

01121
31



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

“TÉCNICAS DE CONSOLIDACIÓN DE GRIETAS EN
MAMPOSTERÍAS DE MONUMENTOS HISTÓRICOS “

TESIS

Que para obtener el título de:

INGENIERO CIVIL

presenta

MARCOS MAURICIO CHÁVEZ CANO

Director de tesis: Ing. Roberto Sánchez Ramírez



CIUDAD UNIVERSITARIA
MÉXICO, DF.

FEBRERO 2003

A

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

Autorizo a la Dirección General de Bibliotecas •
UNAM a difundir en formato electrónico e impres.
contenido de mi trabajo recepciona.
NOMBRE: MARCOS MAURICIO CHÁVEZ CANO
CARR: CARR
FECHA: 24-01-02
FIRMA: [Firma]

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
FING/DCTG/SEAC/UTIT/138/01

Señor .
MARCOS MAURICIO CHÁVEZ CANO
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **ING. ROBERTO SÁNCHEZ RAMÍREZ**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

"TÉCNICAS DE CONSOLIDACIÓN DE GRIETAS EN MAMPOSTERÍAS DE MONUMENTOS HISTÓRICOS"

- INTRODUCCION**
- I. CRITERIOS PARA REHABILITAR ELEMENTOS DE MAMPOSTERÍA**
 - II. TIPOS DE CONSOLIDANTES**
 - III. ADITIVOS**
 - IV. PRUEBAS EXPERIMENTALES**
 - V. METODOLOGÍA PARA CONSOLIDAR GRIETAS**
 - VI. COMENTARIOS FINALES Y CONCLUSIONES**
- REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**
TABLAS
FIGURAS

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria a 24 de agosto de 2001
EL DIRECTOR

[Firma]
M.C. GERARDO FERRANDO BRAVO
GFB/GMP/mstg.

DEDICATORIA

Este trabajo es el fruto de años de esfuerzo que sin el apoyo y sacrificio de mis padres y de mis hermanas Ana, Marce, no hubiera sido posible conseguirlo. Gracias, por haber confiado en mí a pesar de los avatares que hemos vivido. Y claro de mi queridísima "Luisha".

AGRADECIMIENTOS

Al Ing. Roberto Sánchez, por el apoyo y confianza incondicional brindada para la realización de este trabajo.

Al Instituto de Ingeniería, por haberme brindado todas las facilidades para realizar esta investigación.

A todos los cuates del Laboratorio de Estructuras y Materiales del Instituto de Ingeniería, ya que sin su apoyo no hubiera sido posible desarrollar este trabajo, en especial a Concepción Hernández, gran amigo y compañero.

Al Sr. José Rosales, por el apoyo brindado en las tareas de campo y por contagiarme de su gran sentido del humor.

Y sobre todo a la UNAM, por haberme compartido la sabiduría y experiencia de toda su comunidad.

INDICE

Contenido	Página
Introducción	
I. Antecedentes históricos	1
II. Problemática	2
III. Objetivos	2
1. Criterios para rehabilitar elementos de mampostería	
1.1 Aspectos generales	4
1.2 Causas de degradación	5
1.3 Tipos de alteración	8
1.4 Proceso de rehabilitación	9
2. Tipos de consolidantes	
2.1 Consolidantes inorgánicos	13
2.2 Consolidantes orgánicos	21
2.3 Protección de mamposterías	25
2.4 Aplicaciones	26
3. Aditivos	
3.1 Aspectos Generales	32
3.2 Tipos	33
3.3 Limitaciones	36
4. Pruebas experimentales	
4.1 Especificaciones	37

4.2	Pruebas experimentales	38	
4.3	Preparación de lechadas	43	
4.4	Análisis de resultados	48	
4.5	Resumen de resultados	48	
4.6	Descripción de aditivos, morteros y tratamientos empleados en la elaboración de lechadas	50	
5. Metodología para consolidar grietas			
5.1	Inyección de lechada	53	
5.2	Métodos de inyección	53	
5.3	Equipos	54	
6. Comentarios finales y conclusiones			56
Referencias bibliográficas			59
Tablas			62
Figuras			74
Glosario			109

INTRODUCCIÓN

I. Antecedentes históricos

Es incuestionable que los edificios antiguos que hoy perduran y que son conocidos como monumentos históricos fueron contruidos con materiales de alta calidad que, a pesar de la falta de técnicas y equipos sofisticados, fueron diseñados tan perfectamente que han soportado la embestida del paso de los siglos.

En su mayoría, estas construcciones fueron realizadas con mamposterías de adobe, piedra o ladrillo, donde uno de los principales materiales cementantes utilizados en los morteros fue la cal, misma que era manejada según las técnicas constructivas de la época.

Este material ha estado presente en la elaboración de morteros desde hace 5000 o 6000 años antes de J.C. Desde entonces, la cal es obtenida a partir de un sencillo procedimiento, que consiste: primero, en la calcinación de una piedra caliza, dando como resultado terrones de cal viva, la cual es apagada al ponerse en contacto con el agua; posteriormente, es triturada para su empleo en la construcción.

Muchos autores se refieren a los romanos como la cultura que más desarrolló el empleo de la cal en morteros. De acuerdo con *Gárate Rojas, Ignacio, 1994*, Vitruvius, un arquitecto romano decía: *"Cuando la cal es apagada, debe mezclarse con arena, si es arena de mina se utilizará una parte de cal por tres de arena. Pero si es arena de río se utilizará una de cal por dos de arena"*. Dicha composición del mortero de cal ha perdurado con el tiempo.

Más es difícil afirmar quiénes en verdad desarrollaron el uso de este cementante en las construcciones, puesto que en México y en otros países de América podemos encontrar ciudades prehispánicas edificadas con morteros de cal, lo que demuestra su uso antes de la conquista española.

En la actualidad, el uso de la cal en la construcción ha sido desplazado por el cemento, el cual ofrece grandes resistencias en periodos relativamente cortos en comparación con la cal. Sin embargo, los morteros hechos con ésta ofrecen ciertas ventajas sobre los morteros hechos con cemento, entre las más importantes se encuentran las siguientes:

- Su gran poro deja transpirar a los materiales que reviste permitiendo a su vez la transpiración de la estructura.
- La cal no produce sales nocivas, mientras que generalmente el cemento produce sales que atacan los materiales que componen la piedra provocando su deterioro.
- Los morteros de cal no se agrietan por su lento fraguado y no necesitan aditivos. Permiten la transpiración de la mampostería, además son buenos aislantes térmicos y durables.

El paso del tiempo ha sido la mejor evidencia de la durabilidad de los morteros hechos con cal, ya que por varios siglos lograron resistir las acciones del medio ambiente sin que se produjeran alteraciones sustanciales en sus propiedades físicas y mecánicas; sin embargo, con el inicio de la Revolución Industrial el ambiente se ha saturado de contaminantes que han

acelerado el deterioro no solo de los morteros, sino también de otros materiales utilizados en la construcción de estos edificios, puesto que reaccionan químicamente con sus componentes, transformándolos y debilitándolos, ocasionando, en ciertos casos, problemas de estabilidad estructural.

Por lo tanto, para restituírle su estabilidad a los monumentos afectados, la mayoría de las veces es necesario consolidar sus elementos estructurales, lo cual se consigue introduciendo lechadas cementantes o resinas dentro de las partes deterioradas, tratando de conservar al máximo la originalidad del monumento, por lo que en principio se evita el uso de materiales extraños a los originales, aunque esto no siempre sea posible: la elección del tipo de lechada a usar depende de las condiciones del elemento a tratar.

Debido a que los monumentos históricos son el reflejo de nuestro pasado, es de gran importancia implementar medidas que ayuden a su conservación, tratando de mantener su originalidad al máximo, sin menospreciar el uso de los materiales modernos puesto que utilizándolos adecuadamente en combinación con los materiales originales pueden obtenerse resultados satisfactorios.

II. Problemática

La consolidación de elementos estructurales en monumentos históricos tiene como objetivo devolverle a la piedra y a los morteros que las aglutinan en la mampostería, la cohesión que pudo haberse alterado por problemas de arenización, exfoliación, y fisuración, o también, por problemas estructurales producidos por movimientos sísmicos, asentamientos del subsuelo, sobrecargas o defectos de la piedra ocasionados en el momento de su extracción y corte, como lo mencionan en sus libros: *García de Miguel José María, et. al. 1994* y *Mingarro Martín, Francisco, 1996*. En otras palabras, el proceso de consolidación consiste en introducir a través de distintas técnicas, un producto al interior de los elementos estructurales para restituir la integridad de la mampostería deteriorada y adherirla a la parte sana.

Por lo que hace necesario que estos productos tengan una alta penetrabilidad tanto en el seno de la parte alterada, como de la parte sana subyacente, es decir, que sean líquidos de baja viscosidad y tensión superficial, que no modifiquen el color y brillo de la piedra, ni faciliten la aportación de elementos nocivos, además que no alteren de forma drástica la permeabilidad al vapor de agua de la piedra para evitar la aparición de eflorescencias en la superficie de los elementos estructurales. En la práctica, dichos productos no cumplen cabalmente con estos requerimientos; sin embargo, se considera necesario que el restaurador conozca sus ventajas y sus posibles efectos secundarios para que pueda elegir el producto más apropiado al momento de intervenir una construcción histórica.

III. Objetivos

- Describir las causas y los modos en los que actúan los agentes más comunes que degradan la mampostería de los monumentos históricos.
- Evaluar experimentalmente las propiedades físicas y mecánicas de morteros y lechadas empleadas en el proceso de consolidación.

- Describir los productos, procesos y equipos para consolidar elementos estructurales de mampostería.

Para llevar a cabo una consolidación exitosa y durable de grietas en una construcción histórica, se requiere de un consolidante que se adapte a las condiciones ambientales existentes en el lugar de la reparación, por lo cual, no basta solo con conocer sus propiedades mecánicas, si no además, es fundamental tener conocimientos sólidos sobre su comportamiento ante diversos factores químicos que afectan su durabilidad, dichos factores aunque quedan fuera del alcance de este estudio, también serán tratados de manera general, pues un objetivo adicional a los ya mencionados es proporcionar una descripción de todos los factores que intervienen en la degradación de estos materiales, con el fin de que los interesados en el tema tengan una visión más amplia acerca de ellos.

1. CRITERIOS PARA REHABILITAR ELEMENTOS DE MAMPOSTERÍA.

1.1. Aspectos generales

De acuerdo con *García de Miguel José María, et. al. 1994*, en las labores de rehabilitación de Monumentos Históricos participan grupos interdisciplinarios, quienes realizan un diagnóstico y diseñan el procedimiento de intervención.

Primero se efectúa un estudio técnico acerca de los diversos aspectos del problema, sobre todo se evalúan las siguientes: características del entorno climático, geológico, hidrogeológico, antropológico, etc. y su incidencia sobre los materiales que constituyen el monumento, así como la naturaleza y estado de los materiales; problemas constructivos y estructurales; distribución de humedad, presencia y naturaleza de sales solubles; estudio histórico de la edificación y rehabilitaciones anteriores; posibles bancos de materiales de construcción y la disponibilidad de los mismos.

Después, se definen los criterios que delimitan los métodos de intervención, tomando en cuenta el tipo y nivel de rehabilitación que se pretende realizar, es decir, se evalúa si se trata de una intervención de emergencia o aislada y sin continuidad, además, se analiza la posibilidad de diseñar y ejecutar programas de mantenimiento periódicos posteriores a la rehabilitación.

En el siguiente paso se establece una hipótesis de intervención, donde se afrontan las causas de degradación, con el fin de minimizarlas en lo posible para detener su proceso y evitar daños futuros; además se indica el tratamiento a seguir.

Posteriormente, se comprueba esta hipótesis de intervención, utilizando modelos matemáticos y pruebas de laboratorio que puedan predecir el comportamiento del monumento ante la acción del tratamiento. En esta etapa por lo general se evalúan muestras tratadas y sin tratar, las cuales son sometidas a distintas agresiones para observar su comportamiento. Cuando la hipótesis de intervención es confirmada en laboratorio, se procede a experimentar en obra, aplicando el tratamiento en pequeñas zonas controladas, con el objetivo de observar su comportamiento y revisar que no se produzcan efectos no previstos. De ser favorables los resultados, entonces se inician las tareas de rehabilitación.

Por último, se establece un control técnico adecuado para garantizar la ejecución correcta de las labores de rehabilitación tal y como se diseñaron para obtener los resultados previstos.

Generalizando, este proceso se compone de 4 partes: diagnóstico de las causas y los efectos sobre el monumento, establecimiento de los criterios de intervención, comprobación de las hipótesis tanto en laboratorio como en obra, y, ejecución de obra y control técnico de la intervención

El diseño de un proceso de intervención se resume de manera esquemática en la Fig. 1.

1.2. Causas de degradación

El deterioro de los Monumentos Históricos, generalmente es un proceso lento originado tanto por la naturaleza, como por la acción del hombre mismo. Sin embargo, en los últimos años, debido a la emisión excesiva de gases nocivos a la atmósfera, éste se ha acelerado, puesto que la mayor parte de los combustibles utilizados en la actualidad, generan grandes cantidades de dióxido de carbono (CO₂), dióxido de azufre (SO₂) y otros gases que aceleran el proceso de degradación, según *Gárate Rojas, Ignacio, 1994*. También en las referencias 11, 12, 17, 18 y 19, pueden encontrarse otros estudios en los que se hace énfasis en la misma problemática.

En términos generales, las causas que degradan a un monumento pueden clasificarse en tres tipos:

- Intrínsecas
- Extrínsecas
- Otras

Causas intrínsecas

Estas son inherentes al monumento mismo, algunas de las principales son: defectos en la construcción, la naturaleza del terreno en que se encuentra apoyado, así como su ubicación geográfica.

Entre los defectos constructivos se encuentran: una insuficiencia o mala construcción tanto de la estructura como de su cimentación; la utilización de materiales inadecuados o defectuosos; y en el caso del mortero, aunque se haya encontrado en buen estado por mucho tiempo, al ser sometido a una carga excesiva pudo haberse fracturado.

Causas extrínsecas

Las causas extrínsecas o externas son aquellas que no son propias del monumento pero que actúan sobre él. En otras palabras, las condiciones del medio ambiente en que se encuentran los monumentos propician factores físicos, biológicos y químicos, entre otros, que contribuyen al deterioro de estas construcciones.

- Factores físicos

La temperatura. - Los cambios bruscos de temperatura que ocurren entre el día y la noche, los incendios, así como las heladas, pueden ocasionar graves daños tanto en los materiales pétreos como en los morteros. Como la mayoría de estos materiales son porosos, o presentan grietas y fisuras, existe la posibilidad de que conserven agua en su interior, ya sea como consecuencia de la lluvia o por la condensación del agua contenida en el aire; que en situaciones de descensos de temperatura menores a los 0° C llega a congelarse de la parte exterior hacia la interior, formando una especie de tapón, que impide salir al agua cuando esta comienza a dilatarse. Conforme desciende la temperatura, el agua empieza a solidificarse aumentando aproximadamente un 9.5 % su volumen, lo que produce grandes tensiones sobre las paredes

del poro o grieta, ocasionando exfoliaciones o incrementando el tamaño de las fisuras de la piedra. En pruebas de laboratorio, se ha estimado que estas tensiones a una temperatura de -30°C , alcanzan valores de hasta 2100 kg/cm^2 .

Algo similar ocurre cuando la piedra se ve afectada por la radiación solar, pues ocasiona que sus minerales se dilaten en varias direcciones y al enfriarse cuando llega la noche, les produce una contracción. Luego, ante la acción diaria de ciclos de dilatación y contracción, los materiales se deterioran por fatiga como menciona *Mingarro Martín, Francisco, 1996*.

El viento.- Produce graves erosiones superficiales, puesto que siempre lleva consigo partículas en suspensión. Su efecto con el paso del tiempo hace irreconocibles las formas esculpidas en la piedra.

El agua.- En sus distintos estados: líquido, vapor y hielo, es el agente más importante de degradación, debido a que actúa como vehículo de transporte de otras sustancias como sales solubles, contaminantes atmosféricos y organismos vivos.

La hidratación.- Algunos materiales de construcción contienen minerales que tienden a hidratarse, tomando agua tanto de la lluvia como del aire, lo que ocasiona que se generen fuertes tensiones en el interior del material, debido al aumento de su volumen. Gracias a esto, el material puede presentar agrietamientos que en ocasiones lo llevan a su pulverización.

Estos minerales generalmente se encuentran en materiales sedimentarios, como las calizas o en materiales de construcción de naturaleza arcillosa como los ladrillos, cementos, entre otros

- Factores biológicos

Los microorganismos existen sobre casi todas las piedras, aunque no sean visibles. En ocasiones crecen plantas que han enraizado en las juntas de los sillares y retienen humedad (Fig. 2). Los líquenes al crecer sobre la superficie de la piedra retienen humedad por ser esponjosos, lo cual resulta peligroso en el caso de las heladas, además de que segregan ácidos.

La presencia de algas y musgos es un indicador de zonas húmedas. Los daños que ocasionan a la piedra son generalmente de manera indirecta, puesto que favorecen el crecimiento de otros organismos como bacterias, hongos y líquenes.

Las bacterias, como las sulfúreas, las nitrificantes y las ferrobacterianas, atacan a la piedra mediante procesos químicos. Las sulfobacterias oxidan el azufre a sulfato. El azufre, al combinarse con el calcio de la piedra, en presencia de agua, origina yeso. En el apartado de compuestos de azufre se comenta más acerca del efecto del yeso. Las nitrificantes producen nitritos y nitratos que ocasionalmente pueden formar nitrato cálcico. Las ferrobacterias participan en los fenómenos de oxidación y reducción de este metal.

Ciertos microorganismos, como las thiobacterias, desarrollan transformaciones químicas, como la producción de ácido sulfúrico, al extraer azufre de los minerales y combinarlo con oxígeno; como lo mencionan *Gárate Rojas, Ignacio, 1994* y *García de Miguel José María, et. al. 1994*.

- Factores químicos

La contaminación atmosférica.- En zonas urbanas e industriales, los efectos de la contaminación ambiental sobre los materiales de construcción son muy evidentes. Debido a que estos reaccionan con los componentes de la piedra, dando lugar a diversas formas de

alteración como eflorescencias, pátinas y costras, que llevan a la degradación del material (Fig. 3).

La mayoría de los contaminantes provienen del uso de combustibles fósiles como el carbón, gas natural y petróleo. Además, existen fuentes naturales de contaminación como emanaciones volcánicas, incendios forestales, putrefacción de la materia orgánica y la brisa marina; que en algunos casos suelen ser importantes.

Entre los principales contaminantes que influyen en el deterioro de los materiales de construcción se encuentran los compuestos de azufre y de nitrógeno; óxidos de carbono; cloruros y fluoruros; compuestos orgánicos volátiles y partículas sólidas.

Compuestos de azufre.- La presencia de elevadas cantidades de dióxido de azufre (SO_2) se puede encontrar en el aire de núcleos urbanos e industriales. Consecuencia de la ignición de combustibles fósiles. Una vez en el aire, el SO_2 se oxida rápidamente transformándose en SO_3 y en combinación con la humedad del ambiente, da lugar a la aparición de sulfatos dañinos para la piedra, como el yeso, el cual trae como consecuencia un incremento de volumen del material pétreo, creando costras sulfatadas y favoreciendo las descamaciones, desplazaciones y otras formas de deterioro como lo menciona *Esbert, Rosa María, 1997*.

Compuestos de carbono.- El dióxido de carbono (CO_2) es un elemento natural de la atmósfera. Su concentración media es de alrededor de 340 ppm, aunque en áreas urbanas esta concentración ha crecido en un 0.3%, como consecuencia del uso de combustibles fósiles. Este compuesto es muy nocivo para los productos calcáreos, ya que con la presencia del agua, disuelven los carbonatos constituyentes de estas rocas.

El monóxido de carbono (CO) presente en el aire se debe en su mayoría a emanaciones volcánicas, descomposición de la clorofila, acciones bacterianas, etc. Y en menor grado combustiones incompletas. En principio, el CO no representa problema alguno para la piedra, pero por lo general se oxida a dióxido de carbono (CO_2) ocasionando los daños ya mencionados.

Cloruros y fluoruros.- Estos productos se encuentran en la atmósfera, y por lo general proceden de fuentes naturales como mares, volcanes y desiertos, así como de plantas de fabricación de cloruro de hidrógeno (HCl), elaboración de papel y plásticos con cloro. El HCl ataca a materiales que contengan caliza como: mármoles y areniscas, favoreciendo la alveolización y desagregación de esas piedras.

Aunque su presencia en el aire no es muy elevada, los fluoruros provienen de la fabricación de aluminio, vidrio, fertilizantes, etc. Ataca a las calizas generando fluoruro cálcico, que ocasiona un aumento en la porosidad de la piedra.

Compuestos orgánicos volátiles.- Los conforman los hidrocarburos como los alcanos, alquenos, aromáticos, etc. que provienen de la combustión de automotores. En concentraciones elevadas forma costras y pátinas y contribuyen al enmugrecimiento de las fachadas (Fig. 4).

Partículas sólidas.- En el aire existen diferentes partículas sólidas como: polvo, hollín, cenizas volantes, y otras, cuyos diámetros varían entre 0.001 y 100 micras. Las cuales al sedimentarse sobre la superficie del monumento la ensucian e incrementan la humedad, debido a que absorben vapor de agua de la atmósfera.

Sales solubles.- Estas ocasionan daños físicos y químicos en la piedra cuando cristalizan dentro o fuera de ella. Generalmente se encuentran contenidas en el suelo, en los morteros, en el metabolismo de organismos y en intervenciones antiguas, entre otros.

Las sales solubles que se encuentran con mayor frecuencia en las piedras son: sulfatos, cloruros, carbonatos, nitratos y más raramente nitritos. La cantidad depende de las condiciones de temperatura y humedad de los materiales de construcción de los monumentos.

El deterioro producido por estas, se debe principalmente a su cristalización e hidratación. En el caso de la cristalización, los daños se producen por las tensiones locales generadas por el empuje que causa el cristal al crecer en el interior de un poro o microfisura. En cuanto a la hidratación, sucede algo similar, ya que al tomar agua del ambiente, las sales aumentan de tamaño, generando esfuerzos en el interior de la piedra.

- Otros factores de deterioro

Los materiales metálicos tienden a oxidarse ocasionando un incremento de su tamaño. Cuando se encuentran dentro de una mampostería tienden a fracturar el material en donde se encuentran (Fig. 5).

Las vibraciones y accidentes naturales como incendios, inundaciones y sismos, entre otros, también contribuyen al deterioro de la piedra.

1.3 Tipos de alteración

En el apartado anterior se mencionaron los factores que degradan la piedra, y a continuación se tratarán los principales efectos que causan en el material pétreo, de acuerdo a *Esbert, Rosa Maria, 1997*.

Eflorescencia.- La eflorescencia es una capa o agregado cristalino de sales solubles, de color blanquecino, no muy consistente, que se forma en una superficie porosa ocasionada por fenómenos de migración y evaporación de agua con sales solubles (Fig. 6). Si dicha capa se forma por debajo de la superficie pero muy cerca de ella se le llama subflorescencia, y en el caso que se sitúe más internamente se le llama criptoflorescencia.

Depósito superficial.- Es la acumulación de materiales de diversos orígenes como polvo, humo, hollín, organismos, etc. en la superficie de la piedra. Normalmente presentan escasa cohesión y adherencia. Los depósitos de excremento son lo más nocivos para la piedra, debido al alto contenido de ácidos que generan (Fig. 7).

Pátina.- La pátina es una capa o película delgada que se forma en la superficie de la piedra por diversas causas y es similar a las costras, sólo que estas últimas son de mayor espesor. Esta capa es una modificación superficial que no ocasiona necesariamente que se deteriore la roca. Existen pátinas de envejecimiento, que no son más que el cambio de la tonalidad o aspecto externo que cualquier piedra adquiere con el paso del tiempo y bajo los efectos de la intemperie. Pátinas biológicas ocasionadas por el crecimiento de líquenes (Fig. 8).

Costras.- Las costras generalmente se forman en la parte externa de la piedra, alcanzando varios milímetros de espesor; son producto de una transformación superficial, sus

características físicas y su naturaleza químico-mineralógica, son parcial o totalmente distintas a las de las piedras donde se encuentran adheridas. Se distinguen por sus rasgos morfológicos en forma de caparazón o incrustaciones (Fig. 9).

Placa.- Así se le llama al levantamiento o separación de lajas que se produce paralelamente a los planos estructurales o de debilidad mecánica de la piedra. Este fenómeno, así como otros tipos de exfoliación, obedece a cambios de temperatura o humedad y a la acción mecánica del hielo o de las sales (Fig. 10).

Escama.- Lámina de poco espesor que se desprende con relativa facilidad del sustrato pétreo. Con el tiempo las escamas pueden evolucionar a costras (Fig. 11).

Ampolla.- En ocasiones las costras y escamas se abomban y ahuecan llegando a reventarse. Originando que queden descubiertas pequeñas porciones de piedra o recubrimientos por donde pueden entrar con facilidad los agentes de degradación (Fig. 12).

Alveolización.- Este tipo de degradación se presenta en materiales porosos como las areniscas. Suele estar relacionada con la presencia de sales solubles. También es llamada erosión alveolar o meteorización en panal (Fig. 13).

Disgregación.- Es cuando el material presenta una descohesión debida a la pérdida de unión y caída espontánea o inducida de los componentes de la piedra. Si los granos son de tamaño de arenas, se le llama arenización. Ver Fig. 14, o bien cuando el tamaño del grano es más fino se le llama pulverización.

Fisuras y grietas.- Algunas son propias de la roca, otras son inducidas por esfuerzos causados por: asentamientos defectuosos en los sillares, sobrecargas, corrosión de elementos metálicos en contacto con la piedra y otros (Fig. 15).

1.4 Proceso de rehabilitación

Después de establecer las causas y los efectos del deterioro, es posible establecer el proceso de intervención a seguir. El cual consiste básicamente de cuatro tareas que son: limpieza, restitución, consolidación y protección. Generalmente trata de omitirse la restitución, pero esto depende del nivel de deterioro de las piedras afectadas.

Limpieza

Para realizar las tareas de limpieza, primero se establece el método más adecuado de acuerdo a las condiciones existentes que permitan alcanzar las metas deseadas. Dependiendo de los resultados de los estudios previos, se identifican los agentes contaminantes que se desean eliminar y las pátinas que se quieren conservar.

Por lo general, las tareas de limpieza son las primeras que se realizan en un proceso de intervención; sin embargo, si la superficie a tratar está muy dañada primero se efectúa una preconsolidación.

Algunas de las técnicas de limpieza más comunes son:

Limpieza manual.- Consiste en eliminar líquenes, excrementos de animales, polvo, morteros viejos, hierros oxidados y otra suciedad acumulada, utilizando herramientas manuales como: bisturís, cepillos, espátulas, aspiradoras y aire comprimido, este último a una presión menor de tres atmósferas (3 kg/cm^2).

Limpieza mecánica.- Se efectúa con la ayuda de equipos especiales tales como: tornos de precisión, esmeriladoras con fresas de diamante, bombas para agua de alta presión, máquinas de proyección de elementos abrasivos, entre otras. La aplicación de estas técnicas se da en piedras que carecen de pátina o policromías originales, debido a que estas pueden dañarse.

Cuando se proyectan abrasivos con aire a presión para limpiar fachadas, se corre el riesgo de distorsionar las tallas y relieves de la piedra, además de debilitarla cuando está deteriorada, por lo que su uso debe evitarse, aunque en ocasiones es necesaria su aplicación, sobre todo cuando la superficie no responde a tratamientos convencionales. En el caso de que no exista otra opción habrá que tomar las siguientes medidas de acuerdo con *García de Miguel José María, et. al. 1996*:

- Evitar que la presión de proyección exceda de tres atmósferas (3.1 kg/cm^2).
- Utilizar una boquilla cuyo diámetro sea de 2.5 mm.
- Emplear un abrasivo que tenga una granulometría tal, que el tamaño máximo del agregado no exceda de 0.5 mm.
- Realizar un ensayo previo para comprobar que el abrasivo sólo arrastra la suciedad y no parte de la piedra original.

Limpieza química.- Los productos químicos más utilizados son los detergentes humectantes no iónicos que se aplican con un pulverizador directamente sobre las manchas y suciedad originada por la contaminación. En el caso de manchas de grasas, líquenes, excrementos, etc. se utiliza triclorotileno, el cual es un disolvente que descompone la materia orgánica.

Limpieza mediante agua atomizada.- En algunos monumentos, existen zonas donde la piedra ha permanecido relativamente limpia debido al lavado natural que realizan la lluvia y el viento; sin embargo, se pueden encontrar zonas en donde el paso de la lluvia y el viento es esporádico, como en oquedades, bajos de frisos y cornisas, capiteles, estatuas, entre otros, lo que ocasiona que se formen depósitos de hollín, alquitranes, barro, polvo, y otros contaminantes, que al fijarse con las sales forma una capa dura de varios milímetros de espesor.

Debido a la dureza de esta capa, los métodos mecánicos de limpieza no resultan efectivos, ya que pueden alterar la superficie de la piedra. Por lo que en estos casos se utiliza agua atomizada. Este tratamiento consiste en crear un ambiente de saturación de humedad, proyectando agua destilada a presión a través de boquillas de diámetro milimétrico con el fin de alcanzar aquellas zonas de difícil acceso para la lluvia y someterlas a un lavado continuo durante un periodo, para que puedan disolverse las capas de suciedad poco a poco con la ayuda de brochas suaves e ir descubriendo las tallas originales de la piedra. Este método no es utilizado en piedras excesivamente porosas o con recubrimientos de yesos o policromías.

Restitución

Esta etapa generalmente trata de evitarse en cualquier proceso de rehabilitación, pues se pretende conservar la originalidad del edificio en la mayor medida de lo posible. Pero como esto resulta en ocasiones inevitable, debido a que en algunos casos el nivel de deterioro es

muy grave y difícil de controlar por las persistentes causas de degradación, se realiza la sustitución del material. En el caso de una escultura, se le aplica algún proceso de rehabilitación y se traslada a donde existan condiciones atmosféricas más favorables. Dejando en su lugar original una réplica que asegure la continuidad de la armonía estética según *García de Miguel José María, et al. 1994*.

Estas restituciones son realizadas utilizando técnicas tradicionales de cantería, aunque presenta ciertas dificultades, puesto que no siempre es posible localizar canteras iguales. Además, que resulta difícil encontrar artesanos que hagan un tallado fino en piedra. Cuando se realizan restituciones en monumentos arqueológicos se marcan las piezas restituidas para que no se confundan con las piezas originales.

Otro tipo de restitución consiste en la reconstrucción de las piezas utilizando mortero pétreo que se moldea y talla "in situ", permitiendo conservar aquellas partes originales que no están dañadas.

Consolidación

El proceso de consolidación consiste en devolver al elemento estructural su cohesión original que ha perdido ya sea por problemas de arenización, exfoliación y/o fisuración. Lo cual se consigue rellenando las fisuras existentes y en su caso efectuando el anclaje de las piezas que puedan desprenderse según *García de Miguel José María, et al. 1994*.

Antes de realizar una consolidación, recomiendan revisar, mediante estudios previos, que el grado de saturación de sales de la piedra no sea elevado pues de ser así, se pueden formar exfoliaciones a causa de la cristalización de las sales en la superficie tratada.

La consolidación en taller se realiza a piezas de menor tamaño. Entre los métodos más comunes se encuentra el de la cámara de vacío, el cual consiste en colocar la pieza dentro de una cámara hermética de donde se extrae el aire contenido por medio de una bomba de vacío, la cual mantiene la depresión durante unas horas, dependiendo del grado de porosidad de la piedra, para posteriormente inundar la cámara con el material consolidante y después poco a poco se libera el vacío en la cámara. Con la entrada de la presión a la piedra, a través de su porosidad absorbe el líquido consolidante lentamente hasta que llega a un equilibrio interior. Una vez eliminado el líquido sobrante, se controla el proceso de secado para evitar la evaporación rápida que arrastraría el consolidante a la superficie de la piedra.

Protección

Consiste en aplicar sobre la mampostería un tratamiento superficial que permita protegerla de la degradación futura. Desde la antigüedad se han preocupado por este problema y recurrieron a la aplicación de revocos y estucados para proteger a la mampostería. Así, estos son los que reciben los efectos de los fenómenos de degradación. Por lo cual están destinados a ser destruidos con el paso del tiempo y ha ser renovados.

También es común encontrar monumentos que han sido protegidos aplicando pátinas. Según la época, se han aplicado capas de mortero de yeso y/o cal con algún aglutinante orgánico como: sangre de toro, clara de huevo, jugo de habas, colas animales, ceras, etc. con un pigmentante como: polvos obtenidos de teja, ladrillo, o tierra.

Como muchos de los problemas de degradación están relacionados con la humedad, se han desarrollado productos hidrofugantes que evitan la penetración del agua en estado líquido, a su vez, permiten la transpiración de la piedra.

La mayoría de estos productos son de naturaleza orgánica o silicoorgánica y tienen las siguientes características que menciona *García de Miguel José María, et. al. 1994*, aunque su eficacia no se ha demostrado por completo:

- Estabilidad frente a los agentes químicos como la lluvia ácida.
- Estabilidad frente a radiaciones ultravioletas.
- Impermeabilidad al agua en estado líquido.
- Permeabilidad al vapor de agua
- Reversibilidad; es decir, pueden retirarse de la superficie de la piedra sin causarle daño alguno.
- No genera productos secundarios
- Fácil aplicación

2. TIPOS DE CONSOLIDANTES

La consolidación, es una de las etapas más importantes del proceso de rehabilitación, en donde el éxito o fracaso depende del material consolidante elegido. Actualmente, existen numerosos productos que son utilizados en las tareas de consolidación. Los cuales se clasifican en:

- Consolidantes inorgánicos
- Consolidantes orgánicos

2.1. Consolidantes Inorgánicos

Los productos inorgánicos tienen una naturaleza semejante a los minerales que componen la piedra, son durables, frágiles, tienden a formar sales y son poco penetrantes en los materiales pétreos.

Entre los consolidantes inorgánicos más comunes se encuentran los siguientes:

- Cal
- Alumbres
- Hidróxido de bario.
- Aluminato de potasio.
- Cemento

Los cuales se emplean según el tipo de mampostería en forma de lechadas.

Morteros

Los morteros son mezclas de uno o varios materiales, generalmente se componen de cementantes como cal o cemento, arena y agua; en ocasiones además, se le agrega algún aditivo para mejorar alguna de sus propiedades. Una vez amasados hasta la consistencia plástica se utilizan para ligar ladrillos o piedra de una obra de mampostería.

Al mortero utilizado en obras de consolidación estructural se le conoce como lechada (grout en inglés), en donde la mayor diferencia con el mortero común, es la gran fluidez de su mezcla, pues sus componentes siguen siendo esencialmente los mismos, aunque en algunos casos puede carecer de arena.

Cal

Este ha sido uno de los materiales más versátiles empleados desde la antigüedad. Se dice que probablemente los griegos fueron los que la utilizaron por vez primera para revestimientos de muros y que los romanos heredaron dicha técnica adicionándole arena para producir morteros; sin embargo, no se conoce el origen exacto de este aglomerante.

Su obtención, desde el pasado, ha sido a través de la calcinación de algunas piedras calizas (CaCO_3) como: tiza, coral o concha a temperaturas superiores a los 900°C , donde sucede la siguiente reacción química que encierra tres operaciones de acuerdo con *Stulz, Roland 1993*:



- El carbonato de calcio (CaCO_3) contenido en las piedras calizas pierde primero su agua de cantera entre los 120° y 150°C .
- Después, se provoca en la caliza su disociación en óxido de calcio (CaO) y dióxido de carbono (CO_2) a una temperatura entre 880° y 900°C .
- El dióxido de carbono en forma de gas se pierde en la atmósfera, quedando como producto aprovechable el óxido de calcio (CaO) también conocido como cal viva.

El CaO , es sólido de color blanco, muy inestable por su gran avidez al agua, con la que reacciona exotérmicamente produciendo el hidróxido de calcio o cal apagada.



En la hidratación o proceso de apagado, la temperatura se eleva a 180°C y el producto resultante es un polvo amorfo, blanco de efectos cáusticos, es decir, que tiende a quemar los tejidos orgánicos; con propiedades aglomerantes, que mezclado con una cantidad conveniente de agua, forma una pasta espesa y de fluidez variable que la hace trabajable y en combinación con otros materiales, es empleada como aglutinante en las mamposterías o en recubrimientos.

El principal constituyente de la piedra caliza es el carbonato de calcio (CaCO_3), el cual está presente en cantidades mayores del 98% en piedras como la tiza y en diversos tipos de conchas y corales o tan bajo como 54%, en la dolomita mineral pura. Dependiendo de la cantidad de CaCO_3 y de impurezas presentes en la piedra, se obtiene una calidad diferente de cal.

- Tipos

Las piedras calizas naturales son raras como especies químicamente puras (CaCO_3), pues por lo general están acompañadas de otros materiales como el carbonato de magnesio (MgCO_3), arcilla, hierro, azufre, álcalis y materias orgánicas; que al calcinarse proporcionan a la cal propiedades que dependen de la cantidad de las mismas. Algunos de los productos más comunes como lo indica *Saad, 1975* en su libro son las siguientes:

- Cal aérea
 - ✓ cal grasa
 - ✓ cal magra
- Cal hidráulica

Cal aérea.- Es la compuesta principalmente de óxido e hidróxido de calcio que endurece lentamente al aire por la acción de dióxido de carbono. Esta es la cal más pura que existe y que predomina en las construcciones de antes del siglo XVII. Aunque no fragua bajo el agua, ya que no contiene arcilla, la cual le da esta propiedad. Dependiendo de la cantidad de

magnesio (Mg) y oxígeno que contengan, las cales aéreas se puede clasificar en cales grasas y magras.

Cal grasa. - La cal grasa es la que se obtiene de la calcinación de una caliza que contiene hasta un 5% de arcilla y menos de 3% de carbonato de magnesio ($MgCO_3$). Al apagarse produce una pasta fina y espesa que aumenta demasiado de volumen. Nunca endurece en lugares húmedos, sin embargo, en contacto con el aire, el fraguado sucede lentamente.

Se utiliza de preferencia en enlucidos y revoques de los paramentos interiores de los muros, aunque suelen aparecer eflorescencias, por lo cual recomiendan que no se aplique sobre éstos hasta después de sesenta días de haberlos construido, para asegurar que el mortero ligante haya secado.

Cal magra. - Cuando la caliza contiene impurezas como arenas u otras sustancias extrañas que no producen acción química alguna en el producto resultante, y si la cal así obtenida contiene de un 50 a un 80% de óxido de calcio, se le denomina cal magra o árida. Esta cal se apaga más lentamente que la grasa, desprendiendo menos calor, su pasta es menos espesa y su uso se evita en las construcciones, debido a que carece de gran resistencia y en el caso de estar en contacto con el agua, se disuelve con facilidad. Este tipo de cal se utiliza más en pintura que en construcciones.

Cales hidráulicas. - Cuando la caliza contiene más del 5 % de arcilla ya sea de manera natural o artificial, la reacción de disociación descrita se hace más complicada, pues la descomposición del $CaCO_3$ ocurre a una temperatura inferior de los $900^\circ C$. A temperaturas más altas reaccionan los productos de descomposición de la arcilla, dióxido de silicio o sílice (SiO_2), óxido de aluminio o alúmina (Al_2O_3) con el óxido de calcio (CaO), dando origen a silicatos y aluminatos de calcio, que ligados con el CaO que queda en libre, dan como producto resultante, el aglomerante llamado cal hidráulica. La cual tiene la propiedad de fraguar y endurecer incluso debajo del agua. El dióxido de carbono contribuye a su endurecimiento. Su composición química aproximada, es la siguiente:

CaO (Óxido de Calcio)	64.0 %
SiO ₂ (Dióxido de silicio o sílice)	24.0 %
Al ₂ O ₃ (Alúmina)	4.50 %
Fe ₂ O ₃ (Óxido de Hierro)	1.0 %
MgO (Óxido de Magnesio)	1.0 %
SO ₃ (Trióxido de azufre)	0.50 %
Perdidas por calcinación	5.0 %

- Apagado

Se llama apagado o hidratación de la cal, al proceso en el que el óxido de calcio o cal viva CaO , se transforma en hidróxido de calcio $Ca(OH)_2$ al agregarle agua o vapor de agua, tomando lugar la siguiente reacción:



Ocasionando un incremento de 3 a 3 ½ veces su volumen, por lo cual algunos constructores prefieren adquirir cal viva. Las cales vivas puras reaccionan vigorosamente desprendiendo calor considerable, mientras que las cales impuras se hidratan lentamente.

Existen distintos tipos de apagado de las cales, tales como:

Apagado por inmersión.- Consiste en romper los terrones de cal viva en pequeños fragmentos de aproximadamente 5 cm para después verterlos en un cesto de mimbre o de cualquier otro material que permita el paso de agua; ya que este es sumergido en este líquido durante unos segundos hasta que comienza a hervir la superficie, notándose al salir del agua que comienza a silbar y ha despedido vapores. Una vez que se ha dejado escurrir, se vierte la cal en suelo limpio o en toneles. Esta operación se repite hasta llenar el recipiente y hará que se eleve mucho la temperatura, ocasionando que la cal se reduzca a polvo.

Apagado espontáneo.- Este se realiza extendiendo los terrones de cal viva sobre una superficie resguardada de la lluvia, para que absorba el agua contenida en la atmósfera. Por lo cual requiere de varios meses y tiene la desventaja de la reversibilidad de las reacciones, es decir hidratación y carbonatación, por lo que no es recomendable.

Apagado por aspersión.- El proceso consiste en ir regando con agua las capas de cal viva previamente extendidas de entre 10 a 15 cm de espesor o bien sobre pequeños cubos de 30 cm cubiertos de arena, la cual se utiliza para cubrir las fisuras que se producen al aumentar de volumen la cal, e impedir el escape del vapor. En la preparación de un metro cúbico de pasta de cal se necesitan de 350 a 500 kg de cal viva, 1250 litros de agua y de 3 a 4 horas de trabajo.

Apagado por fusión.- Este método consiste en sumergir la cal viva dentro de un estanque con la suficiente agua de apagado que permita obtener una pasta, cuidando que la cal no se anegue en más agua que la necesaria, pues resultaría ahogada. Para determinar la cantidad del líquido necesario de apagado, se toma un trozo de cal viva con peso conocido, el cual se coloca dentro de un recipiente y se vierte agua en exceso. Cuando el agua ha apagado la cal, la convierte en pasta, y queda en el fondo del recipiente, por lo que el agua sobrante se decanta y se pesa la pasta. La diferencia entre el peso medio de la cal viva y el de la pasta representa el agua necesaria para el apagado.

Cuando se trata de pequeños volúmenes, los terrones de cal viva son introducidos en un cráter practicado sobre la arena que formara parte de la mezcla y se vierten tres volúmenes de agua, para obtener la pasta y en mayor proporción cuando se trata de una lechada.

Apagado de las cales hidráulicas.- Se realiza manualmente o por medio de hidratadores, cuidando que la temperatura de reacción no se eleve a 120 °C, pues los silicatos y aluminatos de calcio tienden a hidratarse, lo que le quita a la cal sus propiedades hidráulicas. Por lo que solo se busca que se hidrate el óxido de calcio. El agua es proporcionada en forma atomizada sobre las capas de cal, de tal manera que por absorción, las capas superiores vayan tomando el vapor que desprenden las capas inferiores, evitando así elevar la temperatura.

En este proceso se cuida que la cal esté completamente apagada debido a que existen piezas que se hidratan muy lentamente y si no se detectan pueden causar serios problemas.

Si el agua se añade muy lentamente, la temperatura de la cal se incrementa rápidamente, formando un compuesto arenoso blanco inactivo también llamado cal de agua quemada. Si el

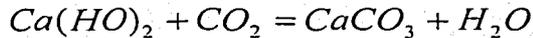
agua es añadida muy rápidamente, se forma una capa de hidróxido, que evita una mayor hidratación dando lugar a la cal ahogada.

- Ventajas

En morteros una vez endurecidos, la cal proporciona superficies suaves con una mayor probabilidad a deformarse que a agrietarse y permite la transpiración de las mamposterías.

- Desventajas

El endurecimiento de los morteros de cal toma lugar muy lentamente debido a la desecación del agua de amasado con la que se formó el mortero, y a la carbonatación por absorción del dióxido de carbono del aire, que lleva a tener nuevamente la caliza de la que se partió.



Esta reacción es bastante lenta y sólo puede lograrse en un ambiente seco, comenzando 24 horas después de amasado el mortero y terminando al cabo de unos seis meses o más. Lo cual prolonga el tiempo de ejecución de la obra.

Durante el proceso de endurecimiento o de fraguado, el mortero experimenta una contracción de su volumen, originado agrietamientos.

Si la cal hidratada se guarda por mucho tiempo, puede reaccionar con el dióxido de carbono del aire y se vuelve inservible.

El hinchamiento de la cal o la hidratación de nódulos o grumos de cal viva restantes, suele suceder tiempo después que el componente se haya secado, lo que ocasiona ampollas, grietas y superficies irregulares.

Cemento

De acuerdo con *López Albiñana, 1996*, el cemento es un conglomerante hidráulico, que finamente molido y amasado con agua forma pastas que fraguan y endurecen a causa de las reacciones de hidrólisis e hidratación de sus constituyentes, dando lugar a productos mecánicamente resistentes y estables, tanto al aire como bajo el agua.

De la gran variedad de cementos disponibles, el cemento portland es el más común. Fue desarrollado en el siglo XIX y llamado así, debido a su semejanza con una popular piedra de construcción de Portland, Inglaterra. Desde entonces, se ha convertido en uno de los materiales de construcción más prestigiosos.

El cemento procede directamente del clinker, que es un producto obtenido por la calcinación de sus componentes químicos a temperaturas a próximas a 1450 °C como: silicio, aluminio, hierro, calcio, magnesio, oxígeno, azufre y otros en proporciones minoritarias como sodio y potasio, que una vez calcinados y enfriados, son molidos finamente, previa adición de yeso, como regulador, para dar lugar al cemento.

- Tipos de Cemento

Existen numerosas variedades de cemento portland en el mundo. En México, actualmente, los cementos se fabrican bajo la norma NMX-C414-ONNCCE-1999, la cual maneja los siguientes tipos:

- Cemento Portland Ordinario (CPO).
- Cemento Portland Compuesto (CPC)
- Cemento Portland Puzolánico (CPP)
- Cemento Portland Ordinario Blanco
- Cemento Portland Ordinario Resistente a los Sulfatos

Los cementos portland con puzolana son hechos mezclando o moliendo una puzolana, por ejemplo ceniza de cáscara de arroz o ceniza volante, en proporciones de 15 a 40% del peso, ahorrando así en cemento y mejorando algunas de sus propiedades.

- Hidratación del Cemento

El agua reacciona en la superficie de los granos de cemento y se difunde hacia el interior alcanzando al cemento que no ha reaccionado. Por ello, mientras más finos son los granos más rápida es la reacción. Cuando se emplea demasiada agua y no hay suficientes productos de hidratación la resistencia del cemento disminuye, por lo cual, es importante aplicar una adecuada relación agua-cemento a/c.

Durante este proceso, la cal contenida en el clinker, se libera y endurece lentamente al combinarse con el CO₂ ocasionando grietas y fallas en el concreto por la expansión que sufre.

El fraguado se realiza en 45 minutos, pero el endurecimiento o desarrollo de la resistencia toma varias semanas. Por ello, las especificaciones se basan en las resistencias obtenidas después de los 28 días de edad.

Debido a su rápido fraguado, las mezclas de cemento se emplean tan pronto como sea posible.

- Ventajas

Los cementos pueden alcanzar resistencias extremadamente altas; generalmente no son afectados por el agua y no se contraen ni dilatan significativamente. Son resistentes al fuego y a los agentes biológicos, si se mantienen limpios.

- Desventajas

El almacenamiento requiere de gran cuidado para evitar un fraguado prematuro. Pueden formarse grietas en condiciones secas calientes debido al rápido fraguado o a las fluctuaciones de temperaturas. Los sulfatos y sales pueden causar un rápido deterioro.

Hidróxido de bario, aluminato y silicato de potasio

En su libro *Eshert, Rosa María, 1997*, menciona que el hidróxido de bario al igual que la cal, actúa por carbonatación gracias al CO₂ atmosférico, precipitando el correspondiente carbonato en el interior de la piedra.

Tiene un color blanquecino que lo hace adecuado para consolidar calizas blancas y las piedras en donde se aplica deben tener una porosidad elevada que permita una completa carbonatación. El uso en México de este material no es muy común.

La acción consolidante del aluminato y silicato de potasio se debe a la formación y depósito de óxido de aluminio (alúmina) y gel de sílice, respectivamente como producto de su hidrólisis. Ambos precipitan en el espacio poroso de la piedra. Son particularmente adecuados para consolidar areniscas, pero tienen el inconveniente de que pueden formar hidróxidos alcalinos que generan fácilmente sulfatos solubles.

Agregados

Los agregados o materiales inertes se dividen en finos y gruesos. Los finos los constituyen las arenas y los gruesos, dependiendo del tamaño máximo de sus agregados (TMA), lo comprenden la grava, matatena, etc.

En el caso del mortero y de la lechada los agregados empleados son arenas.

- Arenas

Las arenas están constituidas por granos sueltos, incoherentes y de estructura cristalina que provienen de la disgregación de rocas por procesos mecánicos o químicos, que al ser arrastrados por corrientes de agua o de viento, forman depósitos en las partes bajas de la superficie.

Dependiendo de su composición, las arenas se clasifican en: sílicas o cuarzosas, calizas, graníticas y arcillosas. Por su dureza y estabilidad química, según *Saad, 1975*, las arenas sílicas son las mejores. Las arenas calizas si provienen de calizas duras son buenas. Las graníticas por su alterabilidad y poca homogeneidad no son utilizadas salvo si tienen una gran cantidad de cuarzo. Las arenas arcillosas se utilizan si el contenido de arcilla es menor al 3%, pues de lo contrario alteran el fraguado y la plasticidad de los morteros.

De acuerdo a su origen, las arenas se denominan: de río, mina, playa o duna y artificiales.

Arenas de río.- Están compuestas por partículas redondas, que pueden contener arcillas y otras impurezas.

Arenas de mina.- Se encuentran localizadas dentro del subsuelo, generalmente están formadas por granos angulosos que ordinariamente contienen arcillas y compuestos orgánicos. De acuerdo con la calidad y cantidad de impurezas, las arenas presentan coloración azul, parda o rosa, siendo las azules las más puras, por provenir de la disgregación de andesitas. Las arenas pardas contienen un alto porcentaje de polvos y las rosas contienen óxidos. Ambas con un proceso de lavado pueden usarse ventajosamente.

Arenas de playa o dunas.- Contienen sales alcalinas que absorben y retienen el agua, dando con el tiempo origen a eflorescencias que dañan los acabados interiores, por lo que su uso en la construcción es muy limitado y solo se utiliza cuando se somete a un previo proceso de lavado con agua dulce. Además, que inducen la corrosión del acero.

Arenas artificiales.- Artificialmente las arenas se obtienen de la trituración y molienda de rocas duras.

- **Granulometría**

El tamaño de los granos se determina pesando una muestra de arena seca y haciéndola pasar a través de una serie de tamices que tienen 16, 64, 144, 256, 400, 900, 1600 y 6400 mallas/cm². La proporción en que se encuentran los granos de distintos tamaños, expresándose en tanto por ciento, constituye la composición granulométrica de la muestra.

Las arenas, según Feret, de acuerdo al tamaño de sus agregados se clasifican en gruesas, medianas y finas, como se indica en la tabla 1. La American Society for Testing and Materials (ASTM) indica en su norma C 404-97 las especificaciones que deben reunir los agregados utilizados en lechadas. A continuación, se hace un breve resumen de esta:

C 404-97. Especificación de los agregados utilizados en lechadas.- Estos pueden ser arenas naturales, artificiales, o alguna combinación de ellas.

El tamaño será conforme a los requerimientos de la tabla 2. Se permiten otras graduaciones si cubren con los siguientes requerimientos:

- Si el 100% del agregado fino pasa por el tamiz de 9.5 mm (3/8 in) y no más del 5% de arena natural o 10 % de arena artificial pasa el tamiz de 75 mm (No. 200)
- El 100% del agregado grueso pasa el tamiz de 12.5 mm (1/2 in) y no más del 5% pasará el tamiz de 600µm (No. 30).

Sustancias nocivas.- La cantidad de sustancias nocivas en los agregados finos o gruesos no deben exceder los límites mostrados en la tabla 3.

Bentonitas

Las bentonitas son arcillas formadas principalmente por filosilicatos de la familia de montmorillonitas (esmectitas), las cuales tienen la propiedad de hincharse al absorber agua.

Son derivadas de productos volcánicos alterados. Su calidad depende tanto del poder de hidratación y de la captación de iones metálicos que le confiere el contenido de la montmorillonita, que en el mejor de los casos es de 80 a 90 %; así como de su granulometría; la cual debe oscilar entre la malla #200. A este tipo de bentonitas se les conoce como atapulgitas.

Se les divide en sódicas, cálcicas y magnesianas. Las sódicas absorben grandes cantidades de agua y se hinchan más que las cálcicas. Las cálcicas no se hinchan con el agua, pero tratadas con ácido, sirven para decolorar aceites. Las magnesianas o tierra de Fuller decoloran aceites sin este tratamiento. Sin embargo, cada arcilla tiene características propias que deben determinarse experimentalmente.

Las bentonitas finas en suspensión aumentan la viscosidad de los líquidos y es muy importante para la preparación de lodos de perforación, ya que al disecarse cementa los granos sueltos.

Para que una arcilla se considere una buena bentonita debe expandirse por lo menos cinco veces su volumen inicial; aunque normalmente las bentonitas disecadas pueden incrementar

su tamaño de 12 a 15 veces.

La adición de esta arcilla al cemento, a los morteros o concretos produce una acción plastificante e incrementa a su vez su impermeabilidad; al agregar 1% de bentonita al cemento portland aumenta su resistencia mecánica, a la vez que acelera el fraguado.

En yesos, mejoran la plasticidad y homogeneidad de la mezcla; por otra parte su carácter tixotrópico facilita considerablemente el trabajo del yeso, produciendo terminaciones de mejor calidad y más impermeables.

El agua

Cualquier tipo de agua puede ser utilizada para el amasado de morteros, pero se evita la que contiene aceite, grasas, u otros contaminantes. El agua de mar no es recomendada cuando se tiene un cemento aluminoso, ni para el curado de morteros fraguados. Se considera que si se utiliza agua de mar en el amasado, las resistencias disminuyen en un 15 % aproximadamente. Además que puede contribuir a la corrosión de anclajes metálicos.

2.2 Consolidantes orgánicos

En la antigüedad, se utilizaban productos naturales como las ceras, para realizar trabajos de consolidación, pero ofrecían escasa penetrabilidad, por lo que en la actualidad, han sido sustituidos por otros sintéticos como las resinas y los de origen organosilíceo. Los cuales, están formados por monómeros, que se enlazan una multitud de veces dando lugar a una cadena llamada polímero.

Estos productos son aplicados en estado líquido y tienen las siguientes características:

- Propiedades físicas y químicas muy distintas a las de los materiales que forman las piedras, por ejemplo: dilatación térmica
- Son poco durables.
- Expuestos a las radiaciones ultravioleta pueden cambiar de color.
- Son elásticos.
- Buenos adhesivos.
- Se usan en solución y polimerizan posteriormente; es decir, se unen varias moléculas para formar una macromolécula ya sea por medio de calor o de algún catalizador.
- Tienen poca capacidad de penetración.

Por su poca penetrabilidad, son diluidos previamente para asegurar una baja viscosidad, aunque su aplicación se realiza rápidamente, debido a que el disolvente se evapora al estar en contacto con el aire, ocasionando un aumento en la viscosidad del producto y por lo tanto una disminución de su capacidad de penetración.

Según *Eshert, 1997* y *Mingarro Martín, 1996*, los principales tipos de consolidantes orgánicos son los siguientes.

- Resinas vinílicas
- Resinas acrílicas
- Resinas de poliéster
- Resinas epóxicas

- Compuestos organosilíceos
- Ceras

Los consolidantes más comunes son las resinas poliméricas que pueden ser termoplásticas (de un solo componente) o termoendurecibles (normalmente de dos componentes).

Resinas termoplásticas

Estas resinas tienen monómeros enlazados entre sí formando polímeros lineales en una o dos direcciones, siendo estas termoestables. Son de un solo componente, que con el disolvente adecuado, penetra en el interior de la piedra, y por evaporación del mismo, la resina queda cubriendo la superficie del poro sin que sufra ningún cambio estructural. Las resinas más utilizadas son los polímeros vinílicos y los acrílicos.

• Resinas vinílicas

Las más comunes son las que contienen un monómero $\text{CH}_2=\text{CH-R}$, siendo el radical R el acetato (CH_3COO), formando el acetato de polivinililo. Muy empleado en la restauración como adhesivo y consolidante. Estable a la luz solar. De acuerdo a su grado de polimerización, sus propiedades mecánicas son diferentes; las de bajo grado son blandas y elásticas, mientras que las de alto grado son frágiles, pero más resistentes al calor. Se pueden encontrar en sólido, granulado o polvo y en solución. Estas resinas son solubles con tolueno, cetonas, ésteres, etc.

Por medio de la saponificación del acetato de polivinililo, es decir la reacción de un éster con una base para obtener un ácido y un alcohol, se obtiene el alcohol de polivinililo, el cual es un polvo blanco poco higroscópico, en otras palabras que tiene poca capacidad de absorber o expulsar humedad. Se usan como consolidantes y también como desmoldantes de siliconas. Son estables a la luz, incoloros y limpios.

• Resinas acrílicas

Son polímeros cuyas características dependen de su composición química y condiciones de polimerización. Sin embargo, en términos generales se puede decir que son productos: incoloros, resistentes a la decoloración por la acción de la luz solar, incluso a altas temperaturas; y resistentes al agua, alcohol, álcalis, aceites, con una gran estabilidad química. Las aplicaciones de esta resina son como adhesivo, consolidante, fabricación de barnices, aglutinante para pigmentos, etc. En el caso de consolidación de materiales pétreos, estos productos polimerizan en el interior de la piedra.

Resinas termoestables o termoendurecidas

Son las compuestas por monómeros que están unidos por enlaces químicos formando una red tridimensional. Sus dos componentes producen una modificación estructural de la resina cuando endurece. El agente endurecedor suele ser amina.

Las resinas termoendurecidas más utilizadas son: las resinas epóxicas y resinas de poliéster.

- Resinas de poliéster

Estas resinas son de poliéster no saturado disuelto en estireno para disminuir su viscosidad y permitir su polimerización. Como catalizador, se utilizan principalmente peróxidos para activar la reacción que es exotérmica. Los polímeros formados tienen una gran resistencia a los ácidos y menor a los álcalis siendo sensible a la radiación ultravioleta lo que produce variaciones cromáticas. Otro inconveniente que hace su uso limitado para la consolidación de la piedra es que disminuye considerablemente la permeabilidad del vapor de agua.

- Resinas epóxicas

Son productos sintéticos obtenidos por la reacción de grupos epóxi que polimerizan en presencia de un catalizador como las aminas.

Las resinas epóxicas tienen un gran poder adhesivo, dureza y buena resistencia a los agentes químicos, por los enlaces tipo éster y la presencia de los grupos epoxi que son los de gran capacidad adhesiva, además de un buen comportamiento ante altas temperaturas. Durante su polimerización no produce subproductos dañinos para la piedra. Sin embargo, por su gran densidad tienen poca penetrabilidad, lo que hace necesario para su aplicación el uso de formulaciones especiales que obligan a utilizar solventes del tipo cetonas, ésteres, alcohol ésteres. Son muy frágiles al igual que ocurre con las resinas de poliéster, por lo que se añade fibra de vidrio para mejorar su comportamiento estructural. Tiende a producir cambios cromáticos (amarillentos) debido a la radiación solar, perdiendo sus propiedades mecánicas con el tiempo. Por lo que su uso se dirige principalmente al sellado de grietas y rejunte de piezas rotas, con acciones posteriores que disminuyan sus cambios cromáticos.

Ceras

Pueden ser naturales o sintéticas. Las naturales han sido muy utilizadas en la antigüedad como la cera de abeja, miel, sebo, etc. Tienen poca adherencia sobre el soporte, escasa penetrabilidad y da a la piedra un aspecto pegajoso, además de ensuciarla. La durabilidad del tratamiento es mínima y tiende a oscurecer a la piedra.

Las ceras sintéticas derivan de hidrocarburos pertenecientes al grupo de las parafinas, tienen mayor adherencia sobre el soporte y cualidades hidrófugas, son más homogéneas en su composición, presentan buena estabilidad química y a la radiación solar, además, de que son menos pegajosas que las naturales. Actualmente suelen ir mezcladas con resinas acrílicas y de siliconas, que facilita su aplicación y mejoran sus resultados.

Compuestos organosilíceos

Estos consolidantes no producen sales en su reacción, los más utilizados son los silicatos de etilo cuya hidrólisis en el interior de la piedra da lugar a un precipitado de gel de sílice, que rellena el poro; además de alcohol etílico y agua que se evapora naturalmente. La forma de acción de este consolidante no es como las resinas, en donde la capacidad adhesiva del producto permitía ligar a los componentes que eran recubiertos por una película fina. En los ésteres orgánicos de silicio, la consolidación se realiza por cementación de los poros de la roca

y la reacción del gel de sílice con el soporte, siempre y cuando sea de naturaleza silíceo como las rocas graníticas, areniscas, etc. La reacción que tiene lugar es muy lenta y requiere un largo periodo de curado, siendo necesario controlar que el proceso de evaporación del catalizador no sea muy rápido para que el producto penetre adecuadamente.

La efectividad de estos tratamientos de consolidación orgánica esta muy ligada con la forma de aplicación y de la naturaleza de consolidante, de los catalizadores y de los disolventes utilizados. A baja humedad y temperatura tanto de la piedra como del ambiente, favorece la efectividad del tratamiento, por el contrario, la lluvia o niebla disminuye su efectividad.

Los consolidantes a base de silicio son considerados productos químicamente mixtos, ya que a partir de compuestos orgánicos, siloxanos, precipitan sílice amorfa de naturaleza inorgánica.

En la actualidad son los productos más utilizados en Europa para la rehabilitación de la piedra, pues le confieren características muy favorables. Entre las que se encuentran:

- Una aceptable penetración en la mayoría de las rocas porosas.
- Se comportan adecuadamente frente a la acción del agua.

Entre los principales consolidantes a base de silicio se encuentran:

- Los silicatos
- Los fluosilicatos.
- Los alcoxisilanos y alquil aril polisiloxanos

Consideraciones para evaluar la idoneidad de los consolidantes.

Una vez mencionadas las principales características tanto de los consolidantes inorgánicos como de los orgánicos, podemos establecer las propiedades físicas a evaluar antes de decidir el uso de alguno de ellos con el fin de obtener mejores resultados. Tal como lo menciona *García de Miguel José María, et. al.* en su libro, estas pueden ser:

- Color.- Debido a que este puede no ser semejante al del sustrato, ó, que sufra alteraciones con el tiempo.
- Porosidad.- Ya que de esta depende la transpiración de los elementos estructurales que consoliden.
- Velocidad de evaporación.- Es necesario que estos productos tengan una velocidad de evaporación suficiente que permitan mantener una fluidez adecuada hasta su aplicación dentro de las mamposterías.
- Ángulo de contacto.- Para conocer que tan impermeable es al agua la superficie.
- Contracción por secado.- Hay que revisar que esta no sea representativa.
- Resistencia a la compresión.- Con el fin de utilizar un producto que ofrezca una resistencia similar a la del sustrato donde se va a colocar.
- Expansión térmica. De modo que esta sea similar a la del sustrato para evitar tensiones internas.

Además, se requiere evaluar la durabilidad de los mismos, por lo que recomiendan realizar los siguientes ensayos de envejecimiento artificial acelerado (durabilidad):

- Ciclos de exposición a la radiación ultravioleta.
- Cristalización de sales.
- Ciclos de hielo - deshielo.
- Ciclos térmicos.
- Desmoronamiento.

Para valorar: porcentajes de pérdida de peso, evoluciones morfológicas superficiales, descripción y cuantificación de lesiones, comparación de propiedades físicas pre y post-ensayo.

Productos comerciales

En la tabla 4 se muestran algunos productos manufacturados orgánicos y silicoorgánicos que se utilizan en la actualidad en Europa y en la tabla 5 se enlistan los productos consolidantes más comunes que existen en el mercado internacional.

2.3 Protección de mamposterías

Hidrofugantes

Los productos hidrofugantes, son aquellos que protegen la mampostería de la acción degradante del agua, pues como se mencionó anteriormente, éste es el vehículo más importante de los factores de degradación.

Estos productos actúan de la siguiente manera (Fig. 16):

- Forman una película delgada que aísla la piedra del medio ambiente
- Forman una película similar al caso anterior, con la diferencia de que esta cuenta con ángulo de contacto agua-producto superior a 90° lo que hace que el agua sea repelida y no penetre en el sistema poroso de la piedra.

Los requisitos mínimos que deben cubrir estos productos según *Migarró Martín et. al. 1996* para la protección de edificios antiguos son:

- No modificar la permeabilidad del vapor de agua de la piedra por encima de un 10%.
- Disminuir la absorción del agua superior a 70%.
- Elevada capacidad de penetración.
- No producir subproductos dañinos
- Resistencia a los álcalis y ácidos, así como a la radiación ultravioleta
- Reversibilidad y posibilidad de aplicar nuevos tratamientos.
- Buena adhesión.
- Compatibilidad con el consolidante.
- No producir variaciones cromáticas y de brillo de su superficie.

Sin embargo, actualmente es difícil encontrar un producto que reúna todos estos requisitos.

Cabe señalar que los hidrofugantes no tienen capacidad de consolidantes. Aunque existen en el mercado productos que son para consolidar e hidrofugar a la vez, pero su eficacia no ha sido comprobada.

- Siliconas

Las siliconas son excelentes hidrofugantes, debido a que resultan permeables al vapor de agua y no producen cambios cromáticos en la superficie de la piedra. Tienen la desventaja de que su efectividad como en los demás casos, disminuye con el paso del tiempo.

Las cadenas de polisiloxanos son polares por lo que sus polos negativos se fijan bien en rocas de composición silíceas y en menor grado a las alcalinas. Por este motivo las siliconas pierden su eficacia rápidamente cuando son aplicados sobre rocas con alto contenido de carbonatos, siendo aconsejable para mejorar su efectividad y duración aplicar un consolidante del tipo de silicatos de etilo, para dejar la superficie de la piedra con cargas electrostáticas positivas de fuerte adherencia con las cargas negativas de los polisiloxanos.

- Resinas termoplásticas.

Las resinas acrílicas son generalmente utilizadas como hidrofugantes, sobre todo cuando se mezclan con siliconas, son menos eficaces y su durabilidad se reduce con el paso del tiempo y en ambientes húmedos, lo mismo sucede con el acetato de polivinililo.

2.4 Aplicaciones

En la actualidad muchos restauradores evitan el uso del cemento Portland en obras de consolidación, pues lo consideran un material que daña la originalidad del monumento proporcionándole mayor resistencia y rigidez a la estructura, características que no son deseables en la restauración, por lo que se inclinan por el uso de materiales similares a los originales como la cal. Sin embargo, debido al rápido fraguado del cemento, actualmente es más utilizado como principal material consolidante en la mayoría de las obras de rehabilitación. Por lo que diversos investigadores han estudiado los efectos que induce el cemento Portland en las estructuras de edificios antiguos, a continuación, se comenta tres casos en los que se ha estudiado la influencia de la consolidación de grietas en el comportamiento estructural de la mampostería.

Caso 1:

El reforzamiento de muros de mampostería de piedra con inyección de lechadas.
Eslovenia.

De acuerdo al artículo de *Tomazevic 1993; Eslovenia*, es una ciudad que esta situada en una zona sísmica, donde pueden esperarse terremotos de intensidad VII en escala MSK (Medvedev-Sponheuer-Karnik) con un periodo de retorno de 200 años o menos. Sus edificios antiguos fueron construidos con materiales típicos de la región como: la pizarra y la caliza. Se ha encontrado que la calidad de sus morteros depende del tipo de arena, si se trata de arena limpia de río, la calidad es buena, si es una arena arcillosa, las características del mortero son bastante pobres; algunas de las propiedades mecánicas de estos morteros (Ver tabla. 6).

Como los edificios históricos no fueron diseñados para resistir fuerzas sísmicas, resultan muy vulnerables a los terremotos; sus elementos estructurales se agrietan e incluso algunos llegan a

colapsar. Debido a esto, el Instituto de Investigaciones y Pruebas de Estructuras y Materiales (ZRMK) en Ljubljana, Eslovenia, realizó un estudio sobre lechadas de cemento para consolidar elementos estructurales, las cuales han demostrado que incrementan eficazmente la resistencia a fuerzas sísmicas.

Originalmente, la mezcla de lechada consistía en 90 % de cemento Portland PC-35 y 10 % de puzolana para asegurar la plasticidad de la mezcla. La proporción del volumen de la parte seca de la mezcla y el agua varía de 1:1 a 1:0.9. El proceso de inyección en muros fue realizado por medio de boquillas, que se colocaron uniformemente entre las juntas de las piedras de la pared, a una distancia uniforme de entre 50 y 100 cm, dependiendo de las características de la mampostería. Los agujeros se taladraron cuando menos a la mitad del espesor del muro para instalar las boquillas a varios centímetros de profundidad y se ligaron por medio de mortero. Después las paredes fueron humedecidas con agua para que después se iniciara la inyección de lechada, la cual comienza de abajo hacia arriba inyectando en la primera boquilla hasta que empiece a fluir fuera del muro, después se taponan y se continúa inyectando la siguiente repitiendo el mismo procedimiento hasta terminar con todo el muro. La presión de inyección es superior a 2.04 kg/cm^2 .

El aumento de la resistencia a los sismos que produce la inyección de lechada en las paredes de mampostería, fue verificada experimentalmente mediante pruebas de laboratorio y in-situ con muros de mampostería de piedra, de ladrillo y mixtos, inyectados y sin inyectar. Los valores de sus propiedades mecánicas son los indicados en la tabla 7. Se encontró que, dependiendo de la calidad de la mampostería original, la lechada de cemento puede aumentar más del doble la resistencia lateral.

La eficacia de la inyección de lechada de cemento, también se verificó a través de los terremotos, pues una casa rural de tres pisos severamente dañada por el primer terremoto de Friuli, Italia, de 1976 (intensidad IX es escala MSK) fue inyectada con lechada de cemento y resistió los dos terremotos subsecuentes de la misma intensidad sin recibir daño alguno.

Sin embargo, el cemento es un material que no ha sido aceptado por muchos restauradores, debido a que sus impurezas disueltas en el agua destruyen los murales y otras decoraciones que frecuentemente pueden encontrarse en la superficie de las paredes. Y lo más importante, es que ocasiona una concentración de humedad, debido a que los huecos y grietas en la mampostería original actúan como una barrera que previene la ascensión capilar de agua, pero al ser llenados con lechadas de cemento, se forma un tejido capilar activo que absorbe agua del subsuelo, o del aire y la transporta en el interior de la pared junto con sus sales. Ocasionalmente que cuando se evapora en la superficie de las paredes, las sales cristalicen debajo o dentro del yeso poroso, produciendo que el yeso se separe de la pared, o en el peor de los casos, la cristalización se lleve a cabo dentro de la piedra, lo que origina una serie de tensiones que fracturan a la piedra y aumente la humedad.

Por consiguiente, en paralelo con la solución de los problemas de resistencia sísmica, el ZRMK buscó mitigar el problema de la capilaridad.

Como primer paso para resolver el problema de la eliminación de humedad, desarrolló aditivos repelentes al agua hechos con sales inorgánicas de ácido graso y que se encuentran disponibles en el mercado bajo los nombres comerciales de «el vlagin» y «el fobin», son fabricados en polvo o en forma líquida y se agregan directamente en el mezclador donde la lechada está preparándose. Finalmente distribuidos en la mezcla, estos aditivos incorporan a la inyección de lechada endurecida una superficie interior de poros, que incrementa el ángulo de contacto con el agua e impide su penetración y transporte en la mampostería. Pero al cambiar

la composición de la lechada original agregándole el aditivo, la resistencia a compresión de la lechada se vio reducida. Para analizar el comportamiento de esta lechada, realizaron muros con piedras y ladrillos originales tomados de las paredes de un edificio histórico localizado en Ljubljana. La composición del mortero fue determinada por medio de un análisis químico, y para acelerar su endurecimiento se le agregó un poco de cemento. La construcción fue realizada por un albañil experimentado, familiarizado con la construcción de mampostería.

Construyeron ocho especímenes (designados A, B, C, y D) con dimensiones 100 x 50 x 100 cm (longitud x espesor x altura) para las pruebas de resistencia sísmica, resistencia a tensión, módulo de corte, ductilidad y capacidad de absorción de energía, y dos con dimensiones 120 x 50 x 100 cm para la determinación de la resistencia a compresión.

Las boquillas de inyección fueron colocadas aproximadamente a 10 cm de profundidad, dentro de las juntas de las piedras en todos los lados de las paredes, con una separación de 30-40 cm y se fijaron con un mortero de secado rápido, las juntas se sellaron con este mismo mortero para prevenir posibles fugas. Y la inyección se realizó a una presión de 2.0-3.06 kg/cm². La composición de estas lechadas aparece en la tabla 8.

En las mezclas que se designaron A y B se usó cemento con y sin el aditivo hidrófugo («el vlagin» se agregó en el caso de mezcla B). En el caso de mezclas C y D, 30% de cemento fue reemplazado por arena sílica de grano fino. El efecto de los dos aditivos hidrófobos fue comparado: «el vlagin» se agregó en el caso de mezcla C y «el fobin» en el caso de mezcla D. Las propiedades mecánicas del mortero y la cantidad de lechada se resumen en la tabla 9.

Para determinar la resistencia sísmica de los especímenes A, B, C Y D, fueron sometidos a cargas verticales constantes en tres ciclos. Todas las paredes fallaron por cortante y las grietas se orientaron diagonalmente, algunas se desarrollaron entre las juntas de las piedras y otras atravesaron la piedra. La deformación lateral que se presentó fue cercana a los 4 mm. Para comprobar que los huecos de la mampostería estaban completamente llenos, se llevaron a la falla. Los resultados de la prueba se resumen en la tabla 10.

El valor medio de la resistencia a tensión del conjunto de todos los 8 especímenes es 3 kg/cm² con una desviación estándar de 0.7 kg/cm² y un coeficiente de variación igual a 21%. Los valores obtenidos por estos experimentos toman buena correlación con los resultados previamente obtenidos (Tabla 7).

Aunque la resistencia a compresión de las diferentes mezclas varió de 71 a 326 kg/cm², no causó efecto en la resistencia lateral de las paredes inyectadas, posiblemente porque esta resistencia está determinada por la resistencia del mortero original que transfiere las cargas externas que actúan en la pared de piedra a piedra. Como la lechada no penetró en el mortero original, según una inspección visual, éste no modificó su resistencia, por lo que la resistencia de la pared no cambia y es indiferente a la resistencia de la lechada, lo que cambia es la unión entre las piedras y el mortero.

El comportamiento de las paredes ensayadas ante cargas alternadas se muestra en la Fig. 17. Comparando estos resultados con los valores obtenidos en la tabla 10, se nota que, aunque se obtuvieron valores similares de resistencia lateral, la lechada con puro cemento es más rígida que las que se inyectaron con aditivos hidrófugos, sin embargo al considerar el factor de ductilidad d_u , (ver tabla 10) no se observa una diferencia considerable.

A pesar de los resultados satisfactorios que se obtuvieron con el empleo de los aditivos hidrófugos, se observaron fenómenos de cristalización de sales en la superficie de las paredes después del secado, que pueden dañar decoraciones exteriores, lo que indica el carácter cauto y complejo de la aplicación de esta lechada, por lo que se buscó reducir la cantidad de cemento y sustituirla por algunos agregados inertes finos que no reduzcan la resistencia de la lechada hidrófuga por debajo de la resistencia original del mortero, pero que si reduzca los efectos negativos del cemento.

Por lo que parte del cemento se sustituyó con diferentes tipos y cantidades de arena. En la tabla 11, se muestran las mezclas investigadas en este estudio, usando arena sílica de 0.025 mm de tamaño y arena de piedra caliza de tamaño 0.063 mm. La cantidad de agua fue la necesaria para obtener una misma viscosidad, con una taza de flujo de 4 mm.

Para ensayar estas lechadas se construyeron especímenes de 4 x 4 x 16 cm, los cuales una vez colados, se cubrieron con una tela húmeda y 24 horas después fueron descimbrados, excepto los que contenían 30% de cemento y 60% de arena, pues estos se descimbraron 48 horas después. La mitad de los especímenes se curaron a 40% de humedad relativa durante 28 días. Mientras la otra parte estuvo a 93% de humedad relativa durante 21 días y los últimos 7 a 40%. La influencia de la composición y condiciones de curado se da en la tabla 12; como se puede apreciar, la resistencia de las mezclas que contienen menos del 50% de cemento, es aproximadamente 55% más baja que la resistencia de la mezcla con 90% de cemento (tipo N). En el caso en donde el 60% del cemento es reemplazado por arena, la resistencia varía un 67% cuando se trata de arena sílica, y de 80% cuando se tiene arena caliza. En condiciones de curado seco, la resistencia se reduce en un 30%.

Como se observa en la tabla 12, los aditivos hidrófobos reducen la resistencia de la lechada de cemento en un 50%, pero en las lechadas de bajo contenido de cemento, la reducción es poco significativa.

La absorción capilar de agua de las diferentes mezclas se determinó según la prueba DIN 52617 con prismas de 4 x 4 x 16 cm. Los resultados se muestran en la tabla 13.

Según estos resultados, se ve que la mayor penetración de agua se tiene cuando los especímenes se curaron en estado seco, que en condiciones atmosféricas húmedas. Las mezclas en las que parte del cemento fue sustituida por algún agregado fino, resultaron más hidrófugas que las que solo consisten en cemento y puzolana. La absorción capilar resultó más alta en las mezclas que contienen arena de caliza, que las que contienen arena sílica. A su vez el efecto hidrófugo es menor en las arenas de caliza.

Según los resultados expuestos en este artículo, es posible considerar lechadas con cierto porcentaje cemento en la consolidación de monumentos históricos; sin embargo, para decidirse por alguna de ellas, es recomendable realizar las investigaciones necesarias para cada tipo de construcción.

Caso 2:

Consolidación de mamposterías antiguas con inyección de lechadas. Francia

En 1979, Jean Rocard, Arquitecto en Jefe de Monumentos Históricos, y Alain Bouineau (Ref. 6), ingeniero del Centro Experimental de Estudios y Trabajos Públicos de París, realizaron la consolidación de las mamposterías de una iglesia del siglo de XIII del castillo de San

Ménéhould (Marne). Este trabajo fue presentado en el simposium de Bolonia en 1981 "The Conservation Stone II".

Como las mamposterías estaban compuestas por una piedra muy degradable, arcillas y elementos calcáreos con morteros de tierra, para su consolidación utilizaron lechadas de cemento con bentonita y, para los morteros de piedra, silicatos de sodio.

Aunque en este tipo de obras, comúnmente se utilizan lechadas de cal, debido a que favorecen la permeabilidad de la pared. Estas no han resultado muy efectivas, por la poca penetrabilidad que ofrecen, consecuencia del tamaño de sus partículas que tapan los poros de la piedra y evitan el paso de la lechada. Por lo que se optó por el uso de lechadas de cemento con bentonita. Ya que se comprobó que no obturan los vacíos de hasta medio milímetro de diámetro. La composición de estas mezclas es la siguiente:

Cemento C.I.K. 45	50 kg
Agua	40 kg
Fluidificante	1 kg
Bentonita hidratada al 1000%	16 kg

Para realizar la mezcla se utilizó un agitador de alta turbulencia. La fluidez se ajustó a 6 mm en el Cono de Marsh para un tiempo de entre 17 -19 segundos. La presión de inyección fue del 1.53 kg/cm².

Para los morteros de tierra se utilizó silicato de sodio. Esta mezcla estuvo compuesta por:

Silicato de sodio 3,3 38° 40°	48,9 %
Durcisseur 2000(endurecedor)	9,9 %
Agua a 20° C	41,2 %

Dicha mezcla se inyectó a una presión de 1.734 kg/cm² y alcanzó una resistencia a la compresión de 14.48 kg/cm².

Estas lechadas fueron empleadas sin saber las mejoras que se podrían obtener y fue hasta 1980 cuando se elaboraron muros experimentales, contruidos con técnicas antiguas y morteros de tierra, arena y cal aérea. Finalmente, en 1986, se publicaron los resultados en el número 3 de la revista del ICOMOS, que en resumen los autores señalan lo siguiente:

La inyección sólo de lechada con cemento y bentonita permitió mejorar la resistencia a la compresión de la mampostería en un 20%. Por otro lado, la combinación de lechadas de cemento bentonita y silicato de sodio mejoró la resistencia de los muros en el orden de 350%.

Caso 3:

Consolidación de muros de adobe en México

De acuerdo con la *SEDUE 1984*, los muros de adobe se acostumbran consolidar con agua y baba de nopal o con agua de cal. Estos compuestos se aplican por aspersión sobre las superficies disgregadas, cuidando que estén secas para asegurar una adecuada absorción.

En México, como indica *Prado Niñez 2000*, los consolidantes químicos más populares son los acetatos de polivinililo, como el DM4, el DRI, el DMIH y el 50, aunque debido a su alto costo, su empleo queda reservado solo para construcciones de gran valor histórico. El endurol se ha usado con éxito en adobe, el OH de Wacker es una mezcla de ésteres de ácidos silicos

con diluyentes. Para sellar fisuras en un muro de adobe, se amasa la arcilla que se va a utilizar con agua a la que se le agrega acetato de polivinilio.

Cuando se inyectan grietas en muros de adobe, se utiliza el mismo sistema de boquillas que se tiene en muros de mampostería. La lechada de inyección esta compuesta por:

Cal	1 parte
Arena cernida	1 parte
Arcilla	3 partes
Agua	(la necesaria para obtener una adecuada fluidez)

La composición de las lechadas varía dependiendo de la arcilla de la región, y en algunos casos se le agrega algún aditivo expansor en las cantidades que recomienda el fabricante.

Caso 4:

Consolidación de muros de mampostería en México

En este caso, la mezcla típica de lechada con que se han inyectado la mayor parte de monumentos históricos consta de:

Cemento	1 parte
Cal	3 parte
Arena	3 parte
Aditivo estabilizador	0.07 parte
Agua	1.5 parte

La cual se utiliza indistintamente en todo tipo de mampostería que emplea morteros a base de cal.

3. ADITIVOS

3.1. Aspectos generales

El empleo de aditivos en la elaboración de morteros de cal y tierra ha estado presente desde la antigüedad para mejorar o modificar alguna de sus propiedades.

Estas sustancias, en su mayoría de origen orgánico, fueron empleadas de acuerdo a las creencias de la época, pues no existía algún estudio que garantizara su efectividad. Por lo cual existe incertidumbre en cuanto a su uso.

De acuerdo a *Gárate Rojas 1994*, según investigaciones, la albúmina de huevo, las queratinas y las caseínas son polímeros orgánicos que fueron utilizados por los egipcios como aglutinantes. La queratina que constituye la parte dura de uñas, pezuñas, cuernos, etc., fue utilizada como retardador de fraguado de yesos.

En el siglo IX, se empleó sangre en los morteros de la Catedral de Rochester. Y en el XVI se utilizó orina en los de la Catedral de Ruen.

La malta, que es un cereal utilizado en la fabricación de bebidas alcohólicas como la cerveza y la urea, la cual es una sustancia con alto contenido de nitrógeno y constituye la mayor parte de la materia orgánica contenida en la orina en su estado normal, fueron utilizadas para mejorar la durabilidad y resistencia del mortero, gracias a que favorecen la formación de cristales.

En la mayoría de los morteros prehispánicos de cal, se han encontrado cabellos de animales y plantas fibrosas, según, para obtener una mayor resistencia.

En época de Justiniano, en la capilla del baptisterio de Constantinopla, se utilizó corteza de olmo y agua caliente de cebada también llamados taninos y cola para los morteros de Estucos.

Estos aditivos entre muchos otros fueron utilizados en el pasado. Independientemente de su eficacia, en la tabla 14 se enlista una serie de aditivos y sus efectos en el mortero utilizado.

En cuanto a la época en que se emplearon estos materiales, Gárate cita algunos casos:

- Egipcios (150 a.J.C.), usaron albúmina, colas animales, sangre, huevos, zumo de higo, goma arábiga, queratina.
- Vitruvio (23 a.J.C.), sangre cuajada, huevos, higos, manteca de cerdo, leche, centeno.
- Plinio (223 d.J.C.), cebada, sangre, corteza de olmo, fibras, higo, pelo, leche, azafrán, sebo, tanino.
- Edad media (1200-1500): cerveza, cera, sangre, huevos, zumos de fruta, gluten, goma, malta, arroz, sebo, azúcar, urea.

Como puede observarse, existe una gran diversidad de aditivos orgánicos, los cuales requieren de una investigación profunda para comprobar su eficacia y comportamiento tanto en el mortero como en los lugares donde se han colocado. Pues ciertos compuestos como la sangre

o la caseína, que es una proteína de la leche que, al fermentar, forma el queso, ocasionan la proliferación de flora bacteriana, trayendo como consecuencia la ruptura del mortero ya sea por exfoliación o por abombamiento. Este mismo efecto se produce con excrementos de animales.

En la actualidad, existe un amplio campo de estudio sobre el uso de aditivos, la Norma ASTM C-125 "Terminología Estándar Relacionada al Concreto y a sus Agregados", define como aditivo, al material diferente del agua, de los agregados y del cemento que se emplea como componente del concreto o del mortero para modificar sus propiedades de acuerdo a las necesidades de la construcción. Cabe señalar que los aditivos han sido elaborados para mezclas de concreto y mortero de cemento, por lo que su uso en mezclas de cal debe ser analizado en cada caso.

3.2. Tipos

Las presentaciones más comunes de estos productos son: en estado líquido o en forma de polvos sólidos. Para determinar su adecuada proporción en la mezcla, es necesario revisar mediante ensayos previos que no se induzcan efectos secundarios no deseados.

La norma ASTM C 494 "Especificación estándar para aditivos químicos para el concreto", indica los tipos de aditivos químicos que se utilizan en el concreto de cemento hidráulico. Según su función, los clasifica en siete tipos:

- Tipo A.- Reductores de agua
- Tipo B.- Retardantes
- Tipo C.- Acelerantes
- Tipo D.- Reductores de agua y retardantes
- Tipo E.- Reductores de agua y acelerantes
- Tipo F.- Reductores de agua de alto rango
- Tipo G.- Reductores de agua de alto rango y retardantes

Sin embargo, existen otros aditivos para funciones más específicas que de acuerdo al *IMCYC*, 1983, son:

- Inclusiones de aire
- Expansores
- Insecticidas, germicidas y fungicidas
- Inhibidores de la corrosión
- Minerales finamente molidos

Acelerantes

Tienen la función de reducir el tiempo de fraguado y acelerar el desarrollo de resistencia de las mezclas. Por lo general, son utilizados en climas fríos, ya que en climas cálidos, pueden ocasionar una rápida evolución del calor debida a la hidratación, fraguado rápido y grietas por contracción. Los aditivos más comunes de este tipo son los siguientes:

- Sales inorgánicas solubles
- Compuestos orgánicos solubles
- Diversos materiales sólidos.

- Sales inorgánicas solubles

Entre estas se encuentran los cloruros, bromuros, fluoruros, carbonatos, nitratos, tiosulfatos, silicatos, aluminatos e hidróxidos alcalinos. El acelerante más común es el cloruro de calcio debido a que es muy económico.

Cloruro de calcio.- Provoca un incremento en la fluencia del concreto y en la contracción por secado del mismo. Sin embargo, estudios han demostrado que el incremento de contracción se debe al periodo de curado del mortero. Mientras más tiempo se deje curar, menores son los efectos de fluencia y contracción. Además, tiene el inconveniente de propiciar la corrosión de los metales que estén en contacto con el concreto, debido a la presencia de iones cloruro. Por lo cual su uso es restringido.

Este producto debe cumplir con la norma ASTM D 98 "Especificaciones para el cloruro de calcio". En donde se indica que el cloruro en forma de escamas debe contener un mínimo de 77% CaCl_2 .

Compuestos orgánicos solubles.- Los más comunes son la trietanolamina y el formiato de calcio, los cuales se utilizan para compensar los efectos retardantes de los aditivos reductores de agua o para proporcionar acelerantes no corrosivos.

Cuando se emplean bajas relaciones agua / cemento a/c y se requiere un rápido fraguado, se utilizan azúcares, las cuales suelen ser fuertes retardantes, sin embargo, con relaciones a /c de 0.22 a 0.24 y con adiciones mayores a 0.25% por peso de cemento se acelera el fraguado.

Inclusores de aire

Producen un número elevado de burbujas finas de aire, separadas y repartidas uniformemente manteniéndose de esta manera después de endurecido el mortero, con el fin de incrementar: la trabajabilidad, la resistencia a heladas y la resistencia a aguas agresivas.

El uso de aditivos líquidos asegura una mayor uniformidad de las burbujas. Generalmente la cantidad que se requiere de aditivo para obtener la cantidad de aire deseada oscila entre el 0.05% del peso del cemento de la mezcla.

Los materiales más usados para este fin son: sales de resinas de madera, aceites vegetales y derivados de grasas animales, lignosulfatos, detergentes sintéticos, sales de ácidos del petróleo, etc. que deben cumplir las especificaciones de la ASTM C 260 "Especificación estándar para aditivos inclusores de aire para concreto", para evitar que se modifique seriamente las propiedades del concreto.

La inclusión de aire puede reducir la resistencia, sin embargo, cuando se mantienen constantes el contenido de cemento y la trabajabilidad, la reducción de resistencia es contrarrestada parcial o totalmente por la reducción de la relación a/c.

Si se incrementa la cantidad de cemento, tiende a disminuir la efectividad del aditivo, lo mismo sucede si se incrementa la finura del cemento, o si se adiciona algún material fino como ceniza volante, puzolanas o bentonita, así como la exposición de la mezcla a altas temperaturas.

La cantidad de aire incluido en la mezcla puede variar dependiendo el tipo y la condición de la mezcladora, la cantidad de mortero que se mezcla y la velocidad de mezclado. Por ejemplo si las aspas de la máquina tienen mortero acumulado, la cantidad de aire puede reducirse.

Reductores de agua y reguladores de fraguado

Su función es disminuir el contenido de agua de una mezcla para mejorar su trabajabilidad sin producir segregación. Lo que ocasiona un incremento en la resistencia a la compresión y reducción en la permeabilidad, así como, en combinación con una adecuada inclusión de aire, una mejor resistencia a ciclos de hielo y deshielo. Entre los materiales más comunes empleados para esta función, podemos encontrar los siguientes:

- ácidos lignosulfónicos y sus sales.
- Ácidos carboxílicos hidroxilados y sus sales
- Materiales inorgánicos tales como sales de zinc, boratos, fosfatos y cloruros.
- Aminas y sus derivados
- Carbohidratos, polisacáridos y ácidos del azúcar.
- Ciertos compuestos poliméricos, como éteres de celulosa, derivados de melanina, derivados de naftaleno, silicones y carbohidratos sulfonados.

Estos aditivos deben cumplir los requisitos de la norma ASTM C 494.

Los aditivos retardantes de fraguado se utilizan para compensar el efecto acelerante y perjudicial de temperaturas elevadas para conservar el mortero trabajable durante el periodo de inyección. Según investigaciones de laboratorio, se ha demostrado que si el aditivo se agrega hasta dos minutos después de iniciado el ciclo de mezcla, aumenta el efecto retardante e incrementa la capacidad de incluir aire y mejoran las propiedades reductoras de agua. Además, producen una reducción importante de la relación a/c para una trabajabilidad dada. Tienen la desventaja de aumentar la retracción, de existir segregación por el exceso de agua, además de ser incompatibles con los inclusores de aire.

Expansores

Estos productos se expanden o reaccionan con los constituyentes de la mezcla durante el periodo de hidratación del mortero. Se utilizan para minimizar los efectos de contracción por secado.

Insecticidas, germicidas y fungicidas

Se utilizan para inhibir y controlar el desarrollo de bacterias y hongos en pisos y muros. Los materiales pesticidas más comunes son los siguientes:

- Fenoles polihalogenados
- Emulsiones de dieldrin
- Compuestos de cobre

Las tasas de adición varían de 0.1 al 10% por peso del cemento, dependiendo de la concentración y composición el producto químico. Tasas de adición superiores al 3%, pueden

tener un efecto adverso sobre la resistencia del mortero. La efectividad de estos materiales, particularmente los compuestos de cobre son de naturaleza temporal.

Inhibidores de la corrosión

Aunque el acero se encuentre ahogado en concreto o mortero, este tiende a oxidarse, ya sea por la infiltración de agua, o por estar en contacto con suelos salinos con alto contenido de cloruros. Uno de los materiales más comunes que resulta efectivo para evitar la corrosión, es el la sal benzoato de sodio. La cual se aplica como una lechada benzoato-cemento al 10%, o recubriendo el acero con el agua de mezcla con tasas de 2% de esta sal.

Aditivos minerales finamente divididos

Son polvos más finos que el cemento Portland. Contribuyen al desarrollo de la resistencia del mortero, por lo cual, las mezclas en que se utilizan requieren de una menor cantidad de cemento para obtener una determinada resistencia. Entre los productos más comunes se encuentran:

- Materiales Cementantes
- Puzolanas
- Materiales cementantes

Entre los materiales cementantes se incluyen los cementos naturales, las cales hidráulicas, los cementos de escoria y escoria granulada de alto horno.

- Puzolanas

En la norma ASTM C 125, la puzolana se define como un material sílico aluminoso que en sí tiene poco valor cementante, pero que finamente molido y en presencia de agua reacciona con el hidróxido de calcio a temperaturas ordinarias, formando compuestos con propiedades cementantes. Cenizas volantes, vidrios volcánicos, tierras diatomeas y algunos esquistos o arcillas, tratados con o sin calor, son ejemplos de materiales puzolánicos. Las puzolanas como aditivos, mejoran la manejabilidad y plasticidad de la mezcla, reduciendo su permeabilidad y mejorando la resistencia a aguas o suelos agresivos.

Productos Comerciales

En el mercado podemos encontrar una infinidad de aditivos que cuentan con alguna de las características antes mencionadas. En la tabla 15, se presentan algunos ejemplos.

3.3. Limitaciones

Antes de elegir algún aditivo, debe verificarse que cumpla con las especificaciones de la ASTM u otras de reconocido prestigio. Su uso, debe realizarse de acuerdo a las indicaciones del fabricante. Asimismo, un aditivo solo debe utilizarse después de haber evaluado en laboratorio sus efectos en la mezcla antes de su aplicación en obra.

4. PRUEBAS EXPERIMENTALES

4.1 Especificaciones

Existen diversos criterios para realizar ensayos de laboratorio a especímenes elaborados tanto de cemento como de cal. En México, rigen las normas NMX desarrolladas por el Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación (ONNCCE), las cuales son muy similares a las elaboradas por la internacional American Society for Testing and Materials (ASTM). También existen las normas UNE, muy populares en España y en diversos países europeos, las cuales son certificadas por al AENOR, que es una entidad privada dedicada al desarrollo de las actividades de Normalización y Certificación, con sede en Madrid. En esta investigación se aplican los criterios de la ASTM debido al reconocimiento mundial que han obtenido.

Normas ASTM

La American Society for Testing and Materials (ASTM), es una de las organizaciones de normalización más importante del mundo. Fundada en 1898, la ASTM desarrolla métodos de prueba, especificaciones, prácticas, guías, y terminología en 132 áreas que cubren metales, pinturas, plásticos, textil, petróleo, construcción, energía, el ambiente, productos del consumidor, servicios médicos y dispositivos, electrónica y muchos otros. Se publican más de 9800 normas cada año en los 72 volúmenes de su Anuario.

La ASTM no realiza investigación ninguna, todo el trabajo publicado, es desarrollado voluntariamente por los 33300 miembros de la organización altamente calificados y localizados en todas partes del mundo. Facilitando de este modo el comercio internacional al estandarizar los materiales, ya que estas normas establecen los principios y requerimientos que deberá cumplir cualquier material documentado.

ONNCCE

El Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., es una Sociedad Civil reconocida en el ámbito nacional, que tiene como propósito contribuir a la mejora tanto de la calidad como de la competitividad de los productos, procesos, servicios y sistemas relacionados principalmente con la industria de la construcción a través de la normalización y de la certificación. La elaboración de Normas Mexicanas se realiza considerando su armonización con normas internacionales y de acuerdo a las condiciones internas del país, enfocadas a mejorar los elementos, componentes, tecnologías, procesos y servicios.

4.2. Ensayes experimentales

Entre las características ideales que se buscan en los productos consolidantes se encuentran las siguientes:

- Baja viscosidad, para asegurar una mayor penetrabilidad en el sustrato sano.
- Impermeables al agua pero que permitan la transpiración de la piedra.
- De resistencia menor o igual que el sustrato rocoso.
- No modifiquen el color de la piedra, ni que cambie su aspecto con el paso del tiempo.
- No liberen sales dañinas que reaccionen con los materiales de construcción formando subproductos que resulten dañinos.
- Con un coeficiente de dilatación lineal térmica similar al de la piedra para evitar tensiones.
- Sus disolventes tengan una buena evaporación que impidan su migración hacia la zona externa de piedra formando costras.
- Resistentes a sustancias ácidas o alcalinas y no tóxicas. Durables
- Que sobre el se pueda aplicar el mismo tratamiento o cualquier otro. Además que pueda retirarse de la piedra sin causarle daño alguno.

Sin embargo, en la práctica todavía no se encuentra un producto que nos brinde todas estas características. Por lo cual, el trabajo presente se enfoca exclusivamente al estudio de la resistencia a compresión, resistencia a sulfatos, fluidez, contracción por secado y permeabilidad al vapor de agua, ya que las demás incursionan dentro del campo de la química y por consiguiente quedan fuera del alcance de este trabajo.

A continuación se hace una descripción de las normas que fueron aplicadas:

C 109/C 109 M-95. Prueba estándar para la determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos

Esta norma establece el método de prueba para determinar la resistencia a compresión de especímenes cúbicos de 5 cm por lado de pastas y morteros, y es equivalente a la norma *NMX-C-061-ONNCCE-2001*. El equipo necesario consta de una mesa de fluidez conforme a la norma C 230 (*NMX-C-144*), una mezcladora mecánica (Fig. 18) de acuerdo a la C 305 (*NMX-C-085*), moldes cúbicos de dureza no menor de 55 HRB de la escala Rockwell constituidos de dos piezas con paredes rígidas para evitar deformaciones, un pisón y una máquina universal.

El mortero es elaborado en la mezcladora conforme a la norma C 305 (*NMX-C-085*), en estado fresco se determina su fluidez en la mesa para dicha prueba (Fig.19), limpiando el platillo de la mesa y colocando dentro del molde una capa de mortero de aproximadamente 2.5 cm de espesor que se compacta 20 veces con el pisón, después, se llena totalmente el molde y se compacta nuevamente como en la primera capa. Luego se enrasa la superficie del mortero, se limpia y se seca la parte del platillo de la mesa no cubierta por el molde dejando pasar un minuto para levantar este y dejar caer el platillo 25 veces en 15 segundos, de una altura de 1.27 cm. La fluidez es el incremento del diámetro de la base de la masa de mortero, expresado como porcentaje del diámetro de la base original. El diámetro considerado del mortero debe ser el promedio de por lo menos 4 mediciones a cada 45°.

El llenado de los moldes se realiza inmediatamente después de terminar la prueba de fluidez, incorporando el mortero utilizado para dicha prueba al tazón de mezclado, además de raspar rápidamente todo el material adherido a las paredes del tazón, para continuar con el mezclado por 15 s a una velocidad media de 285 rpm. La preparación de los especímenes debe iniciarse dentro de un tiempo no mayor de 2 min. 30 s a partir de haber terminado el mezclado inicial del mortero. El llenado de los moldes se realiza colocando una capa de mortero de aproximadamente de 2.5 mm de espesor, en cada compartimiento, compactándola con un pisón 32 veces en 10 s. Una vez terminado el apisonado de todos los moldes, estos, se deben llenar y nuevamente volver a compactar. Por último, se enrasan y se almacenan dentro de la cámara de curado, dejando sus superficies expuestas al ambiente, pero protegidas del goteo directo durante 20 a 24 h para que después de este periodo sean desmoldados y sumergidos en agua saturada de cal en los tanques de almacenamiento. Para cada periodo de prueba, se recomienda como mínimo la elaboración de tres especímenes.

Al cumplir la edad de ensaye, se retiran de la cámara de curado o de los tanques de almacenamiento y se prueban de inmediato en la máquina universal, aplicando la carga sobre las caras del espécimen que estuvieron en contacto con las paredes verticales del molde. Asimismo, puede aplicarse una carga inicial a una velocidad que no exceda el 50 % de la carga máxima esperada, siempre que no sea mayor de 1530 kg. La velocidad de carga debe ser de tal modo que el ensaye no dure menos de 20 s, ni más de 80 s. Las edades de prueba son las indicadas en la tabla 16.

El cálculo de la resistencia a compresión se obtiene dividiendo la carga máxima aplicada al espécimen entre el área de su sección transversal, que generalmente se puede considerar de 25 cm²; sin embargo en los casos en que el área del espécimen varíe en más de 0.3 cm² con relación al área anterior, se debe usar la real.

$$R = \frac{P_{\text{máx}}}{S}$$

Donde:

$P_{\text{máx}}$ es la carga máxima

R es la resistencia a compresión

S es el área de la sección transversal del espécimen

C 1012-95a. Prueba estándar para determinar el cambio de longitud de morteros con cemento hidráulico expuesto a una solución de sulfato.

Este método es para determinar el cambio de longitud de barras de mortero sumergidas en una solución de sulfato de sodio y es equivalente al método expuesto en norma *NMX-C-418-ONNCC-2001*. El equipo necesario para esta prueba consiste básicamente de las siguientes partes: un comparador de longitudes de carátula conforme a la Especificación C 490; un contenedor con tapa para mantener las barras sumergidas y evitar la evaporación de la solución; una rejilla para evitar el contacto entre las barras y las paredes del contenedor; un mezclador mecánico de mortero conforme la norma C 305; moldes para las barras de sección cuadrada de 2.5 cm por lado y una longitud efectiva de 25 cm de acero o un metal duro que no sea fácilmente atacado por el cemento conforme a C 490, los moldes llevarán en sus extremos índices en forma de tornillo, los cuales quedarán ahogados en las barras de mortero 1.75 cm

para que sirvan como puntos de referencia. La distancia entre los extremos interiores de los tornillos de referencia debe ser de 25 cm \pm 0.25 cm. La distancia de entre las caras que limitan el molde transversalmente y su altura debe ser de 2.5 cm \pm 0.07 cm

La preparación del mortero se realizará conforme a la norma C 109 cuya equivalencia con la normatividad nacional corresponde con *NMX-C-061-ONNCC'E*. Los moldes prismáticos se llenarán en dos capas con el mismo volumen aproximadamente, compactando cada capa con el pisón, retirando el material sobrante con una espátula. Una vez terminado lo anterior, se aflojan los tornillos que sostienen en su posición los índices para evitar cualquier restricción a la contracción inicial del mortero. Para cada dosificación se elaborarán 6 barras y 21 cubos que servirán para determinar el momento en que el mortero alcanza una resistencia de 200 kgf/cm². Estos últimos se realizarán conforme a la norma C 109. Una vez alcanzada esta resistencia, se miden las longitudes iniciales de las barras con el comparador de longitudes y posteriormente se sumergen en la solución de sulfato que tendrá una concentración de 50 g de sulfato de sodio (Na₂SO₄) por litro, misma que será preparada un día antes de su uso, cuidando que la concentración de iones de hidrógeno (pH) oscile entre 6 y 8. Una vez sumergidos, se medirán las longitudes de los especímenes a 1, 2, 3, 4, 8, 13 y 15 semanas de edad, teniendo en cuenta que las barras continuarán sumergidas en la solución todo este tiempo. Si los cambios de longitud son pequeños, graduales y uniformes, las siguientes mediciones se pueden realizar a 4, 6, 9 y 12 meses de edad. Cuando existan cambios de longitud rápidos, las mediciones deben realizarse en periodos más cortos. Además, debe registrarse cualquier comportamiento fuera de lo esperado como agrietamientos, exudaciones y el alabeo, el cual debe medirse colocando la barra sobre una superficie plana con los extremos curvados hacia abajo.

Cabe mencionar que cada vez que se realice una medición, se debe medir primero la longitud de la barra de referencia del comparador de longitudes, además de renovar la solución de sulfato.

El cambio de longitud se determinará de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\Delta L = \frac{Lx - Li}{Lg} 100$$

Donde:

ΔL : es el cambio de longitud a la edad x, en %

Lx : es la lectura en el comparador del espécimen medido a la edad x menos la lectura en el comparador de la barra de referencia medida a la edad x.

Li : es la lectura inicial del comparador del espécimen a la edad que por primera vez se introduce dentro de la solución menos la lectura del comparador con la barra de referencia a esa misma edad.

Lg : es la longitud nominal de la barra, 25 cm

Los valores de cambio de longitud de cada barra deben calcularse con una aproximación de 0.001 % y reportar los promedios hasta 0.01 %. El rango de variación de los cambios de longitud expresados en %, no debe exceder a lo indicado en la tabla 17.

E-96-95. Transmisión de vapor de agua en materiales

Esta norma describe un método para determinar la transmisión de vapor de agua en materiales como papel, películas plásticas, productos de madera, yeso, enlucidos, entre otros productos. Aquí se mencionan dos métodos, el Método del Desiccant y el Método del agua.

Los equipos necesarios para esta prueba son: charolas, un gabinete en donde se tenga una temperatura de entre los 21° y 32° C, manteniéndose constante dentro de 0.6° C y una humedad relativa de 50 ± 2 %. Básculas de precisión, con capacidad de medir el 1% del peso de total de la muestra.

El método del Desiccant, consiste en colocar dentro de la charola cloruro anhidro de calcio en forma de pequeños trozos de modo que pasen por el tamiz No. 8 (2.36 mm) y libre de finos que pasen un tamiz No. 30 (600- μ m) que se secarán a 200° C antes de su uso. Después se coloca la losa que se va a probar, sellándola con la boca de la charola para después pesar el dispositivo y colocarlo dentro del cuarto con atmósfera controlada a una temperatura constante preferentemente de 32° C, y una humedad relativa del 50 %. Luego en periodos determinados, se va midiendo la variación del peso del conjunto charola – losa. Para un mejor resultado, se recomienda hacer cuando menos cuatro mediciones.

El método de agua, es muy similar que el anterior, solo que en lugar de llevar en el interior de la charola cloruro anhidro de calcio, se coloca agua destilada. Cuidando dejar un espacio entre el espejo del agua y la superficie del material de prueba cuando este pueda sufrir alguna alteración.

Se pesa la charola con la losa sellada y se coloca en un lugar donde se tenga atmósfera controlada y se pesa durante periodos de tiempo establecidos. Se recomienda realizar al menos 4 mediciones.

El cálculo de la transmisión de vapor de agua (WVT Water Vapor Transmission), se realiza de la siguiente manera:

$$WVT = \frac{G}{tA} = \frac{(G/t)}{A}$$

Donde:

G = es el cambio de peso, g

t = es el intervalo de tiempo, en que ocurrió G, h

G/t = es la pendiente de la recta g/h

A = área del espécimen de prueba, m²

WVT = Proporción de transmisión de vapor de agua, g / (hm²)

La permeancia se calcula de la siguiente manera:

$$Permeancia = \frac{WVT}{\Delta p} = \frac{WVT}{S(R_1 - R_2)}$$

Δp = diferencia de presión vapor, mm Hg (1.333×10^3 Pa)

- S = presión de vapor de saturación a la temperatura de la prueba, mm Hg (1.333×10^2 Pa)
 R₁ = es humedad relativa del plato, que es de 100% para el método del agua y para el método del desiccant, la del cuarto con temperatura y humedad controlada.
 R₂ = es la humedad relativa del depósito.

$$\text{Permeancia} = \frac{g}{Pa * s * m^2}$$

La permeabilidad es igual a:

$$\text{Permeabilidad} = \text{Permeancia} \times \text{espesor} \left(\frac{g}{Pa * s * m} \right)$$

C 305-94. Práctica estándar para mezclar mecánicamente pasta de cemento hidráulico y morteros de consistencia plástica.

Esta práctica es equivalente con expuesta en la norma *NMX-C-085*, e indica el procedimiento para mezclar mecánicamente pastas de cemento hidráulicos y morteros de consistencia plástica.

El equipo necesario es: un mezclador eléctrico de al menos dos velocidades y una potencia de 124 W (1/6hp), con una paleta rotativa removible y un tazón mezclador de acero inoxidable de 4.73 l de capacidad. Un raspador con una hoja de caucho semi-rígida de aproximadamente 7.5-cm de largo, 5 cm de ancho, y con un espesor aproximado de 2 mm, atada a una asa de 15 cm de longitud.

La temperatura del lugar de mezcla se mantendrá entre los 20 y 27.5° C, la del agua de mezclado será de 23° C y no variará por más de $\pm 1.7^\circ$ C. La humedad relativa del laboratorio mayor al 50%.

- Procedimiento para mezclar las pastas

Se coloca la paleta y el tazón seco en el mezclador. Después se introducen los materiales de la siguiente manera:

- 1- Incorpore toda el agua de mezclado dentro del tazón.
- 2- Agregue el cemento y deje reposar 30 s para que absorba el agua.
- 3- Comience a mezclar a una velocidad baja de 140 ± 5 r/min durante 30 min.
- 4- Detenga el mezclador por 15 s y raspe hacia abajo la pasta que pudo haberse pegado en la pared del tazón.
- 5- Encienda el mezclador a una velocidad media de 285 ± 10 r/min) y mezcle durante 1 min.

- Procedimiento para mezclar morteros.

Coloque la paleta y el tazón seco en el mezclador. Después introduzca los materiales de la siguiente de manera:

- 1- Ponga toda el agua de mezclado en el tazón.

- 2- Agregue el cemento y empiece a mezclar a una velocidad de 140 ± 5 r/min. durante 30 s.
- 3- Agregue la cantidad total de arena lentamente en un periodo de 30 s. mientras se mezcla lentamente.
- 4- Detenga el mezclador. cambie a una velocidad media (285 ± 10 r/min.) y mezcle durante 30 s.
- 5- Detenga el mezclador y permita reposar el mortero durante $1 \frac{1}{2}$ min. Durante los primeros 15 s de este intervalo. raspe rápidamente hacia abajo el material que pudo haberse adherido al tazón y este cúbralo con su tapa para el resto del proceso.
- 6- Finalmente. mezcle durante 1 min a una velocidad media (285 ± 10 r/min.).
- 7- En algunos casos se requiere de un intervalo de remezclado. todo el mortero que se adhiera a las paredes internas del tazón se raspará rápidamente hacia abajo.

4.3 Preparación de lechadas

Especímenes

Siguiendo las indicaciones de la ASTM y conforme a los equipos disponibles en el laboratorio de estructuras y materiales del Instituto de Ingeniería; se construyeron los siguientes especímenes para cada lechada:

- 15 especímenes cúbicos de 5 cm por lado
- 3 losas de $25 \times 30 \times 1.9$ cm
- 6 barras de $2.5 \times 2.5 \times 25$ cm
- 2 barras de $2.1 \times 2.1 \times 10$ cm

En la Fig. 20, se observa un conjunto de especímenes típicos.

Volumen

Se requiere de un volumen mínimo de 8.09 litros de lechada para cada dosificación, según se indica en la tabla 18, sin embargo, previendo cualquier eventualidad, se elaboraran alrededor de 10 litros.

Dosificaciones

Estas fueron seleccionadas de una serie de trabajos de consolidación estructural desarrollados en diversas instituciones de prestigio internacional. Ver tabla 19.

Para obtener el volumen absoluto requerido de cada mezcla, se utilizaron los pesos específicos dados en la tabla 20. Las proporciones obtenidas aparecen en la tabla 21.

Elaboración

Seguindo las indicaciones de la norma ASTM C 109, antes de iniciar el mezclado de cada lechada, se prepararon todos los moldes de los especímenes, verificando que se encontrarán libres de impurezas y que sus elementos de sujeción estuvieran perfectamente apretados, para posteriormente aplicarles una ligera capa de aceite que sirviera como desmoldante, cuidando en el caso de los moldes de las barras, de no cubrir los índices que se colocaron en sus extremos. En cuanto a los moldes de las losas, estos se fabricaron de madera (Fig. 21) y entre las juntas de sus elementos antes de sujetarlas con tornillos, se les aplicó una capa de grasa para evitar posibles fugas. Posteriormente, se revisó que el equipo necesario como: mezcladora de mortero, espátulas, embudo de Marsh y probetas, estuvieran limpios y cerca del lugar de mezclado. Por último, se prepararon las proporciones de materiales necesarios para elaborar la lechada en cuestión.

Una vez concluidos los preparativos, se procedió a iniciar el mezclado, tal como lo indica la norma C 305 de la ASTM para mezcla de pastas: a su término, se midió la viscosidad de la mezcla utilizando el embudo de Marsh, la cual se obtiene al tomar el tiempo en que tarda en pasar por el embudo un litro de lechada (Fig. 22). Inmediatamente después, se procedió al llenado de los moldes y 48 horas después de haber fraguado la lechada, se sacaron los especímenes de los moldes para después ser almacenados dentro de la cámara de curado hasta la edad de prueba. En algunos casos, fue necesario esperar hasta 72 horas para desmoldar los especímenes, debido al lento fraguado que presentaron. Tal fue el caso de las lechadas que contenían bentonita, la lechada C-Ca-ArS-AH y la C-Ca-AR-AF.

Este procedimiento se realizó en todas las mezclas, pero en el caso del mortero Emaco Resto, la prueba de fluidez se realizó utilizando la mesa de fluidez como lo describe la norma ASTM C 109, pues este no era una lechada (Fig. 23).

Hay que señalar que en algunas mezclas fue necesario adicionar una mayor cantidad de agua pues presentaban una gran viscosidad y por lo tanto muy poca fluidez. Estas cantidades y los resultados de la prueba de fluidez se dan en la tabla 22.

4.4 Análisis de resultados

Lechadas

- C-AF-B

Esta lechada alcanzó una resistencia promedio a la compresión a los 28 días de 189.54 kg/cm². Además, presenta una viscosidad de 60 s, lo que la hace una mezcla fluida. Sin embargo, en el momento en que empezó su fraguado, aparecieron varias grietas ocasionadas por la severa contracción ocurrida por secado. Ocasionando en la mayoría de los casos, con excepción de los cubos de lechada, que los especímenes se fracturaron antes de ser desmoldados, como puede apreciarse en las Figs. 24 y 25. Por ello, no fue posible obtener mayor información acerca de su comportamiento ante los ensayos adicionales previstos.

En el caso de las barras de $2 \times 2 \times 10$ cm, pudo obtenerse una aproximación de la contracción por secado, ya que ésta fue muy notoria y los especímenes salieron del molde con facilidad, presentando contracciones del 6 % y de 4 % en los sentidos longitudinal y transversal respectivamente (Fig. 26). Desde el punto de vista estructural estos valores resultan excesivos por lo que su aplicación debe ser limitada.

Este comportamiento es provocado por la bentonita, que al estar en contacto con el agua tiende a incrementar su tamaño hasta 10 veces, pero que al iniciar su secado tiende a regresar a su tamaño original, provocando el agrietamiento mencionado, esta situación obligó a realizar la mezcla C-AF-B2 con bentonita previamente humedecida, obteniendo resultados no satisfactorios, pues se complicó el mezclado, debido a que la bentonita formó grumos y no se mezcló adecuadamente con los demás materiales, ocasionando que la mezcla no fuera homogénea. A pesar de ello, se prosiguió con la elaboración de los especímenes, los cuales les tomó más de 72 horas para fraguar por completo, durante este periodo se apreciaron problemas severos de contracción y agrietamiento como se muestra en la Fig. 27, además, en la superficie de los especímenes aparecieron poros como lo expone la Fig. 28, por consiguiente, no fue posible obtener ningún espécimen útil.

La bentonita utilizada en esta mezcla carecía de alguna identificación en su empaque, por lo que se tuvo la necesidad de conseguir material que estuviera perfectamente identificado para realizar nuevas lechadas.

- C-AF-BS

En este caso se empleó bentonita sódica, utilizando en principio la dosificación original, pero debido a la escasa fluidez alcanzada, se tuvo que adicionar 4 litros de agua para obtener una menor viscosidad, quedando ésta en 51 segundos. Fraguando hasta las 48 horas, pero con la ventaja de que se pudo obtener todo el lote de especímenes, ya que a pesar de tener una contracción por secado apreciable, los especímenes no se fracturaron (Fig. 29).

La resistencia a la compresión promedio alcanzada a los 28 días fue 104 kg/cm^2 . A pesar de haber obtenido el lote completo de especímenes, en cuanto se trasladaron de la cámara de curado a la cámara seca se empezaron a fracturar después de 24 horas, lo que impidió medir su contracción por medio del comparador de longitudes (Fig. 30).

En el caso de las barras de $2 \times 2 \times 10$ cm, estas no llegaron a romperse pero sí presentaron un alabeo con hasta 4mm de flecha y una contracción longitudinal del 5 % y del 4 % transversalmente.

Las barras sumergidas en sulfato de sodio han presentaron una tendencia de expansión, ya que después de dos semanas dentro de la solución la longitud de los especímenes se incrementó cerca del 0.02 %; y una semana después se presentó la ruptura de todos los especímenes.

La transmisión de vapor de agua promedio de esta lechada es de $23.08 \text{ g} / (\text{h} \cdot \text{cm}^2)$, pero hay que señalar que los especímenes presentaron una serie de pequeñas grietas en toda la superficie, lo cual pudo haber incrementado la evaporación del agua, a pesar de que se trataron de sellar las grietas con silicón; además, sufrieron un pequeño alabeo una vez que fueron sacadas de la cámara de curado; sin embargo, soportaron todo el periodo de prueba.

- C-AF-BC

La bentonita cálcica se proporciono de igual manera que la lechada C-AF-B, y fue necesario agregarle 2 litros de agua para obtener una viscosidad de 56 segundos con el embudo de Marsh. A la edad de 28 días alcanzó una resistencia promedio a la compresión de 131 kg/cm².

No fue posible medir la contracción por secado en las barras almacenadas en la cámara seca, ya que se presentó el mismo comportamiento que en el caso anterior (Fig. 30). Y las barras de 2 x 2 x 10 cm, presentaron una contracción del 5 % y 2 %, en los sentidos longitudinal y transversal respectivamente. Además de tender al alabeo con una flecha de hasta 3 mm.

La expansión longitudinal sufrida de los especímenes sumergidos en la solución de sulfato después de 5 semanas fue de 0.037 % con tendencia a seguirse incrementando. Pero hasta el momento, no se ha llegado a la fractura de los especímenes, aunque ya se aprecian una serie de fisuras.

En cuanto a la permeabilidad, se obtuvo un valor promedio de 16.21 g/(h*m²) y a diferencia de la bentonita sódica, el agrietamiento fue considerablemente menor, por lo que la evaporación a causa de las grietas también fue menor.

- C-AE-AF

Para esta lechada no fue necesario adicionar más agua que la indicada, obteniendo una viscosidad de 122 segundos y una resistencia promedio a la compresión los 28 días de 500 kg/cm². La contracción por secado promedio medida en las barras guardadas en la cámara seca fue de 0.14 % después de 12 semanas. Y en las barras de 2 x 2 x 10 cm a los 28 días, se obtuvo una contracción del 2 % en ambos sentidos (Fig. 31).

En lo que se refiere a su expansión longitudinal promedio, al estar sumergidos dentro de la solución de sulfato después de 6 semanas, fue del 0.011%, sin que hasta el momento se presenten cambios apreciables en el espécimen.

La transmisión de vapor de agua promedio resultó de 4.35 g/(h*m²) siendo uno de los valores más pequeños obtenidos en las mezclas estudiadas.

- C-Ca-AH

Esta lechada no presentó problema alguno en su elaboración, la viscosidad alcanzada fue de 43 s, y su resistencia a la compresión a los 28 días fue de 202 kg/cm². La contracción por secado presentada a los treinta días en las barras de 2 x 2 x 10 cm fue de 1 % y 4 %, en sus direcciones longitudinal y transversal respectivamente. En lo que se refiere a las barras que permanecieron en la cámara seca, la contracción por secado promedio a la edad de 12 semanas fue de 0.01 %.

La expansión promedio debida a la exposición de sulfatos fue de 0.012 % después de 6 semanas. Y hasta este momento no ha presentado cambios significativos en su estructura.

La transmisión de vapor de agua promedio obtenida fue de 9.80 g/(h*m²).

- C-Ca

Alcanzó una viscosidad de 47 s, con una resistencia a la compresión a los 28 días de 204 kg/cm², presentando una contracción por secado a los 28 días en las barras de 2 x 2 x 10 cm de 1 % y 4 % en los sentidos longitudinal y transversal respectivamente. En cuanto a las barras almacenadas dentro de la cámara seca, se presentó una contracción del 0.12 % después de 12 semanas.

La expansión sufrida dentro de la solución de sulfato fue de 0.012 % después de estar sumergidas 6 semanas. Los especímenes no presentaron cambios importantes en su superficie.

La transmisión de vapor de agua promedio a través de las losas de lechada fue de 8.203 g/(h*m²).

- C-Ca-ArS-AH

La viscosidad obtenida con la proporción original de agua fue de 36 s, por lo cual no fue necesario adicionarle agua, obteniendo una resistencia a la compresión a los 28 días de 43 kg/cm² (Fig. 32) y una contracción por secado del 0 % a la edad de 28 días, en las barras de 2 x 2 x 10 cm, ya que no se apreció un cambio importante en sus dimensiones que pudiera medirse, sin embargo, en las barras almacenadas dentro de la cámara seca se obtuvo una contracción del 0.042 %. Lo cual verifica que fue mínima la contracción presentada.

En el caso de la expansión debida a la solución de sulfato, esta fue notable pues en una barra llegó a 0.22%, presentando severos agrietamientos en uno de los extremos donde se encuentran ahogados los índices de tornillo, probablemente ocasionados por la oxidación de los mismos, aunque en el otro espécimen la expansión longitudinal fue de 0.069 %, con tendencia a seguirse incrementando. Lo cual la pone en desventaja con los demás casos.

La transmisión de vapor de agua promedio que presentó fue de 15.947 g/(h*m²).

- C-Ca-Ar-AF

Esta lechada es la que generalmente se utiliza en obras de consolidación de muros de mampostería en México, utilizando la dosificación original se obtuvo una mezcla demasiado viscosa que no pasaba por el embudo de Marsh, por lo cual fue necesario incrementar la cantidad de agua, y se adicionaron 3.5 litros, que es más del doble de la cantidad propuesta y así se obtuvo una viscosidad de 165 s con una resistencia a la compresión a los 28 días de 23 kg/cm².

La contracción por secado presentada en las barras de 2 x 2 x 10 cm a los 28 días fue de 2 % y 4 en sus dimensiones longitudinal y transversal respectivamente (Fig. 33). En este caso, no fue posible medir la contracción por secado dentro de la cámara seca, a causa de que los especímenes elaborados para dicha prueba se fracturaron durante el proceso de fraguado, por lo cual tampoco pudo realizarse la prueba de sulfatos (Fig. 34).

Morteros

- ER-Ar

Este es un mortero premezclado diseñado especialmente para utilizarse en reparaciones de monumentos históricos. Su resistencia promedio a la compresión a los 28 días es de 60.78 kg/cm². Muy similar a la resistencia señalada por el fabricante.

En las barras 2 x 2 x 10 cm, no se observó contracción por secado alguna. Pero en las barras almacenadas dentro de la cámara seca (Fig. 35), se obtuvo una contracción promedio de 0.064 % en doce semanas. La expansión ocasionada por la exposición a la solución de sulfato fue de 0.027 %. Referente a la transmisión de vapor de agua, esta fue de 15.852 g/(h*m²).

Tratamientos

- Can-Strat. y Can-Ctrat.

Con el fin de evaluar la efectividad de un tratamiento hidrófugo protector que permita la transpiración de la mampostería y a su vez la hace impermeable al agua líquida, se realizó la prueba de transmisión de vapor de agua en dos losas de cantera: Can-Strat y Can-Ctrat, de las cuales solo a Can-Ctrat se le aplicó el tratamiento Sikaguard 70, obteniendo que la transmisión de vapor de agua fue de 3.75 g/(h*m²) en la cantera tratada y de 7.26 g/(h*m²) en la que no se aplicó tratamiento alguno (Fig. 36). Lo que indica que este tratamiento reduce casi en un 50 % la permeabilidad original de la piedra y para medir la impermeabilidad al agua líquida del producto, fue invertida la posición del sistema losa-charola de modo que el agua contenida en el interior de la charola escurriera a través de la piedra, y se comprobó que el tratamiento reduce notoriamente el paso del agua líquida, pues en un periodo de 170 horas la cantera con tratamiento solo perdió 25 g, en cambio la cantera sin tratamiento permitió el paso de 154 g, ocasionando un escurrimiento notorio de agua en la piedra, efecto que no se apreció en el espécimen con tratamiento.

4.5 Resumen de resultados

Resistencia a la compresión

De acuerdo a la norma ASTM C 109, la resistencia a la compresión se obtuvo mediante el ensaye de especímenes cúbicos sometidos a carga axial (Fig. 37); sin embargo, los periodos de ensaye se modificaron debido al lento fraguado de las lechadas, además de que se agregaron más periodos para revisar la evolución de su resistencia, quedando a 14, 28, 56 y 112 días. Estos resultados se muestran en la Fig. 38 y en la Fig. 39, aparece un espécimen después de la falla.

Contracción por secado

Esta fue medida utilizando dos métodos. El primero consistió en medir la contracción que sufrían las barras pequeñas de 2.1 x 2.1 x 10 cm tanto en su sección transversal como longitudinal utilizando un vernier. Pero, debido a que los moldes presentaban cierta deformación en sus paredes, y a que la contracción sufrida en las muestras fue pequeña, no fue posible descimbrar algunas de las barras, por lo cual resulto difícil obtener datos precisos de sus dimensiones y se obtuvo de manera aproximada, aunque reflejan cualitativamente el comportamiento de las mezclas. En otros casos, la contracción fue tan severa, que no hubo problema alguno para su medición.

La contracción se midió a una edad de 28 días. En la tabla 23 se presentan los resultados obtenidos.

El segundo método empleado es el más preciso, ya que se realizó de acuerdo a la práctica de la ASTM C- 490 para medir cambios longitudinales de barras de mortero endurecido. Y consiste en medir el cambio de longitud de barras como se describe en la norma ASTM C 1012 (Fig. 40). Estos especímenes fueron colocados dentro de una cámara seca a una temperatura promedio de 25 °C y el cambio en sus dimensiones longitudinales fue medido semanalmente con el comparador de longitudes. Los resultados obtenidos para cada espécimen se muestran en la tabla 24 y Fig. 41, en cuanto a valores promedio en la tabla 25 y Fig. 42 se resumen los resultados obtenidos.

Transmisión de vapor de agua

La evaluación de la transmisión de vapor de agua (WVT), se realizó de acuerdo con la norma ASTM E 96, utilizando el método del agua. Para esto, dentro de unas palanganas de aluminio se colocaron 2 litros de agua destilada y sobre ellas se colocaron las losas de lechada que se sellaron a la misma por medio de silicón (Fig. 43). Una vez sellados, se pesaron y se colocaron dentro de un horno con una temperatura constante de 30° C. en donde la humedad relativa se mantuvo alrededor del 40 %, esto se logró colocando en el interior del horno un recipiente con agua (Fig. 44). La presión de vapor de saturación a la temperatura de la prueba fue de 4241 Pa. Para cada lechada se prepararon tres arreglos, obteniendo los resultados que se muestran en la Fig.45 en función de la WVT, en la Fig. 46, en función de la presión de vapor de saturación y en la Fig. 47 en función del espesor de las losas.

Cambio de longitud de morteros expuestos a una solución de sulfato de sodio

En este ensaye se procuró tener 3 especímenes tipo barra para cada lechada, sin embargo, en algunos casos esto no se logro debido a que algunos se fracturaron al desmoldarlos o, por la severa contracción por secado sufrida.

La prueba se realizó conforme a la norma ASTM C 1012. Los resultados obtenidos se muestran en las tablas 26 y 27. Y de forma gráfica en las Figs. 48 y 49.

4.6 Descripción de aditivos, morteros y tratamientos empleados en la elaboración de las lechadas.

Pozzolith® 322-N

De acuerdo con el fabricante (Ref. 37), se trata de un aditivo plastificante líquido, que excede las especificaciones para Tipo A de la ASTM C-494, AASHTO M-194 y CRD C-87, además reduce la cantidad de agua para obtener la consistencia y resistencia requeridas.

- Descripción

En el concreto plástico.- Aumenta la trabajabilidad aún usando menos agua, reduce la segregación y sangrado, mejora el bombeo y lanzado de concreto

En el concreto endurecido.- Aumenta las resistencias a la compresión y a la flexión, así como la adherencia al acero de refuerzo; reduce la permeabilidad y el agrietamiento; aumenta la resistencia del concreto con aire incluido sujeto a ciclos de congelamiento-deshielo y a los efectos de descamación por sales deshielantes.

No contribuye a la corrosión del acero. Además, es compatible con todos los inclusores de aire que satisfagan los requerimientos de la ASTM, AASHTO y CRD. Cuando se usa con otro aditivo, cada uno debe dosificarse por separado dentro de la mezcladora. Intencionalmente, este producto no contiene cloruro de calcio o ingredientes basados en cloruros, debido a que los ingredientes utilizados en su producción, favorecen a su formación, por lo cual, el aditivo contribuye en un porcentaje menor a 0.00024% de iones de cloruro por peso de cemento cuando se usa una dosis de 65 ml/100 kg de cemento.

- Dosificación

Se recomienda en un rango de 195 a 455 ml por cada 100 kg de cemento. Sin embargo, las variaciones en los ingredientes de la mezcla y las condiciones de la obra, pueden requerir dosificaciones diferentes. Por lo que se aconseja consultar al fabricante para determinar la dosificación adecuada. Debe agregarse simultáneamente con el agua de mezcla. Nunca se añade directamente al cemento o a los agregados secos.

Sikaguard® 70

Es un producto líquido, repelente al agua e incoloro, que se aplica sobre superficies absorbentes. Al introducirse en los poros del soporte, actúa como repelente de larga durabilidad al agua de lluvia, permitiendo al mismo tiempo la difusión del vapor de agua a través de dicho soporte. Se emplea en concreto, morteros, teja, fibrocemento, mampostería de ladrillo o piedra y es aplicado directamente con rodillo, pistola, o preferiblemente con brocha para asegurar una mejor impregnación.

- Durabilidad

Este es un producto a base de siloxanos; que aplicado según las indicaciones del fabricante, tiene una durabilidad media de al menos 10 años, en el caso de no existir anomalías provocadas por vicios ocultos en el soporte, alteraciones meteorológicas anormales, y asegurando que no debe sufrir ningún tipo de ataque físico o químico.

- Consumos

0.3 – 0.5 kg/m² (0.375 l/m² - 0.625 l/m²) dependiendo de la porosidad del soporte y del número de capas. Para conseguir la durabilidad media indicada anteriormente, deberán aplicarse 2 capas de material.

Para mayor consulte la Ref. 36.

Sika[®]-1

Aditivo impermeabilizante líquido de fraguado normal para mortero y concreto, exento de cloruros.

- Descripción

Es una dispersión viscosa de color amarillo que no contiene cloruros y que reacciona con el cemento durante el proceso de hidratación dando origen a sustancias minerales que obturan la red capilar, proporcionando de esta manera elevada impermeabilidad al mortero o concreto. Se emplea como aditivo impermeabilizante de mortero para revestimientos de: piscinas, canales, pozos, alcantarillas, fachadas, paredes, sótanos, etc.

En concreto como impermeabilizante en: obras subterráneas, túneles y galerías, cimentaciones, muros de contención, piscinas, canales, etc.

- Dosificación y consumos

- Mortero: Dilución SIKA-1: agua = 1:10.
- Consumo: Aprox. 0.250 kg/m² /cm espesor.
- Concreto: Dilución SIKA-1: agua = 1: 14.
- Consumo: Aprox. 3 % del peso de cemento.

- Modo de empleo

El mortero estará compuesto por 1 volumen de cemento y 3 como máximo de arena de río lavada y sin mezcla, con un tamaño máximo recomendable de 2.5 a 3 mm.

Para mayor información consulte la Ref. 36.

Emaco[®] Resto L

Mortero hidráulico inorgánico para la restauración de edificios históricos

- Descripción

Este es un producto hidráulico basado en materiales inorgánicos con fibras de poliacrilonitrilo, recomendadas para los yesos y morteros de restauración de edificios históricos.

- Dosificación

- Para morteros ásperos se mezcla 1 parte de Emaco Resto L por 3 partes de arena en peso.
- Para morteros finos: 1 parte de Emaco Resto L con 2 partes de arena fina.

En ambos casos la cantidad de agua es la necesaria para obtener un mortero plástico. Para más información, consulte la Ref. 37.

Flowcable

Este es un aditivo libre de cloruros en forma de polvo, para producir lechadas que cubran cables pos-tensados dentro de elementos de concreto.

- Descripción

Se agrega a razón de aproximadamente 6% por peso de cemento para producir una lechada bombeable. No tiene problemas de contracción ni segrega; protege los cables contra la corrosión; ofrece una alta adherencia al acero, además, tiene propiedades expansivas.

- Rendimiento

Aproximadamente se obtienen 68 litros de lechada, mezclando 100 kg de cemento, 6 kg de Flowcable y 34 litros de agua.

- Mezclado

Se introducen aproximadamente 25 litros de agua por 100 Kg. de cemento en el mezclador, después se enciende y se agrega el producto (6% del peso de cemento) luego el cemento. Este proceso dura 3 minutos hasta obtener una mezcla homogénea. Posteriormente se agrega alrededor de 7 litros de agua y se vuelve a mezclar durante 2 minutos hasta que la lechada sea fluida y en el cono de Marsh se obtenga una fluidez de aproximadamente 20 segundos.

El agua de mezclado necesaria por peso de cemento y Flowcable es cerca de 34% pero puede reducirse de un mínimo de 30% a un máximo de 38% que depende del cemento usado.

Para mayor información consulte la Ref. 37.

5. METODOLOGÍA PARA CONSOLIDAR GRIETAS

5.1. Inyección de lechada

La forma más común y efectiva de consolidar elementos estructurales de mampostería, es a través de la inyección de lechada. La cual se aplica por tres medios distintos de acuerdo a *Weaver 1977*:

- gravedad
- presión, o
- vacío

Independientemente del medio elegido, antes de iniciar las tareas de inyección, se realiza una limpieza del elemento estructural con cualquiera de los métodos anteriormente mencionados para hacer más efectiva la inyección.

Después de eliminar todos los agentes nocivos como: basura, vegetación, animales, etc. se elimina todo el material suelto o débil que se encuentra en los bordes de la grieta o fisura que corran el riesgo de desprenderse, de modo que solo quede material sano en su contorno para asegurar una mejor adherencia de la lechada con el resto de la mampostería. Por último, se limpia la grieta con aire a presión para eliminar todo el polvo que haya quedado. En el caso de que se trate de mamposterías de adobe esto no se realiza.

Una vez efectuadas estas preparaciones preliminares a la inyección, se procede según el método elegido.

5.2. Métodos de inyección

Inyección por gravedad

Primero se realizan barrenos a lo largo de la grieta a cada 30 o 50 cm, como lo describe *Tomazevic, 1993* si la trayectoria de la grieta es vertical o a cada 100 cm, si la trayectoria es horizontal. Tendrán una profundidad aproximadamente igual a la mitad del espesor del muro con un diámetro suficiente para poder insertar en ellos una manguera de plástico o metálica de $\frac{1}{2}$ in (12.7 mm) que se unirá a la mampostería por medio de mortero y que sobresaldrá del paño del muro unos 20 cm (Fig. 50), según *González Avellaneda, 1988*

Posteriormente se sella la grieta con mortero para evitar fugas de lechada. Y se inyecta agua por las boquillas (mangueras) para lavar y humedecer perfectamente la grieta y proceder a la inyección.

Esta se realiza por medio de una licuadora de aspas, colocada a una altura de cuando menos 200 cm de altura o más, cuidando que la presión de inyección no exceda los 4 kg/cm^2 , aunque se recomienda que sea de 2 kg/cm^2 .

La inyección inicia en la boquilla más baja hasta la saturación de la grieta. después se repite el mismo procedimiento con la inmediata superior. hasta terminar con todas. Una vez que haya fraguado la lechada. las boquillas se cortan al ras de la mampostería.

Cuando se trata de adobe. no se utiliza aire a presión ni agua para lavar la grieta, sólo se humedecen cuidadosamente las superficies de contacto y en su interior se colocan varitas de madera a manera de pasadores y se llenan en forma superficial con lechuguilla, ixtle o algo similar. revueltos con mortero bastardo. dependiendo de la técnica empleada.

Inyección a presión

Este método es muy similar al anterior. solo que la presión en lugar de obtenerla de la gravedad. se obtiene de una bomba que puede ser manual o eléctrica. pero de baja presión. Las bombas manuales se utilizan cuando las mamposterías son muy inestables y delicadas. Las eléctricas son de diafragma y necesitan de un mezclador y de mangueras con válvulas de control.

Se tiene el mismo sistema de boquillas utilizado en el método anterior. Y se procede a inyectar la lechada por la boquilla más baja hasta saturarla. Repitiendo la misma operación con las boquillas restantes. La presión recomendada es de 9.98 a 15 kg/cm², según *Weaver 1977*.

Inyección por vacío

En este método se colocan boquillas como en los casos anteriores. La mampostería que será inyectada es aislada por medio de una hoja de polietileno transparente. El aire que queda dentro de la zona aislada es evacuado por medio de una bomba potente de vacío. lo que ocasiona que la lechada sea succionada por el muro al abrir la válvula que permite su flujo. Los resultados son observados a través del plástico y cuando la inyección es completada comienza a escurrir la lechada en los agujeros superiores. Entonces se encorchan las boquillas.

Inyección de resinas

Las resinas comerciales cuando vienen en presentación de cartuchos. se inyectan por medio de una pistola de calafateo, utilizando un sistema de boquillas similar a los anteriores.

5.3 Equipos

Mezcladoras

En la mayoría de las obras de consolidación de mamposterías es común encontrar mezcladoras elaboradas con materiales convencionales de la misma obra, ya que son fáciles de construir, pues sólo se necesita un recipiente cilíndrico del tamaño que más convenga.

generalmente se emplean recipientes de 200 l. una barra de acero que bien puede ser alguna flecha de algún vehículo, un balero de igual diámetro que la barra y unas aspas rígidas que puede ser de lámina gruesa y en ciertos casos reforzados con soleras. En algunas obras llega a emplearse una propela de lancha de diámetro menor que el recipiente. En la Fig. 51 se muestra un esquema sencillo de una licuadora de aspas convencional.

Sin embargo, en el mercado se encuentran equipos especialmente diseñados para este fin, aunque con un alto costo, pero con un mayor control en el proceso de mezclado. En la Fig. 52 podemos ver una mezcladora de remo motorizada para todo tipo de lechadas.

Además en el caso de productos orgánicos como las resinas, existen mezcladores especiales equipados con un cronómetro que permite realizar ciclos de mezclado. Un equipo típico aparece en la Fig. 53.

Bombas

Existen bombas manuales o automáticas, las primeras ofrecen un rendimiento de hasta 22 l / minuto con una presión que puede alcanzar 14.27 kg/cm^2 (Fig. 54).

Las automáticas pueden ser de varios tipos como las centrífugas o las de pistón. En las Figs. 55, 56, 57 y 58 se muestran algunos ejemplos.

COMENTARIOS FINALES Y CONCLUSIONES

Con base a los resultados obtenidos en este estudio, se puede concluir que la lechada C-AE-AF no presentó problemas en su elaboración y fue posible la obtención de todos los especímenes, por lo cual no hubo problema alguno para la realización de todas las pruebas. Es una mezcla con una viscosidad de 122 s que alcanzó una resistencia a la compresión de 500 kg/cm². La contracción por secado medida fue del 0.12 % y su expansión ante el ataque de sulfatos fue mínima. En lo que se refiere a la permeabilidad al vapor de agua, esta fue la más baja de todas las mezclas, 4.35 g/(h*m²). En términos generales, se puede decir que C-AE-AF es un consolidante de alta resistencia que supera ampliamente la resistencia a compresión de cualquier mampostería, lo cual permite asegurar la continuidad del elemento estructural, especialmente, donde esto sea prioritario, aunque debe tenerse presente que debido a su alta impermeabilidad, en ciertas condiciones, sobre todo de humedad, puedan llegarse a presentar problemas de eflorescencias, por lo que dependiendo de cada caso particular pueda ser necesario buscar medidas complementarias que mitiguen este posible problema. La viscosidad de esta lechada es elevada, no obstante, se ha comprobado in situ que esto no afecta la penetrabilidad al interior de la mampostería. Sin embargo, debido a que esta mezcla contiene aditivos y cantidades importantes de cemento, elevan notoriamente su costo, por lo cual su empleo se recomienda en casos justificados desde el punto de vista estructural.

Las lechadas de bentonita a pesar de presentar una viscosidad baja, entre 26 a 56 s que asegura una mejor penetrabilidad, presentaron severos problemas de contracción por secado, lo cual produjo la fractura o el fisuramiento de la mayor parte de los especímenes. Esto hace suponer que el alto valor de permeabilidad presentado se deba a las fisuras. El ensaye de sulfatos, sólo pudo realizarse en la lechada con bentonita cálcica, y hasta el momento ha presentado una expansión de 0.038%, que resulta excesiva de acuerdo con la norma C 1012, además, que los especímenes presentaron un severo alabeo y agrietamiento. En las demás lechadas a base de bentonitas no pudo realizarse esta prueba por la falla temprana de los especímenes. Estos permanecieron en buenas condiciones mientras se mantuvieron húmedos, en cuanto comenzó el proceso de secado también inició el agrietamiento. Por consiguiente, esta lechada puede considerarse útil en lugares húmedos, ya que además tiene una resistencia a la compresión que va de los 100 a los 180 kg/cm².

En cuanto a las lechadas estudiadas en Eslovenia, éstas no pudieron elaborarse tal como se realizaron en aquella ciudad, pues no fue posible conseguir puzolana, así que esta fue sustituida por cal. De este modo se elaboraron las lechadas C-Ca-AH, C-Ca y C-Ca-ArS-AH. La única diferencia entre las dos primeras es que solo C-Ca-AH contaba con un aditivo hidrófugo, esto con el fin de analizar los efectos que este induce. En cuanto a los valores de resistencia a la compresión y viscosidad no se presentaron diferencias importantes, pues estas fueron de 200 kg/cm² y de 43 a 47 s, respectivamente. La contracción por secado oscila entre el 0.1 y 0.13 % y su expansibilidad ante el ataque de sulfatos fue de 0.01 % valor que esta dentro de la norma. Respecto a la influencia del aditivo hidrófugo, se esperaba una mayor permeabilidad de la mezcla con dicho aditivo que de la que no lo contenía, pero no fue así, ya que C-Ca-AH tuvo una WVT de 9.81 g/(h*m²) y C-Ca de 8.2 g/(h*m²), es decir, que en el mejor de los casos la permeabilidad sólo fue 20% mayor cuando se usó aditivo hidrófugo, siendo mínima la diferencia, por lo cual es irrelevante utilizar este aditivo. En términos generales se puede decir que estas lechadas ofrecen una resistencia importante que puede

asegurar la continuidad del elemento consolidado, además brindan mayor permeabilidad y menor viscosidad que C-AE-AF.

C-Ca-ArS-AH, es una lechada con una menor cantidad de cemento que presentó una resistencia a la compresión de 40 kg/cm², su viscosidad de 36 s la hace una mezcla con alta penetrabilidad, y la contracción por secado resultó ser la menor de todas las mezclas (0.04 %), su permeabilidad fue una de las más altas 15.95 g/(h*m²), considerando que no presentó fisuramiento alguno como sucedió con las lechadas de bentonita. Sin embargo, tiene el inconveniente de ser muy sensible al ataque de sulfatos, pues en los ensayos surgieron severos agrietamientos además, de una excesiva expansión de las barras. Pero esto no impide su uso en obras de consolidación, ya que si no existe el problema de sulfatos en la mampostería, esta lechada ofrece un excelente comportamiento mecánico para consolidar mamposterías de calidad pobre y sometida a solicitaciones moderadas.

La lechada C-Ca-Ar-AF, que es la mezcla típica utilizada en la consolidación de mamposterías en México, presentó problemas en su elaboración, pues se obtuvo una mezcla demasiado espesa, que incluso no llegaba a pasar por el embudo de Marsh, lo que llevó a adicionarle hasta un 100 % más de agua para obtener una mezcla trabajable; con esta cantidad adicional de agua su viscosidad que llegó a ser de 165 s, valor que todavía resulta ser demasiado alto y que por consiguiente, pone en duda la capacidad de penetración de la misma, así como su efectividad. En cuanto a su resistencia a la compresión, esta fue muy baja comparada con las mezclas anteriores alcanzando en el mejor de los casos valores de hasta 37 kg/cm², además presentó una contracción por secado tan severa, que ocasionó el agrietamiento tanto de las barras, como de las losas para la prueba de permeabilidad. A pesar de ello, la prueba de permeabilidad se realizó uniéndose los especímenes con un sellador de silicón, obteniendo una WVT de 22 en g/(h*m²), lo que verifica que las mezclas con alto contenido de cal son más hidrófugas que las que contienen cemento.

Al analizar las propiedades del mortero premezclado ER-Ar especialmente diseñado para la rehabilitación de monumentos históricos, se comprobó que la resistencia a la compresión es semejante a la indicada en su ficha técnica, a su vez, la contracción por secado fue de 0.06 % que a simple vista no es apreciable y no ocasiona agrietamientos como en los morteros convencionales. En cuanto a la permeabilidad, este producto ofrece una WVT de 15.85 g/(h*m²), valor similar al de la lechada anterior, que aunque este sea un mortero y no una lechada, muestra que su permeabilidad es equivalente a la presentada en un mortero de cal. De este modo queda demostrada la eficacia del mortero, aunque tiene el inconveniente de ser un producto de importación, lo cual eleva su costo.

Quedó comprobado que los tratamientos hidrófugos son eficaces en la protección superficial de las mamposterías, ya que reducen de manera importante el paso del agua en estado líquido al interior de la mampostería, aunque disminuyen su permeabilidad al vapor de agua en casi un 50%, pero permite la transpiración de la mampostería, lo cual resulta benéfico para el inmueble.

Después de presentar las distintas lechadas estudiadas quedan las interrogantes ¿De todas estas, cuál es la más efectiva? ¿Cuál recomiendan? A pesar de los resultados obtenidos, la elección del consolidante depende de las condiciones existentes en el monumento, no se puede decidir el uso de una u otra sin realizar los estudios previos que indiquen los factores que han ocasionado el deterioro de la mampostería, pues el elegir una lechada sin conocimiento de su comportamiento ante estos factores, puede traer efectos secundarios no deseados; sin embargo, lo que sí se puede señalar es: que las lechadas de resistencias

superiores a los 100 kg/cm^2 pueden asegurar una mejor continuidad de la mampostería, trayendo como consecuencia un incremento en la resistencia del monumento: las lechadas de resistencias inferiores, suelen ser útiles en casos donde sólo se requiera el relleno de las grietas sin pretender un incremento importante en la resistencia de elementos que se intervengan. En la práctica se ha encontrado que el uso de lechadas de baja resistencia se emplea equivocadamente con fines estructurales, pues estas lechadas no mejoran la estabilidad estructural de una mampostería, solo rellenan. Por ello, es necesario recalcar que cuando se requiera incrementar la capacidad de carga de un monumento, se utilicen lechadas de alta resistencia aunque superen la resistencia de la mampostería original. Esto suena contradictorio a los criterios de rehabilitación que se siguen en nuestro país, pero es la manera más adecuada de reforzar un edificio antiguo, aunque sin olvidar, buscar medidas que mitiguen los efectos secundarios que estas generalmente producen como las eflorescencias debido a su alta impermeabilidad.

En cuanto a los equipos empleados para la inyección de lechada, se pudo conocer la amplia variedad de los mismos, pero se considera que la mezcladora tradicional compuesta de una manivela, unas aspas y un tambo, suele ser de gran utilidad, aunque es preferible contar con un medio motorizado para obtener una mezcla uniforme y constante. Además, se pudo constatar que en la práctica la elaboración en obra de lechada es un proceso ineficiente, pues no se acostumbra limpiar la mezcladora después de realizar una bachada, lo que ocasiona que debido a los residuos de bachadas anteriores se incremente la viscosidad reduciendo así la capacidad de penetración. Por otra parte, una vez que esta iniciada la mezcla de la lechada, ésta no es inyectada en el momento, debido a fallas en el sistema de inyección lo que ocasiona que el fraguado inicie en la mezcladora y no en el interior de la mampostería.

Este trabajo trató de abarcar de manera general el amplio campo de la consolidación estructural, queda claro que hubo temas en los que faltó una mayor investigación, como es el caso de la durabilidad de las lechadas, que debido a los conocimientos de química que exige quedaron fuera del alcance de éste, por lo cual la investigación queda abierta para quienes deseen contribuir en este tema. A pesar de ello, la información obtenida resultó ser de gran utilidad sobre todo porque sirve de referencia cuando se pretenda realizar un proyecto de intervención.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Gárate Rojas, Ignacio. *Artes de la Cal*. I.C.R.B.C. Madrid.1994.
2. López Albiñana, Ricardo. *Materiales de Construcción*. Universidad Politécnica de Valencia.1996.
3. García de Miguel José María, García Gerónimo y otros. *Tratamiento y Conservación de la Piedra en los Monumentos*. C.O.A.T.A.A.M.1994.
4. Saad, Antonio Miguel. *Tratado de Construcción*. CECSA.1975.
5. Tomazevic, Miha. *The Strengthening of Stone-Masonry Walls by Injecting the Masonry-Friendly Grouts*. European Earthquake Engineering, No.1, 1993.
6. Bouineau, Alain. *Le Renforcement des Maçonneries Anciennes a L'aide de Coulis D'injection*. I.C.O.M.O.S. Francia, 1986.
7. Mingarro Martín, Francisco. *Degradación y Conservación del Patrimonio Arquitectónico*. Ed. Complutensc. España, 1996.
8. Weaver, Martin E. *Conserving Buildings. A Manual Of Techniques and Materials*. Ed. John Wiley & Sons, Inc, 1977.U.S.A.
9. Secretaría de Desarrollo Urbano y Ecología. *Especificaciones Generales de Restauración*. SEDUE, 2ª Edición, 1984. México.
10. González Avellaneda, Albert. *Manual Técnico de Procedimientos para la Rehabilitación de Monumentos Históricos en el Distrito Federal*. Departamento del Distrito Federal, INAH, 1988.
11. Calderón Cabrera José Luis. *Reestructuración y Consolidación de Monumentos*. Tesis UNAM.
12. T. Stambolov, J. R.J. Van Asperen de Boer; Tr. de Luis Torres M. *El Deterioro y la Conservación de Materiales Porosos de Construcción en Monumentos: Una Revisión Bibliográfica*. UNAM, México 1984.
13. Stulz, Roland; Mukerji, Kiran. Tr. Reiser, J.; Domínguez, C. *Materiales de construcción apropiados. Catálogo de Soluciones Potenciales Revisado Edición Ampliada*. SKAT & IT Publications, Switzerland 1993.
14. Esbert, Rosa María. *Manual de diagnosis y Tratamiento de Materiales Pétreos*. Col·legi d'Aparelladors i Arquitectes Tècnics de Barcelona, España 1997.
15. Lal Gauri, K. *Carbonate Stone. Chemical Behaviour, Durability, and Conservation*. John Wiley & Sons, Inc. Unites States of America 1999.
16. Prado Núñez, Ricarao. *Procedimientos De Restauración y Materiales. Protección y Conservación de Edificios Artísticos e Históricos*. Ed. Trillas, México 2000.

17. Moriconi, G. *Mortar Deterioration of the Masonry Walls in Historic Buildings. A Case History: Vantivelli's Mole in Ancona*. Revista Materials and Structures, Vol. 27. No. 171. 1994.
18. Sarkar L. Shondeep. *Investigation of Mortar and Stone Deterioration in the Victoria Memorial, Calcutta*. Revista Materials and Structures, Vol. 27. No. 171. 1994.
19. Ruth, W. *Masonry Repair by Grout Injection*. Magazine of Masonry Construction. Vol. 9, No. 9, 1996.
20. Saval, José Miguel. *Materiales de Construcción. Tomo I y II*. Ed. Club Universitaria
21. Norma Mexicana NMX-C-005-1996-ONNCCE "Industria de la Construcción - Cal Hidráulica - Especificaciones y Métodos de Prueba"
22. Norma Mexicana NMX-C-061-ONNCCE-2001 "Industria de la Construcción - Cemento - Determinación de la Resistencia a la Compresión de Cementantes Hidráulicos"
23. Norma Mexicana NMX-C-185-ONNCCE-2001 "Industria de la Construcción - Cemento - Determinación de la Expansión de Barras de Mortero de Cemento Sumergidas en Agua"
24. IMCYC, "Aditivos para Concreto", México, 1983.
25. Norma Mexicana NMX-C-418-ONNCCE-2001 "Industria de la Construcción - Cemento - Cambio de Longitud de Morteros con Cemento Hidráulico Expuesto a una Solución de Sulfato de Sodio"
26. ASTM, "Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50 mm] Cube Specimens)", ASTM C 109/C 109M-95.
27. ASTM, "Standard Specification for Flow Table for Use in Test of Hydraulic Cement". ASTM C 230-90.
28. ASTM, "Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency". ASTM C 305-94.
29. ASTM, "Standard Practice for Use of Apparatus for the Determination of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar, and Concrete". ASTM C 490-96.
30. ASTM, "Standard Test Method for Length Change of Hydraulic - Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution". ASTM C 1012-95a.
31. ASTM, "Standard Test Methods for Water Vapor Transmission of Materials". ASTM E 96-95.
32. Mataix, Claudio. "Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas", Ed. Harla, Segunda Edición, México 2001.
33. Sickels, L.B. "Organic additives in mortars" in B.A.R., vol. 1981, pág. 15.
34. Clark, George L. "Enciclopedia de Química". Ed. Omega, Barcelona, 1961.

35. Hawley, Gessner G. *“Diccionario de Química y Productos Químicos”*. Ed. Omega. Barcelona, 1975.
36. http://www.sika.com.ar/fset_productos.html
37. <http://www.mbtmexico.com.mx/>
38. <http://www.groutation.co.uk/grout-pumps.html>
39. <http://www.kenrichproducts.com/Mixer-spc.html>
40. <http://www.drotec.com.ar>
41. <http://www.concretelifting.com/carryon.html>
42. <http://www.chemgrout.com/030a.html>
43. ASTM, *“Standard Specification for Aggregates for Masonry Grout”*, ASTM C 404-97.
44. Norma Mexicana NMX-C-414-ONNCCE-1999 *“Industria de la Construcción- Cementos Hidráulicos- Especificaciones y Métodos de Prueba”*

TABLAS

Tabla 1. Clasificación de arenas según Feret (Ref. 4).

Tipos	Tamaño
Arenas gruesas	Pasan por el tamiz de 5mm y son retenidas por otro de 2 mm
Arenas medianas	Pasan por el tamiz de 2mm y son retenidas por el de 0.5 mm
Arenas finas	Pasan por el tamiz de 0.5 mm y son retenidas por el de 0.02 mm

Tabla 2. Tamaño de agregados para lechada (ASTM C-404)

TAMAÑO DEL TAMIZ	CANTIDAD DE FINOS, % EN PESO				
	Agregados finos			Agregados gruesos	
	Tamaño No. 1	Tamaño No. 2		Tamaño No. 8	Tamaño No. 89
		Natural	Artificial		
12.5 mm (1/2 in)	---	---	---	100	100
9.5 mm (3/8 in)	100	---	---	85 a 100	90 a 100
4.75 mm (No.4)	95 a 100	100	100	10 a 30	20 a 55
2.36 mm (No.8)	80 a 100	95 a 100	95 a 100	0 a 10	5 a 30
1.18 mm (No.16)	50 a 85	70 a 100	70 a 100	0 a 5	0 a 10
600µm (No.30)	25 a 60	40 a 75	40 a 75	---	0 a 5
300µm (No.50)	10 a 30	10 a 35	20 a 40	---	---
150µm (No.100)	2 a 10	0 a 15	10 a 25	---	---
75µm (No.200)	0 a 5	0 a 5	0 a 10	---	---

Tabla 3. Porcentaje de sustancias nocivas en arenas (ASTM C-404)

Sustancias nocivas	Contenido máximo permisible % Peso
Partículas friables	1.0
Partículas ligeras, flotando en líquido que tengan una gravedad específica de 2.0	0.5

Tabla 4. Consolidantes orgánicos utilizados en Europa (Ref. 3).

Fabricante	Naturaleza química	Producto
Ciba	Resina epóxica	Araldyl AY 103
Eurostac	Resina epóxica cicloalifática	EP 2101/K210
Rhom & Hass	Resina acrílica	Paraloid o Acryloid B372
Albus	Resina acrílica	Alhuperl Z4B
Wacker Chemie	Silicato de etilo	Wacker OH
Goldschmidt	Silicato de etilo	Tegovakon V
Rhone-Poulenc	Metil-fenil polisiloxano Silicatos de etilo Silicatos de etilo modificados	Rhódorsil 11309 RC70* RC80***, RC90
Dow Corning	Metil-trimetoxi-silano Fenil-trimetoxi-silano	Z-6070 Z-6124

* Actualmente sustituido por el Rhoximat ID RC-70

** Actualmente sustituido por el Rhoximat HD RC-80

Tabla 5. Consolidantes orgánicos más comunes

SIKADUR 52 INYECCIÓN	SIKA	Producto líquido de dos componentes a base de resinas epoxi de alta resistencia, es utilizado en la inyección de grietas y fisuras.
ADHEPOX LIQUIDO	IMPERQUIMIA	Adhesivo epóxico de baja viscosidad para el relleno de grietas.
SYPYL 190 I	SYPYL	Adhesivo epóxico para inyección de grietas de concreto.
EPOXY 7100	UNITEX	Resina epóxica de dos componentes, de baja viscosidad y alta resistencia. Es empleado en el relleno de grietas mediante inyección a presión o por gravedad.
MAXCLEAR CONSOLIDATED	DRIZORO	Producto a base de compuestos de silicio, que al aplicarse sobre el material de construcción es absorbido al interior donde cristaliza ayudado por un catalizador y la humedad del ambiente. Es utilizado en la restauración de piedra natural, estucos y frescos dañados por agentes atmosféricos.

Tabla 6. Propiedades Mecánicas de la piedra, morteros y ladrillos de mampostería histórica. (Tomazevic, 1993)

Tipo de mampostería	Resistencia a compresión de la piedra (kg/cm ²)	Ladrillos		Arena (Tamaño) (mm)	Composición del mortero	Resistencia a compresión mortero (kg/cm ²)
		Dimensiones (cm)	Resistencia a compresión (kg/cm ²)			
Piedra	408-714			0- 10 mm	1:2:5	5.1
Piedra-ladrillo	408-714	15x10x5	153	0- 5 mm	1:2:5	10.2
Piedra-ladrillo	408-714	15x10x5	153	0- 8 mm	1:2:5	5.1

Tabla 7. Propiedades Mecánicas de Mampostería Histórica Original y Mampostería Histórica Inyectada. (Tomazevic, 1993)

Tipo de mampostería	Descripción de la prueba	Resistencia de la lechada (kg/cm ²)	Resistencia a compresión f_c (kg/cm ²)	Resistencia a tensión f_t (kg/cm ²)	Módulo de elasticidad E (kg/cm ²)	Modulo de cortante G (kg/cm ²)
Con arena barrosa	(a). 1 muro original	-	5	0.2	2000	713
	Inyectado	336	10	1.22	8409	1019
Con arena limpia	(a). 6 muros originales	-	8	1.02	3975	886
	Inyectado	336	22	2.55	2744	1478
Con arena limpia	(b) 1 muro original	-	-	1.02	-	-
	Inyectado	316	-	1.42	-	1019
Con arena limpia	(b). 6 muros originales	-	-	1.42	-	408
	Inyectado	245	-	1.94	-	4587

Especímenes construidos y probados en laboratorio

(a) Pruebas in situ

Tabla 8. Composición de lechadas de inyección de muros. (Tomazevic, 1993)

Tipo de grout	Designación del muro	Cantidades (en % de masa)			
		Cemento	Puzolana	Arena sílica	Aditivo
A	A-1, A-2	90	10	-	-
B	B-1, B-2	90	10	-	10 (a)
C	C-1, C-2	70	10	30	10 (a)
D	D-1, D-2	70	10	30	10 (b)

(b) Aditivo hidrotobo "vaglin"

(a) Aditivo hidrotobo "robin"

Tabla 9. Propiedades mecánicas del mortero y lechada (Tomazevic, 1993).

Designación del muro	Designación de la lechada	Mortero		Lechada		Cantidad de lechada
		Resistencia a compresión (kg/cm ²)	Resistencia a torsión (kg/cm ²)	Resistencia a compresión (kg/cm ²)	Resistencia a torsión (kg/cm ²)	
A-1	A	38	11	331	19	166
A-2	A	43	12	331	19	118
B-1	B	33	6	201	16	58
B-2	B	34	10	201	16	100
C-1	C	30	7	69	6	102
C-2	C	32	11	69	6	114
D-1	D	27	8	130	17	108
D-2	D	30	9	130	17	46

Tabla 10. Propiedades mecánicas de muros inyectados. (Tomazevic, 1993)

Designación del muro	Resistencia a compresión de la lechada (kg/cm ²)	Resistencia tensión f_t (kg/cm ²)	Rigidez efectiva k_e (kg/mm)	Modulo de cortante $E=1761 \text{ MPa}$ G (kg/cm ²)	Factor de ductilidad d_u
A-1	331	3	6594	16310	2.6
A-2	331	3	8547	2029	3.44
B-1	201	4	4979	1193	2.2
B-2	201	4	5332	1244	2.41
C-1	69	2	5489	1397	2.58
C-2	69	4	5910	1448	2.52
D-1	130	3	5835	1509	3.13
D-2	130	4	6206	1509	3.13

Tabla 11. Composición de lechadas de inyección (Tomazevic, 1993).

Designación del grout	Cemento	Puzolana	Arena sílica	Arena de caliza	Aditivo	Agua
N	90	10				57
NV	90	10			10	65
O	45	10	45			53
OV	45	10	45		10	56
P	45	10		45		60
PV	45	10		45	10	67
R	30	10	60			52
RV	30	10	60		10	59
S	30	10		60		58
SV	30	10		60	10	65

Nota: Las mezclas designadas con "V" contienen aditivos hidrotobos

Las proporciones son dadas en % de masa

Tiempo de flujo: 15s (ISO 2431, tasa de flujo 4 mm)

Curado D (dry): 28 días a T = 20°C, 50% de humedad relativa.

W (wet): 21 días a T = 20°C, 93% de humedad relativa.

7 días a T = 20°C, 50% de humedad relativa

Tabla 12. Influencia de las condiciones de curado en las pruebas de resistencia a compresión de especímenes de lechada. (en kg/cm²) (Tomazevic, 1993)

Designación de la lechada	Condiciones de curado	
	Seco	Húmedo
N	233	364
NV	163	167
O	145	158
OV	120	166
P	123	163
PV	128	141
R	82	120
RV	93	120
S	44	62
SV	51	76

Nota. Las mezclas designadas con "V" son mezclas hechas con aditivos hidrotugos

Tabla 13. Influencia de las condiciones de curado en la absorción de agua de los especímenes inyectados con lechada (en kg/m²/24h) (Tomazevic, 1993)

Designación de la lechada	Sin aditivo repelente del agua		Con aditivo repelente de agua	
	Seco	Húmedo	Seco	Húmedo
N	13.2	7.4	-	-
NV	-	-	5.1	1.8
O	14.5	9.0	-	-
OV	-	-	4.1	2.6
P	15.1	10.6	-	-
PV	-	-	11.0	7.1
R	15.4	10.6	-	-
RV	-	-	7.2	6.0
S	17.3	14.4	-	-
SV	-	-	15.1	12.2

Tabla 14. Aditivos y sus efectos en la elaboración de morteros antiguos (Ref. 1)

<p>Aceleración del fraguado y aumento de resistencia</p> <ul style="list-style-type: none"> - Corteza de olmo - Agua de cebada - Zumo de higo - Masa de centeno - Cuajada - Sangre - Almidón - Calostros - Azúcar 	<p>Retardadores</p> <ul style="list-style-type: none"> - Azúcar - Sangre - Clara de huevo - Gluten - Bórax - Queratina para yesos
<p>Aireadores con aumento de durabilidad</p> <ul style="list-style-type: none"> - Malta - Cerveza - Urea - Cuernos de animales (queratina) 	<p>Adhesivos para aumentar la trabazón</p> <ul style="list-style-type: none"> - Resinas de pino - Gelatina - Colas animales y vegetales - Gluten - Caseínas - Albúmina de sangre
<p>Resistencia a heladas</p> <ul style="list-style-type: none"> - Azúcar 	<p>Solidificadores, rigidizadores, endurecedores</p> <ul style="list-style-type: none"> - Azúcar, Colas vegetales - Colas animales - Melazas, mieles
<p>Estabilizadores que producen mayor dureza y estabilidad a la mezcla</p> <ul style="list-style-type: none"> - Yemas de huevo - Aceites, grasas - Ceras, colas, goma arábica - Talco, Azúcar, Zumo de fruta - Gluten 	<p>Consolidantes, aglutinantes</p> <ul style="list-style-type: none"> - Queratina, Caseína - Corteza de olmo - Tanino, colas, arroz, paja cortada - Masa de centeno, clara y yema de huevo - Copos de algodón, yute, sisal - Goma arábica o tragacanto - Cola animal de Rodas - Jugo de higos, azúcar.
<p>Agente antiretracción</p> <ul style="list-style-type: none"> - Cera de abeja 	<p>Espesadores</p> <ul style="list-style-type: none"> - Sangre, leche agria - Caseína, Queso, gelatina - Goma de tragacanto con agua
<p>Modificadores de plasticidad para mejorar la trabajabilidad del mortero</p> <ul style="list-style-type: none"> - Azúcar, leche, clara de huevo - Estiércol, Aceite rojo de Turquía - Glicerina, glucosa - Aceites minerales - Resinas, colofonia - Higo 	<p>Impermeabilizantes</p> <ul style="list-style-type: none"> - Colas animales, Taninos - Betunes, ceras de emulsión - Emulsión de aceite mineral - Cera de abeja

Tabla 15. Aditivos más comunes en el mercado

Nombre	Fabricante	Función
Serie POZZOLITH	MBT	Reductor y retardador del fraguado del concreto
MB AE 90		Incluidor de aire para el concreto
OMICRON		Reduce el agua de la mezcla y le reparte repelencia al agua para concreto y mortero
MB -VR		Incluidor de aire para el concreto
POZZUTEK 20		Accelerador del fraguado del concreto a bajas temperaturas
FLOWCABLE		Aditivo para rellenos protectores de cables postensados u operaciones de anclaje, pernos, sujeciones, etc.
MASTERFLOW		Lechada expansiva fluida para inyecciones, rellenos y operaciones de anclaje
Sikament- HE	Sika	Reductor de agua de alto poder, superfluidizante y acelerante de resistencias
Sika-Aer		Incluidor de aire para concreto
Sikament-320		Suj. erfluidizante, reductor de agua de alto rango y retardante de fraguado
Sika 1		Impermeabilizante integral para morteros
Sika 2		Accelerante ultrarrápido de fraguado de morteros
Sikalite		Impermeabilizante integral para morteros
Intraplast		Expansor para mezclas de cemento, estabiliza las lechadas de cemento, reduciendo la segregación y exudación del agua

Tabla 16. Periodos de Prueba para evaluar la resistencia a compresión, según ASTM C-109

Edad de prueba	Tolerancia
24 h	$\pm \frac{1}{2}$ h
3 días	± 1 h
7 días	± 3 h
28 días	± 12 h

Tabla 17. Valor máximo permisible de los cambios de longitud de barras expuestas a una solución de sulfato, según ASTM C-1012

No. de espécimen	Cementos compuestos	Cementos Portland
3	0.034	0.010
4	0.037	0.011
5	0.039	0.012
6	0.041	0.012

Tabla 18. Volumen mínimo para cada bachada

Tipo de espécimen	Volumen unitario litros	Cantidad de especímenes	Volumen total litros
Cubos	0.13	15	1.95
Losas	1.7	3	5.1
Barras	0.16	6	0.96
Barras	0.04	2	0.08
		Suma total	8.09

Tabla 19. Lechadas y su aplicación en obras de consolidación estructural

Nombre	Aplicaciones
C-AF-B	Se utilizó en la consolidación de las mamposterías de una iglesia del siglo de XIII del castillo de San Ménchould (Name), Francia.
C-Ca-AH	Estas lechadas fueron estudiadas por el Instituto de Investigaciones y Pruebas de Estructuras y Materiales (ZRMK) en Ljubljana, Eslovenia
C-Ca-ArS-AH	
C-Ca	
C-AE-AF	Es utilizada en la consolidación de columnas de la Catedral Metropolitana, en la Cd. de México
ER-Ar	Este es un mortero premezclado fabricado por la empresa MBT, especialmente diseñado para la rehabilitación de monumentos históricos.
C-Ca-Ar-AF	Esta es la mezcla típica utilizada para consolidar elementos de mampostería en México
C-AF-BS	Esta lechada es similar a la primera, solo con la diferencia de que se trata de bentonita sódica
C-AF-BC	Esta lechada es similar a la primera, solo con la diferencia de que se trata de bentonita cálcica

Tabla 20. Pesos volumétricos y específicos de materiales empleados

Material	Peso volumétrico kg/m ³	Peso específico.	
Cemento	1510	3.1	
Cal:			
Piracal	600	2.34	
Calidra	700	2.31	
Arena	1600	2.55	
Arena sílica		2.45	3
Bentonita		2.7	2.8
Agua		1	

Tabla 21. Proporciones de materiales para obtener 10 litros de lechada para cada bachada

LECHADA	DOSIFICACIONES		VOLUMEN NECESARIO	
	Material	% de peso en masa	Peso kg	Volumen Litros
C-AF-B	Cemento	75	8	2.58
	Bentonita hidratada al 1000 %	25	2.64	0.98
	Aditivo Fluidificante	1.5	0.16	0.16
	Agua	60	6.4	6.4
	Volumen total			10.12
C-AE-AF	Cemento	94	14	4.516
	Pozzolith 322.N	0.6	0.084	0.084
	Flowcable	6	0.84	0.364
	Agua	36	5.32	5.32
	Volumen total			10.28
C-Ca-AH	Cemento	90	8.1	2.61
	Cal	10	0.9	0.385
	Aditivo hidrófobo	10	0.9	0.9
	Agua	65	5.85	5.85
	Volumen total			9.745
C-Ca-ArS-AH	Cemento	30	2.55	0.823
	Cal	10	0.85	0.363
	Arena sílica	60	5.1	2.082
	Aditivo	10	0.85	0.85
	Agua	65	5.525	5.525
Volumen total			9.643	
C-Ca	Cemento	90	8.1	2.613
	Cal	10	0.9	0.385
	Agua	65	5.85	5.85
	Volumen total			8.848
	C-Ca-Ar-AF	Cemento	14	2.3
Cal		43	6.9	2.987
Arena cernida		43	6.9	2.706
Agua		22	3.45	3.45
Aditivo (según fab.)			0.161	0.161
Volumen total			10.046	
MORTERO	Material	% en masa	Peso en kg. para obtener 10 l	
ER-Ar	EMACO	34	5.4	
	Arena (1 mm)	66	10.7	
	Agua	18	2.9	

Tabla 22. Dosificación y viscosidad de las lechadas preparadas (para un volumen de 10 litros)

Código	Dosificación kg.		Agua kg.			Viscosidad s.
			Original	Adicional	Total	
C-AF-B	Cemento	8	6.4	1	7.4	26
	Bentonita hidratada al 1000%	2.64				
	Aditivo Fluidificante	0.16				
C-Ca-AH	Cemento	8.1	5.85		5.85	43
	Cal	0.9				
	Aditivo hidrófobo	0.9				
C-Ca-ArS-AH	Cemento	2.55	5.525		5.525	36
	Cal	0.85				
	Arena sílica (50/60)	5.1				
	Aditivo hidrófobo	0.85				
C-Ca	Cemento	8.1	5.85		5.85	47
	Cal	0.9				
C-AE-AF	Cemento	14	5.32		5.32	122
	Aditivo Estabilizador Flowcable	0.84				
	Aditivo fluidificante Pozzolith 322.N	0.084				
ER-Ar	Mortero Émaco Resto	5.4	2.95	1.25	4.2	*96.4 %
	Arena cernida (Andesita 1 mm)	10.7				
C-Ca-Ar-AF	Cemento	2.3	3.45	3.5	6.95	165
	Cal	6.9				
	Arena cernida (Andesita 1 mm)	6.9				
	Aditivo fluidificante Pozzolith 322.N	0.161				
C-AF-BS	Cemento	8	6.4	4	10.4	51
	Bentonita sódica	2.64				
	Aditivo fluidificante Pozzolith 322.N	0.16				
C-AF-BC	Cemento	8	6.4	2	8.4	56
	Bentonita cálcica	2.64				
	Aditivo fluidificante Pozzolith 322.N	0.16				

*Nota En este caso no se trata de viscosidad sino de fluidez, ya que se trata de un mortero y se obtuvo utilizando la mesa de fluidez

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Tabla 23. Contracción por secado a los 28 días de edad, en barras de 2 x 2 x 10 cm

Lechada	# Espécimen	Longitudes iniciales		Longitudes finales a los 30 días de edad		$\Delta l = (l_i - l_f) / l_i \times 100$	
		l_i longitudinal mm	l_i transversal mm	l_f longitudinal mm	l_f transversal mm	Δl longitudinal %	Δl transversal %
C-AE-AF	1	9.99	2.06	9.75	1.99	2.40	3.40
	2	9.9	1.99	9.8	1.99	1.01	0
C-AF-B	1	9.9	2.02	9.38	1.94	5.25	3.96
	2	10.1	2.1	9.48	2	6.14	4.76
C-Ca	1	9.98	2.1	9.94	2.08	0.40	0.95
	2	9.99	2.11	9.9	1.98	0.90	6.16
C-Ca-AH	1	10.1	2.1	10	2.02	0.99	3.81
C-AF-BC	1	10.01	2.05	9.56	2	4.50	2.44
	2	9.97	2.03	9.46	1.98	5.12	2.46
C-AF-BS	1	10.06	2.05	9.58	1.96	4.77	4.39
	2	9.995	2.005	9.53	1.95	4.65	2.74
ER-Ar	1	9.99	2.11	9.99	2.11	0	0
	2	1.9	1.98	1.9	1.98	0	0
C-Ca-ArS-AH	1	10	2.02	10	2.02	0	0
C-Ca-Ar-AF	1	9.9	2.02	9.76	2.0075	1.41	0.62
	2	10.04	2.13	9.71	2.1	3.29	1.41

Tabla 24. Contracción por secado de barras de 2.5 x 2.5 x 25 cm guardadas en la cámara seca

# BARRA	LECHADA	Edad, en semanas													
		1 %	2 %	3 %	4 %	5 %	6 %	7 %	8 %	9 %	10 %	11 %	12 %	13 %	
1	C-Ca-AH	0	0.0244	0.0508	0.0826	0.0742	0.0772	0.0804	0.0804	0.0804	0.0804	0.0804	0.0804	0.0804	0.0804
2	C-Ca-AH	0	0.0274	0.0576	0.0717	0.0811	0.0853	0.0884	0.0925	0.0925	0.0925	0.0925	0.0925	0.0925	0.0925
3	C-Ca-MS-AH	0	0.0151	0.0337	0.0224	0.0214	0.0355	0.038	0.0376	0.0417	0.0447	0.0457	0.0475	0.0475	0.0475
4	C-Ca-MS-AH	0	0.015	0.0342	0.0375	0.023	0.0213	0.0224	0.0244	0.0264	0.0315	0.0335	0.0335	0.0335	0.0335
5	C-Ca-MS-AH	0	0.0151	0.0342	0.0332	0.0233	0.0213	0.0234	0.0244	0.0274	0.0335	0.0335	0.0335	0.0335	0.0335
6	C-Ca	0	0.0406	0.0713	0.0804	0.0786	0.0787	0.0857	0.0957	0.1128	0.1188	0.1188	0.1188	0.1188	0.1188
7	C-Ca	0	0.0407	0.0823	0.0804	0.0728	0.0789	0.1296	0.124	0.124	0.138	0.138	0.138	0.138	0.138
8	C-AI-AI	0	0.0176	0.0383	0.0343	0.0375	0.0357	0.0357	0.1188	0.1188	0.124	0.125	0.125	0.125	0.125
9	C-AI-AI	0	0.0335	0.0646	0.0722	0.0664	0.0686	0.0686	0.1087	0.1087	0.1158	0.1158	0.1158	0.1158	0.1158
10	C-AI-AI	0	0.0364	0.0703	0.0664	0.0686	0.0686	0.1108	0.124	0.124	0.128	0.128	0.128	0.128	0.128
11	ER-Ar	0	0.0403	0.0713	0.0234	0.0305	0.0345	0.0306	0.0417	0.0467	0.0528	0.0578	0.0578	0.0578	0.0578
12	ER-Ar	0	0.0403	0.0712	0.0254	0.0325	0.0366	0.0366	0.0437	0.0478	0.0538	0.0538	0.0538	0.0538	0.0538
13	ER-Ar	0	0.0403	0.0713	0.0244	0.0305	0.0325	0.0336	0.0406	0.0488	0.0538	0.0578	0.0589	0.0589	0.0589

TESIS CON
CÁMARA DE ORIGEN

Tabla 25. Contracción por secado promedio de barras de 2.5 x 2.5 x 25 cm guardadas en la cámara seca

LECHADA	Edad, en semanas												
	1 %	2 %	3 %	4 %	5 %	6 %	7 %	8 %	9 %	10 %	11 %	12 %	13 %
C-Ca-AH	0	-0.0250	-0.0544	-0.0665	-0.0772	-0.0813	-0.0874	-0.0909	-0.0989	-0.0945	-0.0965	-0.0991	-0.1060
C-Ca-ArS-AH	0	-0.0151	-0.0135	-0.0170	-0.0224	-0.0244	-0.0271	-0.0288	-0.0318	-0.0350	-0.0362	-0.0376	-0.0420
C-Ca	0	-0.0417	-0.0767	-0.0935	-0.1057	-0.1133	-0.1148	-0.1173	-0.1184	-0.1245	-0.1245	-0.1250	-0.1265
C-AE-AF	0	-0.0359	-0.0674	-0.0826	-0.0958	-0.1040	-0.1104	-0.1162	-0.1172	-0.1226	-0.1229	-0.1243	-0.1251
ER-Ar	0	-0.0051	-0.0166	-0.0244	-0.0312	-0.0345	-0.0396	-0.0420	-0.0478	-0.0528	-0.0589	-0.0643	-0.0682

Tabla 26. Expansión de barras sumergidas en una solución de sulfato

# Barra	Lechada	Semana 1 Δx %	Semana 2 Δx %	Semana 3 Δx %	Semana 4 Δx %	Semana 5 Δx %
1	C-Ca-AH	0	-0.0020	0.0020	0.0051	0.0122
2	C-Ca-ArS	0	0.0010	0.0010	0.0051	0.0152
3	C-Ca-ArS-AH	0	0.0051	0.0345	0.0843	0.1503
4	C-Ca-ArS-AH	0	0.0000	0.0122	0.0305	0.0528
5	C-Ca	0	0.0010	0.0020	0.0051	0.0111
6	C-Ca	0	0.0010	0.0030	0.0051	0.0111
7	C-AE-AF	0	0.0010	0.0010	0.0030	0.0091
8	C-AE-AF	0	0.0010	0.0010	0.0020	0.0081
9	C-AE-AF	0	0.0000	0.0000	0.0020	0.0061
10	ER-Ar	0	0.0020	0.0061	0.0102	0.0172
11	ER-Ar	0	0.0030	0.0081	0.0152	0.0233
12	ER-Ar	0	0.0030	0.0091	0.0152	0.0243
13	C-AF-BS	0	0.0122			
14	C-AF-BS	0	0.0193			
15	C-AF-BC	0	0.0020	0.0081	0.0102	0.0213
16	C-AF-BC	0	0.0020	0.0183	0.0274	0.0538
17	C-AF-BC					

Tabla 27. Expansión promedio de barras sumergidas en una solución de sulfato

Lechada	Semana 1 Δx %	Semana 2 Δx %	Semana 3 Δx %	Semana 4 Δx %	Semana 5 Δx %
C-Ca-AH	0	-0.0005	0.0015	0.0051	0.0137
C-Ca-ArS-AH	0	0.0025	0.0234	0.0574	0.1016
C-Ca	0	0.0010	0.0025	0.0051	0.0111
C-AE-AF	0	0.0007	0.0007	0.0024	0.0077
ER-Ar	0	0.0027	0.0078	0.0135	0.0216
C-AF-BS	0	0.0157			
C-AF-BC	0	0.0020	0.0132	0.0188	0.0376

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

FIGURAS

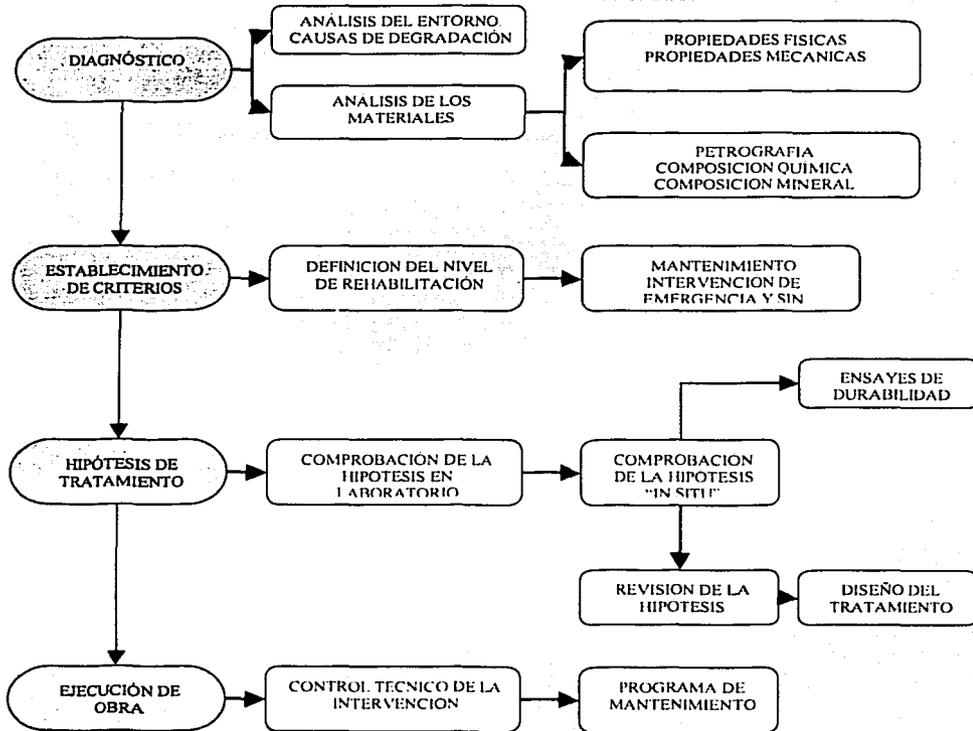


Fig. 1. Metodología para rehabilitar elementos de mampostería (Ref. 1)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Fig. 2. Crecimiento de vegetación en la piedra



Fig. 3. Degradación ocasionada por los efectos de la contaminación ambiental.

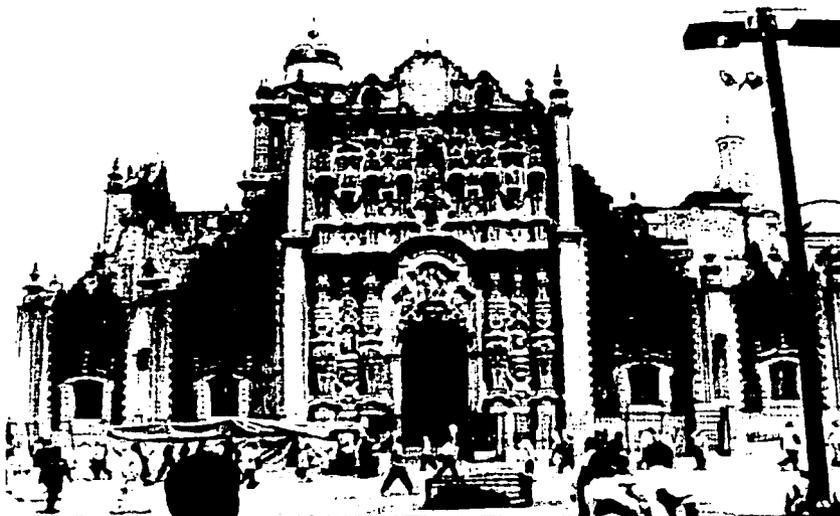


Fig. 4. Enmugrecimiento ocasionado por el smog

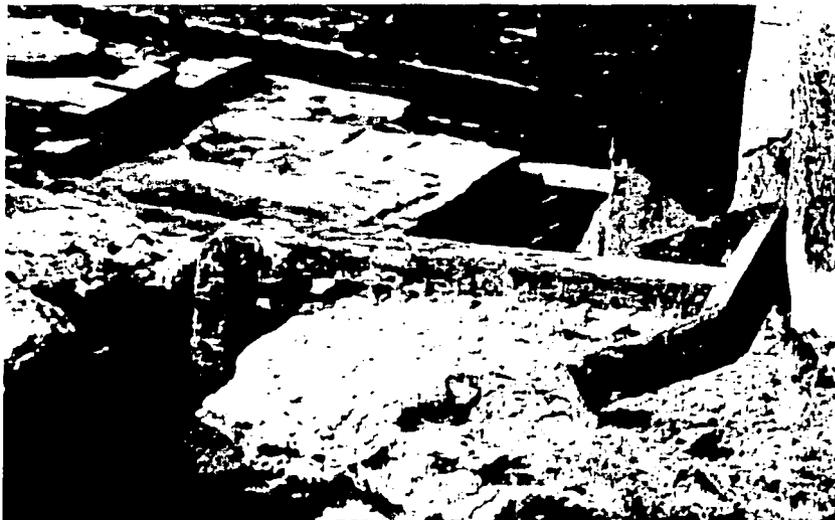


Fig. 5. Fractura de la piedra debida a la oxidación de anclajes de acero

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

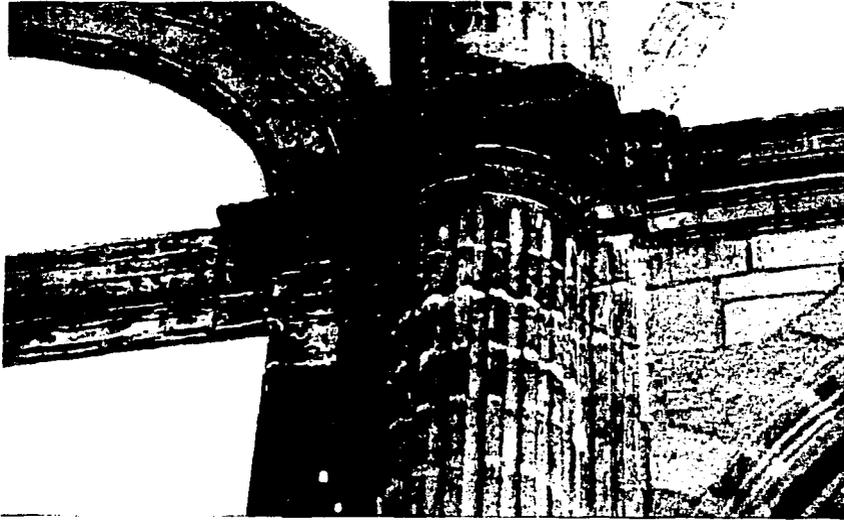


Fig. 6. Eflorescencias

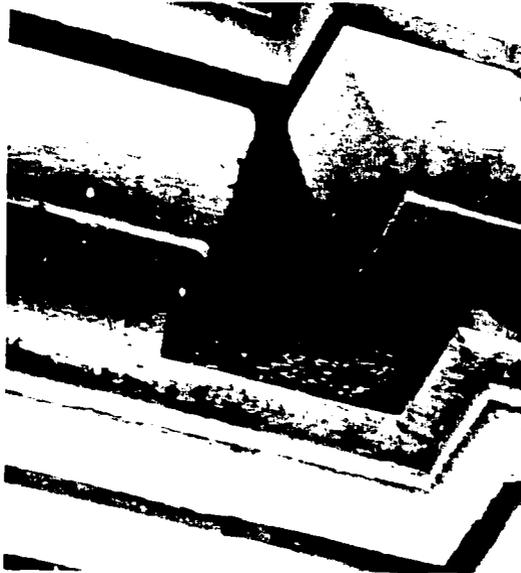


Fig. 7. Excremento de paloma

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Fig. 8 .Pátina biológica

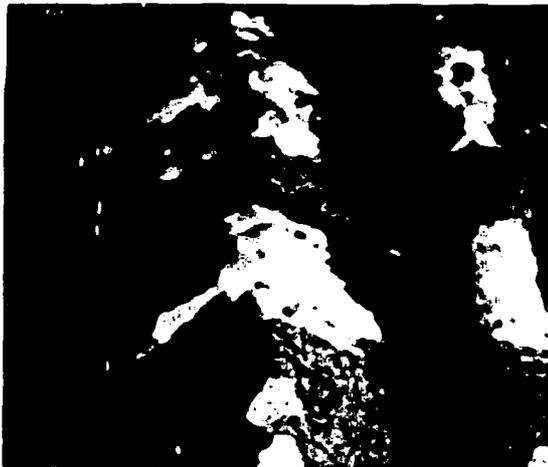


Fig.9. Costra negra (Ref. 14)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Fig. 10. Desplacamiento



Fig.11. Descamación de la piedra.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Fig. 12. Ampollas en la piedra

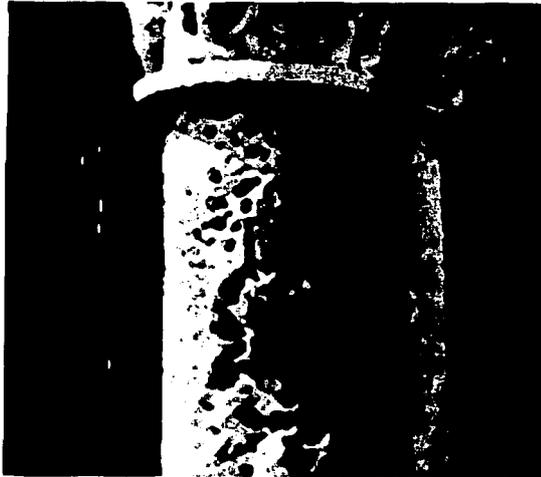


Fig. 13. Alveolización (Ref. 14)

TESIS CON
FALJA DE ORIGEN



Fig. 14. Disgregación



Fig. 15. Grietas

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

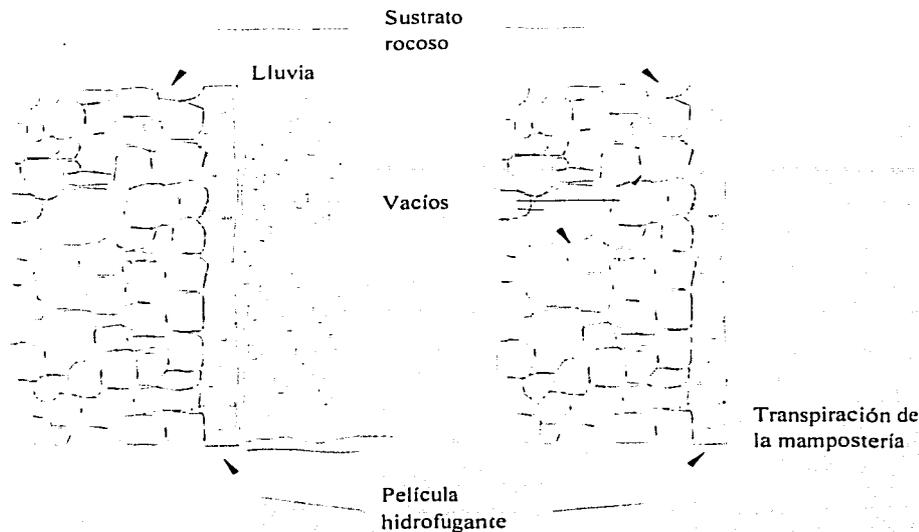


Fig. 16. Película hidrofugante que protege de la lluvia a la mampostería y a su vez permite la transpiración de la misma.

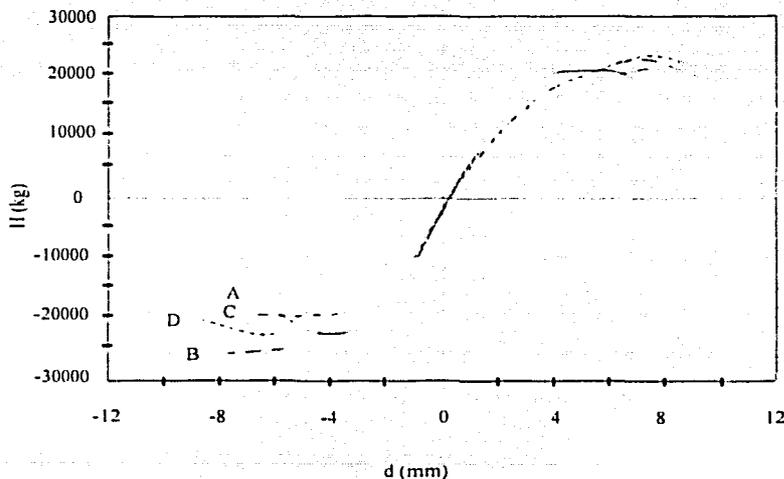


Fig. 17. Comparación de ciclos de histéresis obtenidos durante los ensayos de resistencia lateral de los muros. (Tomazevic, 1993)

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Fig. 18. Mezcladora de mortero



Fig. 19. Mesa de fluidez para morteros

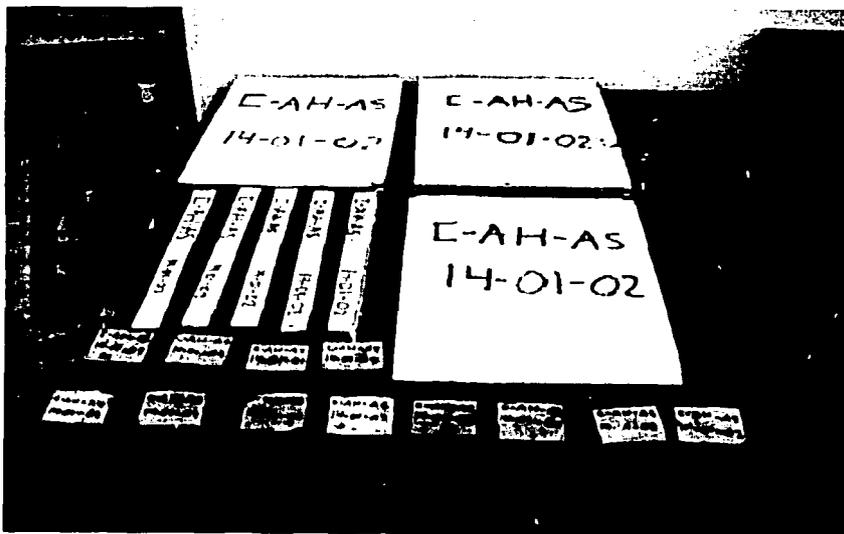


Fig. 20. Especímenes típicos para ensayos

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

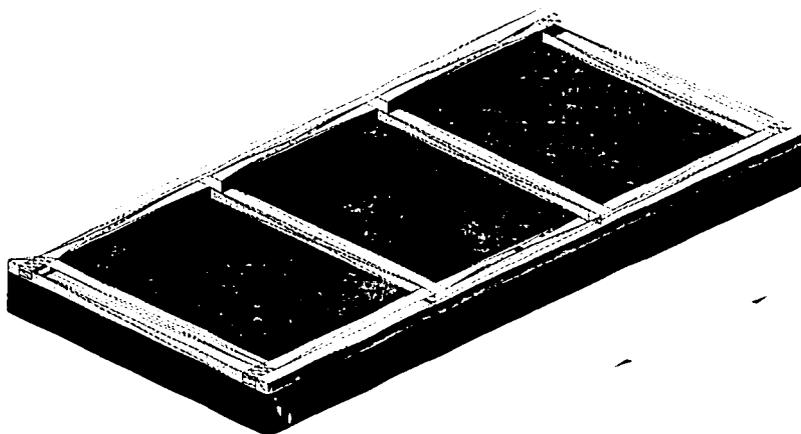


Fig. 21. Cimbras para especímenes tipo losa



Fig. 22. Embudo de Marsh y Prueba de fluidez

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



a) Inicio

b) Levantamiento del cono truncado con el mortero ER-Ar



c) Diámetro extendido del mortero ER-Ar

Fig. 23. Prueba de fluidez del mortero

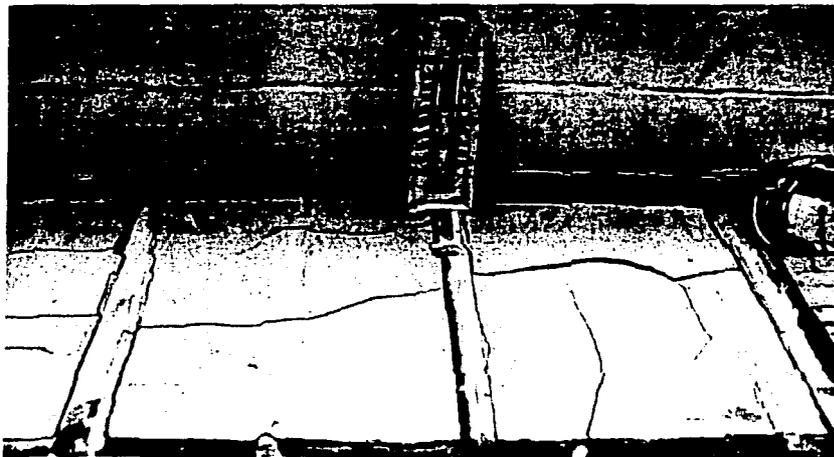


Fig. 24. Contracción por secado de losas hechas con lechada C-AF-B

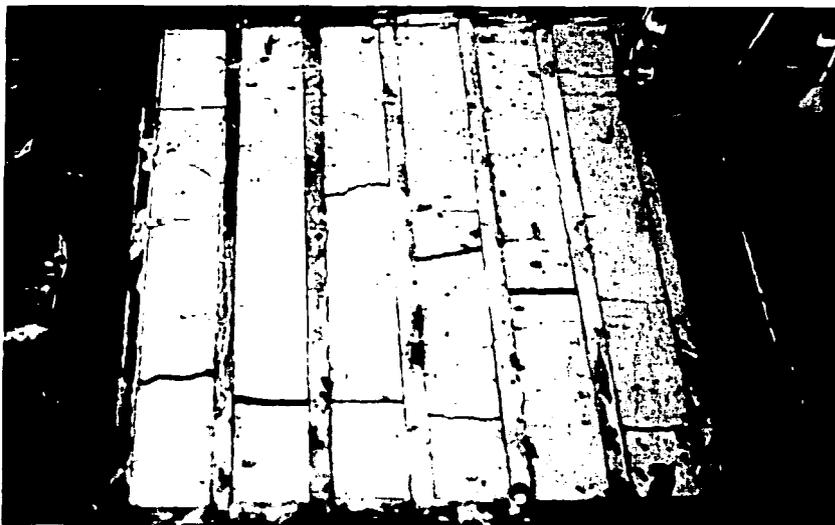


Fig. 25. Grietas de contracción por secado de lechada C-AF-B

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Fig.26. Contracción por secado de barras de lechada C-AF-B.

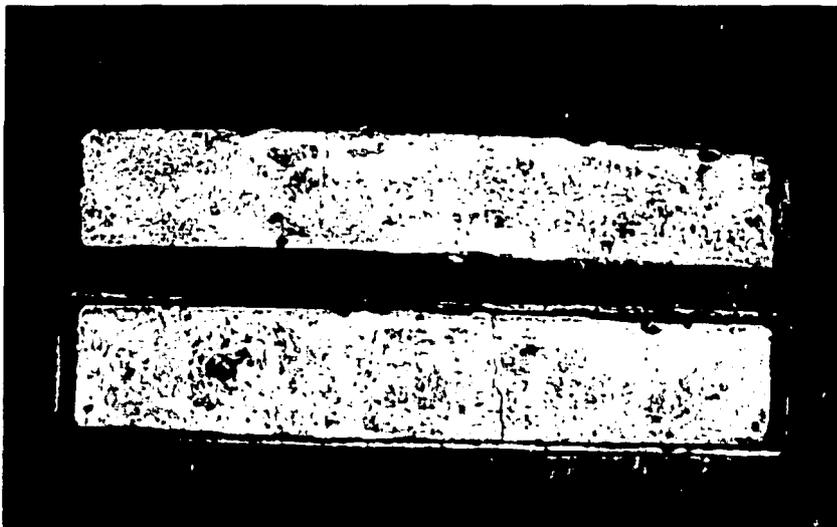


Fig. 27. Agrietamiento ocasionado por la contracción por secado de barras de lechada C-AF-B2.

TESIS CON
FAJJA DE ORIGEN



Fig. 28. Contracción por secado sufrida en la lechada C-AF-B2



Fig. 29. Espectámenes de lechada C-AF-BS



Fig. 30. Fractura de barras de lechada C-AF-BS y C-AF-BC almacenadas dentro de la cámara seca.



Fig. 31. Contracción por secado presentada en barras de lechada C-AE-AF

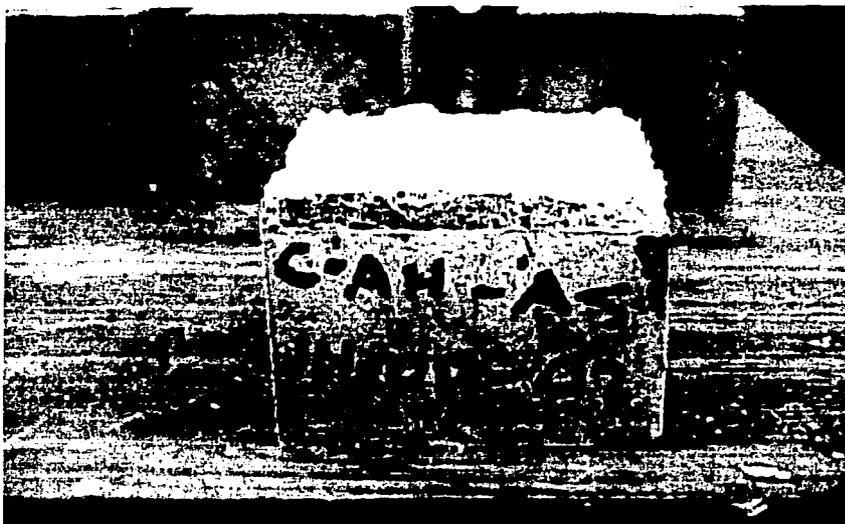


Fig. 32. Cubo de lechada C-Ca-ArS-AH

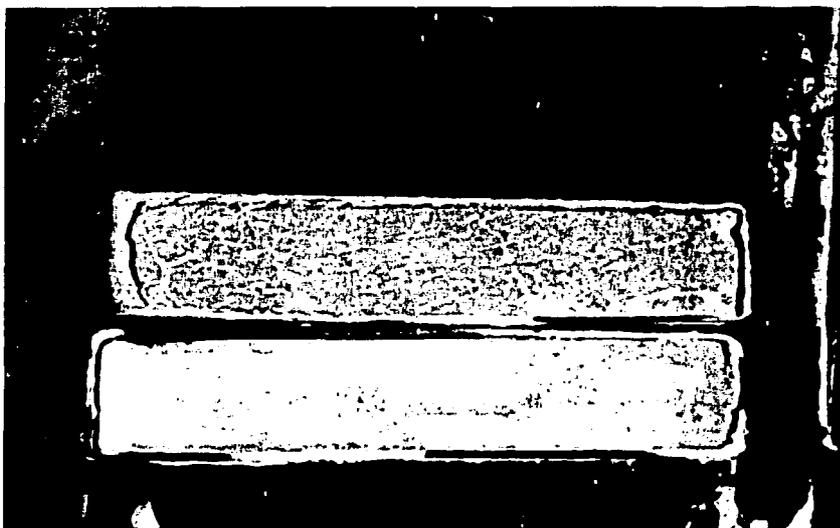


Fig. 33. Contracción por secado presentada en barras de lechada C-Ca-Ar-AF.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Fig. 34. Grietas debidas por contracción en lechada C-Ca-Ar-AF.

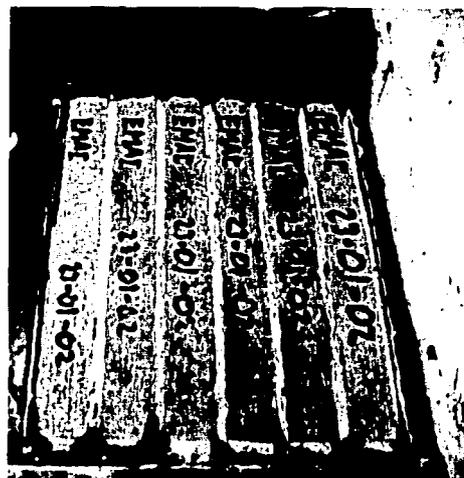
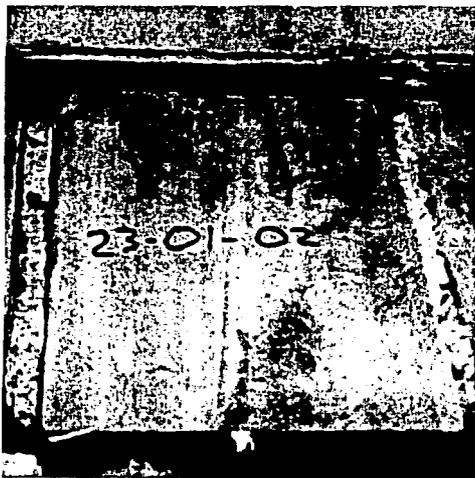


Fig. 35. Especímenes de mortero ER-Ar, los cuales no presentaron una contracción por secado aparente.

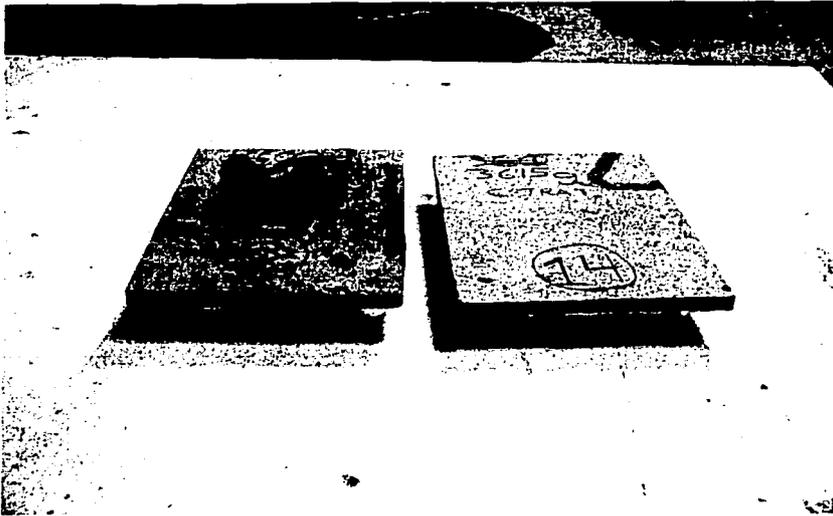


Fig. 36. Losas de cantera con y sin tratamiento hidrófobo

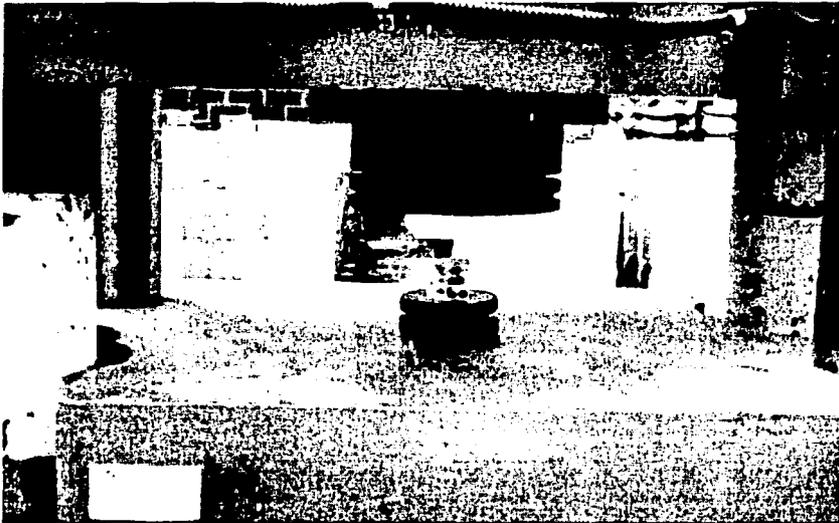
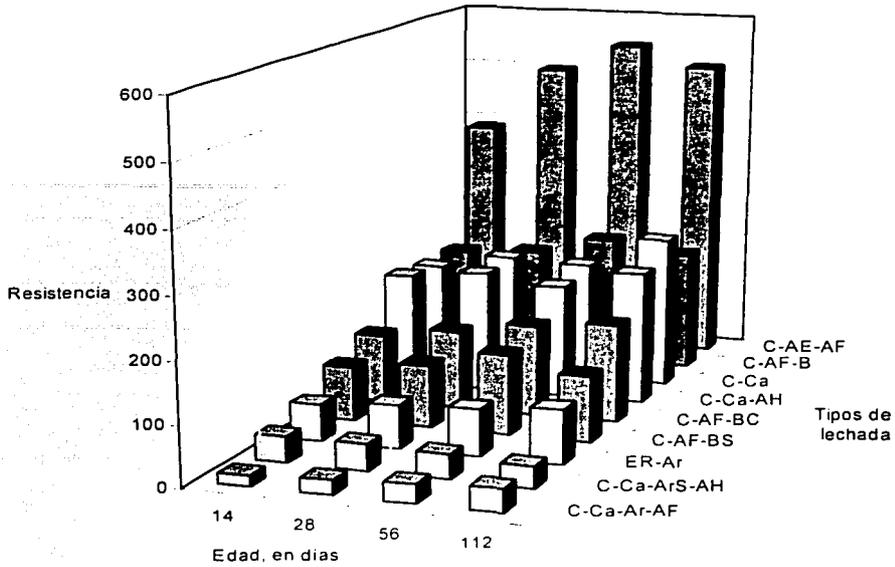


Fig. 37. Ensayo de especímenes a compresión en la máquina universal



*Resistencia promedio de 3 especimenes

Lechada	Edad, en días			
	14	28	56	112
C-AE-AF	387.01	500.22	548.66	516.31
C-AF-B	180.59	189.54	219.61	201.80
C-Ca	178.29	204.14	199.93	253.65
C-Ca-AH	188.71	202.45	190.10	221.04
C-AF-BC	114.41	131.21	151.91	163.52
C-AF-BS	90.80	104.00	133.69	109.56
ER-Ar	60.78	71.59	77.07	89.17
C-Ca-ArS-AH	42.83	43.85	39.81	35.00
C-Ca-Ar-AF	17.51	23.20	30.43	37.08

Fig. 38. Resistencia a la compresión, en kg/cm²

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Fig. 39. Falla típica de un cubo de lechada en prueba de compresión simple

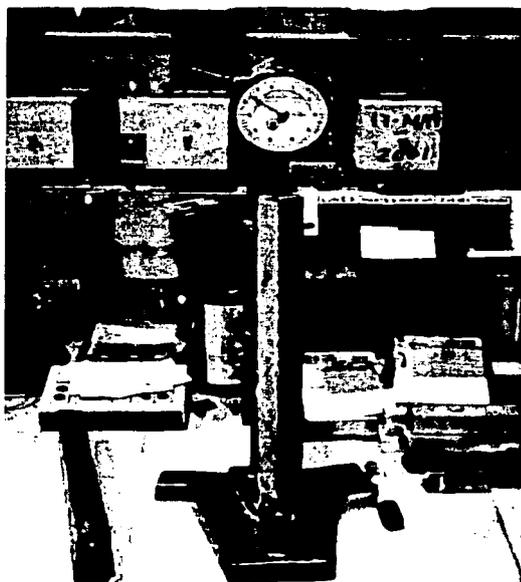


Fig. 40. Comparador de longitudes

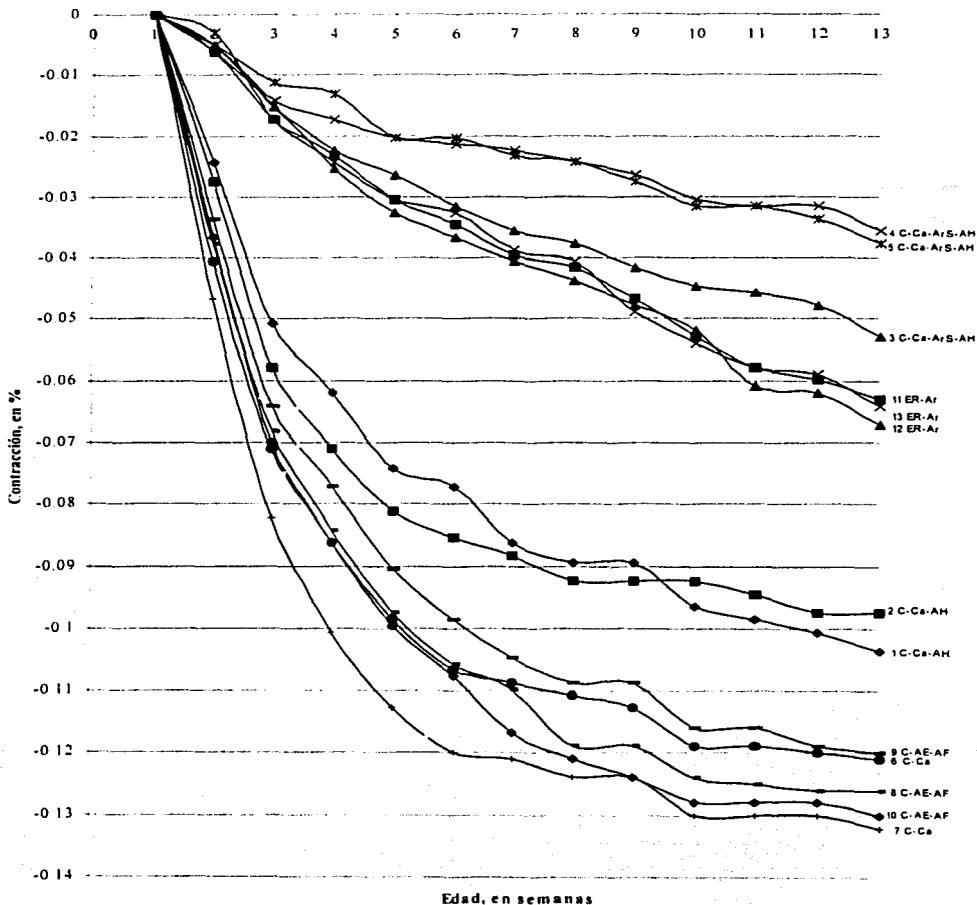


Fig.41. Contracción por secado de barras de 2.5 x 2.5 x25 cm. almacenadas dentro de la cámara seca.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

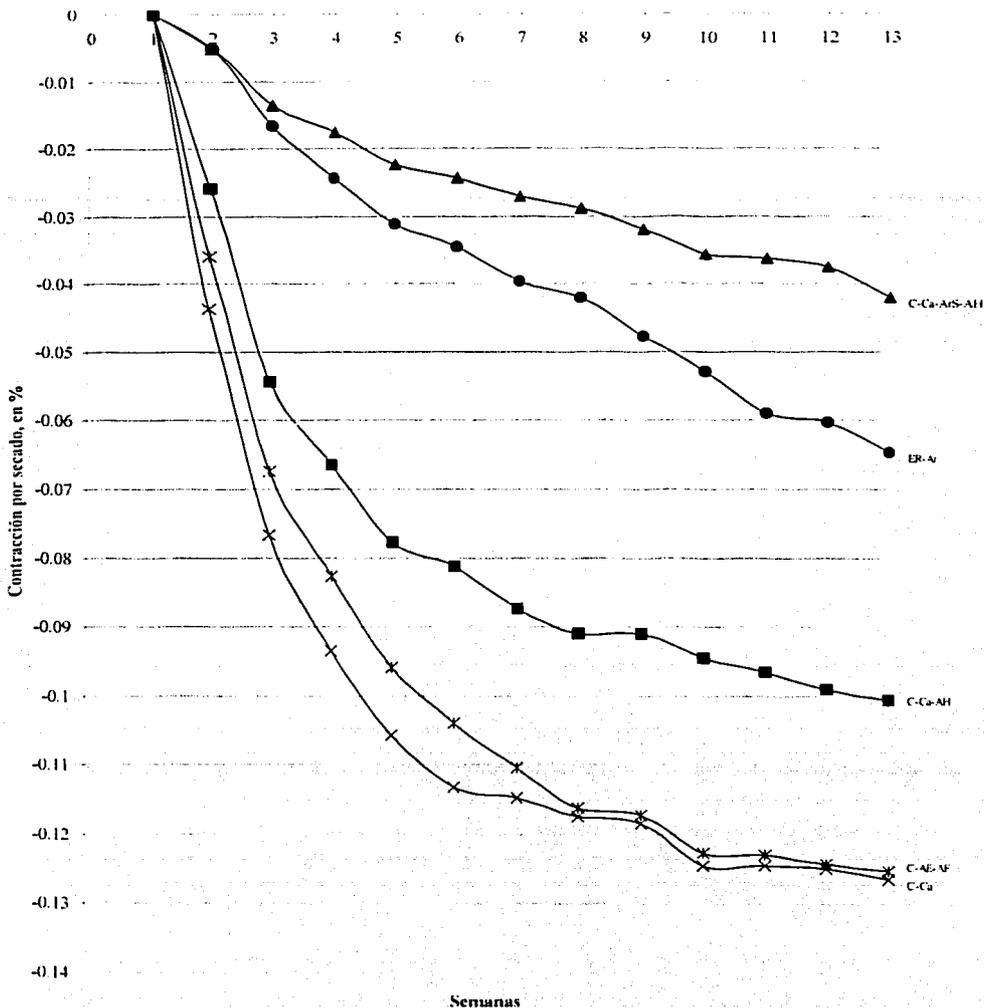


Fig. 42. Contracción por secado promedio de barras de 2.5 x 2.5 x 25 cm.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

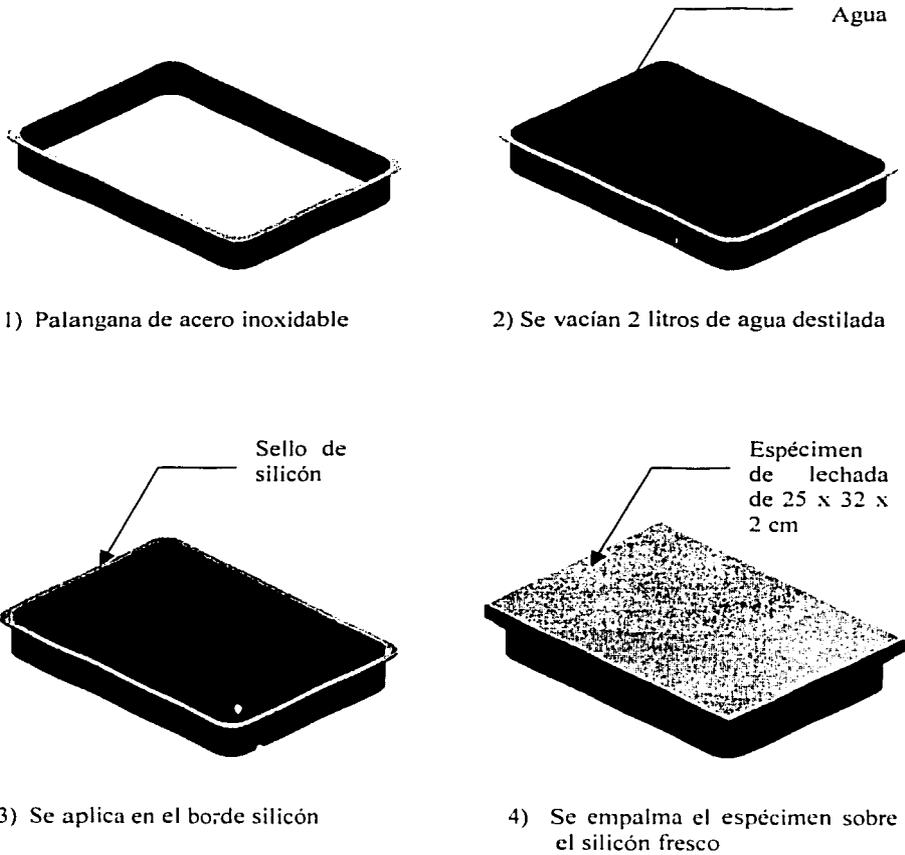


Fig. 43. Preparación de los especímenes para la prueba de permeabilidad

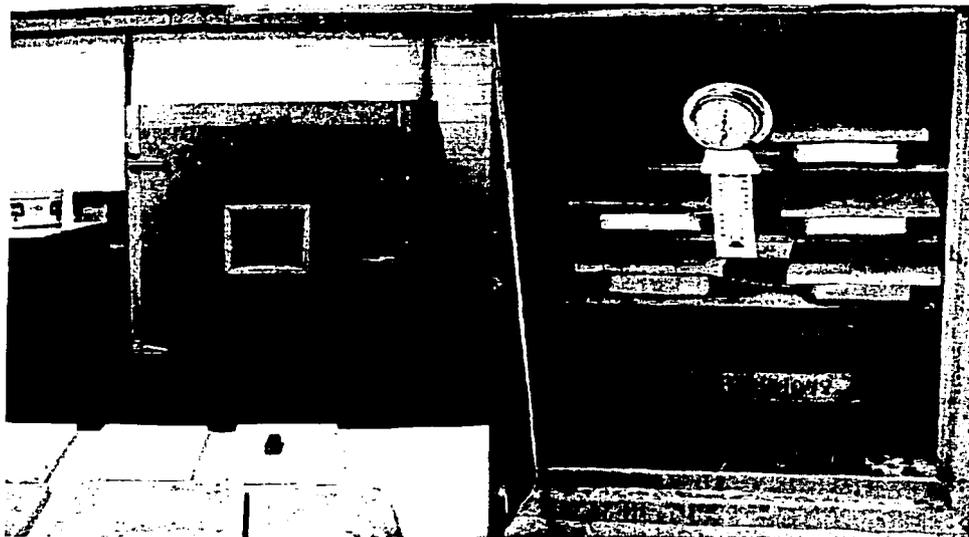
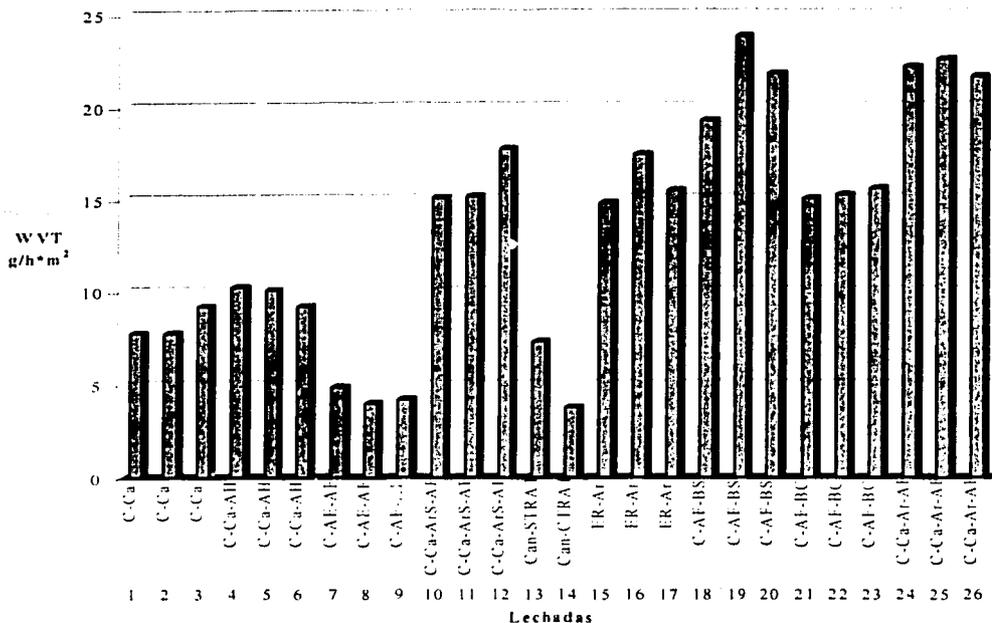


Fig. 44. Gabinete con temperatura y humedad relativa controlada

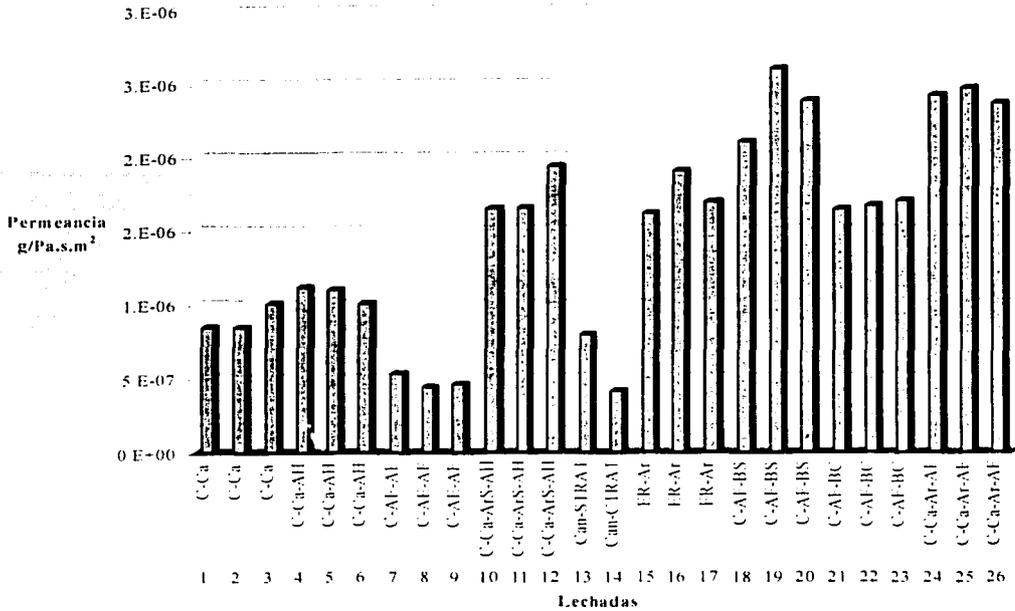
TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



# Charola	Lechada	WVT g/(h*m²)	WVT Promedio g/(h*m²)
1	C-Ca	7.73	8.20
2	C-Ca	7.72	
3	C-Ca	9.16	
4	C-Ca-AH	10.20	9.81
5	C-Ca-AH	10.05	
6	C-Ca-AH	9.18	
7	C-AE-AF	4.86	4.35
8	C-AE-AF	3.99	
9	C-AE-AF	4.19	
10	C-Ca-ArS-AH	15.05	15.95
11	C-Ca-ArS-AH	15.10	
12	C-Ca-ArS-AH	17.70	
13	Can-STRAT	7.26	7.26
14	Can-CRAT	3.75	3.75

# Charola	Lechada	WVT g/(h*m²)	WVT Promedio g/(h*m²)
15	ER-Ar	14.75	15.85
16	ER-Ar	17.39	
17	ER-Ar	15.43	
18	C-AF-BS	19.21	21.57
19	C-AF-BS	23.76	
20	C-AF-BS	21.75	
21	C-AF-BC	14.98	15.23
22	C-AF-BC	15.19	
23	C-AF-BC	15.53	
24	C-Ca-Ar-AF	22.10	22.07
25	C-Ca-Ar-AF	22.53	
26	C-Ca-Ar-AF	21.58	

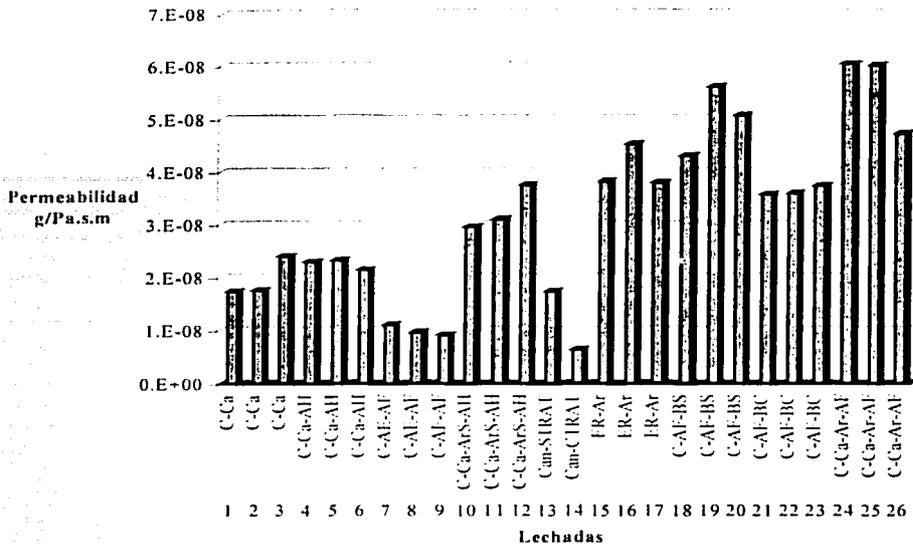
Fig. 45. Transmisión de vapor de agua (WVT), en g/h*m



# Charola	Lechada	Permeancia g/(Pa.s.m²)	Permeancia Promedio g/(Pa.s.m²)
1	C-Ca	8,44E-07	8,96E-07
2	C-Ca	8,42E-07	
3	C-Ca	1,00E-06	
4	C-Ca-AH	1,11E-06	1,07E-06
5	C-Ca-AH	1,10E-06	
6	C-Ca-AH	1,00E-06	
7	C-AE-AF	5,30E-07	4,74E-07
8	C-AE-AF	4,36E-07	
9	C-AE-AF	4,57E-07	
10	C-Ca-ArS-AH	1,64E-06	1,74E-06
11	C-Ca-ArS-AH	1,65E-06	
12	C-Ca-ArS-AH	1,93E-06	
13	Can-STRA1	7,93E-07	7,93E-07
14	Can-CTRA1	4,09E-07	4,09E-07

# Charola	Lechada	Permeancia g/(Pa.s.m²)	Permeancia Promedio g/(Pa.s.m²)
15	ER-Ar	1,61E-06	1,73E-06
16	ER-Ar	1,90E-06	
17	ER-Ar	1,68E-06	
18	C-AF-BS	2,10E-06	2,35E-06
19	C-AF-BS	2,59E-06	
20	C-AF-BS	2,37E-06	
21	C-AF-BC	1,63E-06	1,66E-06
22	C-AF-BC	1,66E-06	
23	C-AF-BC	1,69E-06	
24	C-Ca-Ar-AF	2,41E-06	2,41E-06
25	C-Ca-Ar-AF	2,46E-06	
26	C-Ca-Ar-AF	2,36E-06	

Fig. 46. Permeancia, en g/*Pa.s.m²



# Charola	Lechada	Permeabilidad g/(Pa.s.m)	Permeabilidad promedio g/(Pa.s.m)	# Charola	Lechada	Permeabilidad g/(Pa.s.m)	Permeabilidad promedio g/(Pa.s.m)
1	C-Ca	1,73E-08	1,96E-08	15	ER-Ar	3,82E-08	4,04E-08
2	C-Ca	1,75E-08		16	ER-Ar	4,52E-08	
3	C-Ca	2,40E-08		17	ER-Ar	3,79E-08	
4	C-Ca-AH	2,29E-08	2,25E-08	18	C-AF-BS	4,30E-08	4,99E-08
5	C-Ca-AH	2,33E-08		19	C-AF-BS	5,60E-08	
6	C-Ca-AH	2,14E-08		20	C-AF-BS	5,06E-08	
7	C-AE-AF	1,11E-08	9,94E-09	21	C-AF-BC	3,56E-08	3,62E-08
8	C-AE-AF	9,58E-09		22	C-AF-BC	3,58E-08	
9	C-AE-AF	9,15E-09		23	C-AF-BC	3,73E-08	
10	C-Ca-ArS-AH	2,96E-08	3,27E-08	24	C-Ca-Ar-AF	6,03E-08	5,58E-08
11	C-Ca-ArS-AH	3,10E-08		25	C-Ca-Ar-AF	6,00E-08	
12	C-Ca-ArS-AH	3,75E-08		26	C-Ca-Ar-AF	4,71E-08	
13	Can-STRAT	1,74E-08	1,74E-08				
14	Can-CTRAT	6,39E-09	6,39E-09				

Fig. 47. Permeabilidad al vapor de agua , en g/Pa.s.m

TESIS CON FALLA DE ORIGEN

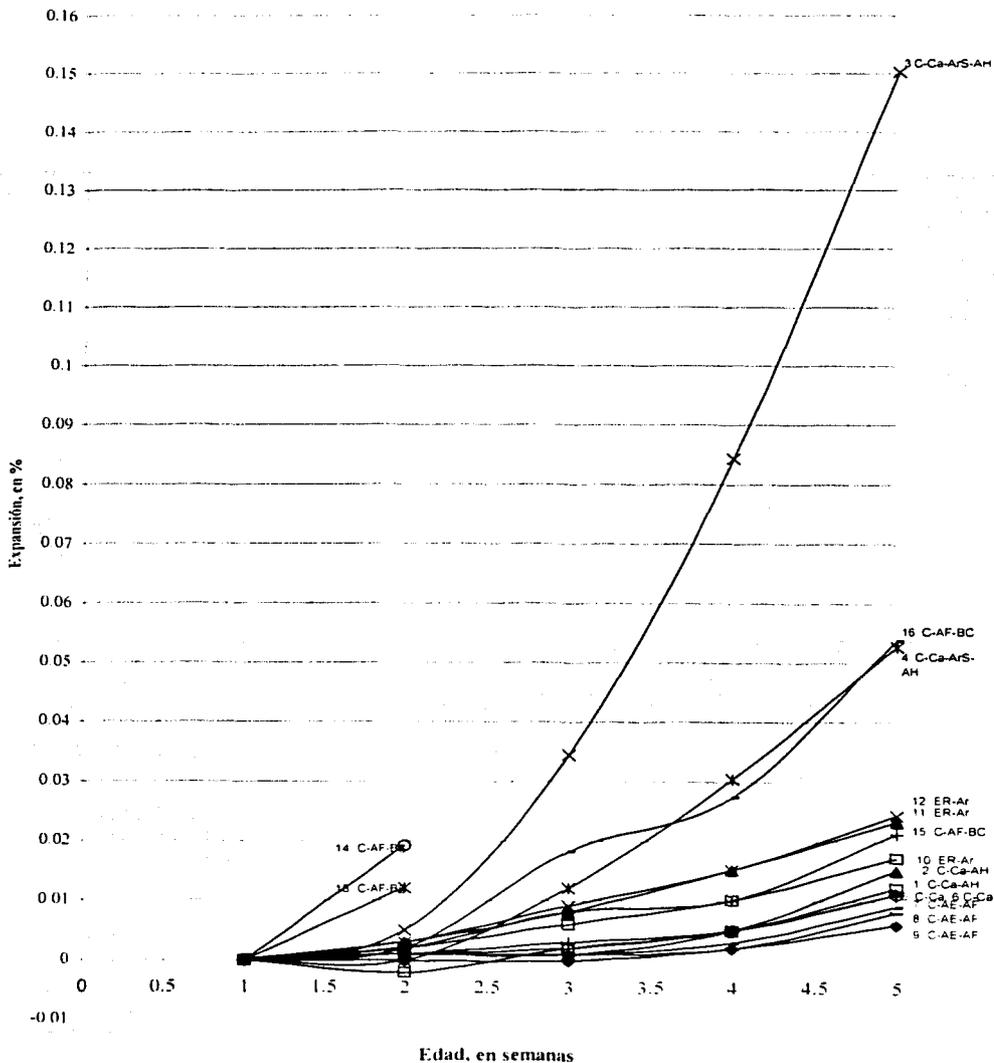


Fig. 48. Expansión de barras de 2.5 x 2.5 x 25 cm sumergidas en una solución de sulfato

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

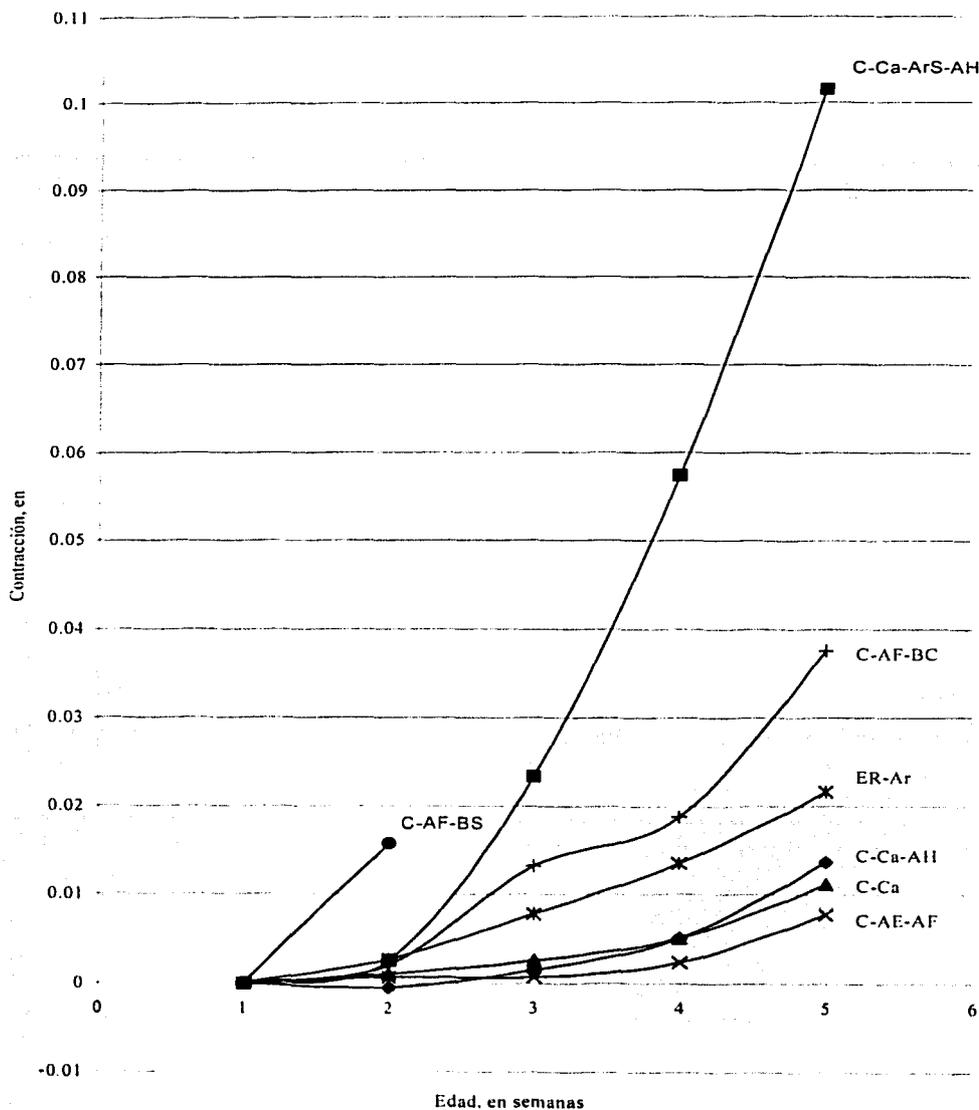


Fig. 49. Expansión promedio de barras de 2.5 x 2.5 x 25 cm sumergidas en una solución de sulfato.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

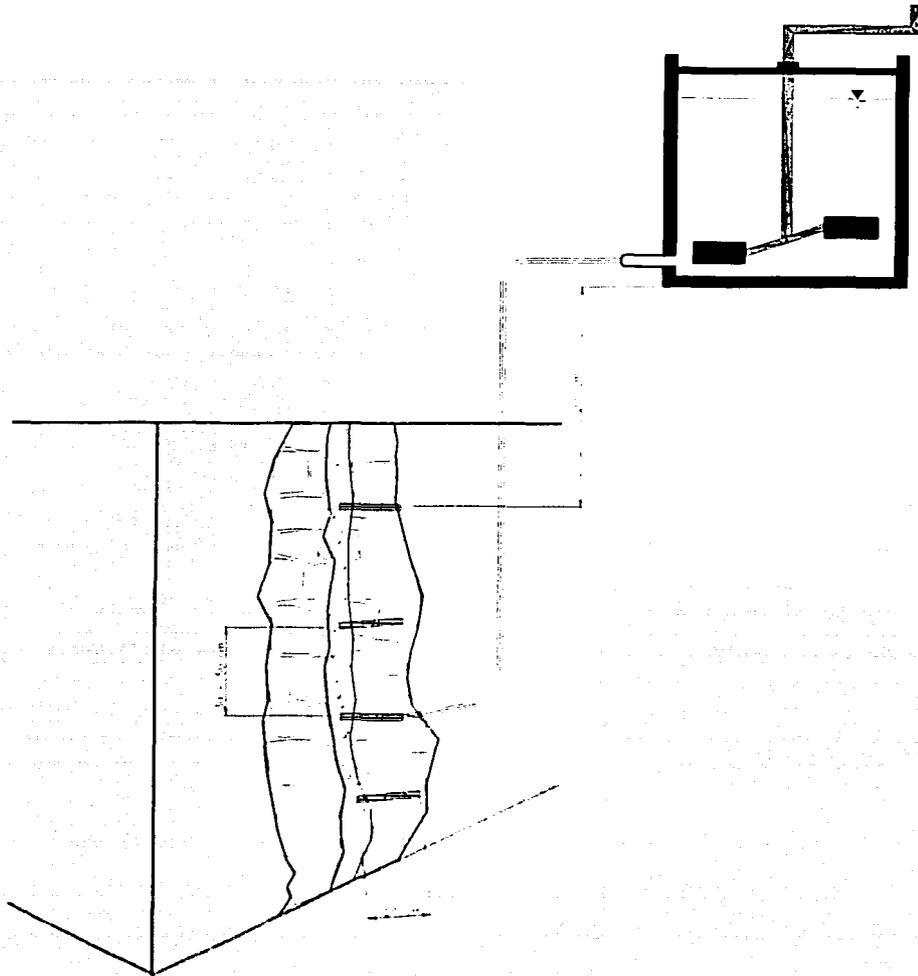


Fig. 50. Inyección de mamposterías por el método de gravedad

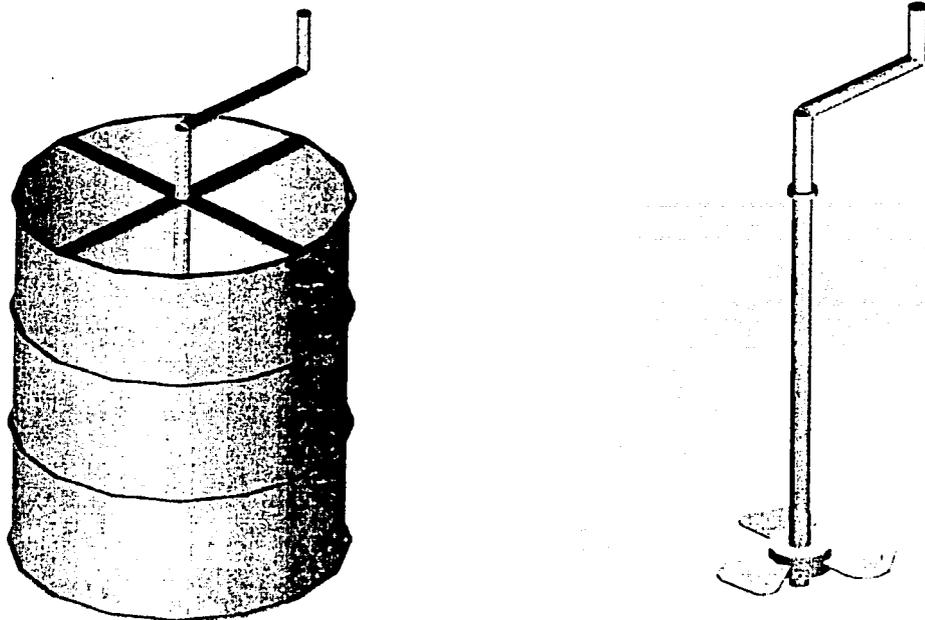


Fig. 51. Licuadora convencional de aspas



Fig. 52. Mezclador de remo para todo tipo de lechadas, con capacidades que van desde los 100 hasta los 1000 l de capacidad. (Ref. 38).



Fig. 53. Mezcladora impulsada por un motor de medio caballo de fuerza, diseñada especialmente para mezclar resinas epóxicas o cualquier tipo de mortero. (Ref.39).

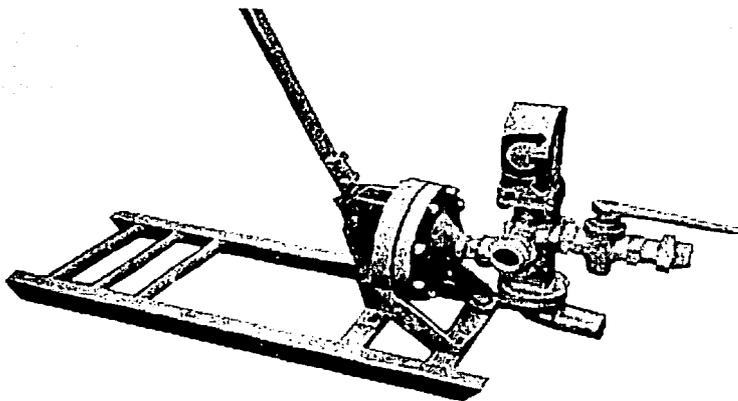


Fig. 54. Bomba manual con un rendimiento de hasta 22 l/min, con una presión de hasta 14 kg/cm². (Ref. 38).

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

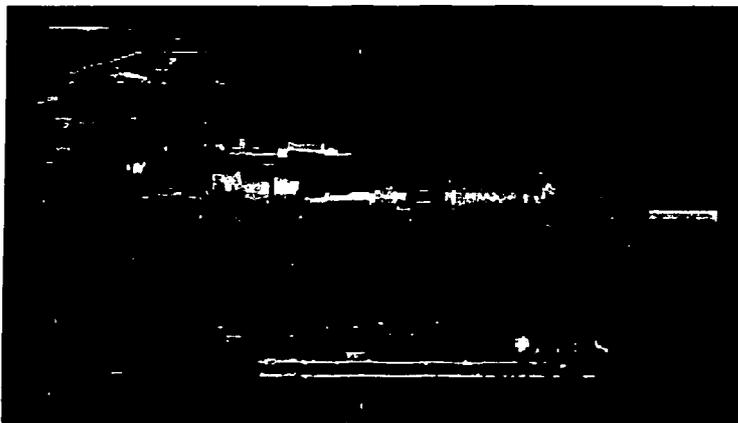


Fig. 55. Bomba centrífuga para todo tipo de lechadas (Ref.40)

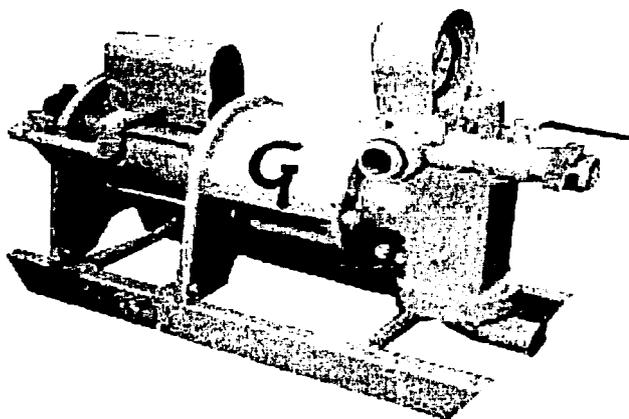


Fig. 56. Las bombas neumáticas de pistón ofrecen un rendimiento que va desde 55 l/min, hasta los 270 l/min, con presiones de 14 kg/cm² a 100 kg/cm². (Ref. 38).

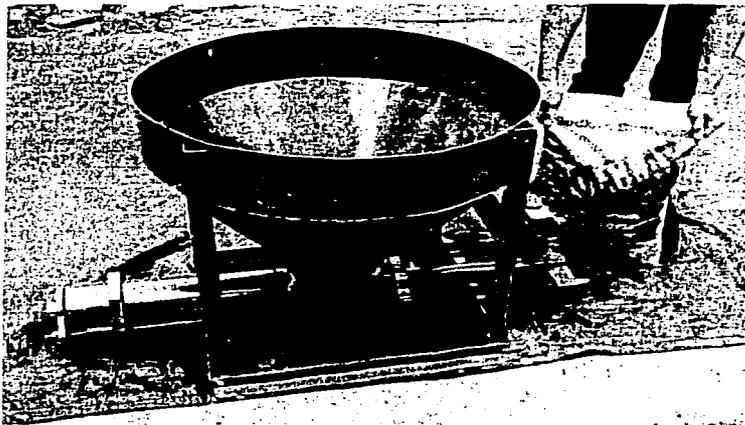


Fig. 57. Bomba de pistón diseñada para inyectar lechadas de cemento bentonita y concreto celular. (Ref. 41)

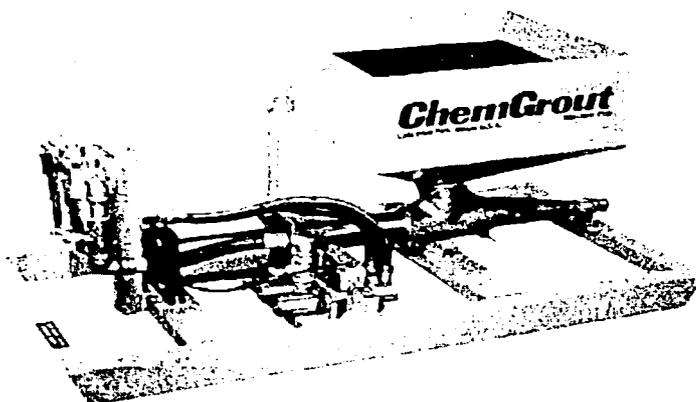


Fig. 58. Bomba de pistón con desplazamiento positivo de 3" para lechada (Ref. 42).

GLOSARIO

Álcali.- Cualquier sustancia que en disolución acuosa es amarga, más o menos irritante o cáustica a la piel. Cada uno de los óxidos, hidróxidos o carbonatos de los metales alcalinos, que pueden actuar como bases energéticas, debido a que son muy solubles en agua. compuesto químico que tiene carácter básico.

Azafrán.- Planta cuyos estigmas, de color rojo anaranjado, se usan para condimento.

Amina.- Cada uno de los compuestos orgánicos que se consideran formalmente derivados del amoniaco, por sustitución de uno o más átomos de hidrógeno por radicales alquilo, arilo, o de las dos clases: las aminas, según el número de átomos de hidrógeno sustituidos, pueden clasificarse en primarias, secundarias y terciarias.

Betún.- Crema o líquido para lustrar el calzado. Nombre genérico de varias sustancias, compuestas de carbono e hidrógeno, que se encuentran en la naturaleza y arden con llama, humo espeso y olor peculiar. Crema de distintos sabores con que se bañan los pasteles.

Borato.- Sal obtenida de la combinación del ácido bórico con una base.

Bromuro.- Combinación del bromo con un radical simple o compuesto: el bromo se obtiene por electrolisis de los bromuros.

Calostro.- Primera leche que da la hembra después de parir.

Caseína - Proteína de la leche que, al fermentar, forma el queso.

Carbonato.- Sal resultante de la combinación del ácido carbónico con un radical.

Cáustico.- Que quema o corroe los tejidos orgánicos.

Carbohidratos.- Cada uno de los compuestos formados por carbono, hidrógeno y oxígeno.

Centeno.- Planta gramínea de tallo delgado, hojas planas y estrechas y espiga larga. Grano de esta planta, empleado en la elaboración de bebidas y alimentos.

Cola.- Pasta viscosa que sirve para pegar.

Cetona.- Compuesto orgánico, líquido o sólido, que se obtiene por deshidratación de ciertos alcoholes y se usa como disolvente.

Cloruro.- Combinación del cloro con un metal, con un metaloide o con un radical orgánico: la sal que usamos en la cocina es cloruro de sodio.

Cuajada.- Parte grasa y espesa de la leche, que se separa del suero por la acción del calor, del cuajo o de los ácidos, y se toma como alimento: la cuajada con miel es deliciosa.

Exfoliación.- División de una cosa en láminas o escamas.

Enlucido.- Blanqueado para que tenga buen aspecto.

Ester.- Compuesto orgánico que resulta de sustituir un átomo de hidrógeno de un ácido por un radical alcohólico. *Las grasas son esteres de la glicerina con ácidos grasos.*

Estuco.- Masa de yeso blanco y agua de cola, con la cual se hacen y preparan muchos objetos que después se doran o pintan. Pasta de cal apagada y mármol pulverizado, conque se cubren las paredes o los muros, que se barnizan después con aguarrás y cera. Capa de yeso, estuco u otra mezcla que se da a las paredes para alisarlas.

Exotérmico.- Se dice del proceso en el que se desprende calor.

Fosfato.- Sal del ácido fosfórico, que se emplea como abono y como reconstituyente.

Fluosilicato.- Sal del ácido fluosilícico. H_2SiF_6 .

Friable.- Que se desmenuza fácilmente: la arcilla es un material friable.

Gel.- Sustancia gelatinosa en que se transforma una mezcla coloidal al enfriarse.

Glicerina.- Alcohol incoloro de tres átomos de carbono, viscoso y dulce, que se encuentra en todos los cuerpos grasos como base de su composición.

Gluten.- Sustancia albuminoidea, de color amarillento, que se encuentra en las semillas de las gramíneas, junto con el almidón, y tiene un alto valor nutritivo.

Hidrófugo.- Sustancia que evita la humedad e las filtraciones.

Hidrólisis.- Descomposición de sustancias orgánicas e inorgánicas complejas en otras más sencillas por acción de agua: la hidrólisis de una sal forma disoluciones ácidas o básicas.

Higroscópica.- Que tiene la propiedad de absorber o expulsar humedad de acuerdo con las condiciones atmosféricas.

Ion.- Átomo o grupo de átomos que, por pérdida o ganancia de uno o más electrones, ha adquirido una carga eléctrica.

Lignosulfatos.- Es un agente dispersante que cuando se añade a un medio de suspensión favorece la separación de partículas sólidas extremadamente finas.

Liquen.- Planta resultante de la asociación simbiótica de hongos con algas unicelulares. Crece en sitios húmedos, extendiéndose sobre las rocas o las cortezas de los árboles en forma de hojuelas grises, pardas, amarillas o rojizas.

Lluvia ácida.- Dicese de la precipitación, normalmente en forma de lluvia, pero también en forma de nieve o niebla, que presenta un pH del agua inferior a 5.65.

Malta.- Grano de cereal, generalmente cebada, germinado artificialmente y después tostado, que se emplea en la fabricación de bebidas alcohólicas, como la cerveza o el gúisqui, o como sucedáneo del café.

Melaza.- Residuo líquido espeso, dulce y oscuro, que resulta de la cristalización del azúcar.

Monómero.- Compuesto de peso molecular bajo.

Nitrato.- Sal que se obtiene por reacción del ácido nítrico con una base

Peróxido.- Óxido que tiene la mayor cantidad posible de oxígeno de los de su serie.

pH.- El valor pH de una solución acuosa es el número que describe su acidez o alcalinidad. El pH fue definido originalmente como el logaritmo negativo (base 10) de la concentración de iones hidrógeno (equivalente a un litro).

Polímero.- Compuesto químico de elevada masa molecular obtenido mediante un proceso de polimerización.

Polimerización.- Proceso químico por el cual mediante el calor, la luz o un catalizador, se unen varias moléculas de un compuesto para formar una cadena de múltiples eslabones de estos y obtener una macromolécula.

Policromía.- Cualidad de lo que tiene varios colores

Queratina.- Sustancia albuminoidea, muy rica en azufre, que constituye la parte fundamental de las capas más externas de la epidermis de los vertebrados y de los órganos derivados de esta membrana, como plumas, pelos, cuernos, uñas o pezuñas; la queratina es la responsable de la dureza y resistencia de los cuernos y uñas.

Revoco.- Enlucido de las paredes de un edificio o de un paramento.

Saponificación.- Hidrolizar un ester, fundamentalmente para fabricar jabones.

Sebo.- Grasa sólida y dura que se extrae de algunos animales y se utiliza para hacer velas, jabones, etc.

Sílice (sílica).- Dióxido silícico SiO_2 . Se presenta en la naturaleza como arena, cuarzo, pedernal, diatomita. Es tóxico por inhalación, exposición constante a los polvos, puede producir silicosis.

Silicatos.- Cualquiera de los compuestos que contienen silicio, oxígeno y uno o más metales con o sin hidrógeno. La mayoría de las rocas (excepto caliza y la dolomita) y muchos compuestos minerales son silicatos.

Siloxanos.- Compuesto de cadena lineal que consiste en átomos de silicio unidos por enlaces simples a oxígeno y dispuestos de tal manera que cada átomo de silicio este ligado a cuatro átomos de oxígeno.

Sisal.- Fibra flexible y resistente obtenida de la pita y otras especies de agave, que se emplea para fabricar cuerda, esteras, etc.

Sulfonación.- La sulfonación comprende todos los métodos de transformación de los compuestos orgánicos en ácidos sulfónicos o sulfonatos.

Tanino.- Sustancia ácida y astringente extraída del tronco de algunos árboles, como el roble y el castaño; el tanino se usa para curtir pieles.

Termoplástico.- Un alto polímero que se ablanda cuando se calienta y recupera su condición original cuando se enfría a temperatura ambiente. Este término se acostumbra aplicarse a productos sintéticos como cloruro de polivinililo, nylon, fluorocarburo, resinas celulósicas y acrílicas.

Termoestable.- Un alto polímero que se solidifica irreversiblemente cuando se calienta.

Tixotropía.- Propiedad de ciertos geles coloidales de licuar cuando se agitan por efecto mecánico o ultrasonido y recuperando en repos la forma de jalea. Esto se observa en pinturas o tintas de imprenta que fluyen libremente solamente cuando están sometidas a la acción de una fuerza.

Tolueno.- Hidrocarburo parecido al benceno, usado en la fabricación de la trilita y de ciertas materias colorantes: el tolueno se obtiene a partir del alquitrán de la hulla.

Trietanolamina.- Amina empleada en jabones grasos para la limpieza en seco, cosméticos, detergentes domésticos y una amplia variedad de emulsiones de aceite, agente antihumo e impermeabilizante textil, inhibidor de la corrosión, insecticidas, etc.

Urea.- Principio que contiene gran cantidad de nitrógeno y constituye la mayor parte de la materia orgánica contenida en la orina en su estado normal. Es muy soluble en agua, cristalizante, inodoro e incoloro: la urea se emplea en preparados farmacéuticos como pomadas.

Yute.- Material textil que se saca de la corteza interior de varios árboles oriundos de Asia y África.