volumétrica de poros de gel y exponencial, en el caso de de la porosidad total.

Como ya se ha mencionado, son los poros de gel los que más afectan a la retracción por secado y a la fluencia debida a movimientos de agua interlaminar.

Los poros capilares son también determinantes en fenómenos como el hielo-deshielo, ya que el agua, al solidificarse, crea tensiones en los poros que llevan una fisuración generalizada. En cambio, los poros de mayor tamaño ejercen un efecto positivo ya que actúan de modo de cámaras de expansión para la formación del hielo, puesto que el agua no llega a llenar totalmente estos poros. De ahí la práctica de introducir agentes aireantes para evitar la acción del hielo, pues introducen burbujas de aire de diámetro superiores a los capilares.

#### 4.3. FASE ACUOSA CONTENIDA EN LOS POROS DEL MORTERO

La presencia de agua o humedad es el factor individual más importante que controla los diferentes procesos de deterioro de morteros, excluyendo los daños mecánicos. El transporte de agua en morteros está determinado por el tipo y la distribución del tamaño de poros. Igualmente, la composición química de la fase acuosa existente en el interior de los poros es de vital importancia desde el punto de vista electroquímico por ser el medio electrolítico conductor en los procesos de corrosión de las armaduras.

El estudio de la fase acuosa interesa también para el conocimiento de los mecanismos de hidratación de la cal.

#### 4.4. VARIABLES QUE INFLUYEN EN LA PERMEABILIDAD AL AGUA

La permeabilidad está íntimamente relacionada con la estructura porosa del material en cuestión, en particular, con los poros capilares. Como ya se ha visto, la porosidad capilar decrece con el tiempo y por lo tanto, la permeabilidad.

La influencia de los áridos, en función de su tamaño, en la permeabilidad del agua. Se puede considerar a nivel práctico, que el árido es impermeable debido a su baja permeabilidad ( $10^{-8} - 10^{-12}$  cm/s) [9], en consecuencia, la mayor permeabilidad de morteros frente a la pasta de cal se debe a la interface pasta-árido. Cuando mayor sea la

proporción de árido se obtendrá un coeficiente de permeabilidad mayor [San Juan Barbudo, 1992].

Sin embargo, de lo que pudiera suponerse en principio, al aumentar la porosidad, se puede obtener un mortero poco permeable, esto se explica por la formación de aire aislado que no actúan de forma permeable. Un factor determinante de la permeabilidad de cualquier mortero es el tipo de curado, ya que, a su vez según sea este se obtendrá una estructura más o menos porosa. Los curados efectuados durante más tiempo con un contenido mayor de humedad son los que menor permeabilidad presentan. Al estudiar la permeabilidad de morteros no se debe olvidar que la composición química de la cal empleada también afectará de forma decisiva en su estructura.

Las adiciones modificaran las reacciones de hidratación tanto en su cinética como en sus productos de formación.

#### 4.5. ABSORCIÓN CAPILAR

Este mecanismo de absorción permite la rápida entrada de grandes volúmenes de agua en los materiales de construcción. La cantidad de agua absorbida depende del radio capilar que presenten los poros del material.

#### 4.6. FUNDAMENTOS DE LA ABSORCIÓN CAPILAR

Cuando en un capilar la presión de vapor sobre el líquido es menor que la de saturación, se produce la evaporación de moléculas de éste. En los poros capilares, la presión de vapor sobre el menisco es diferente que sobre una superficie plana, ya que las fuerzas de atracción que actúan sobre las moléculas son mayores en una superficie cóncava; por lo que, para que en este se produzca una evaporación, la presión de vapor debe ser menor que en el caso de una superficie plana, Figura 10. El radio del menisco,  $r_c$ , y la presión de vapor están relacionados por la ley de Kelvin:

$$\ln\left(\frac{P}{P_0}\right) = \frac{2\sigma}{RT\rho r_c}$$

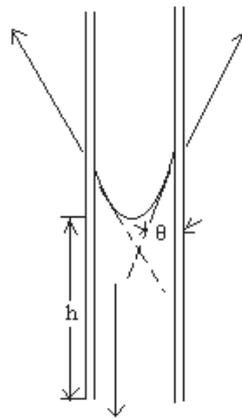
Siendo:  $P_0$  = Presión de saturación sobre una superficie plana.

$\sigma$  = Tensión superficial del líquido.

$R$  = Constante de los gases.

$T$  = Temperatura en grados Kelvin.

$\rho$  = Densidad del líquido.



**Figura 10.-Fuerzas de atracción en moléculas en superficie cóncava. [15].**

Cuando se está al 100% de humedad relativa, la superficie del agua en el capilar es plana ( $r_c = \infty$ ), y no se produce la evaporación. Al disminuir la presión de vapor, comienza la evaporación y la formación del menisco hasta un radio de menisco,  $r_c$ , nunca inferior al radio del poro,  $r_p$ .

En la pasta de cal primero se vacían los poros grandes (poros capilares) y luego los poros pequeños (poros de gel). Como consecuencia de este fenómeno, el agua capilar está sometida a tensiones de atracción que deben ser compensadas por tensiones de compresión en la pasta de cal, lo que genera una retracción del material [San Juan Barbudo, 1992].

Se conoce como succión capilar en sólidos porosos al transporte de líquidos debido a la tensión superficial que actúa en los poros capilares. Y depende de las propiedades

características del líquido (viscosidad, densidad, tensión superficial) y del sólido (microestructura porosa). La fuerza producida por la tensión superficial sobre el menisco ( $2 \pi r_p \rho$ ) hace que el líquido se eleve en el poro capilar.

$$h = \frac{2 \sigma \cos \theta}{\rho g r_p}$$

Donde:

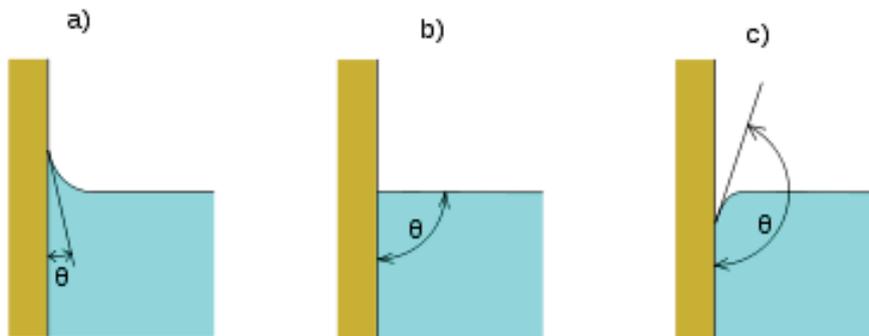
$h$ =altura de succión.

$r_p$ =Radio de poro capilar.

$\theta$ =Ángulo de mojado.

$\sigma$  = Tensión superficial del fluido.

$\rho$ =Densidad del fluido.



**Figura 11.** El ángulo de contacto de un líquido con la superficie: a) el ángulo de contacto  $<90^\circ$ , el líquido moja la superficie, b) el ángulo de contacto  $=90^\circ$ , el líquido permanece sin ascenso ni descenso, c) el ángulo de contacto  $>90^\circ$ , el líquido no moja la superficie.

Succión capilar vertical con efecto gravitacional opuesto.

Se obtiene un equilibrio final (Fagerlund, 1982). En la práctica, en la velocidad de absorción del agua no se diferencian los efectos gravitacionales ya que el efecto capilar es dominante. El estudio de esta propiedad en morteros se realiza situando una probeta preacondicionada del material que será estudiado en contacto con la disolución que tiene que absorber y, posteriormente se monitorea el peso a lo largo del tiempo.

#### 4.7. MÉTODOS PARA CALCULAR EL COEFICIENTE DE ABSORCIÓN.

El estudio de la absorción de agua en morteros se realiza en probetas llevadas al laboratorio o "in situ". En el primer caso, las probetas se someten a los periodos de secado prefijado, y tras ser expuestas al agua, se determina la absorción efectuada empleando técnicas de observación directa sobre las probetas. Registrándose el aumento de peso en las probetas en el tiempo, Figura 12.

En las medidas "in situ" es difícil conseguir relaciones lineales entre la cantidad de agua absorbida y la raíz cuadrada del tiempo como consecuencia de no poder determinar claramente ni la geometría, ni el volumen sobre los que actúa, ni la cantidad de agua necesaria para saturar la zona de la estructura estudiada.

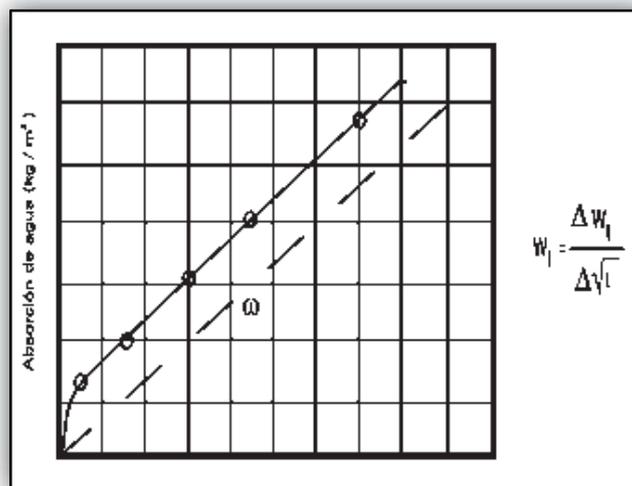


Figura 12.- Grafica para los pesos obtenidos en el tiempo [Wagner, 2000].

##### 4.7.1 TEORÍA DE KUNZEL

Para que un muro exterior o bien sus constituyentes presenten una durabilidad alta, es preciso que permanezcan secos con el transcurso del tiempo, a pesar de ser sometidos a la acción de las lluvias. En otras palabras, la cantidad de agua absorbida tendrá que ser eliminada durante los periodos secos en forma de vapor de agua (por difusión). Entonces de tendrá:

Agua absorbida  $\leq$  Humedad entregada durante el período seco

Por lo tanto, es necesario considerar no solo la absorción capilar del agua por parte del material de construcción, sino que además tendrá que tomarse en cuenta su permeabilidad al agua.

Para medir la absorción capilar se cuenta con el coeficiente de absorción capilar de humedad,  $w$ . Este coeficiente se calcula dividiendo la absorción de agua  $W$  ( $\text{kg}/\text{m}^2$ ) que posee un material de construcción, por la raíz cuadrada del tiempo  $t$  (hr). El hecho de que no se considere el tiempo en forma directa se debe a que la absorción de agua por parte de un cierto substrato no es un fenómeno lineal en relación a este, sino que al ir aumentando la absorción se produce en algún momento la saturación. Por lo tanto el coeficiente se define:

$$w = \frac{W}{\sqrt{t}} \text{ (kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0.5}\text{)}$$

Para la permeabilidad al vapor de agua, se contempla la llamada “capa de aire equivalente”, basado en un índice de resistencia a la difusión  $\mu$ , el cual es un índice relativo que indica cuanto mayor es la resistencia a la difusión de vapor de agua que posee un material en comparación a aquella capa de aire en reposo del mismo espesor. El índice  $\mu$  es adimensional y tiene un valor constante para cada material.

Para poder evaluar la capacidad de difusión de vapor de agua que presenta un muro o recubrimiento, resulta más conveniente considerar el producto entre el índice  $\mu$  y el espesor  $s$  del muro o de la capa. Este producto se conoce como capa de aire equivalente  $S_d$ .

$$S_d = \mu \cdot s \text{ (m)}.$$

Este valor equivale al ancho que debe tener una capa de aire en reposo para que ofrezca la misma resistencia a la difusión de vapor de agua que pose la capa de espesor  $S$ . En un muro ideal tanto “ $w$ ” como “ $S_d$ ” son iguales acero.

Kunzel fijó valores adecuados para estos parámetros para un muro o recubrimiento libre de fallas (por ejemplo sin fisuras), para funcionar en forma apropiada desde el punto de vista de la física de la construcción se debe de cumplir:

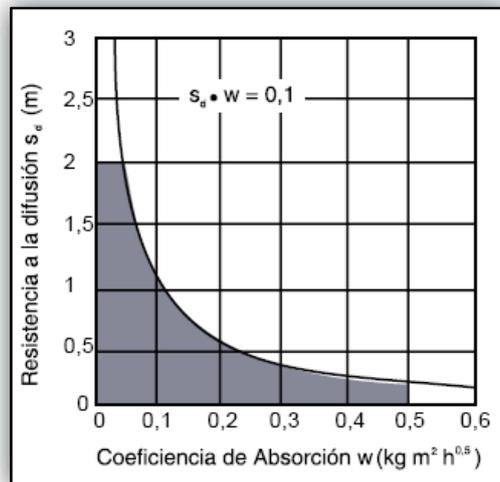
$$w < 0.5 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{h}^{0.5}$$

$$S_d < 2.0 \text{ m}$$

Al aumentar el valor de  $w$  al límite indicado, el valor de  $S_d$  debe disminuir. En otras palabras, si el material de construcción absorbe mayor cantidad de agua, su porosidad debe aumentar ( $S_d$  más bajo) para permitir la eliminación por difusión del exceso de humedad. Para expresar lo anterior en forma matemática, se estableció la siguiente relación hiperbólica:

$$w \cdot S_d = 0.1 \text{ (kg/mh}^{0.5}\text{)}$$

Gráficamente, Figura 13:



**Figura 13.- Valores correspondientes para valores aceptables en muros de recubrimiento[Wagner, 2000].**

La zona achurada corresponde al rango de valores aceptable de funcionamiento para muros o recubrimientos. En base a diversos valores, tanto de  $w$  como de  $S_d$  los muros o revestimientos de fachada se pueden dividir en los grupos Tabla 6 o categorías Tabla 7:

Tabla 6: Clasificación de muros de revestimiento [Wagner, 2000].

Según su absorción de humedad		
Grupo	Coefficiente de absorción capilar "w" (kg/m <sup>2</sup> *h <sup>0.5</sup> )	Clasificación
I	<0.1	Impermeable
II	0.1-0.5	Hidrorrepelente
III	0.5-2.0	Inhibidor de penetración de humedad
IV	>2.0	Permeable

Tabla 7: Clasificación de muros de revestimiento [Wagner, 2000].

Según su permeabilidad al vapor de agua		
Grupo	Resistencia a la difusión "S <sub>d</sub> " (m)	Clasificación
I	<0.1	Microporoso y permeable al vapor de agua
II	0.1-0.5	Permeable al vapor de agua
III	0.5-2.0	Inhibidor de la difusión del vapor de agua
IV	>2.0	Impermeable al vapor de agua

Curvas típicas de absorción de agua de diferentes materiales de construcción, Figura 14. Los valores "w" resultantes oscilan entre 0.15 kg/ (m<sup>2</sup>h<sup>0.5</sup>) del concreto para puentes, extremadamente compacto, y el 11.5 kg/ (m<sup>2</sup>h<sup>0.5</sup>) del ladrillo muy poroso [Wagner, 2000].

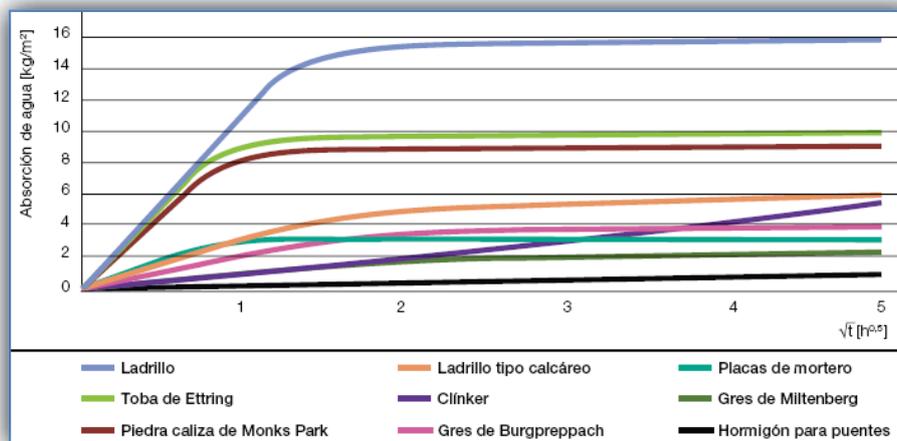


Figura 14.- Curvas típicas absorción de agua Vs raíz del tiempo, para diferentes materiales [Wagner, 2000].

#### 4.8. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA ABSORCIÓN CAPILAR.

##### 4.8.1 ESTRUCTURA POROSA DEL MATERIAL.

Lógicamente, la absorción va a estar muy ligada a los factores que determinan la distribución de tamaño de poros.

Esta propiedad, varía con el tipo de la mezcla y el grado de compactación, siendo esta propiedad muy sensible a este último factor. La absorción aumenta con la relación agua/cal y disminuye en materiales bien curados. El límite inferior de esta propiedad está entorno a  $0.1 \text{ mm/min}^{0.5}$  en morteros.

##### 4.8.2 CONTENIDO INICIAL DE AGUA.

En la práctica, ninguna estructura de concreto o mortero está completamente seca, por lo que el extrapolar los datos de laboratorio a situaciones reales puede ser bastante complejo.

El contenido de agua que inicialmente existía en la probeta debe estar uniformemente repartido para que se cumpla la relación con la raíz cuadrada del tiempo.

##### 4.8.3 TEMPERATURA.

La absorción es proporcional a  $(\sigma/\eta)^{0.5}$ , siendo  $\sigma$  la tensión superficial y  $\eta$  la viscosidad del fluido absorbido. Este valor se duplica si pasamos de  $5^{\circ}\text{C}$  a  $35^{\circ}\text{C}$ , por lo que la absorción se incrementa con la temperatura, aún que muy despacio.

##### 4.8.4 FLUIDO ABSORVIDO.

La capacidad de absorber de un material varía con el tipo de fluido según la relación  $(\sigma/\eta)^{0.5}$ . Añadiendo sales al agua se observa una ligera variación en cuando a la velocidad de absorción [9], posiblemente debido a los pequeños cambios de viscosidad y tensión superficial con el agua pura. En general, cualquier sal disuelta puede difundirse a través de los poros hacia el interior pudiendo recristalizar y producir tensiones y fisuración.

## 5. PRUEBAS

### 5.1. POROSIDAD [Juán José Carpio et al, 2000]

OBJETIVO.- Determinar la absorción capilar y la porosidad de morteros y hormigones como una medida de compacidad. Como porosidad de morteros se consideran los espacios vacíos que quedan en la matriz del cementante de morteros a consecuencia de la evaporación del agua excedente del amasado y del aire atrapado en su manipulación. Los poros dependiendo de su tamaño y características se subdividen en:

- Poros de gel.- Son de menor tamaño ( $<15-25 \text{ \AA}$ ) y corresponden a espacios intersticiales del gel de la cal apagada. Estos poros sólo intercambian agua con el ambiente cuando se secan a humedades  $< 20\%$ . Estos poros de tamaño reducido impiden el transporte capilar del agua, que sólo puede atravesarlo en estado gaseoso. Los materiales de microporosidad alta son, por lo tanto, casi impermeables a nivel capilar.
- Poros capilares.- Son de forma variable y tamaño del orden de  $2 \text{ nm}$  a  $1 \text{ }\mu\text{m}$ . Cuando están interconectados y abiertos al exterior constituyen la causa principal de la permeabilidad de la pasta de cal apagada endurecida, así como su vulnerabilidad a la acción de agentes externos. Por ello, la eliminación de la capilaridad interconectada es una condición necesaria para su durabilidad. Permiten el transporte capilar de agua; en estos casos, la cantidad absorbida depende de la capilaridad del material.
- Poros de aire.- Son generados por las burbujas de aire atrapadas en la masa del concreto, en el proceso de manipulación tecnológica. No suelen estar interconectados entre sí y su dimensión es variable, aunque generalmente son mayores de  $0.05 \text{ mm}$ . Aunque afectan a la resistencia mecánica, en cuando a la

durabilidad pueden, según el caso, inducir efectos benéficos, este tipo de poro grande tampoco favorece el transporte de capilar de agua.

Como absorción capilar se considera la masa de agua por unidad de área que puede ser absorbida en los capilares cuando la cal apagada se encuentra en contacto con agua líquida. Representa la porosidad efectiva o accesible al agua y por tanto a los agentes agresivos ambientales.

## 5.2. ENSAYO DE ABSORCIÓN CAPILAR

La propuesta de la metodología de ensayo se debe a Gören Fagerlund y describe la cinética de la absorción capilar de morteros y concretos a través de tres coeficientes:

$m$ = Resistencia a la penetración del agua.

$k$ = Coeficiente de absorción capilar.

$\epsilon_0$ =Porosidad efectiva.

Procedimiento.

El ensayo se realiza en especímenes de espesor  $H \leq 50$  mm, Figura 15, luego de un acondicionamiento de secado a  $60^\circ\text{C}$  por 48 horas hasta peso constante, Figura 16 y posteriormente un enfriamiento a la intemperie.

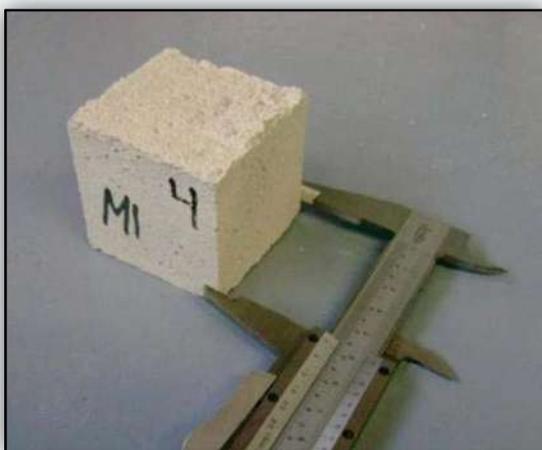


Figura 15.- Espécimen  $H \leq 50$  mm



Figura 16.- Secado a  $60^\circ\text{C}$ .

Luego de registrar su peso inicial,  $W_0$ , la muestra es colocada sobre una esponja húmeda en el interior de un recipiente de fondo plano, con un tirante de agua sólo de 3 mm por encima de la parte inferior de la probeta de ensayo, Figura 17. Se recomienda previamente cubrir con resina o parafina las caras laterales del espécimen, Figura 18, para evitar que la muestra absorba agua por las caras laterales del espécimen, y lo largo del ensayo, habrá que mantener cubierto el recipiente para evitar evaporación. El cambio de peso ( $W_t - W_0$ ) de la probeta por unidad de área expuesta del espécimen ( $A$ ) se registra a intervalos de tiempo de 1/12, 1/6, 1/4, 1/2, 1, 2, 3, 4, 6, 24, 48...horas, hasta lograr peso constante.



**Figura 17.- Probetas sobre esponja húmeda con tirante de 3mm.**



**Figura 18.- Cubierta de parafina**

Los coeficientes se calculan en base a las siguientes ecuaciones según el método de ensayo de Fagerlund:

Coeficiente de la resistencia a la penetración del agua ( $m$ ).

$$m = \frac{t}{z^2} \quad (\text{s/m}^2)$$

Donde:  $z$  representa la profundidad de penetración del agua en el tiempo " $t$ ". (m)

Coeficiente de absorción capilar ( $k$ )

$$k = \frac{(w_t - w_0)/A}{\sqrt{t}} \quad (\text{kg/m}^2\text{s}^{1/2})$$

Donde:

$W_o$  = Peso inicial de la probeta (kg o gr)

$W_t$  = Peso final de la probeta (kg o gr)

$A$  = Área expuesta de la probeta (m o cm)

$k$  es evaluado como la pendiente de la región lineal del gráfico  $(W_t - W_o)/A$  como función respecto de la raíz del tiempo  $\sqrt{t}$ .

Se obtendrán valores para el coeficiente de absorción capilar “ $k$ ” para los especímenes, uno para cada tipo muestra, los valores de los pesos registrados se muestran en las Tablas 8, 9, 10 y 11 para los diferentes tipos mezclas de mortero:

**Tabla 8: Pesos registrados para la mezcla M1: Cal Apagada-Arena Volcánica-Ceniza Volcánica-Mucílago de Cactus.**

Mezcla “M1”												
Nº	W o	5min	10min	15min	30min	1 h	2 h	3 h	4 h	6 h	24 h	48 h
1	175,80	186,15	194,03	198,76	202,91	206,79	207,05	207,20	207,24	207,37	208,23	208,67
2	173,30	184,60	191,23	196,58	200,34	204,06	204,32	204,45	204,50	204,62	205,52	205,94
3	177,39	189,67	196,28	200,78	204,59	208,01	208,26	208,43	208,46	208,57	209,44	209,88
4	185,32	196,41	203,57	208,02	211,87	217,02	217,34	217,47	217,53	217,70	218,48	218,92
5	176,30	187,80	194,72	198,88	202,54	206,71	206,97	207,11	207,11	207,26	208,06	208,51
6	177,53	188,63	196,37	200,79	204,64	208,95	209,23	209,41	209,43	209,56	210,50	211,01
7	183,18	194,78	202,30	206,67	210,62	214,55	214,86	214,97	215,04	215,15	215,96	216,40
8	181,92	194,12	200,17	204,53	208,27	213,37	213,69	213,84	213,88	214,01	214,83	215,27

**Tabla 9: Pesos registrados para la mezcla M2: Cal Apagada-Arena Volcánica-Ceniza Volcánica-Agua.**

Mezcla “M2”												
Nº	W o	5min	10min	15min	30min	1	2	3	4	6	24	48
1	180,22	191,97	198,71	202,86	206,67	210,31	210,55	210,71	210,81	210,93	211,87	212,14
2	163,06	175,33	184,76	190,08	193,71	194,85	195,10	195,21	195,27	195,37	196,19	196,61
3	181,94	192,11	198,49	202,42	206,13	212,08	212,43	212,55	212,65	212,72	213,56	214,02
4	178,34	190,73	196,88	201,17	205,14	208,40	208,68	208,80	208,83	208,97	209,85	210,33
5	176,78	187,95	194,47	198,29	202,00	206,05	206,31	206,45	206,47	206,70	207,39	207,82
6	162,86	183,15	189,07	190,38	190,61	190,88	191,06	191,20	191,23	191,37	192,28	192,81
7	185,03	196,48	202,39	206,45	210,44	216,32	216,65	216,79	216,82	217,01	217,96	218,54
8	178,94	188,81	194,41	197,94	201,50	209,26	209,83	209,95	209,99	210,15	211,07	211,57

**Tabla 10: Pesos registrados para la mezcla M3: Cal Apagada-Arena Volcánica-Mucílago de Cactus.**

Mezcla "M3"												
Nº	W o	5min	10min	15min	30min	1	2	3	4	6	24	48
1	191,06	204,62	211,00	215,38	219,01	222,59	223,11	223,30	223,34	223,49	224,54	225,12
2	191,62	206,62	211,93	215,54	219,14	223,24	223,71	223,87	223,87	224,02	224,96	225,46
3	175,66	189,06	194,91	198,96	202,12	204,58	204,85	204,96	205,01	205,17	205,97	206,45
4	188,50	201,95	207,29	210,95	214,42	219,76	220,27	220,40	220,42	220,56	221,51	222,09
5	181,77	195,50	201,74	206,28	209,59	211,97	212,29	212,43	212,51	212,60	213,45	213,96
6	183,09	198,07	203,31	206,36	209,98	213,78	214,13	214,29	214,31	214,46	215,35	215,89
7	178,91	192,88	198,75	202,04	205,78	208,90	209,21	209,43	209,43	209,58	210,41	210,94
8	199,24	215,98	221,50	224,66	228,12	230,92	231,23	231,33	231,37	231,48	232,51	233,08
9	192,17	205,83	211,47	215,03	219,10	223,62	224,00	224,14	224,19	224,31	225,22	225,73
10	175,51	188,41	194,40	199,00	202,04	204,17	204,39	204,54	204,59	204,70	205,50	205,98

**Tabla 11: Pesos registrados para la mezcla M4: Cal Apagada-Arena Volcánica-Agua.**

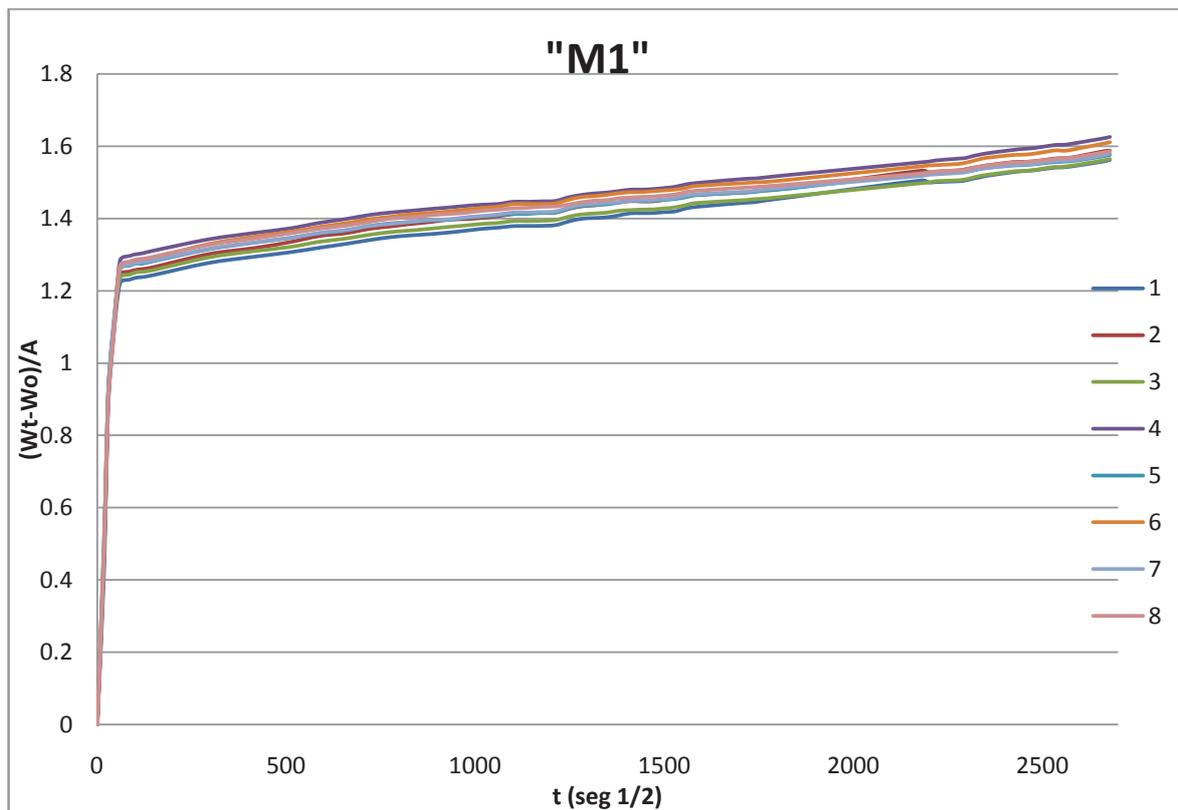
Mezcla "M4"												
Nº	W o	5min	10min	15min	30min	1	2	3	4	6	24	48
1	172,70	190,24	195,78	199,02	200,16	200,55	200,65	200,79	200,87	201,04	201,97	202,49
2	173,58	191,50	196,69	199,78	201,08	201,47	201,66	201,84	201,93	202,09	203,02	203,61
3	179,32	196,28	202,43	206,60	208,65	209,15	209,34	209,52	209,61	209,86	210,89	211,46
4	182,90	201,34	207,08	211,09	212,51	212,89	213,12	213,26	213,32	213,48	214,69	215,36
5	177,31	194,69	199,91	203,40	205,50	206,26	206,44	206,56	206,68	206,85	207,81	208,29
6	175,09	189,46	195,34	199,27	201,49	202,05	202,26	202,37	202,46	202,62	203,45	203,84
7	173,46	189,85	195,27	198,91	200,96	201,52	201,66	201,74	201,82	202,02	202,89	203,38
8	173,02	188,95	194,11	197,57	200,01	200,76	200,94	201,07	201,16	201,37	202,38	202,97
9	181,16	197,93	204,93	208,91	211,17	211,64	211,82	211,92	212,02	212,19	213,40	213,89
10	179,50	198,86	204,45	207,85	209,23	209,63	209,78	209,85	209,98	210,12	211,25	211,93

Para obtener el gráfico  $(W_t - W_o)/A$  de las probetas en función de  $\sqrt{t}$ , se tienen las Tablas 12, 13, 14 y 15.

**Tabla 12:**  $(W_t - W_0)/A$  de las probetas en función de  $\sqrt{t}$ . Para las Muestras "M1": Cal Apagada-Arena Volcánica-Ceniza Volcánica-Mucílago de Cactus.

		t (seg 1/2)												
		0	17,32	24,49	30	42,42	60	84,85	103,92	120	146,97	293,94	415,69	509,12
$(W_t - W_0)/A$	0	0,41	0,72	0,90	1,07	1,22	1,23	1,24	1,24	1,24	1,24	1,28	1,29	1,31
	0	0,46	0,72	0,94	1,09	1,24	1,25	1,26	1,26	1,26	1,27	1,30	1,32	1,33
	0	0,50	0,76	0,94	1,10	1,23	1,24	1,25	1,25	1,25	1,26	1,29	1,31	1,32
	0	0,45	0,74	0,92	1,07	1,28	1,30	1,30	1,30	1,30	1,31	1,34	1,36	1,37
	0	0,48	0,76	0,93	1,09	1,26	1,27	1,28	1,28	1,28	1,28	1,31	1,33	1,35
	0	0,45	0,76	0,94	1,09	1,27	1,28	1,29	1,29	1,29	1,29	1,33	1,35	1,36
	0	0,47	0,77	0,94	1,10	1,26	1,27	1,28	1,28	1,28	1,28	1,32	1,33	1,35
	0	0,49	0,74	0,91	1,06	1,27	1,28	1,29	1,29	1,29	1,29	1,33	1,34	1,36

Generándose el siguiente Gráfico:

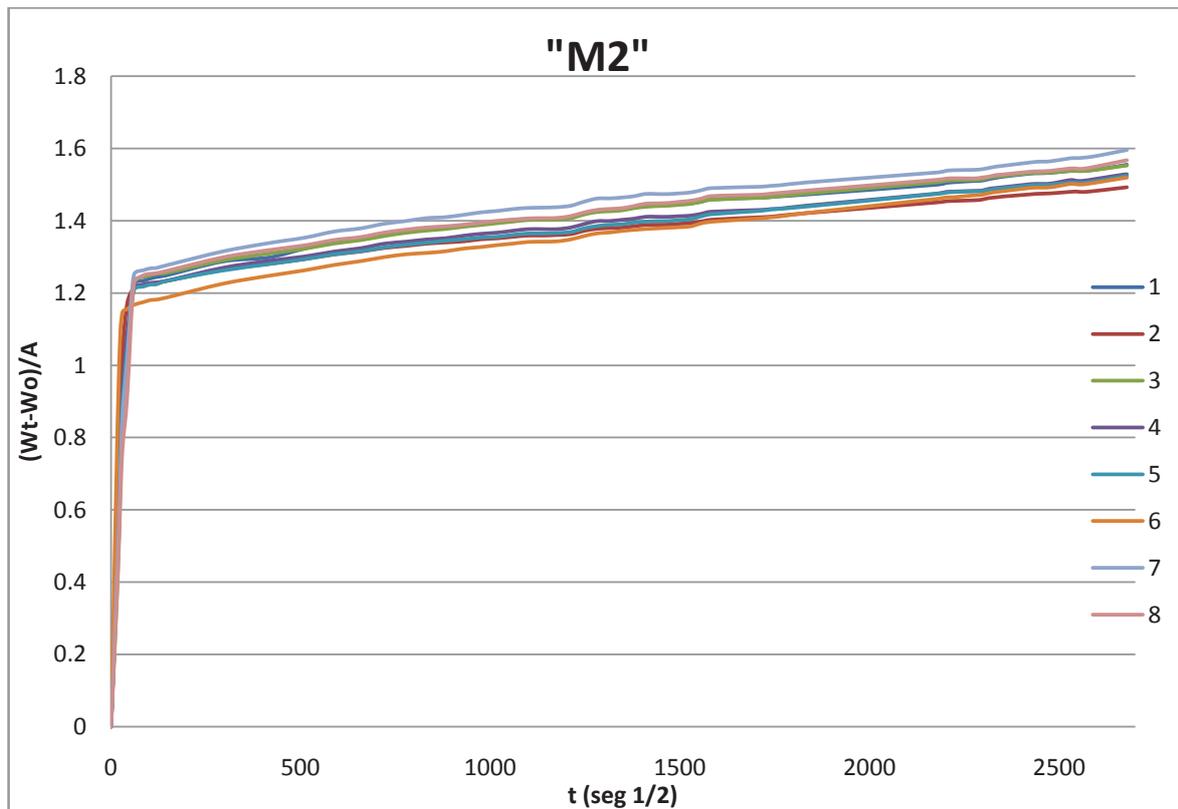


**Gráfica 1:** Muestra la relación de la diferencia de los pesos en el tiempo respecto al área de cada probeta VS raíz del tiempo.

**Tabla 13:  $(W_t - W_0)/A$  de las probetas en función de  $\sqrt{t}$   
Para las Muestras "M2": Cal Apagada-Arena Volcánica-Ceniza Volcánica-Agua**

		t (seg 1/2)											
		0	17,321	24,495	30	42,426	60	84,853	103,92	120	146,97	293,94	415,69
$(W_t - W_0)/A$	0	0,48	0,75	0,92	1,08	1,22	1,23	1,24	1,24	1,25	1,29	1,30	1,32
	0	0,47	0,83	1,03	1,17	1,21	1,22	1,23	1,23	1,23	1,26	1,28	1,29
	0	0,42	0,68	0,84	0,99	1,23	1,24	1,25	1,25	1,26	1,29	1,31	1,32
	0	0,50	0,75	0,92	1,08	1,21	1,22	1,23	1,23	1,23	1,27	1,29	1,30
	0	0,46	0,73	0,89	1,04	1,21	1,22	1,22	1,22	1,23	1,26	1,28	1,29
	0	0,85	1,09	1,15	1,16	1,17	1,17	1,18	1,18	1,19	1,23	1,25	1,26
	0	0,46	0,69	0,86	1,01	1,25	1,26	1,27	1,27	1,28	1,31	1,34	1,35
	0	0,40	0,63	0,77	0,91	1,23	1,25	1,25	1,25	1,26	1,30	1,32	1,33

Generándose el siguiente Gráfico:

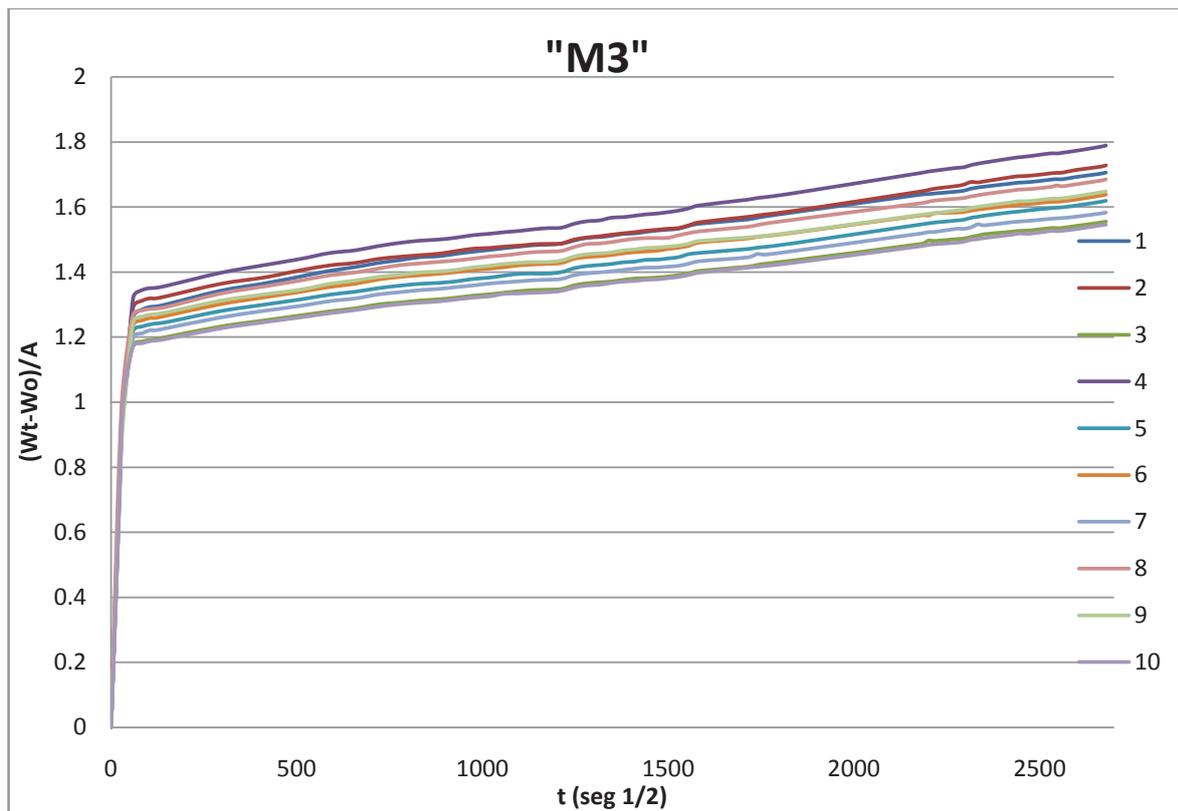


**Gráfica 2: Muestra la relación de la diferencia de los pesos en el tiempo respecto al área de cada probeta VS raíz del tiempo.**

**Tabla 14:  $(W_t - W_0)/A$  de las probetas en función de  $\sqrt{t}$**   
**Para las Muestras "M3": Cal Apagada-Arena Volcánica-Mucílago de Cactus**

		t (seg 1/2)											
		0	17,321	24,495	30	42,426	60	84,853	103,92	120	146,97	293,94	415,69
$(W_t - W_0)/A$	0	0,54	0,80	0,97	1,12	1,26	1,28	1,29	1,29	1,30	1,34	1,37	1,39
	0	0,61	0,83	0,98	1,13	1,29	1,31	1,32	1,32	1,32	1,36	1,38	1,41
	0	0,54	0,78	0,95	1,08	1,18	1,19	1,19	1,19	1,20	1,23	1,25	1,27
	0	0,57	0,80	0,95	1,10	1,32	1,35	1,35	1,35	1,36	1,40	1,42	1,44
	0	0,55	0,81	0,99	1,12	1,22	1,23	1,24	1,24	1,25	1,28	1,30	1,32
	0	0,60	0,82	0,94	1,08	1,24	1,25	1,26	1,26	1,26	1,30	1,32	1,34
	0	0,56	0,79	0,93	1,07	1,20	1,21	1,22	1,22	1,23	1,26	1,28	1,30
	0	0,67	0,89	1,02	1,16	1,27	1,28	1,29	1,29	1,29	1,33	1,36	1,37
	0	0,54	0,77	0,91	1,07	1,25	1,26	1,27	1,27	1,28	1,31	1,33	1,35
	0	0,53	0,77	0,96	1,08	1,17	1,18	1,19	1,19	1,19	1,23	1,25	1,26

Generándose el siguiente Gráfico:

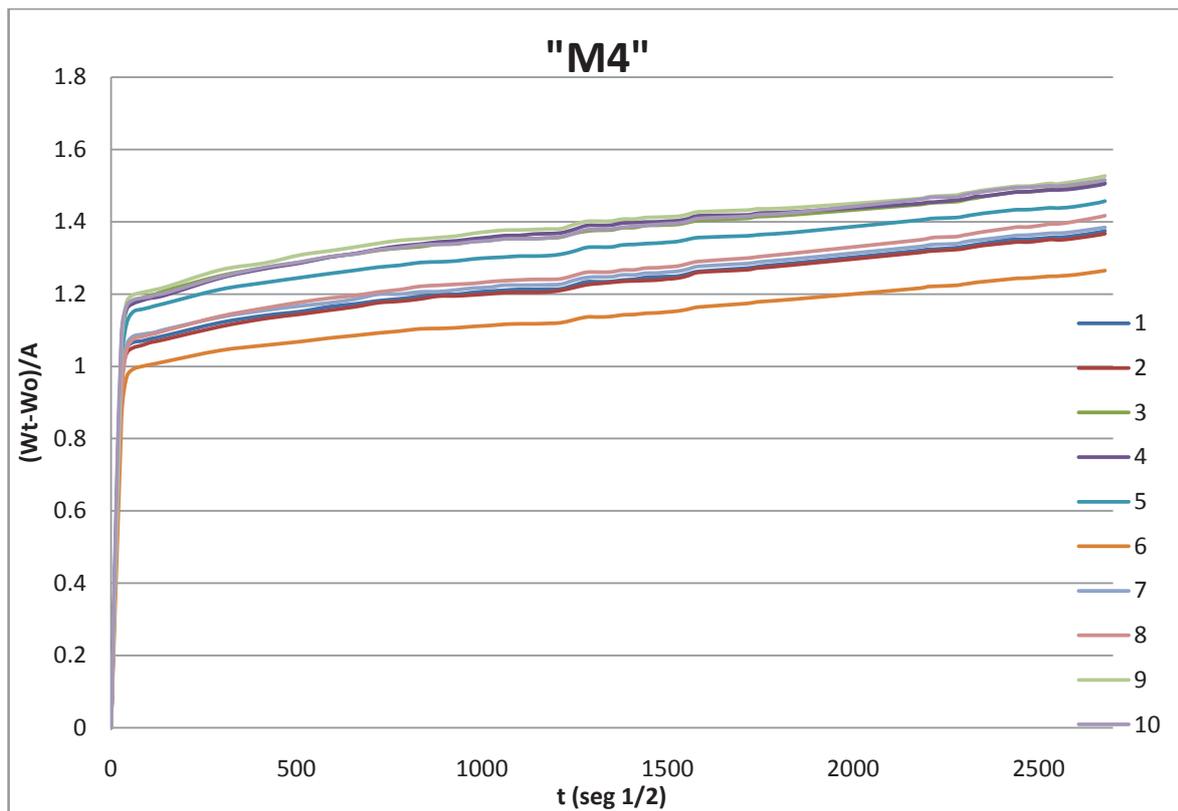


**Gráfica 3: Muestra la relación de la diferencia de los pesos en el tiempo respecto al área de cada probeta VS raíz del tiempo.**

**Tabla 15:  $(W_t - W_0)/A$  de las probetas en función de  $\sqrt{t}$**   
**Para las Muestras "M4": Cal Apagada-Arena Volcánica-Agua**

		t (seg 1/2)											
		0	17,321	24,495	30	42,426	60	84,853	103,92	120	146,97	293,94	415,69
$(W_t - W_0)/A$	0	0,67	0,88	1,01	1,05	1,07	1,07	1,08	1,08	1,09	1,12	1,14	1,15
	0	0,68	0,87	0,99	1,04	1,05	1,06	1,07	1,07	1,08	1,11	1,13	1,14
	0	0,67	0,92	1,08	1,16	1,18	1,19	1,20	1,20	1,21	1,25	1,27	1,29
	0	0,72	0,95	1,10	1,16	1,17	1,18	1,19	1,19	1,20	1,24	1,27	1,29
	0	0,69	0,90	1,04	1,12	1,15	1,16	1,16	1,17	1,17	1,21	1,23	1,25
	0	0,53	0,75	0,89	0,97	0,99	1,00	1,00	1,01	1,01	1,04	1,06	1,07
	0	0,63	0,84	0,98	1,06	1,08	1,09	1,09	1,09	1,10	1,14	1,15	1,17
	0	0,62	0,82	0,95	1,05	1,08	1,08	1,09	1,09	1,10	1,14	1,16	1,18
	0	0,66	0,93	1,09	1,18	1,20	1,20	1,21	1,21	1,22	1,27	1,29	1,31
	0	0,76	0,98	1,11	1,17	1,18	1,19	1,19	1,20	1,20	1,25	1,27	1,29

Generándose el siguiente Gráfico:



**Gráfica 4: Muestra la relación de la diferencia de los pesos en el tiempo respecto al área de cada probeta VS raíz del tiempo.**

Para evaluar el coeficiente de absorción capilar "K" para las diferentes mezclas se evaluará la pendiente de la región lineal de las gráficas, Figura 19.

Como se observa en las gráficas 1, 2, 3 y 4 la región lineal sólo se presenta a intervalos de tiempo cortos, para evaluar la pendiente se utilizará la siguiente fórmula que toma en cuenta la influencia de las diferentes pendientes "Si" en los sub-tramos Li, que se encuentran en un tramo considerado L. La fórmula presenta una gran ventaja ya que se acerca más a la pendiente real de la gráfica, si sólo se considerara una pendiente aritmética; la pendiente que existe entre dos puntos extremos de los datos, no se tomaría la influencia de las pendientes intermedias entre dichos puntos.

$$S = \left[ \frac{L}{\frac{L_1}{\sqrt{S_1}} + \frac{L_2}{\sqrt{S_2}} + \frac{L_3}{\sqrt{S_3}} + \dots + \frac{L_i}{\sqrt{S_i}}} \right]^2$$

L = Longitud total.

Li = Longitud del tramo i-ésimo considerado.

$\sqrt{S_i}$  = Pendiente del tramo i-ésimo considerado.

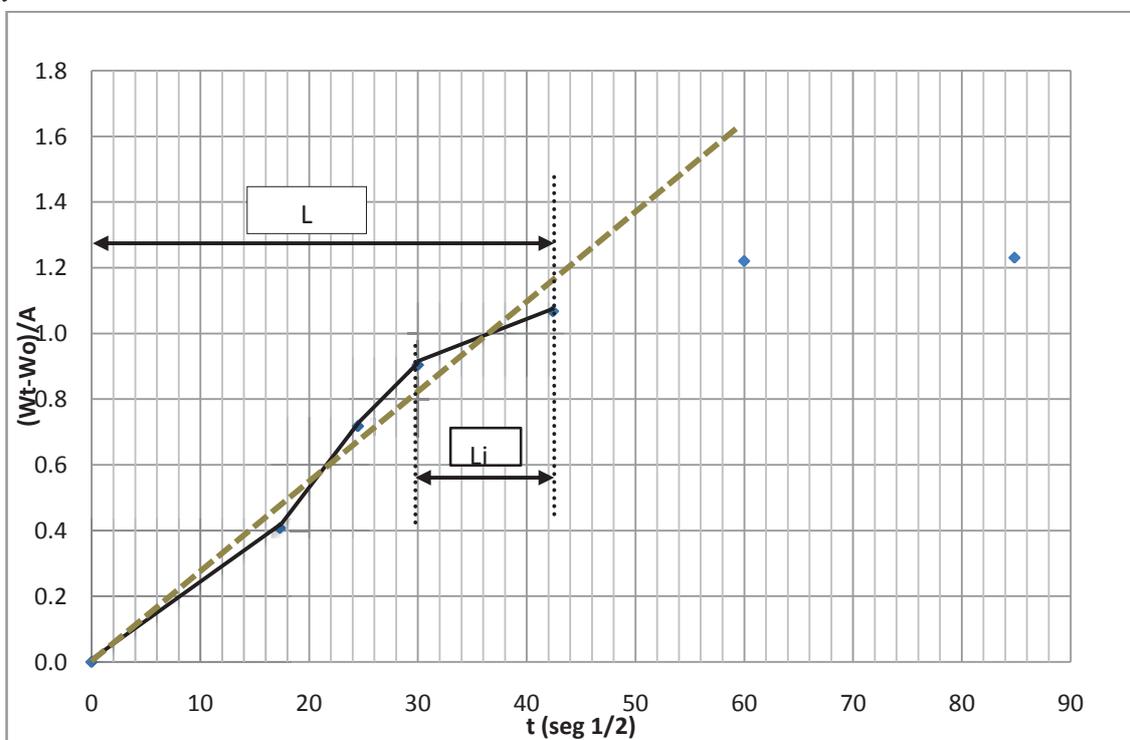


Figura 19.- Obtención de la pendiente "S" del tramo más lineal.

Para las diferentes mezclas analizadas sólo se consideran los tres primeros puntos de la gráfica que se generan de las expresiones  $(Wt-W_0)/A$  respecto a  $\sqrt{t}$  por ser la región que se aproxima a ser más lineal, Tabla 16, se pueden considerar más datos pero estos no aseguran una mejor aproximación de la tendencia lineal.

**Tabla 16: Datos considerados para la Mezcla "M1" en la determinación de la pendiente para la región más lineal.**

Para la Gráfica de la Mezcla "M1"							
$\sqrt{S_1}$	$\sqrt{S_2}$	$\sqrt{S_3}$	L1	L2	L3	L	S
0,1534	0,2080	0,1839	17,321	7,174	5,505	30,00	0,0286
0,1624	0,1932	0,1982	17,321	7,174	5,505	30,00	0,0306
0,1691	0,1927	0,1816	17,321	7,174	5,505	30,00	0,0311
0,161	0,201	0,1809	17,321	7,174	5,505	30,00	0,0298
0,1658	0,1998	0,1769	17,321	7,174	5,505	30,00	0,0306
0,1608	0,2086	0,1799	17,321	7,174	5,505	30,00	0,0302
0,164	0,2052	0,1786	17,321	7,174	5,505	30,00	0,0306
0,1685	0,1844	0,1787	17,321	7,174	5,505	30,00	0,0303

Aplicando el mismo criterio para determinar las pendientes para las mezclas M2, M3 y M4 se presentan las pendientes del tramo lineal, Tabla 17.

**Tabla 17: Pendientes de los tramos más lineales para cada probeta.**

Nº de Muestra	Mezcla M1	Mezcla M2	Mezcla M3	Mezcla M4
	S1	S2	S3	S4
1	0,00096	0,00093	0,00098	0,00109
2	0,00094	0,00095	0,00096	0,00109
3	0,00094	0,00088	0,00099	0,00115
4	0,00092	0,00095	0,00091	0,00117
5	0,00093	0,00092	0,00101	0,00112
6	0,00093	0,00092	0,00094	0,00106
7	0,00094	0,00087	0,00092	0,00108
8	0,00094	0,00077	0,00101	0,00104
9	-	-	0,00093	0,00115
10	-	-	0,00098	0,00115

Teniendo en cuenta que la pendiente de la región lineal es evaluado como el coeficiente de absorción capilar " $k$ ".

Para obtener el valor del coeficiente de la resistencia a la penetración del agua ( $m$ ) y el coeficiente de porosidad efectiva, se procede de la siguiente manera: se traza la pendiente en el gráfico de la región lineal, se toma el valor de la relación  $(W_t - W_o)/A$ , se traza una línea horizontal en el eje de los tiempos, el punto donde se interceptan las dos líneas es el tiempo que tardó el agua en ascender hasta la cara superior de la probeta, Figura 20.

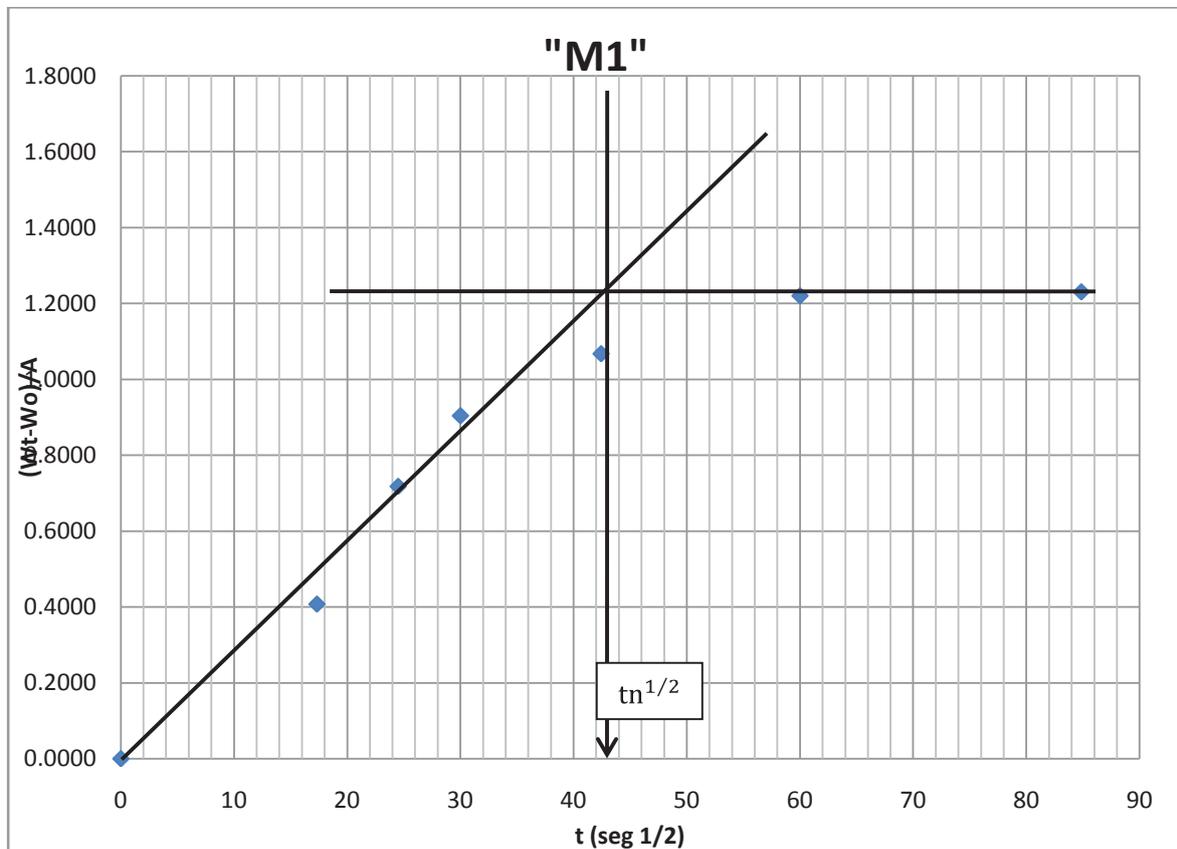


Figura 20.- Obtención del tiempo " $t_n$ " que tarda en ascender el agua a la cara superior de la probeta.

El coeficiente " $m$ " es determinado calculando el tiempo requerido para que el agua ascienda a la cara superior de la probeta, es decir, cuando  $z=H$ .

El coeficiente de porosidad efectiva ( $\epsilon$ ) se obtiene de la expresión según Fagerlund:

$$\varepsilon_e = \frac{k\sqrt{m}}{1000} \quad (\%)$$

Con la anterior información la Absorción Capilar, S, se calcula como:

$$S = \frac{1}{\sqrt{m}} \quad (\text{mm/h}^{1/2}) \text{ o } (\text{m/s}^{1/2})$$

**Tabla 18: Resumen de los datos obtenidos para los coeficientes de absorción capilar, resistencia a la penetración del agua y porosidad efectiva. Para las mezclas M1 y M2.**

# Muestra	Mezcla "M1"					Mezcla "M2"				
	"K" $\frac{\text{g}}{\text{cm}^2 * \text{s}^{1/2}}$	"tn" seg	"m" $\text{s/m}^2$	"Ee" %	"S" $\frac{\text{m}}{\text{s}^{1/2}}$	"K" $\frac{\text{g}}{\text{cm}^2 * \text{s}^{1/2}}$	"tn" Seg	"m" $\text{s/m}^2$	"Ee" %	"S" $\frac{\text{m}}{\text{s}^{1/2}}$
1	0,02862	2980	1085188	29,81	0,00096	0,03027	2639	1145432	32,39	0,00093
2	0,03057	2700	1119938	32,35	0,00094	0,03265	2089	1119545	34,55	0,00095
3	0,03115	2524	1128271	33,08	0,00094	0,02723	3252	1300882	31,06	0,00088
4	0,02983	2971	1174306	32,32	0,00092	0,03052	2507	1111172	32,17	0,00095
5	0,03060	2653	1146613	32,76	0,00093	0,02911	2742	1175239	31,56	0,00092
6	0,03016	2854	1160058	32,49	0,00093	0,03028	2517	1189491	33,02	0,00092
7	0,03063	2660	1126354	32,51	0,00094	0,02832	3173	1326855	32,62	0,00087
8	0,03025	2750	1126822	32,11	0,00094	0,02526	3847	1683702	32,78	0,00077
PROMEDIO	0,03023	2761	1133444	32,18	0,00094	0,02921	2846	1256540	32,52	0,00090

**Tabla 19: Resumen de los datos obtenidos para los coeficientes de absorción capilar, resistencia a la penetración del agua y porosidad efectiva. Para las mezclas M3 y M4.**

# Muestra	Mezcla "M3"					Mezcla "M4"				
	"K" $\frac{\text{g}}{\text{cm}^2 * \text{s}^{1/2}}$	"tn" seg	"m" $\text{s/m}^2$	"Ee" %	"S" $\frac{\text{m}}{\text{s}^{1/2}}$	"K" $\frac{\text{g}}{\text{cm}^2 * \text{s}^{1/2}}$	"tn" Seg	"m" $\text{s/m}^2$	"Ee" %	"S" $\frac{\text{m}}{\text{s}^{1/2}}$
1	0,03242	2767	1039121	33,05	0,00098	0,03253	1787	840650	29,82	0,00109
2	0,03231	2859	1082225	33,61	0,00096	0,03152	1881	844482	28,97	0,00109
3	0,03154	2430	1028601	31,99	0,00099	0,03574	1777	755560	31,07	0,00115
4	0,03160	3205	1208418	34,74	0,00091	0,03605	1743	726048	30,72	0,00117
5	0,03297	2412	988383	32,78	0,00101	0,03364	1877	794519	29,98	0,00112
6	0,03064	2858	1133958	32,63	0,00094	0,02959	1826	889867	27,91	0,00106
7	0,03053	2688	1181265	33,18	0,00092	0,03223	1844	856587	29,83	0,00108
8	0,03300	2608	975569	32,59	0,00101	0,03115	2067	927886	30,01	0,00104
9	0,03011	2995	1160405	32,43	0,00093	0,03600	1799	755247	31,29	0,00115
10	0,03194	2341	1033021	32,47	0,00098	0,03560	1813	751931	30,87	0,00115
PROMEDIO	0,03171	2716	1083097	32,95	0,00096	0,03341	1841	814278	30,05	0,00111

### 5.2.1. CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE LA ABSORCIÓN CAPILAR.

- Para espesor de recubrimiento de 30 mm en ambientes severos se recomiendan morteros con absorción capilar  $S \leq 3 \text{ mmh}^{1/2} (5 \times 10^{-5} \text{ m/s}^{1/2})$ ; en medios menos severos puede ser hasta de  $6 \text{ mm h}^{1/2} (10^{-4} \text{ m/s}^{1/2})$ . Si el espesor de la cubierta se incrementa, la absorción capilar puede modificarse proporcionalmente [Ho, 1978].

### 5.3. ENSAYO DE POROSIDAD

El espécimen después de un pre-acondicionamiento se debe saturar totalmente, para obtener la porosidad total se debe saturar totalmente el espécimen, hervir este 2 horas, Figura 21, Luego proceder a enfriarlo lentamente; se pueden dejar las probetas en el recipiente de agua hervida a 100 °C y dejarlas que se enfríen, para evitar un cambio brusco de temperatura en las probetas evitando un posible fracturamiento, hasta que la temperatura del agua llegue a la temperatura ambiente, Figura 23, antes de registrar su peso (saturado de agua), y dentro de agua (sumergido en agua), Figura 24. Finalmente el espécimen se seca a 105 °C, Figura 26, hasta peso constante.

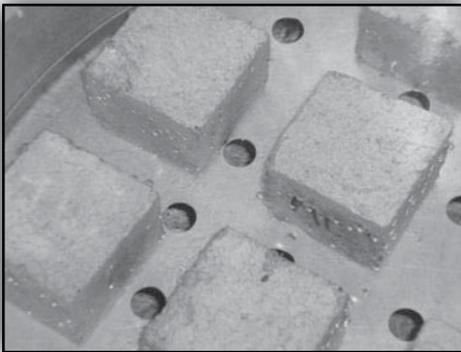
La porosidad total se expresa en porcentaje, con la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de Porosidad Total} = \frac{W_{\text{saturado}} - W_{105^{\circ}\text{C}}}{W_{\text{saturado}} - W_{\text{sumergido}}} \times 100$$



**Figura 21.- Especímenes en proceso de saturación total, sometidos a un proceso de hervido en agua.**

Los especímenes inmediatamente comienzan a saturarse al estar en contacto con el agua, este proceso es más intenso conforme la temperatura del agua aumenta hasta llegar a temperatura de ebullición, Figura 22.



**Figura 22.- Aumento de saturación de los especímenes.**



**Figura 23.- Proceso de enfriamiento, sumergidos en agua con temperatura a 100°C.**

Para calcular el peso sumergido se debe colocar una canastilla en la balanza, para que el agua esté en contacto directo con los especímenes, cuidar que la canastilla no tenga ningún contacto con el recipiente donde se encuentra el agua, Figura 25.



**Figura 24.-** Peso sumergido



**Figura 25.-** Ningún contacto de la canastilla.

El secado hasta peso constante se llevó a cabo en un horno marca Arsa con capacidad máxima de 240 °C a  $T=60\pm 3^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 26.-** Secado de los especímenes.

**Tabla 20: Datos obtenidos para los pesos saturado, sumergido y secado a 105 °C, en las diferentes probetas analizadas para obtener la porosidad total.**

Mezcla	#	W saturado	W sumergido	W 105 °C	P total	Porosidad Total “%”
		"gr"	"gr"	"gr"	"%"	
M1	1	219,20	102,90	174,76	38,21	38,52
	2	227,56	107,20	181,54	38,24	
	3	217,41	102,14	173,41	38,17	
	4	221,70	103,04	174,29	39,95	
	5	225,75	106,40	180,22	38,15	
	6	222,52	104,39	177,19	38,37	
M2	1	220,51	103,74	174,98	38,99	39,01
	2	201,35	93,27	157,75	40,34	
	3	221,30	104,42	176,47	38,36	
	4	218,49	102,89	173,79	38,67	
	5	217,38	102,33	173,16	38,44	
	6	226,55	106,26	179,31	39,27	
M3	1	228,67	110,46	180,68	40,60	40,88
	2	229,80	110,48	180,93	40,96	
	3	234,73	113,40	185,26	40,77	
	4	229,09	110,63	180,39	41,11	
	5	214,59	103,54	169,06	41,00	
	6	230,28	111,39	181,72	40,84	
M4	1	208,98	99,86	163,61	41,58	41,04
	2	213,98	102,45	168,13	41,11	
	3	209,30	100,42	164,95	40,73	
	4	214,77	102,92	168,98	40,94	
	5	210,72	101,10	165,88	40,90	
	6	205,22	98,28	161,43	40,95	

### 5.3.1. CRITERIOS DE EVALUACIÓN DEL PORCENTAJE DE LA POROSIDAD.

En cuanto al porcentaje de Porosidad [Juan Jose Carpio et al, 2000]:

≤ 10 %

Indica un mortero de buena calidad y compacidad.

10% - 15%

Indica un mortero de moderada calidad.

> 15%

Indica un hormigón de durabilidad inadecuada.

6. RESULTADOS.

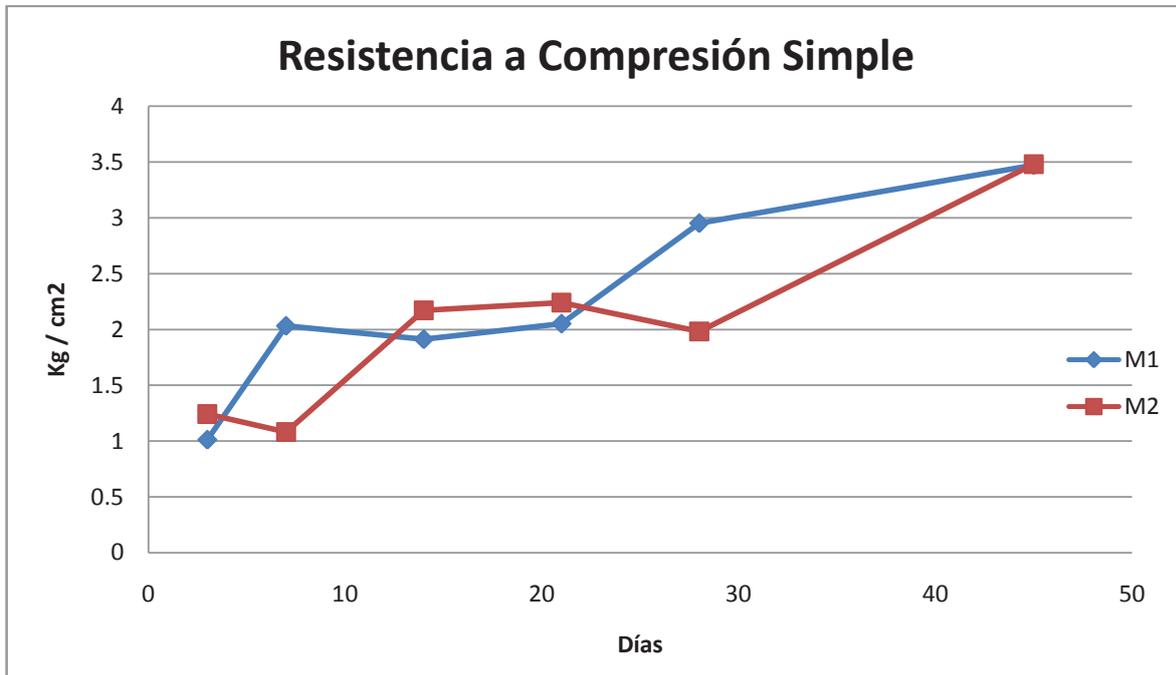


Figura 25.- Gráfica comparativa en esfuerzos de compresión entre morteros M1 que contienen mucílago de cactus y M2 que no contienen mucílago de cactus, ambos morteros contienen ceniza volcánica [Yepez, 2008].

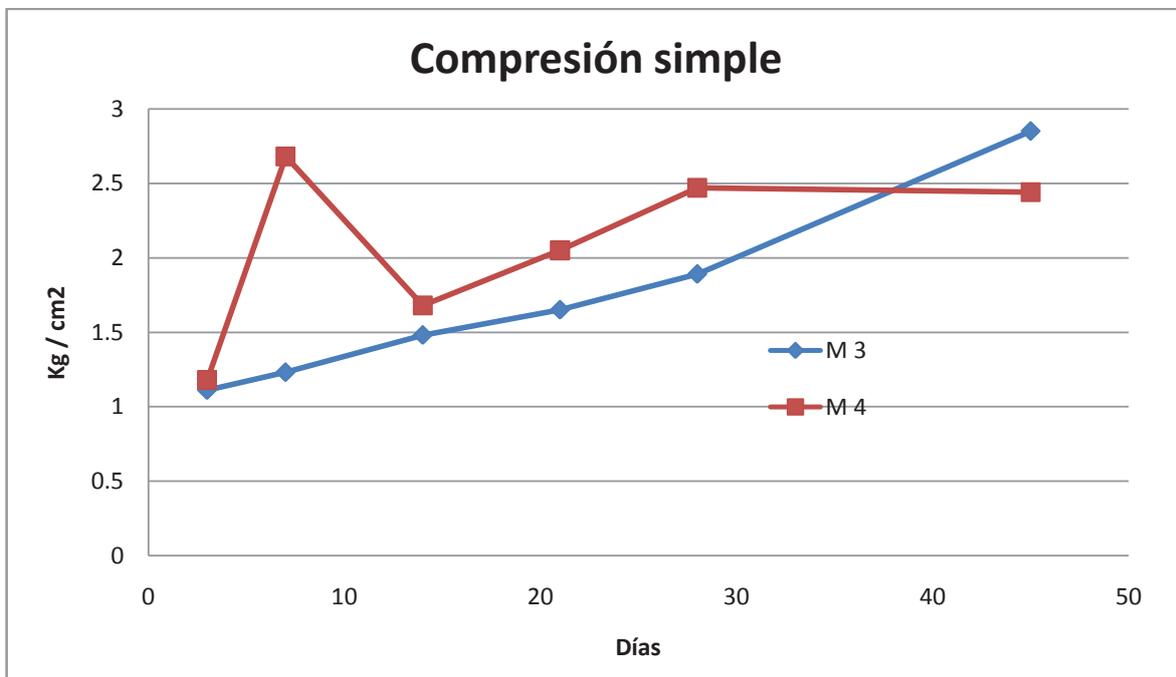


Figura 26.- Gráfica comparativa en esfuerzos de compresión entre morteros M3 que contienen mucílago de cactus y M4 que no contienen mucílago de cactus, ambos morteros no contienen ceniza volcánica [Yepez, 2008].

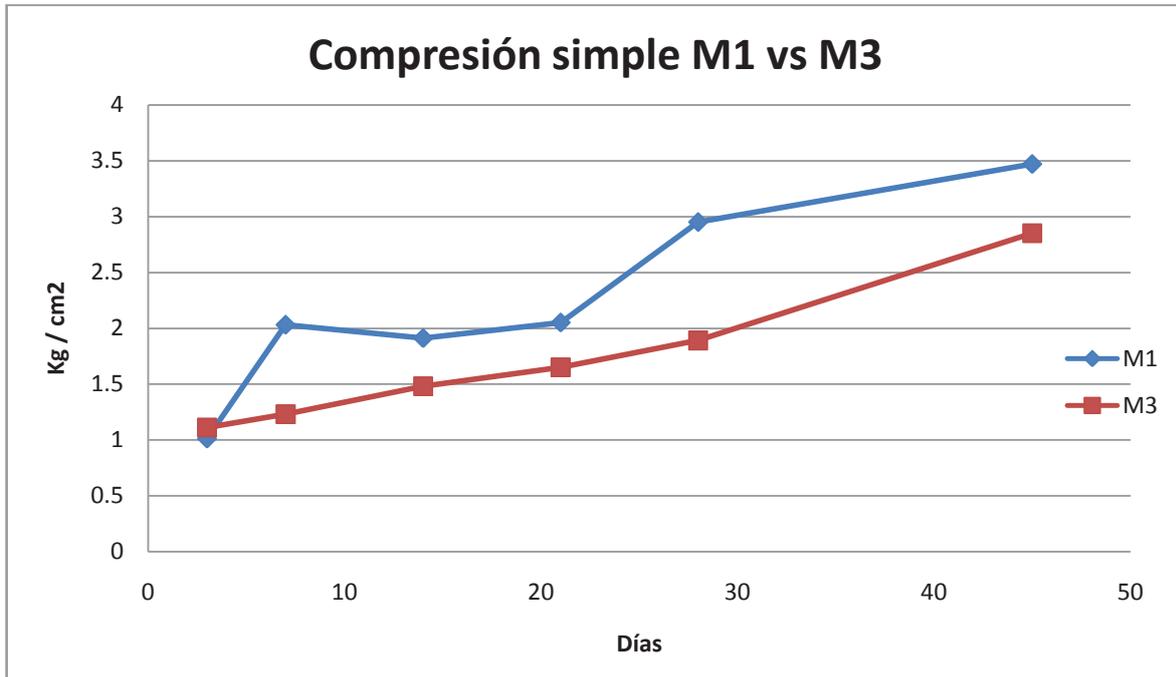


Figura 27.- Gráfica comparativa en esfuerzos de compresión entre morteros M1 que contienen ceniza volcánica y M3 que no contienen ceniza volcánica, ambos morteros contienen mucílago de cactus [Yepez, 2008].

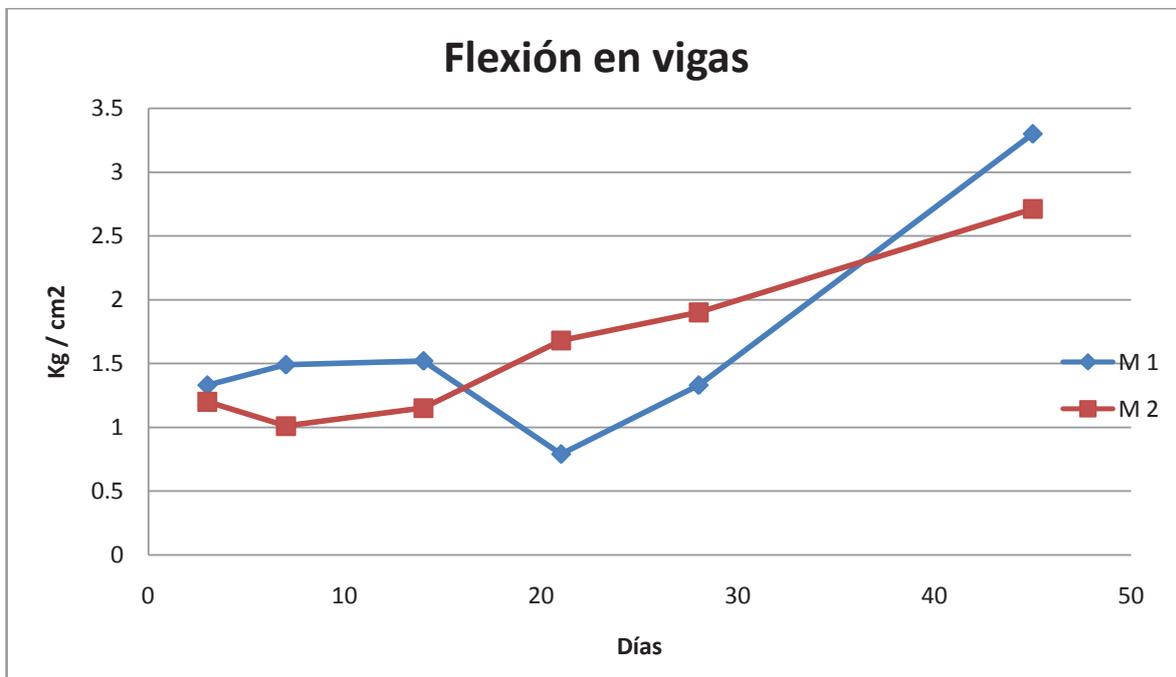


Figura 28.- Gráfica comparativa en esfuerzos de flexión entre morteros M1 que contienen mucílago de cactus y M2 que no contienen mucílago de cactus, ambos morteros contienen ceniza volcánica [Yepez, 2008].

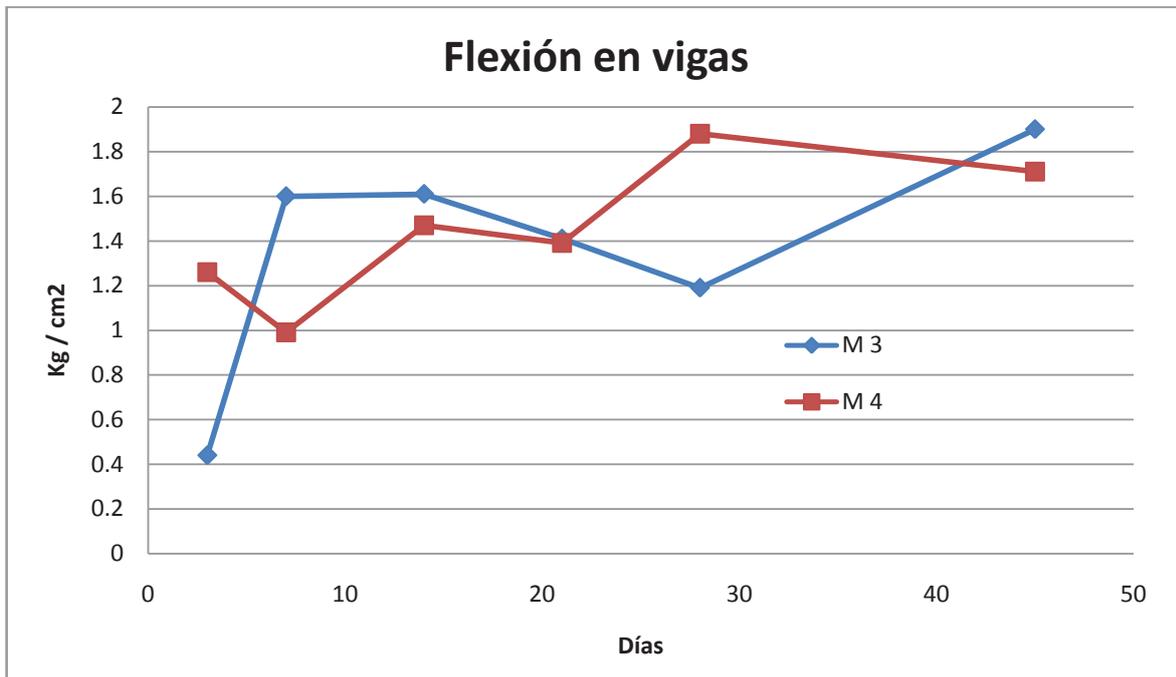


Figura 29.- Gráfica comparativa en esfuerzos de flexión entre morteros M3 que contienen mucílago de cactus y M4 que no contienen mucílago de cactus, ambos morteros no contienen ceniza volcánica [Yepez, 2008].

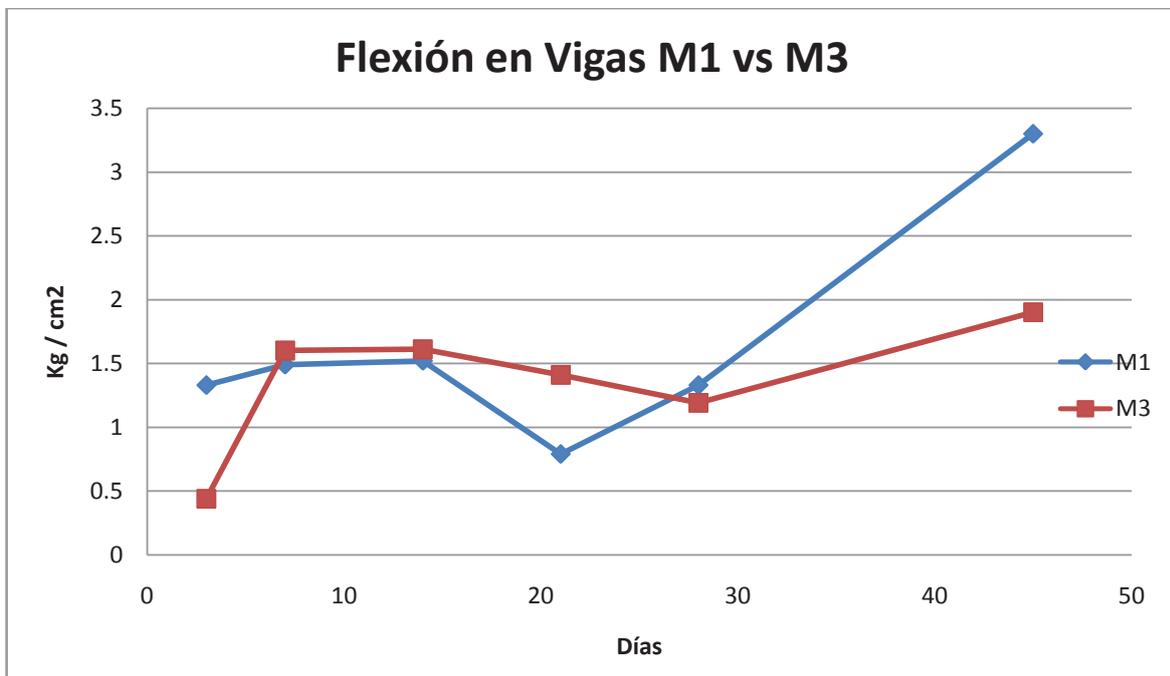


Figura 30.- Gráfica comparativa en esfuerzos de flexión entre morteros M1 que contienen ceniza volcánica y M3 que no contienen ceniza volcánica, ambos morteros contienen mucílago de cactus [Yepez, 2008].

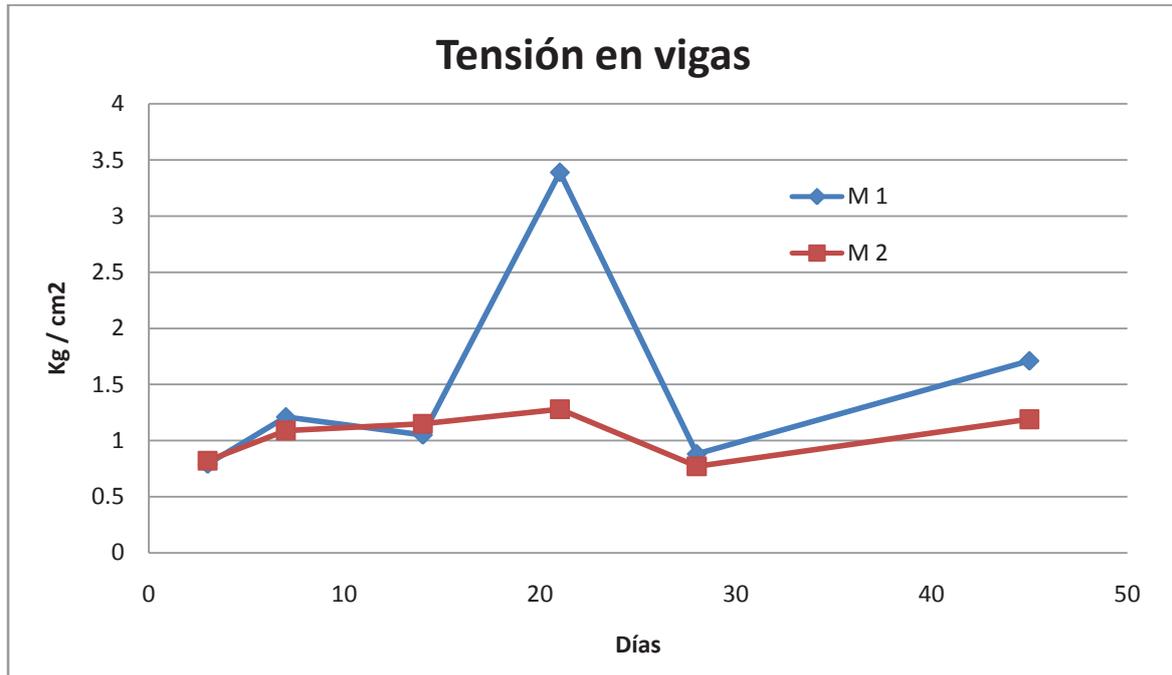


Figura 31.- Gráfica comparativa en esfuerzos de tensión entre morteros M1 que contienen mucílago de cactus y M2 que no contienen mucílago de cactus, ambos morteros contienen ceniza volcánica [Yepez, 2008].

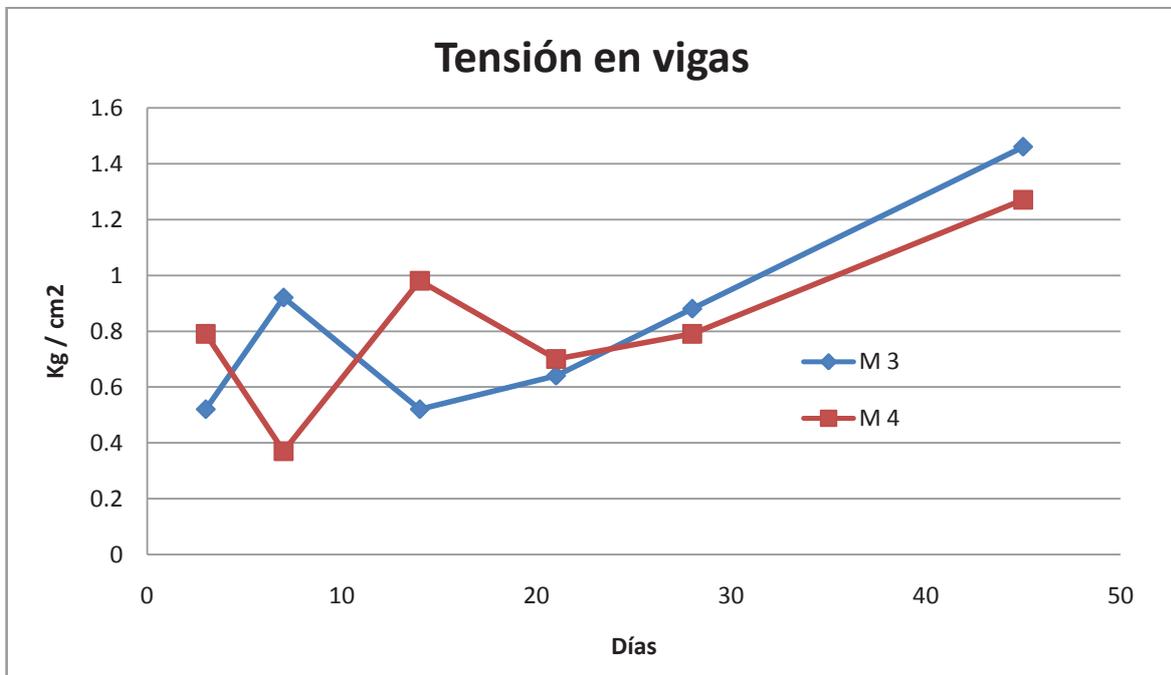
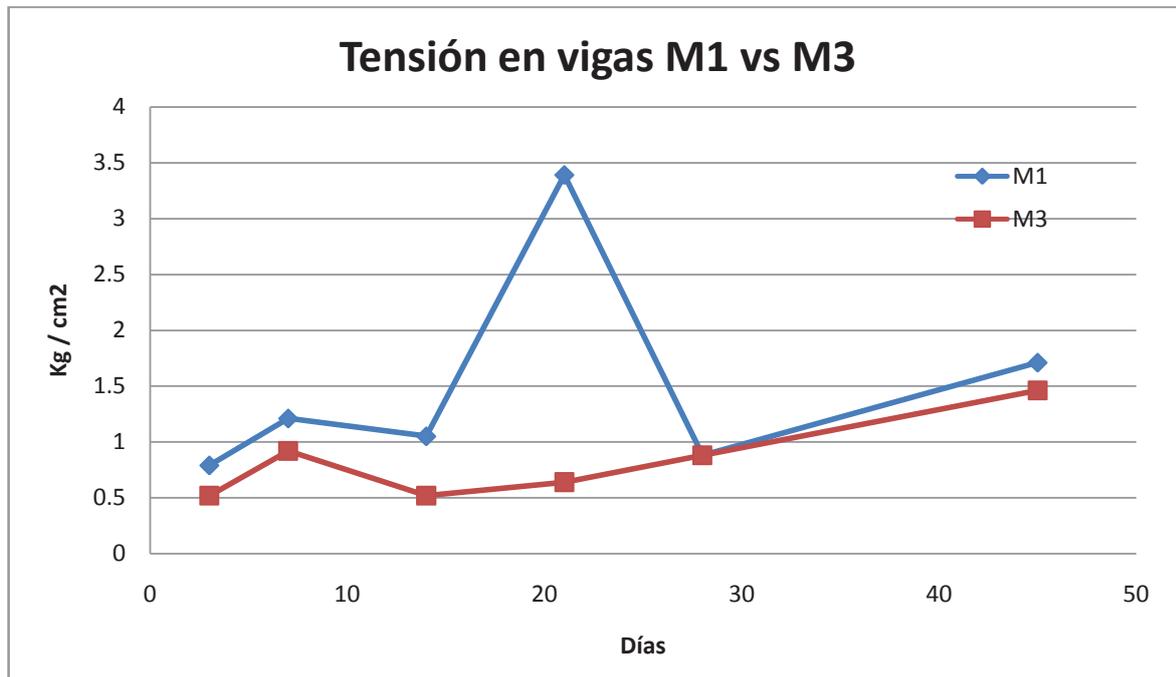


Figura 32.- Gráfica comparativa en esfuerzos de tensión entre morteros M3 que contienen mucílago de cactus y M4 que no contienen mucílago de cactus, ambos morteros no contienen ceniza volcánica [Yepez, 2008].



**Figura 33.- Gráfica comparativa en esfuerzos de tensión entre morteros M1 que contienen ceniza volcánica y M3 que no contienen ceniza volcánica, ambos morteros contienen mucílago de cactus [Yepez, 2008].**

En la Tabla 21 se resumen todos los datos obtenidos de las diferentes pruebas realizadas absorción capilar, porosidad total. Los datos de los elementos mecánicos presentados [Yepez, 2008], son para correlacionar la porosidad con la resistencia de las probetas de las de mezclas analizadas.

**Tabla 21: Resumen de los elementos mecánicos, coeficientes y propiedades de las mezclas analizadas M1, M2, M3, M4**

PROPIEDADES			TIPO DE MEZCLA			
			M1	M2	M3	M4
ELEMENTOS MECÁNICOS	Módulo de ruptura (MR en kg/cm <sup>2</sup> )	a 45 días	3.30	2.71	1.90	1.71
	*Esfuerzo de tensión (ft en kg/cm <sup>2</sup> )	a 45 días	1.71	1.19	1.46	1.27
	*Esfuerzo de compresión (f`c en kg/cm <sup>2</sup> )	a 45 días	3.47	3.48	2.85	2.44
COEFICIENTES	Absorción Capilar (k en g/cm <sup>2</sup> *s <sup>1/2</sup> )		0,03023	0,02921	0,03171	0,03341
	Resistencia a la penetración Del agua (m en s/m <sup>2</sup> )		1133444	1256540	1083097	814278
	Porosidad efectiva (ε <sub>e</sub> en %)		32,18	32,52	32,95	30,05
PROPIEDADES	Absorción capilar (S en m/s <sup>1/2</sup> )		0,00094	0,00090	0,00096	0,00111
	Porosidad Total (%)		38,52	39.01	40.88	41.04
	Absorción Total (%)		25.70	26.11	26.63	26.95

## 7. CONCLUSIONES

El coeficiente de absorción capilar definido como la relación de la cantidad de agua que penetra en una área expuesta respecto al tiempo. Para las mezclas M1 se obtuvo un valor mayor en 3.5% respecto a su mezcla testigo M2, que indica que la mezcla M1 absorberá más cantidad de agua. En la mezcla M3 disminuye el valor en 5.4% con respecto a su mezcla testigo M4, indicándonos que la mezcla a la que se le adicionó mucílago de cactus absorberá menos volumen de agua, las mezclas que no se les adicionó ceniza volcánica pero que sí se les adicionó mucílago de cactus M4 tuvieron mejor comportamiento en cuanto a la cantidad de agua absorbida.

Para los valores de la porosidad efectiva  $\epsilon_e$ , para la mezcla M1 se obtuvo un valor menor en 0.5% con respecto a su mezcla testigo M2. En las probetas realizadas M3 se obtuvo un valor mayor en 2% respecto a su mezcla testigo M4.

Todos los valores de la porosidad efectiva son menores que la porosidad total, ya que la porosidad efectiva representa la porosidad capilar que es donde se puede contener el mayor volumen de agua. En las mezclas M1 y M2 la porosidad efectiva representa un 83% de la porosidad total en los morteros. En las mezclas M3 y M4 representa un 75% de la porosidad total, corroborando que la porosidad capilar constituye aproximadamente 3/4 de la porosidad total en las mezclas analizadas.

La formación de los poros capilares depende además del grado de hidratación, de la relación a/c (agua/cal hidratada) utilizada, para la relación de 0.4 mezclas M1 y M2 se tiene que es mayor la porosidad efectiva, y para la relación a/c de 0.3 la porosidad efectiva disminuye, corroborando que para relaciones agua/ cal hidratada menores, disminuye la porosidad efectiva, disminuyendo la penetración de agentes agresivos.

En la porosidad total tuvieron valores menores en las mezclas que se les adicionó mucílago de cactus como aditivo.

La evaluación de la porosidad total de morteros utilizando el criterio del Manual de Inspección, Evaluación y Diagnóstico de Corrosión de Estructuras de Hormigón Armado. Nos da parámetros de valores que deben cumplir para saber qué tan adecuada es la mezcla, la mezcla M1 con una porosidad total de 38.5, M2 de 39%, M3 y M4 con 41% nos indica que todas son mayores al 15% de la porosidad total que marca el manual, según este criterio se concluye que la durabilidad del mortero es inadecuada.

Para correlacionar los elementos mecánicos obtenidos en las pruebas de compresión, tensión y flexión, se eligió la edad de 45 días ya que el agua contenida en los poros capilares es la primera que se evapora, evitando así contener humedad en el mortero que pueda reducir la resistencia de los morteros.

Para obtener los esfuerzos de compresión y tensión en un mortero se aplicaron dos fórmulas que dependen del área donde se aplica la carga, dado que el área se reduce cuando un mortero sea más poroso.

#### COMPRESIÓN.

En las mezclas con menor porosidad se tendrá un aumento del esfuerzo de compresión, en la mezcla M1 la porosidad es de 38.52% y la resistencia es de 3.47 kg/cm<sup>2</sup>, en la mezcla testigo M2 la porosidad total es de 39.01, el esfuerzo resistido es de 3.48 kg/cm<sup>2</sup>.

Analizando la mezcla M3 se tiene una porosidad de 40.88% y una resistencia de 2.85 kg/cm<sup>2</sup>, la mezcla testigo M4 con una porosidad total de 41.04 dió una resistencia de 2.44 kg/cm<sup>2</sup>, cumpliendo que a mayor área, mayor resistencia. Comprando la mezcla que se le adicionó ceniza volcánica M1, con la mezcla que no se le adiciono ceniza volcánica M3, pero que a ambas se les adiciono mucílago de cactus, M1 tiene porosidad menor que M3, la resistencia es mayor en la mezcla que se le adiciono ceniza volcánica mezcla M1.

El mucílago de cactus disminuye la porosidad capilar, que es el tipo de poros que resulta relevante para la durabilidad en morteros, y son los inciden en la mayoría de las

propiedades mecánicas. En los morteros que se les adicionó ceniza volcánica como agregado fino y mucílago de cactus como líquido de amasado, presentaron características superiores en la resistencia mecánica de compresión, tensión y modulo de ruptura respecto a los morteros que no se les adicionó ceniza volcánica como agregado fino.

---

## 8. BIBLIOGRAFÍA

- Aguilar G.R.C. 2005, Tesis Profesional "El Efecto Puzolánico de la Ceniza Volcánica" de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; Morelia, Michoacán, México. Pág. 7-12, 18-25.
- Amoroso G. y Fassina V. 1983, Stone decay and conservation, atmospheric pollution, cleaning, consolidation and protection. Materials Science Monographs, 11. Elsevier.
- Artigas, 2002, Departamento de enseñanzas de las tecnologías de la construcción, 2002, Morteros, Facultad de Arquitectura., Montevideo, Uruguay, Edición 5. Pág. 1-7.
- Benner W.H., McKinney P.M., 1985, Oxidation of  $SO_2$  in fog droplets by primary oxidation. Atmospheric Environment, 19: 1377-1383.
- Boke H., Gokturk H., Caner-Saltik E. & Demirci S., 1999, Effect of Airborne Particle on  $SO_2$ -Calcite Reaction. Applied Surface Science, 140: 70-82.
- Bravo Hollis H. y Sanchez Mejorado H., 1991, "Las Cactaceas de Mexico", UNAM, Pág. 52-76.
- Callebaut K., J. Elsen, K. Van Balen y W. Viaene, 2001, "Nineteenth century hydraulic restoration mortars in the Saint Michael's Church (Leuven, Belgium) Natural hydraulic lime or cement?" Cement and Concrete Research, Volume 31, Number 3, Pág. 397-403.

---

Carbonell de Massy M. "Conservación y Restauración de Monumentos", 1993, Editorial Vanguard Grafic, España, Pág. 18-48 y 45-51.

Del Monte M. Sabbioni C. Vittori O., 1981, Airborne carbón particles and marble deterioration. *Atmospheric Environment*, 15: 645-652.

Esbert R.M., Ordaz J., Alonso F.J., 1997, Manual de diagnosis y tratamiento de materiales cerámicos pétreos y cerámicos. *Collegi d'Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona*, Barcelona. Pág. 139.

Fort R. 2007, Ciencia, Tecnología y Sociedad para una Conservación Sostenible del Patrimonio Pétreo "La contaminación atmosférica en el deterioro del patrimonio monumental: medidas de prevención" Primera Edición.-Madrid, España. 2007, ISBN: 84-95710-41-2.-Pág. 57-70.

Flores Hernández A., Orona Castillo I., 2004, Productividad del nopal para verdura (opuntia spp) bajo riego por goteo subterráneo en la comarca lagunera. *Revista de Chapingo, Serie Zonas Aridas*, Vol. III, Núm. 2, ISSN: 0186-3231, Pág. 100.

Granados S. Diodoro, 1991, Castañeda P. A. "El nopal (historia, fisiología, genética e importancia frutícola)", Primera Edición, Editorial Trillas S.A. México. Pág. 9-14.

Ho, D.W. and Lewis, R.K., 1978, "The Water Sorptivity of Concretes: The Influence of Constituents under Curing". *Durability of Building Materials*, Vol. 4. Pág. 241-252.

- 
- Juán José Carpio y miembros de la Red DURAR., 2000, Manual de Inspección, Evaluación y Diagnostico de Corrosión En Estructuras de Hormigón Armado. Tercera Edición.-Campeche, México. Agosto, ISBN 980-296-541-3.- Pág. 117-121.
- Kovacs T., R.m. Esbert, M. Montoto., 2008, "Characterization of the pore space of crystalline monumental stones" Libro de actas IX Congreso Internacional de Rehabilitación del Patrimonio Arquitectónico y Edificación. Ed. Centro internacional para la Conservación del Patrimonio, Sevilla, España. Pág. 1-2
- López Celis R. y otros., 2006, Durabilidad de la Infraestructura de Concreto Reforzado Expuesta a Diferentes Ambientes Urbanos de México. Publicación Técnica N° 292.-Sanfandila, Querétaro. México, ISSN 0188-7297.-Pág. 47,48 y Pag.149-154.
- Mandujano Ruiz R. R., 2006, Tesis Profesional "Estudios Preliminar de los pigmentos presentes en Cascara de Pitaya de la Región Mixteca "Universidad Tecnológica de la Mixteca; Huajuapán de León, Oaxaca, México. Pág., 3.
- Martínez W., Alonso E., Camacho S., Castaño V. y Martínez Gómez L., 2002, "Efecto del Mucilago Cactus Opuntia, en el Incremento de Resistencia Mecánica de Morteros Antiguos de Albañilería Elaborados con Cal", Ciencia Nicolaita, Diciembre 2002, ISSN: 0188-9176, Pág. 159-168.
- Meli Piralla, R., 1971,"Ingeniería Estructural de los Edificios Históricos", Editado por Fundación ICA, Pág. 25-28.
- Miranda, Angel, 1972, La evolución del hombre, Editorial Herrero, México, Pág. 15-17.

Navarro J. V. 2007, Ciencia, Tecnología y Sociedad para una Conservación Sostenible del Patrimonio Pétreo “Principales técnicas de laboratorio aplicables al estudio de los materiales pétreos” Primera Edición.-Madrid, España. 2007, ISBN: 84-95710-41-2.-Pág. 147-150.

Neville A., 1999, Tecnología del Concreto, IMCYC, México, Pág. 163.

Pérez Yopez D. Y., 2008, Tesis Profesional “Ceniza Volcánica Como Agregado en Morteros de Albañilería con Cal Apagada Artesanalmente “de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; Morelia, Michoacán, México. Pág. 4, 11, 52-54, 73-74, 77,78-101.

Pimienta-Barrios E., 1994, Prickly pear (Opuntia), A Valuable Fruit Crop For the Semi-Arid Lands of Mexico. Journal of Arid Environments, Pág. 1-11.

Rivera Flores E., 2002, Tesis Profesional “Morteros de Albañilería para Restauración, como Aditivo Miel de Abeja” de la Faculta de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo; Morelia, Michoacán, México. Pág. 5-22.

Salamanca Correa, R., 1984, "Dosificación de morteros, diseño de mezclas de mortero". Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Civil. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá.

San Juan Barbudo M.A., 1992, Tesis Profesional “Cálculo del Período de Iniciación de la Corrosión de la Armadura de Hormigón” Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Complutense de Madrid; Madrid, España. Pág.9-11, 20, 50-54 y 106-115.

Silva Ruelas, 1990, Los Materiales de Construcción de la Antigua Valladolid, Secretaria de Comunicaciones y Obras Publicas del Gobierno del Estado de Michoacán, Pág. 63.

Scherer G.W.,1999, Crystallisation in pores. Cement Concr. Res, 29: 1347-1358.

Torfs K., Van Grieken R., 1997, Chemical relations between atmospheric aerosols, deposition and Stone decay layers on historic buildings at the Mediterranean coast. Atmospheric Environment, Pág. 2179-2192.

Vos B. H. ,1976, Waterabsortion and drying of material. En: Int Simp. The Conservation of Stone. R. Rossi-Maneresi, Ed. Bologna, Pág. 679-694.

Wagner M. C., 2000, La Teoría de Protección de Fachadas según Kunzel como base para una Futura Normalización, Revista Bit, Pág. 1-2.

Winkler E.M., 1997, Stone: Properties, durability in man's environment. Springer, New York, 3ª Edition. Pág. 313.