

00582
/



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**“ PROPIEDADES MECÁNICAS Y DETERIORO DE
MATERIALES BASADOS EN ROCAS ÍGNEAS ”**

TESIS

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
DOCTOR EN CIENCIAS QUÍMICAS
(OPCIÓN INGENIERÍA QUÍMICA)**

PRESENTA:

ELIA MERCEDES ALONSO GUZMÁN

ASESOR:

DR. LORENZO MARTÍNEZ GÓMEZ

OCTUBRE 2002

**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.

3837

ESTA TESIS NO SALE
DE LA BIBLIOTECA

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES Y ENSEÑANZA DE QUÍMICA
CARRERAS DE QUÍMICA Y QUÍMICA INDUSTRIAL
CARRERAS DE QUÍMICA Y QUÍMICA INDUSTRIAL
CARRERAS DE QUÍMICA Y QUÍMICA INDUSTRIAL

A Wilfrido, porque el trabajo también es de él, con profunda admiración respeto y cariño.

A Wilfrido, Eduardo y Elia María, sin ellos no tendría sentido este trabajo y son los tres mejores regalos que Dios me ha dado.

Agradecimientos.

Quizá alguna de las personas que tan bondadosamente me ayudaron en algo, quede excluida de esta lista, ojalá de cualquier manera cuenten con mi agradecimiento.

A Ing. Servio Tulio Alonso Balboa, Ing. Elia Angélica Guzmán Morales (que ya está en el cielo) y Walquiria Cáceres Viaña, que cuidaron a mis hijos.

A Amalia Molinero Carabantes, sin su ayuda y apoyo, no hubiera concluido, así como a la Sra. Emelia Medina.

A Lorena, Servio Tulio nieto, Juan Carlos, Geraldina, Juan Carlos hijo, Emilio, Nacho, Cristy, Ana Cristina, Julieta, Ernesto y Miguel; por parte de los Alonso y por parte de los Martínez, mi familia política, a Gregorio (que también se nos adelantó al encuentro del Señor), María, Rocío, Leopoldo, Guare Rocío, Ricardo, Lourdes, Lourdes hija, Marisol, Ricardo hijo, Armando, Tere, Teresita, Jorge, Cuauhtémoc y Maru.

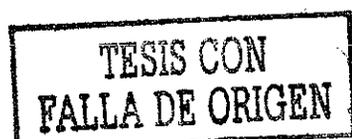
Al Dr. Lorenzo Martínez Gómez, asesor de esta investigación.

A La Universidad Michoacana, la Facultad de Ingeniería Civil, los programas Supera y Promep y la Coordinación de Investigación Científica, por su soporte financiero.

Al jurado revisor de la presente tesis, cuyos comentarios fueron tan valiosos para la consecución del objetivo, en riguroso orden de notificación: Dr. Joan Genescá Llongeras, Dr. Jorge Uruchurtu Chavarín, Dr. Liberto de Pablo Galán, Dra. María Eugenia Contreras García, Dr. Francisco Javier Rodríguez Gómez, Dr. José Luis Albarrán Gómez, Dr. Manuel Guadalupe Amaya Malpica.

A las personas que me prestaron asesoría técnica; Dr. Pedro Corona Chávez, Ing. Francisco Solorio González, Ing. Tarsicio Alfaro García, Dr. Jesús Porcayo Calderón, Dra. Georgina Izquierdo Montalvo, Ing. Julio César Viggiano Guerra, M. C. Aída López Hernández, Mtro. Rufino Lozano Santacruz, Mtra. Patricia Girón García, Dr. Miguel Ávalos Borja, Dr. Rafael Salgado Garciglia, Dra. Eva Luz Soriano Bello, Dr. Alejandro Carrillo García, Dr. José Reyes Gasga, Dr. Mikhail Ostroumov Fink, Dr. Luis Manuel Villaseñor Cendejas, Dra. Adriana del Carmen Wong, Ing. Osvaldo Francisco Campos Gallegos, M. C. Luis Elías Chávez Valencia, Dra. Patricia Torres, Mtro. Jesús Zauno García y Mtro. Rubén Hernández Guzmán.

Al Dr. Víctor Manuel Castaño Meneses por su coasesoría en el capítulo del Concreto.





Índice

Dedicatoria.

Agradecimientos.

Índice.

Resumen.

Abstract.

Hipótesis.

Objetivo.

1. Introducción.	1
Aspectos históricos y geográficos.	1
Aspectos geológicos de las ignimbritas y las andesitas.	3
El deterioro de materiales basados en rocas ígneas.	8
Nuevos materiales y procesos para la reparación de monumentos.	25
Las andesitas y el concreto.	26
Los morteros	27
La limpieza.	31
2. Deterioro ambiental de ignimbritas de la Catedral.	33
Introducción.	33
Metodología.	36
Resultados.	38
Discusión.	45
3. Concreto elaborado con agregados ígneos extrusivos, andesitas, de los bancos locales.	65
Introducción.	65
Metodología.	68
Experimentación.	69
Resultados.	72
Discusión.	78

4. Morteros para Restauración.	93
Introducción.	93
Metodología.	100
Experimentación.	100
Resultados.	102
Discusión.	106
5. Conclusiones y Recomendaciones.	123
Ignimbritas.	123
Concreto.	124
Mortero	126
6. Bibliografía	129

Resumen.

El trabajo inicia con una descripción del empleo de rocas ígneas extrusivas sanas en la construcción de obra de tipo civil y el deterioro de las ignimbritas de los monumentos en el centro histórico de Morelia, Michoacán.

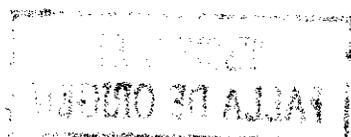
El segundo capítulo hace una descripción del mecanismo de deterioro de tipo antropogénico en las ignimbritas, rocas ígneas extrusivas ácidas abundantes en la región, y tomadas de la catedral. Los resultados de las ignimbritas dañadas se comparan con los obtenidos en muestras sanas de bancos provenientes de los alrededores. Determinado el deterioro se muestra que los bloques no deben ser reemplazados con bloques de ignimbritas sanas de las canteras aledañas estudiadas.

La humedad capilar de los elementos verticales en los monumentos provoca daños estéticos y mecánicos en las ignimbritas; en el capítulo tres se hace un estudio de concreto hidráulico con agregados pétreos del estado: arenas y gravas volcánicas naturales y trituradas, andesitas y basaltos. La relación A/C promedio fue 0.54 para obtener resistencias del orden de 250 kg/cm², las variables fueron las diferentes propiedades físicas y mecánicas de los agregados, así como la inclusión de fibras de vidrio en la matriz y aditivos químicos como fluidificantes, superfluidificantes, acelerantes, retardantes, reductores de agua, método de curado. El concreto diseñado tiene el objetivo de construir fosos perimetrales a los monumentos, que son rellenados con agregado pétreo en greña para evitar la capilaridad, expansiones, contracciones y hundimientos diferenciales.

En el cuarto capítulo se investigan los morteros de cal de albañilería con que se juntaron (adhirieron) los bloques de ignimbritas en los monumentos. Este capítulo nació como una propuesta de preservación, dado que las ignimbritas sanas no satisficieron los requisitos para reemplazar los bloques existentes en los monumentos. Los fosos cumplen ampliamente con su cometido para evitar la capilaridad, pero los bloques continúan expuestos al medio ambiente. Los morteros de cal son el único material permitido por los restauradores para la preservación; la bibliografía indica que los



aditivos empleados en la construcción de los mismos fueron lana de cordero, algodón, mucílago de nopal blanco, miel de colmena, sangre de ganado bovino, leche, crema de leche, leche ácida, manteca de cerdo, yema y clara de huevo. A la fecha el INAH indica que los morteros para restauración deben ser elaborados con mucílago de nopal.



Abstract.

This research began with the necessity of the best employment of the igneous extrusive stones in the civil engineering building and the stone decay of the ignimbrites from the ancient monuments from Morelia, Michoacan.

In the second chapter, it was written a description of the anthropogenic decay mechanism in the ignimbrites, acid regional igneous extrusive stones taken from the cathedral. The damage ignimbrite data were compared with the obtained from the healthy stone data from the surrounding quarry stones.

The damaged ignimbrite blocks should no be replaced with the blocks taken from the nearest quarry stones, because of their lower mechanical resistance.

The aesthetic damage in the walls was due to the capillarity and it diminishes the mechanical resistance, in the third chapter, the hydraulic concrete was studied to design concrete admixtures with aggregates from the nearby quarry stones. The igneous aggregates were andesitic volcanic stones and basaltic crushed stones. The W/C rate was 0.54 to get mechanical resistances of 250 kg/cm², the variables were the mineralogical composition of the stones, the reinforced matrixes of the concrete, the chemical additives like superfluidizers, fluidiziers, accelerants, water reducers, curing.

The objective of the designed hydraulic concrete was to build perimetrical fosses with gravel, around the buildings to avoid the capillarity and to improve the foundation mechanical resistance.

When the capillarity was solved it still continued to exist the problem of the preservation. The government authorities only permit to employ lime masonry mortars to preserve the ancient monuments. The fourth chapter studied the lime mortars, thus it is now not possible to replace the damage ignimbrite blocks with "healthy" stones, then the recent researches point to the use of organic additives to improve the mechanical properties of the mortars; additives studied were wool, cotton, honey, cactus sap, blood, milk, milk

Abstract

cream, pork lard, yolk and white of egg. The lime masonry mortars employed to restore the San Jose quart were cactus sap lime mortars, and of course permitted by the architects, historians and anthropologists.

Hipótesis de Trabajo.

1. El daño que presentan los edificios se suponía sólo debido a la humedad capilar de los elementos verticales de los monumentos.

Estudiando la resistencia mecánica, cohesión de la matriz, pudo demostrarse que no era la causa principal.

El daño es debido a condiciones meteóricas antropogénicas y de su génesis. Se colectaron todos los datos existentes en la única estación metereológica de la ciudad a partir de 1976 a la fecha, se realizaron estudios de calidad del aire. Los resultados apuntan a daño antropogénico; y se corroboraron con MEB, FRx, DRx, calcinación, resistencia con esclerómetro.

2. Los problemas de humedad en muros de monumentos provocan manchas típicas y sales de eflorescencia, no pueden ser eliminados con consolidantes químicos o cubiertas, el medio más efectivo para solucionar la humedad capilaridad y la provocada por la escorrentía pluvial es la construcción de fosos perimetrales de concreto, rellenos con agregado pétreo de diez pulgadas.

El reto se dirigió a diseñar mezclas de concreto hidráulico con agregados pétreos regionales, estudiando aditivos químicos que mejoren las propiedades mecánicas del mismo.

3. Eliminados los problemas de humedad capilar, continúa sin resolver el problema de partículas antropogénicas producto de la quema de combustible fósil, transportadas por el viento y depositadas en las fachadas exteriores de los edificios.

La investigación se dirige entonces a diseñar cubiertas protectoras que sean aprobadas por el INAH. Sólo se permite el uso de la cal como adhesivo, arena volcánica y mucílago de nopal como aditivo, sin embargo la literatura informa de aditivos de origen orgánico que actúan sobre las propiedades mecánicas de los morteros de albañilería de cal. Los morteros de cal pueden fácilmente reconstruirse y requieren poco mantenimiento.

Objetivo.

El presente trabajo está dirigido a la creación de conocimiento original y de relevancia para analizar el deterioro y los mecanismos que causan deterioro en las rocas ígneas extrusivas con que fue construida la Catedral de Morelia. Los factores principales que causan deterioro son los agentes antropogénicos, partículas que se depositan en la superficie formando pátinas y causando exfoliación; las partículas pueden también causar erosión mecánica sobre todo en las fachadas expuestas a los vientos dominantes; la humedad por capilaridad fomenta el crecimiento de cristales en los poros causando eflorescencia.

Inicialmente el objetivo sólo era determinar si existía daño o no, pero fue dinamizándose: se determinó el daño mecánico causado por la presencia de contaminantes atmosféricos que devitrifican la roca.

Determinado el daño, se amplió la investigación para encontrar el banco de ignimbrita aledaño que pudiera emplearse para la reposición y suministro de material pétreo. Ninguno de los tres bancos estudiados cumplió con los requisitos mecánicos sugeridos por el Reglamento de Construcción.

Como la primera hipótesis de trabajo fue el daño debido a la capilaridad del perímetro de los monumentos, y al no contar con material pétreo para substituciones, se pensó en una solución al problema de la capilaridad y hundimientos en los edificios. La respuesta es el empleo de fosos perimetrales de concreto. La investigación se dirigió entonces al diseño de mezclas de concreto que presentaran las mejores propiedades mecánicas. Se estudiaron diversos agregados pétreos, métodos de diseño, aditivos, formas de curado.

El concreto resuelve el problema de asentamientos diferenciales, capilaridad y humedades, pero el deterioro de las ignimbritas no sólo se presenta en las partes inferiores de los monumentos. El daño se observa en las diferentes fachadas y a muy diversas alturas, no deben restituirse bloques dañados con rocas sanas que no

Objetivo

presenten como mínimo la misma resistencia mecánica. La investigación se dirigió entonces a estudiar los morteros que se emplearon en la antigüedad, fue condicionante el empleo de cal como adhesivo y sus propiedades se mejoraron con el empleo de aditivos orgánicos existentes a la fecha de la construcción de los mismos.

El estudio de rocas sanas de los bancos aledaños, rocas provenientes de los monumentos, diseño de concreto hidráulico y mortero de cal, es una propuesta integral para la restauración y preservación de los monumentos histórico arquitectónicos del centro histórico de Morelia, Michoacán.

Capítulo 1.

INTRODUCCIÓN GENERAL

Aspectos históricos y geográficos

La Ciudad de Morelia.

Morelia, nombrada así en honor de José María Morelos y Pavón, es la Capital de la Entidad Federativa de Michoacán, llamada Michoacán de Ocampo; en honor de Melchor Ocampo. Fue fundada en 1541 por el Virrey Don Antonio de Mendoza [Tavera Montiel, 1999 y Ramírez Romero, E., 1994], conocida por los Purhépecha como Guayangareo hasta 1578, cuando por mandato del Rey Felipe II de España se cambió su nombre por el de Valladolid. La primera guerra entre los conquistadores y los nativos Purhépecha fue perpetrada por los españoles al mando de Don Cristóbal de Olid, provocando que los nativos fueran sometidos. En honor a esa batalla se conoció a la Ciudad como el Valle de Olid, o Valladolid, además hubo otra razón ya que el hijo de Carlos V nació en la ciudad castellana de Valladolid. El nombre actual, de Morelia, lo tiene a partir del 16 de Septiembre de 1828, según decreto del día 12 del mismo mes.

Acerca de la fundación de Morelia, “más atrás en el tiempo, más antes de que hubiera holladura humana en este sitio donde ahora es Morelia, más allá, donde la única memoria que nos ha llegado es la que arrojan las piedras y los estratos de la tierra, hubo en este lugar, ocupado casi seguramente por un gran depósito de agua, tremebundos cataclismos, horrorosas convulsiones, espectáculos hermosos pero terroríficos que produjeron bruscos levantamientos del terreno, repliegues, depresiones y hondonadas, fisuras y altas chimeneas llenas de fuego que arrojaban incesantes fumarolas de humo y de ceniza que hacían de los días, noches. Allí, donde alguna vez se agitaron las aguas al soplar de los vientos, surgieron elevaciones de tierra y rocas empujadas inconteniblemente por los jugos plutónicos formando espesas nubes de vapor, grietas y fosas que a su vez se cubrieron en diferentes momentos de cenizas volcánicas” [Tavera Alfaro, X., 1995]. De esta manera poética se hizo una descripción de la génesis de las canteras de ignimbrita que abundan en los alrededores de Morelia.

La Ciudad de Morelia fue declarada como Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO, dependencia de la ONU, lo cual significa que pertenece al Hombre y que tenemos el deber moral de preservarla para las futuras generaciones. La reunión en la cual se aprobó la solicitud para lograr la citada declaración, tuvo lugar los días 9 al 13 de Diciembre de 1991, en Túnez. Esta distinción internacional se obtuvo merced a la cantidad y calidad de los monumentos histórico-arquitectónicos ubicados en el Centro Histórico de la Ciudad, conocido también como Primer Cuadro.

A la fecha se encuentran totalmente inventariados los 1,113 monumentos arquitectónicos erigidos. Estos monumentos fueron construidos con ignimbritas de los bancos de cantera de los alrededores de la Ciudad y muestran particularmente un característico color rosa, lo que también le ha valido el nombre de Ciudad de las Canteras Rosas y Jardín de la Nueva España. Los monumentos de Morelia son de la época post-conquista, es decir son de la época colonial y por lo tanto ninguno de ellos cuenta con más de 500 años de edad.

La Ciudad de Morelia se encuentra localizada en el Noroeste del Estado y éste en la costa Pacífica de la República Mexicana. Su situación geográfica es justo en el cruce de la Sierra Madre Occidental (la mayor cadena montañosa del país), el Eje Neovolcánico o Cinturón Volcánico Mexicano y las Placas Tectónicas de Cocos y de Rivera. La orografía descrita es producto de la continua actividad volcánica y al mismo tiempo es precursora de las rocas ígneas extrusivas, que son las que nos ocupan en este trabajo.

Las ignimbritas han sido descritas de muy diversas maneras [Alonso, E. y L. Martínez; 1998, 1999, 2000 y 2001] y han sido ampliamente usadas en la construcción de obras civiles. De manera particular se han utilizado en la arquitectura colonial moreliana, en donde su uso en muros, marcos, dinteles, gárgolas, columnas, repisones, capiteles, arcos y claves está obligado en las construcciones y reparaciones de las obras que se realicen en el Centro Histórico, puesto que la Junta de Gobierno del Municipio de Morelia emitió un Bando donde queda tácitamente aceptado que no podrán construirse ni repararse los sitios y edificios sin emplear al respecto ignimbritas, entre otras restricciones de tipo arquitectónico.

Aspectos geológicos de las ignimbritas y las andesitas.

Las rocas son un material natural que ha sido fundamental en el desarrollo de la humanidad. La presencia del hombre en el planeta es relativamente reciente, en el Sistema Cenozoico, Serie Pleistoceno, Era Cuaternaria. La influencia de las rocas da nombre a una época, el Neolítico ó Nueva Edad de Piedra; en ella el hombre pudo tallar las rocas y por lo tanto mejorar su uso como material de defensa, cocina, herramienta de caza [Asimov, I., 1996] y material para construir viviendas.

Las rocas ígneas son las rocas jóvenes del planeta, son productos volcánicos. Las rocas ígneas en lo general pueden ser de tipo extrusivo o intrusivo. Son rocas ígneas extrusivas si fueron eyectadas en eventos volcánicos y son intrusivas si no existieron las condiciones termodinámicas de presión y temperatura en las cámaras magmáticas que las expulsaron y permanecieron, por lo tanto, dentro de la corteza terrestre.

Después de que las rocas ígneas fueron extruídas a la litósfera, al paso del tiempo y debido al meteorismo, algunas presentaron disgregación mecánica y fueron trasladadas a otros lugares por agentes eólicos, pluviales, fluviales, glaciares; algunas nuevamente se sedimentaron por la acción de la fuerza de la gravedad y se consolidaron por la presión suprayacente, dando lugar a las rocas sedimentarias, cuya composición mineralógica suele ser como la de la roca madre. Cuando las rocas ígneas están expuestas a metamorfismo por el intemperismo regional, suelen presentar migración de iones y cambios mineralógicos que dan lugar a nuevas especies mineralógicas que no están contenidas en la roca madre; son las rocas metamórficas.

Las ignimbritas son rocas ígneas extrusivas. Como son productos volcánicos, son también conocidas como flujos piroclásticos o lluvia de fuego, especialmente por nuestros ancestros que describían los eventos volcánicos como lluvia de fuego. Se les conoce como tobas, pues si el magma tiene una gran cantidad de agua, las explosiones violentas pulverizan el magma y ese polvo fino al sedimentarse en la superficie y consolidarse da lugar a las tobas o cenizas consolidadas. El nombre de riolitas lo toman

de su composición química. Las tres composiciones geológicas básicas son riolitas, dacitas y andesitas. Las riolitas contienen en promedio un 70% o más de sílice (SiO_2) y son rocas de tipo ácido.

Las ignimbritas son las más voluminosas de los productos volcánicos y son los más cataclísmicos de todos los fenómenos geológicos; pueden variar desde depósitos de cenizas incoherentes y texturalmente similares a los flujos de fango, hasta las tobas duras muy densamente soldadas. El nombre de ignimbritas es un término acuñado en la literatura inglesa e introducido en la literatura geológica por Marshall [Marshall, P., 1935] y da idea no sólo de la composición en función de su contenido de sílice sino también por la forma y extensión de la colada en el momento de la eyección volcánica. El término no sólo indica toba soldada, también indica el origen genético de su formación a partir de flujos o cenizas piroclásticos.

El soldamiento no puede ser considerado como una característica fundamental de las ignimbritas; también pueden definirse las ignimbritas como flujos pumicíticos piroclásticos independientemente del grado de soldamiento o el volumen de la colada. El que se formen de flujos de rocas o de cenizas incendiadas, ha dado también origen a los nombres de depósito de flujo pumíceo o espumoso o toba de flujo de ceniza, nombres menos comunes en ingeniería pero precisos en la nomenclatura geológica.

Las ignimbritas son productos volcánicos comunes siendo encontrados en todos los asentamientos volcánico tectónicos [Leet y Judson, 2000]. Como se mencionó: riolitas, dacitas y andesitas son sus composiciones usuales. Muchas de las ignimbritas más voluminosas son riolitas que tienen composiciones regionales y cuyas cubiertas indican la composición de las grandes cámaras.

En función de su volumen los rangos de las ignimbritas cubren al menos cinco órdenes de magnitud en volumen. Los estudios estratigráficos en las ignimbritas y los análisis interpretativos de sus erupciones frecuentemente indican una secuencia común de actividad: (a) fase pliniana que produce los depósitos de pumicita (espuma), (b) la fase del flujo piroclástico que produce ignimbritas y espumas piroclásticas y (c) la fase efusiva de lava. El modelado teórico muestra que el cambio de actividad pliniana a



formación de ignimbritas varía en función del radio de abertura, velocidad de los gases y contenido de H₂O [Wilson, L, 1976, y Sparks y Wilson, 1976]. Las ignimbritas más voluminosas han sido generalmente asociadas con erupciones de fisuras lineales o erupciones de fisura de anillo continuo. Las ignimbritas están usualmente asociadas con las calderas; el tamaño de las calderas guarda una relación directa con el tamaño de la ignimbrita asociada y también está relacionado con las dimensiones y profundidad de la cámara magmática.

El colapso de la caldera tiene lugar cuando la presión litostática en el techo de la cámara magmática excede la presión de la cámara por esfuerzos de compresión de la roca sobre yacente. En muchos casos las grandes erupciones provocan el hundimiento de las calderas dentro de las cámaras magmáticas, provocando fisuras anulares. La secuencia de erupción puede dividirse en dos fases: orificio sencillo y orificio de anillo de fisura. Un número importante de ignimbritas cuaternarias ha sido relacionado a orificios centrales por diferentes métodos, incluyendo mapeos de la distribución de los depósitos de pumicita co-eruptiva [Legros et al, 2000, Cas y Wright, 1988]

Durante los estados iniciales de una erupción altamente explosiva, la parte más ancha de la fisura ofrecerá la menor resistencia a la fricción a los flujos de magma o gases. La erosión más rápida tendrá lugar en estos sitios, posteriormente, acentuando el flujo hasta que la erupción esté confinada en este punto [Cas y Wright, 1988; Ferrari et al, 1999]

En años recientes ha sido aparente que los grandes volúmenes de ignimbritas deberían estar asociados con cenizas de co-ignimbrita y cenizas volantes muy propagadas que están sincronizadas con emplazamientos de las ignimbritas. Las ignimbritas muestran una marcada concentración de cristales libres diseminados en la matriz comparada con el contenido magmático juvenil. Esto puede ser atribuido a la gran cantidad de polvo vítreo que se perdió durante la erupción y el flujo piroclástico es entonces depositado en un depósito de co-ignimbrita de cenizas volantes. De los estudios de concentración de cristales, las ignimbritas muestran promedios de pérdidas de cenizas vítreas de al menos 35% del total de magma eyectado. Hay dos fuentes de

las cuales provienen la ceniza fina, como plumas convectivas, durante la erupción de las ignimbritas: a) encima del colapso de la columna y b) sobre el flujo piroclástico en movimiento. Cuando los flujos piroclásticos son generados por el colapso de la columna, la columna de convección fluye hacia el orificio, produciendo una gran erupción de columna y pequeñas nubes de ceniza fina que arriban hasta la pumicita en movimiento. Esto significa la pérdida preferencial de material amorfo en plumas convectivas que conducen a un incremento complementario en la proporción de cristales en la ignimbrita [Cas, 1988; Kirstein et al, 2001] .

Como las ignimbritas están emplazadas a muy altas temperaturas, el soldamiento, recristalización y alteración pueden ocurrir durante el período de enfriamiento. Pueden ser reconocidos tres procesos: soldamiento, condensación de la fase vapor y devitrificación.

En el soldamiento se juntan los fragmentos de pumicita caliente y los “shards” (bigotes o esquirlas) de cristal bajo carga compactacional. Los controles más importantes son: (a) la viscosidad del vidrio que depende de la temperatura y composición y, (b) la carga litostática que depende del espesor del depósito. El contenido de líticos en un depósito también afecta el desarrollo del soldamiento. Los estudios experimentales indican que el proceso de soldamiento inicia entre 600 ° C y 750 ° C para composiciones riolíticas, dependiendo de la carga de presión y el contenido de H₂O en el vidrio. De manera característica, cuando el soldamiento termina, se producen tres zonas: densamente soldadas, parcialmente soldadas y no soldadas. En las zonas soldadas comprimidas, frecuentemente los clastos de vidrio juvenil llamados “fiammes” y las esquirlas de vidrio definen la foliación de los planos o la textura eutaxítica. En la mayoría de los casos los fiammes parecen clastos pumicíticos aplastados, pero a veces pueden tener clastos juveniles no vesiculados [Cas, 1988]

El soldamiento está frecuentemente asociado con cambios de color distintivos, que se deben a los diferentes estados de oxidación del hierro. En las zonas columnares densamente soldadas las juntas de enfriamiento son muy notorias. Muchos estudiosos han registrado cambios sistemáticos con el peso y la densidad específica y porosidad en

ignimbritas soldadas. Típicamente, la gravedad específica tiene un máximo, donde la porosidad es mínima en la mitad central del depósito y esto corresponde a la zona de soldamiento denso. Algunos autores [Smith, 1960b] clasificaron las ignimbritas que muestran soldamiento simple como unidades de enfriamiento simples y Riehle, [Riehle, 1973] encontró que estas variaciones pueden ser predichas del análisis teórico del enfriamiento de un estrato, emplazado con temperatura uniforme. Como siempre, algunas ignimbritas tienen varias zonas de soldamiento denso y soldamiento parcial. Tales ignimbritas están clasificadas como unidades de enfriamiento compuestas. Esto sugiere que las partes superiores de las unidades de flujo tempranas de las ignimbritas deben estar parcial o totalmente enfriadas antes del emplazamiento de unidades de flujo posteriores. Debe tenerse cuidado cuando se describen las unidades de enfriamiento compuestas, pues pueden también estar constituidas de un número de ignimbritas separadas por largos intervalos entre sus erupciones. Las ignimbritas que muestran zonas bien desarrolladas de soldamiento denso y en las cuales la proporción de soldamiento es alto, pueden ser ignimbritas terminadas de alto grado, en contraste con las de bajo grado que son totalmente ignimbritas no soldadas o de las cuales sólo una pequeña porción están soldadas. La temperatura de emplazamiento de las ignimbritas es por lo tanto muy variable, Smith [Smith, 1960a] consideraba que los procesos dentro de la columna eruptiva debían ser los responsables y Sparks, [Sparks, 1976] explicó esto por el modelo de colapso de la columna eruptiva. Erupciones con pequeños contenidos de gas y pequeñas velocidades de gas conducirán a pequeños colapsos de peso y pequeñas pérdidas de calor durante el colapso, que favorecerán la formación de una ignimbrita densamente soldada. Esta condición también conducirá a los menores flujos expandidos que podrían perder solo pequeñas cantidades de ceniza vítrea, como se aprecia en los casos de muchas ignimbritas de intracaldera bien soldadas.

La condensación de la fase vapor, resulta al percolar gases calientes a través de las ignimbritas durante el enfriamiento. Los principales productos de la condensación de la fase vapor son tridimita, cristobalita y feldespatos alcalinos, que ocurren cuando los gases cargados de sílice se infiltran en la matriz y las cavidades pumíceas, formando cementante o reduciendo el espacio de poros. La cristalización puede producir una roca coherente; la palabra sillar se usa para esas rocas, y también se aplica a tobas incipientemente soldadas, en las cuales los granos de ceniza están escasamente

sinterizados en puntos de contacto y no muestran otra deformación de los clastos juveniles; pueden también ocurrir en zonas separadas en ignimbritas soldadas o compactadas, y se encuentran comúnmente hacia la parte de arriba del estrato.

El deterioro de materiales basados en rocas ígneas.

Una extensa revisión bibliográfica, que incluyó el análisis de poco más de 210 citas, indica que con anterioridad a la realización de la presente investigación no existían publicaciones especializadas sobre el deterioro de las ignimbritas, rocas ígneas extrusivas regionales con las que se construyeron los 1,113 monumentos arquitectónicos catalogados en el Centro Histórico de Morelia. Sin embargo, existen factores que influyen en el deterioro de las rocas que han sido estudiadas como mármol, caliza, arenisca y granito [Robert et al, 1992; Sweevers et al, 1995; Haneef et al, 1993; Haneef et al, 1992]

Básicamente, las causas del deterioro pueden clasificarse en antropogénicas, que fueron inducidos por la actividad humana, como la quema de combustibles fósiles [Bishop et al, 1997]; la formación de pátinas reactivas [Del Monte et al, 1984; Baedecker et al, 1992; Sáiz-Jiménez, 1993; Pérez-Rodríguez et al, 1994; Realini et al, 1995; Leysen et al, 1989 y Fassima, 1978; Coursimault et al, 1995]; así como factores atmosféricos o meteóricos, tales como lluvia, sol y congelamiento [Haneef et al, 1992]

También son causas del deterioro la inyección de agua por capilaridad, y las consecuentes eflorescencia y recristalización que provocan grietas que se propagan a lo largo de planos de falla provocando exfoliación y pérdida de masa [Yocom, J.E., 1979; Amoroso, G.G. y Fassima, V., 1983].

En las rocas, el deterioro básicamente afecta la resistencia mecánica y la estética. Se estudia la posibilidad de proteger los elementos verticales, fachadas, de los monumentos con morteros de cal de base orgánica (sangre, leche, mucílago, huevo, algodón, lana de cordero, grasa) [Colloque International, 1978; Sherwood, 1999;

Charola y Henriques, 1999; Thompson y Groot, 1999; Fontaine et al 1999; Alonso et al, 2001]

Los productos principales son cristobalita y feldespatos alcalinos. La devitrificación tiende a ser más prevalente en tobas densamente soldadas y particularmente en los espesores de ignimbrita de intracaldera por su enfriamiento prolongado.

El deterioro de los edificios antiguos se ha estudiado muy ampliamente en calizas, areniscas y mármoles, que son más abundantes en Europa Occidental y la costa Atlántica del Continente Americano. En la costa Pacífica de nuestro territorio nacional abundan las rocas ígneas. Sin embargo pueden describirse procesos comunes que deterioran las rocas de los monumentos.

Se han realizado estudios acerca de las condiciones ambientales en el deterioro de los monumentos europeos. Mayormente, la atención está dirigida a los efectos del deterioro inducido antropogénicamente [Leysen et al, 1989 y Fassima, 1978]. El deterioro antropogénico es el inducido por el hombre, en este caso por el uso de vehículos que emplean combustibles fósiles y cuyo uso se ha generalizado a partir de la segunda mitad del siglo XX. [Coursimault et al, 1995]. Es ampliamente aceptado que los porcentajes de deterioro se han acelerado desde los últimos 50 años. Cuantificar los porcentajes de deterioro de los diferentes tipos de rocas encontrados en edificios históricos es un importante paso en la formulación de estrategias para reducir el deterioro. Se ha observado que las diferencias en orientación con respecto a la prevaleciente dirección de intemperismo y la topografía local deben tener un gran efecto. Comparando la pérdida de masa pétreo sobre casi todos los sitios y casi todos los periodos de exposición, la caliza tuvo la mayor pérdida (244.9 gr/m²) seguida por el mármol (197.7) y la arenisca (177.7) [O'Brien et al, 1995].

En nuestro caso, la catedral de Morelia, los contaminantes atmosféricos provienen principalmente del uso de vehículos automotores que funcionan con combustibles fósiles. Por el clima prevaleciente en la región, su latitud y longitud, es mínimo el uso de calefactores que emplean carbón mineral como combustible.

En una época los muros de las fachadas de los edificios del centro histórico estuvieron recubiertos con morteros. Cuando se decidió el retiro de las cubiertas de mortero de albañilería de los edificios del centro histórico, el control de calidad para la emisión de contaminantes atmosféricos era aún deficiente.

Desde los modelos automotores modelo 1995, se están emitiendo 75 % menos CO, 70 % menos HC y 65 % menos NO que los modelos anteriores [Bishop et al 1997] y desde el período 1991-1994, México ha instituido muchas nuevas iniciativas para reducir las emisiones ligeras incluyendo un agresivo programa para renovar el parque vehicular de los carros de alquiler y una fase nacional de reducción de estándares de emisiones para los nuevos vehículos de gasolina comenzando a partir de los modelos 1989 [Diario Oficial de la Federación, 1993]. A partir de 1999, el Instituto Mexicano del Petróleo inició un intenso programa de investigación tendiente a minimizar en lo posible las emisiones de contaminantes que han disminuido de entre 600 y 800 ppm de azufre a menos de 500 [Schifter, 2000]. Morelia no es una ciudad con gran número de industrias; la mayor parte de los contaminantes provienen de los vehículos automotores y del servicio público de transporte, teniéndose un total de 250,000 vehículos por día en la Ciudad, esto incluye a los vehículos que emplean diesel; esto también ocurre en otros sitios turísticos en el mundo, como lo mostró el Programa Nacional Italiano de Energía para 1989, que informó que ~50 % del polvo es debido al sector transporte [Realini et al, 1995]

La composición mineralógica de los depósitos en pátinas en monumentos es consistente con el polvo, siendo una combinación de 10-20% de polvo local, 9-17% producto del deterioro del techo de la caverna o pared y un promedio de 53% de polvo de la combustión de los vehículos de los caminos cercanos (que pueden variar del 27 al 92 %) [Salmon et al, 1995].

Los patrones espaciales de emisiones muestran que Estados Unidos, Rusia y China eran los principales emisores de azufre (casi el 50 % del total mundial) en los años noventa. Las emisiones azufrosas han disminuido con empleo de combustibles de bajo contenido de azufre [Lefohn et al, 1999]

Los contaminantes ambientales en la atmósfera urbana son varios y numerosos, y causan serio daño a los monumentos históricos. Los procesos de deterioro y transformación de los diferentes componentes del material son mayormente debidos a contaminantes con azufre, metales pesados, alquenos de la combustión de petróleo, residuos animales, hongos, etc., todos ellos por las condiciones ambientales. El principal proceso de alteración ocurre en la superficie del material. Estudios diferentes han mostrado que las capas superficiales de los materiales ornamentales pueden contener muchos compuestos del medio ambiente y/o de los procesos de alteración [Del Monte et al, 1984; Baedecker et al, 1992; Sáiz-Jiménez, 1993; Pérez-Rodríguez et al, 1994]

De los constituyentes producidos por la quema de combustibles fósiles, NO_x y SO_2 son los más potentes en el deterioro de las rocas. Durante los periodos secos, ambos se acumulan como materia en partículas sobre la superficie de las rocas y son activadas por periodos subsecuentes de humedad [Lal Gauri y Holdren, Jr, 1981]; el más abundante de los compuestos del nitrógeno en ambiente de aire es el NO_x . Sus efectos adversos en rocas calizas y su sinergismo con otros contaminantes, como el O_3 , han sido estudiados [Haneef, J. S., et al 1993]. La presencia de nitritos, como siempre, indica que en cada caso las rocas reaccionan, al menos parcialmente, con los productos de la reacción $2\text{NO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{HNO}_3 + \text{HNO}_2$. [Lee y Schwartz, 1981] El NO_2 y las partículas suspendidas tampoco permanecen invariables y se incrementan [Cobourn, et al 1993]

La cristalización del yeso autigénico bajo la superficie del material, afecta las rocas carbonatadas (caliza, mármol, arenisca con cemento carbonáceo, etc.) expuestas a la contaminación atmosférica. Este mecanismo ha sido experimentalmente reproducido, revelando el importante rol que juega el SO_2 incrementado por la presencia de NO_2 , O_3 [Haneef et al 1992] y la alta humedad relativa [Spiker et al 1992]

Las cenizas volátiles emitidas por la quema de combustibles pesados son altamente reactivas, conllevando transformaciones químicas y morfológicas que aumentan el crecimiento cristalino, especialmente del yeso [Ausset et al 1999]. Se han realizado estudios de la composición química de la precipitación sobre intervalos extendidos de tiempo, para detectar modificaciones causadas por el incremento de las

actividades humanas, pero ha sido difícil mostrar tendencias debido a las amplias variaciones observadas en la composición de agua de lluvia [Colin et al 1990]

Los mecanismos por los cuales los contaminantes del aire dañan los materiales pueden clasificarse como:

Abrasión. Las partículas sólidas de tamaño suficiente viajan a grandes velocidades y pueden causar abrasión destructiva.

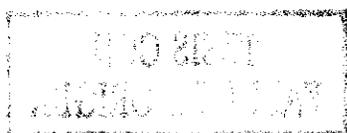
Deposición y remoción. Las partículas sólidas depositadas sobre una superficie pueden no causar ningún daño directo, otras causan decoloración, pero la remoción del depósito causa algún deterioro. Además, la presencia de partículas de basura en una superficie aumentan los efectos producidos por los gases contaminantes provocando un gran número de centros de reacción.

Ataque químico directo. Algunos contaminantes atmosféricos reaccionan irreversiblemente con las superficies causando daño; por ejemplo los óxidos de azufre, especialmente el trióxido de azufre (SO_3) puede reaccionar directamente con el mármol o la caliza (CaCO_3) para producir yeso.

Ataque químico indirecto. Ciertos materiales absorben contaminantes y se dañan cuando los contaminantes se someten a cambios químicos. El dióxido de azufre (SO_2), por ejemplo, en contacto con humedad se convierte en ácido sulfuroso, $\text{SO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}_2\text{SO}_3$ [Genescá, 2002].

Corrosión electroquímica. Los gases ácidos como el dióxido de azufre (SO_2) y el trióxido de azufre (SO_3), en presencia de humedad aumentan la superficie conductora de hierro, acero y otros metales, acelerando la corrosión.

Otras condiciones ambientales que fuertemente influyen el daño a los materiales:



Humedad; como se hizo notar antes, la humedad se requiere para causar la corrosión del hierro y acero. Las muestras de acero en ambientes secos que contienen dióxido de azufre no se corroen.

Temperatura. Cualquier reacción química de deterioro se incrementará con la temperatura, además, una superficie que está debajo de la temperatura del punto de rocío causará condensación en la superficie y aumentará la reacción con gases contaminantes solubles.

Congelamiento y deshielo; si las temperaturas están por debajo del punto de congelamiento del agua, los ciclos de congelamiento y deshielo causan grietas y exfoliación de las rocas, exponiendo nuevas superficies a los contaminantes reactivos [Yocom, 1979].

Los efectos de las sales en los monumentos son principalmente causados por los subsecuentes procesos de cristalización y disolución de la materia soluble, que causan cambios volumétricos en las rocas. El daño por sales ocurre siempre que los cristales sean depositados de alguna solución o cuando los cristales absorben agua y son transformados a un estado de hidratación mayor. Esto puede ocurrir como resultado de los cambios de la humedad relativa del aire. Los ciclos subsecuentes de disolución y cristalización, junto a la hidratación y deshidratación de las sales, susceptibles a la cristalización con un número diferente de moléculas de agua causando esfuerzos en la roca, dan por resultado una disgregación y desmoronamiento (desmigajamiento) de la superficie expuesta y la formación de hojas de exfoliación [Amoroso y Fassima 1983] Los cristales crecidos en los poros de la roca son inversamente proporcionales a la densidad de la misma [Jacobs et al 1995]; los hoyos de lombriz (bioturbaciones) y los canales cubiertos de 1 mm y más largos pueden ser fácilmente distinguibles sin equipo alguno [Griffiths y Roberts 1999] pero la macroporosidad y densidad pueden ser calculadas con secciones transversales, mientras se infiltran las soluciones colorantes para mostrar la continuidad de los poros [Peyton et al 1992]

Cuando los cristales crecen dentro de los poros y su tamaño es tal que no caben dentro de él, lo fracturan y producen microgrietas que se propagan en forma

tridimensional. El daño por microfisuramiento es la causa principal de la deformación no lineal y la falla de materiales frágiles como las rocas, concretos y compósitos cerámicos. El crecimiento de las microfracturas puede también ocurrir de manera independiente del tiempo, aún si los esfuerzos aplicados son menores que en el corto período del límite elástico, mayormente debido al fenómeno de esfuerzos de corrosión. En otras palabras, un material poroso inicialmente isotrópico puede convertirse en un material anisotrópico si las microgrietas inducidas por esfuerzos están generalmente orientadas en algunas direcciones preferenciales. Tales leyes de variación pueden ser determinadas tanto empíricamente, de datos de laboratorio, como teóricamente de análisis micromecánico [Shao, 1998]. Este crecimiento de la grieta dependiente del tiempo, es comúnmente llamado crecimiento sub-crítico [Atkinson y Meredith, 1987], las microgrietas mencionadas se propagan con mayor rapidez en materiales con presencia de agua; por ejemplo, la presencia de agua puede acelerar la propagación sub-crítica [Lajtai et al 1987].

Pueden existir grandes diferencias en la exposición a la contaminación en dos fachadas del mismo edificio. Los efectos físicos dominan en los poros pequeños y los efectos de solución en los grandes. La porosidad, la forma geométrica y la exposición de las piedras son también factores importantes que pueden caracterizar diferentes balances locales y consecuentemente la forma de meteorismo. Aparentemente, la acción de los vientos es frecuentemente incluida; por ejemplo, la formación de picaduras y hoyos profundos interconectados con pérdida de material granular es muy común en biocalcarentas, donde el agua de lluvia disuelve y debilita las uniones entre los granos o los ciclos seco-húmedo favorecidos por la acción del viento y la radiación solar que causan solución, movilización y recristalización o crecimiento de sales internas, con el consecuente rompimiento de la estructura interior. La erosión eólica, también llamada 'corrasión', ocurre cuando partículas abrasivas se impactan con gran energía en una roca durante largos períodos causando un extenso daño micromecánico, que eventualmente redundará en efectos macroscópicos. La energía de la partícula es linealmente proporcional a su densidad, proporcional en segunda instancia a la velocidad del viento y en tercer lugar a su diámetro. El arrastre dominante de las moléculas atmosféricas es teniendo la masa ($M_N = 28$ y $M_O = 32$) mayor que las moléculas de vapor ($M_V = 18$) [Camuffo, 1995]. En el análisis y diseño arquitectónico

nunca debe perderse de vista la exposición de las fachadas del edificio a los vientos dominantes [Riley, et al 1998], ya que el no hacerlo ocasiona que en un mismo edificio se presenten zonas de alto, medio y nulo deterioro [Felden 1982]. Los principales contaminantes asociados con la precipitación ácida son partículas de SO_4^- y NO_3^- , y HNO_3 y SO_2 gaseosos. Puede haber, entonces, grandes diferencias en la contaminación entre dos caras expuestas de un mismo edificio [Dolske, 1995]

Puede decirse que dependiendo del tipo de roca empleado en la construcción un edificio es susceptible al deterioro en la roca en las formas de desintegración granular, incrustaciones oscuras y otras como resultado de una combinación de ambos factores: físicos (ambiente húmedo, orientación de los edificios hacia el sol y humedad dominante) y químicos (flujos deposicionales secos y húmedos de contaminantes, no obstante en concentraciones moderadas). El flujo de los contaminantes a través del sendero de la humedad deposicional no afecta en mucho las áreas de máxima recepción. La distribución de estas áreas susceptibles no sólo depende de la dirección y velocidad del viento, temperatura y humedad durante y después de las precipitaciones sino también en las estructuras de las fachadas [Lammel y Metzsig 1997]

Los mecanismos por los cuales los contaminantes atmosféricos, especialmente la reciente precipitación ácida y los contaminantes del aire son los causantes de la aceleración de los procesos naturales de deterioro [Petuskey et al 1995; Cooke y Gibbs, 1994]; el deterioro superficial de los monumentos muestra un gradiente de la superficie hacia el interior de los bloques de roca, respecto a la presencia de Azufre [Ausset et al 1996]

La velocidad de depositación de SO_2 para superficies húmedas de mármol es un orden de magnitud más grande que la depositación en una superficie seca del mismo material bajo circunstancias comparables. [Spiker et al 1992]. Para el cálculo de la concentración de SO_2 atmosférico, no se toman en cuenta la velocidad del viento ni la humedad relativa [Torfs et al 1997; Skoulikidis, 1993]

Procesos geoquímicos importantes incluyen la disolución y precipitación, adsorción superficial de minerales y comportamiento químico de los elementos mayores

como carbón, hierro, silicio y azufre. El conocimiento geoquímico ambiental de los metales traza en la superficie de la tierra ha sido incrementado por los numerosos y bien controlados experimentos de laboratorio. El interés detrás de estas investigaciones es estudiar sistemas simples para mejor entender los sistemas naturales y contaminados más complejos [Carrol et al 1998; Rimstidt et al, 1994]. La catálisis microbiana es otro proceso importante; la oxidación sulfídica de la bacteria no prospera arriba de pH 4 [Nordstrom, 1982]

El deterioro de los edificios se debe también, en menor medida, a los llamados bioaerosoles, aerosoles, sales marinas y suelos volátiles. Pensando que la contaminación interior puede ser causada por multitud de contaminantes, las historias del caso indican que los problemas agudos de contaminación interior, también llamadas “síndrome de edificios enfermos” son generalmente debidas a bioaerosoles [Indoor Pollution News, 1994], virus, hongos, bacterias, en forma de partículas ambientales. Los bioaerosoles incluyen partículas ambientales de bacterias, virus, hongos, esporas, pólenes y fragmentos de plantas e insectos, etc. [Poruthoor et al 1998]. (1) Los aerosoles antropogénicos que afectan el posible cambio global y (2) los efectos de la lluvia ácida en el medio ambiente, han impulsado el interés en la transformación y el destino del azufre en la atmósfera. Teóricamente los aerosoles tienen la habilidad de enfriar la atmósfera y así, las partículas antropogénicas azufrosas pueden ser un importante factor en el sistema climático. Su influencia regional puede ser relativamente pequeña, o quizá contar con el efecto entero de calentamiento de invernadero en el hemisferio norte [Charlson et al 1992].

El spray marino es la mayor fuente natural de partículas en aerosol en la atmósfera. Las partículas salinas marinas en la atmósfera, se originan de la ruptura de las burbujas en las olas. En promedio, una burbuja se rompe en la superficie del océano cada 1 a 10 cm²/seg. La cantidad de aerosoles marinos anualmente, alcanza una cantidad de 10⁹ a 10¹⁰ m³ [Monahan, 1986]; una vez que son formadas, las burbujas se colapsan porque la energía superficial es transformada en energía cinética. Se piensa que mientras las burbujas con un diámetro menor de 0.3 mm no producen capas de gotas, una burbuja de 6 mm puede crear un millar de gotas. Las composiciones de estos dos tipos de gotas reproducen substancialmente la del agua del mar en que el 3.5 % del

peso es sal marina, la mayor parte de la cual (sobre el 85 %) es cloruro de sodio. Estimando la cantidad de aerosoles marinos que son formados anualmente, se tiene una cantidad de 10^9 - 10^{10} toneladas métricas. Puede ser así mismo establecido que las sales de origen continental son más comunes en partículas que son depositadas durante el verano. Los cloruros y sulfatos son encontrados sólo de entre 2.5 a 5 μm a más de 50 μm . Las superficies expuestas son afectadas en particular por los siguientes fenómenos: (a) deterioro diferencial, debido a características diferentes texturales del mármol, (b) disgregación granular, causado por separación de los cristales que carecen de cohesión intercrystalina, (c) corrosión, ligada al ataque de las superficies expuestas que sufren un proceso químico de deterioro, (d) fisuras (grietas lineales) de 1 cm a > 10 cm de longitud y unos pocos mm de espesor (hojuelas de roca o exfoliación) [Zezza y Macrí, 1995], la zona de superficie de actividad química varía de 2-5 mm [Cheng y Castillo, 1984]

Los suelos volátiles son partículas que pasan la malla No 200 ASTM y que conforman una pequeña pátina en el globo terrestre [Juárez Badillo y Rico Rodríguez, 1981] y generalmente son minerales producto del metamorfismo que requieren diversas técnicas para su caracterización [Goldstein et al 1996; Schiavon y Zhou, 1996]

La presencia de suelos o arcillas en las rocas ígneas o ignimbritas es un indicio claro del metamorfismo. Cuando las ignimbritas fueron eyectadas al medio ambiente que tenía una temperatura ambiente de aproximadamente 25 °C, el magma siálico (con silicio y aluminio) tenía temperaturas del orden de los 1,000 °C y se presentó un choque térmico; el choque térmico dió por resultado que la fase predominante en éstas rocas ígneas sea la fase vítrea. La naturaleza no acepta lo imperfecto y el vidrio al ser un material amorfo, lo es. La naturaleza solo ofrece materiales con acomodados cristalinos o perfectos. Se tiene el caso del hierro; la naturaleza no lo provee como tal, existe como un óxido, entonces aún cuando el hombre trata de aislarlo, la naturaleza trata de perfeccionarlo, corroyéndolo (oxidándolo) y convirtiéndolo de nuevo en un material que exista de manera natural. El mismo fenómeno ocurre en la matriz de las rocas ígneas, el vidrio se devitrifica convirtiéndose en arcillas. Las arcillas son materiales cristalinos y son al mismo tiempo minerales metamórficos de enlace iónico. Se les conoce como

arcillas en el campo de los materiales y como suelos en ingeniería. Cuando se detecta la presencia de arcillas en las ignimbritas es un indicio de metamorfismo y ocurre por el ataque del ambiente, meteorismo, sobre las rocas. Las arcillas son materiales laminares higroscópicos cuya detección y cuantificación requiere de sofisticación o en su defecto que su presencia sea mayor al 5 % del total del material analizado, en caso contrario, su presencia no es detectable; los picos del difractograma sólo revelan fases si tienen > 5 % masa [Reardon y Della Valle, 1997]

En ciertos casos, como el de las arcillas, el agua puede alterar la estructura del material, causando expansión, esfuerzos y fracturas. La estructura cristalina está compuesta por series de hojuelas y los iones positivos frecuentemente están atrapados entre las hojuelas o láminas. Cuando la humedad relativa disminuye el agua adsorbida se evapora. La contracción provoca histéresis y a lo largo los ciclos de adsorción- evaporación causan daños irreversibles. [Torraca, G., 1981]. Las arcillas minerales son agentes activos para limpieza de mantos contaminados debido a su singular acomodo atómico y su espacio interlamina. La caolinita, beidellita y nontronita son las más activas arcillas en los suelos, la goetita y el alofano, son las menos activas. Las esmectitas son montmorillonita, nontronita y beidellita. [Xu, S., et al 1998]

La identificación estructural y aún la detección de cantidades traza de arcillas como montmorillonita por difracción y fluorescencia de Rx es difícil, así como la identificación de sus cationes (Ca, Mg, Fe, Al, Na, K) [Solebello, L., 1999]. La técnica de fluorescencia de energía dispersiva de rayos X ha sido muy valiosa para evaluar suelos (arcillas) [Goldstein et al, 1996], pero debido a las marcadas diferencias entre los estratos de los suelos, generalizar acerca de la velocidad y extensión de la secuestación o invasión de los mismos no es todavía posible [Chung y Alexander 1998].

Las primeras lluvias limpian los contaminantes acumulados resultando en relativamente altas concentraciones iónicas. Es razonable asumir que las mayores concentraciones iónicas ocurren durante las primeras lluvias de mayo y después de periodos secos [Saylor et al, 1992]. En el D.F. se asume que el SO₂ y el NO_x son importantes precursores de SO₄²⁻ y NO₃⁻/NO_x y SO₄²⁻/SO₂. El sulfato fue el más

abundante ión en todas las muestras de agua de lluvia, seguido de NH_4^- y NO_3^- . [Báez et al 1997]

El HNO_3 gaseoso es más corrosivo que el NO_2 para los monumentos de mármol [Kirkitsos y Sikiotis, 1996]

Cuando se analizan los procesos de biodeterioro en una escala urbana, los dos parámetros ambientales prominentes son primero el bioclima, aquí observado como la distribución estacional y el rango de lluvias y temperatura, y segundo el porcentaje de contaminación [Caneva et al 1995]

El agua de lluvia sube por capilaridad a las rocas de los elementos verticales (muros) de los edificios históricos apreciándose como manchones oscuros; se ha observado en algunos edificios una distribución bimodal del tamaño de los poros, en la cual los poros mayores proveen rutas para la transferencia de masa convectiva de contaminantes dentro del material y los poros pequeños conducen a altas adsorciones de área superficial y sitios de reacción [Leith et al 1996]. Los materiales hidratados presentan dificultad para su observación microscópica electrónica. La identificación mineral es uno de los mejores caminos para verificar actividades de microorganismos en la corrosión [Pope et al 2000]. Una técnica analítica que puede ser usada en una partícula ambiental es la difracción electrónica de área seleccionada [Kohyama, 1978]

La precipitación tiene propiedades únicas de socavación y limpieza, que la hacen un indicador de niveles de contaminación ambiental. Los datos de evaluación de análisis en función de ambos, nutrientes y compuestos tóxicos, son empleados en los sistemas terrestres y acuáticos [Parungo et al 1990].

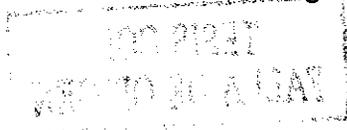
El calor influye en la cinética del deterioro y debe ser cuantificado en casos de cambios de temperaturas extremas. En nuestro país la máxima temperatura nocturna es de 7.8 °C, fue observada en un mes seco (Febrero) caracterizado por noches claras. Menos frecuente, las concentraciones de calor diurnas, ocurrieron y causaron diferencias en la temperatura de evaporación durante las estaciones húmedas [Jauregui, 1997]

El deterioro ambiental en los edificios expuestos puede apreciarse de manera óptica por las pátinas o costras que se forman en su superficie expuesta. Las costras negras son desarrolladas por formaciones de yeso en las superficies húmedas y son atacadas por el contaminante atmosférico SO₂. Una gran captación de material particulado (Fe₂O₃, Al₂O₃, SiO₂, C, etc) [Aragón Piña, 1999], se observa en las superficies intemperizadas [Rodríguez Navarro y Sebastian, 1995]

En particular, las varias interacciones material-medio ambiente que tienen lugar están caracterizadas por: (a) superficies "lavadas" desintegradas, donde los productos fueron eliminados por disolución; (b) pátinas amarillo oxidadas ricas en Fe y Cu; (c) costras negras firmemente unidas y en contacto con agua, producto de la percolación, donde los depósitos amorfos de la calcita recristalizada son ricos en S, Si, Fe y partículas carbonáceas; (d) depósitos negros sueltos en las áreas húmedas, consistentes principalmente de yeso y partículas de ceniza volante; y (e) costras cementicias, cubriendo y corroyendo o picando las superficies horizontales [Moropoulou et al 1998]

El color café rojizo de las pátinas está compuesto de plomo y la delgada capa metálica es estaño. El rojo está constituido por hierro y plomo, algunas capas rojas contienen también manganeso unido al hierro; en este caso el color rojo es más oscuro. El color azul está constituido por cobre y plomo. La hidrocercusita se emplea para el color blanco. La calcita con una pequeña proporción de cuarzo y óxidos de hierro, da el ocre. Los estudios de difracción de RX muestran que el color verde es malaquita. El medio ambiente provee una variedad de compuestos orgánicos – principalmente alquenos, producidos por la combustión de petróleo- los cuales son responsables de las cubiertas negras en el policromado que sirven así mismo como nutrientes para el crecimiento microbiológico [Pérez-Rodríguez et al 1998]

Una fracción de partículas de las costras de intemperismo en los monumentos ha sido también usada como una herramienta para distinguir entre las fuentes de contribución de partículas de aceites y las carbonáceas. Todas las muestras mostraron altos valores de susceptibilidad magnética, sugiriendo que los principales portadores magnéticos en la fracción magnética son los granos ferromagnéticos. Los datos



magnéticos y microscópicos combinados son consistentes con una mayor derivación de la fracción magnética de los procesos de combustión de carbón. Las cenizas volantes derivadas de la combustión de aceites tuvieron los menores contenidos de Fe (típicamente $\cong 0.5\%$ en oposición al $\cong 11.5\%$ en cenizas de carbón) y de conformidad no contienen un gran número de esferas magnéticas. En contraste, es bien conocido que las cenizas pulverizadas de combustibles (CPC) de las plantas de quema de carbón, contienen óxidos de hierro con presencia de esférulas magnéticas. Para explicar el origen de tales partículas en CPC, ha sido desarrollado trabajo teórico en la fabricación de polvos. Estos estudios han mostrado que la microestructura de la partícula puede ser dependiente de los eventos de nucleación y crecimiento. En el caso de enfriamientos rápidos, los polvos esféricos, microscópicos y de aleación, una vez que la nucleación ha ocurrido, la microestructura solidificada está determinada por la relación de crecimiento del sólido a partir del líquido. Si la relación de crecimiento no puede ser sustentada por repartición difusional de los elementos (una alta relación de crecimiento o una baja temperatura), entonces se anticipa una estructura uniforme del cristal. Si la relación o rango de crecimiento es bajo comparada con los rangos de difusión en el líquido, se espera un patrón dendrítico cristalino. A temperaturas altas absolutas con pequeños gradientes de temperatura (retardantes del rango de crecimiento), también se tenderá a patrones dendríticos cristalinos superficiales. [Schiavion y Zhou, 1996].

Las partículas de carbón juegan un papel importante como catalizadores de muchas reacciones en la atmósfera, particularmente en la conversión de SO_2 y óxidos de nitrógeno en ácidos sulfúrico y nítrico [Zappia et al 1993] y presentan una trayectoria bien definida antes de depositarse en las fachadas de los edificios [Leuzzi y Monti 1998]

El intemperismo primario por alteraciones hidrotermales es probablemente el responsable de las fracturas y roturas químicas de los feldespatos y las arcillas minerales y de la construcción o formación de óxidos de hierro. El segundo intemperismo, cuando ocurre en edificios, puede provenir de la abertura de las fracturas debido a la penetración de sales solubles. Esto acelera los mecanismos de intemperismo mencionados al permitir al agua y sales penetrar más profundamente en las rocas. Existen tres mecanismos de donde las sales pueden generar energía para superar el esfuerzo de compresión de la roca; la presión de cristalización, la presión de

hidratación y la expansión térmica diferencial. El papel de los morteros de cal ricos en sales de calcio, se piensa que ha sido una importante fuente de sales. Un mortero impermeable forzaría a la humedad a moverse a través de la roca en lugar del mortero cuando el agua se evapora de la superficie. [O'Brien et al 1995]

El carbono total (Ct) puede ser considerado como compuesto de dos factores principales, $Ct = Cc + Cnc$, donde el Cc es el carbón carbonatado (carbonate carbon) y el Cnc es el carbón no carbonatado y $Cnc = Ce + Co$. El Cnc, está compuesto por Ce = carbón elemental, predominantemente un producto de los procesos de combustión y el carbón orgánico (Co) de origen biológico y antropogénico.

Como se ha observado en las costras negras estudiadas, 98.7 % del azufre está presente como sulfato y es debido a depositaciones secas y húmedas de SO_2 atmosférico y aerosol en la superficie del mortero; su reacción con el carbonato de calcio constituye el componente de enlace del mortero de cal que forma yeso ($CaSO_4 \cdot H_2O$).
Notas importantes: a) el azufre está siempre totalmente presente como sulfato y el yeso es la especie cristalina principal presente en las costras negras debido a la transformación del carbonato de calcio determinada por la deposición atmosférica; b) los compuestos de nitrógeno, como nitratos y nitritos, que son muy solubles y no forman compuestos estables con el calcio del mortero, presentan una variabilidad digna de remarcar en las muestras analizadas; c) después del azufre, el carbono es el principal elemento debido a la deposición atmosférica, presente en las capas deletéreas en los morteros; el 80.3 % está presente en la forma de carbón no carbonatado, mientras que el 43.3 % del Cnc está presente como carbón elemental.

Los efectos tanto marinos como antropogénicos son determinantes en la formación de pátinas que causan deterioro. Existe una relación entre la composición química de la atmósfera circundante y la composición química de las rocas meteorizadas [Torfs y Van Grieken, 1997], el daño puede cuantificarse en función del "manchado" que es un efecto óptico, un oscurecimiento de la superficie que puede ser medida como un cambio en la reflectancia de la luz y está generalmente relacionado a la deposición de materia ambiental en la superficie de los edificios. [Newby et al 1991]

El problema que las pátinas superficiales causan a la preservación de nuestra herencia artística y cultural no sólo es antiestético; los procesos de meteorismo y deterioro que actúan sobre el substrato por debajo de la roca son de aspecto común. El origen de los cationes Ca^{2-} es más controversial. El polvo cálcico, o las partículas contaminantes ambientales ricas en Ca incluyendo cenósferas carbonáceas de la combustión doméstica e industrial han sido señaladas como posibles fuentes de Ca^{2-} [Schiavon et al 1995]

Dado que los vegetales han sido siempre un importante indicador de la contaminación atmosférica, los líquenes han sido usados para cuantificar trazas de metales pesados y contaminantes en diferentes medios [Wadleigh y Blake, 1999], por otro lado la presencia de flora y fauna propician el metamorfismo, la aparición de arcillas jóvenes como la montmorillonita.

En suelos calcáreos, la solubilidad de metales pesados es pequeña, puesto que en suelos neutros o ácidos una fracción relevante de metales puede disolverse y llegar a estar disponible para transformarse por plantas. La biodisponibilidad de los metales pesados en suelos está principalmente determinada por contenidos de materia orgánica, óxidos de hierro y manganeso, arcillas minerales y pH.

Los minerales arcillosos son agentes de enlace potenciales para contaminantes pues tienen una gran área superficial específica y una alta capacidad de cambio catiónico [Lothenbach et al 1997]

Para relacionar los niveles de contaminación a los rangos de depositación se han hecho ensayos usando especímenes de hierba, crecidos y expuestos bajo condiciones estándar, como bioacumuladores. Los elementos que manchan tienen su origen en, V-Ni (quema de combustibles) y Ca-Fe (dispersión de partículas de los suelos) muestran una extremadamente fuerte correlación [Cercasov et al 1998]. Para probar la confiabilidad de un método simple de bioacumulador, las depositaciones de contaminantes en la hierba crecida bajo condiciones estándares han sido también investigadas [Cercasov et al 1996]

El modelado matemático se ha realizado sin éxito total para resolver los problemas geoquímico-ambientales. Existen razones para sugerir que las predicciones acerca de las emisiones del SO_x pueden ser modeladas por algoritmos de Fourier y el resultado es casi el mismo que el obtenido por los filtros de Kalman [Schlink y Herbarth, 1997]

Los procesos químicos describen el destino de los contaminantes atmosféricos y están matemáticamente representados por un par de juegos de ecuaciones no lineales diferenciales. La primera fuente de dificultad en la solución numérica de estas ecuaciones aparece porque la química en los sistemas ambientales incluye reacciones cuyas escalas de tiempo características varían en ordenes de magnitud, resultando un altamente rígido sistema de ecuaciones [Mathu et al 1998; Schlink et al 1997]

El análisis del costo-beneficio regional, no se ha cuantificado porque las consecuencias financieras del daño son difíciles de estimar, pero algunos autores han revelado que el costo de la prevención y remediación debida a las concentraciones de azufre y sulfatos ambientales solamente, son de orden de 2 billones 1982 dólares por año [Lareau, T.J., et al 1986]

Asumiendo que los niveles compuestos son el umbral del daño al cual la reparación o reemplazo llega a ser necesario, los costos económicos fueron estimados calculando la pérdida de servicio de la vida útil de los materiales predicha bajo ataque y por tanto el costo resultante del exceso de desembolso en mantenimiento.

Simplificando, el nivel de exposición del material existente a los contaminantes es directamente proporcional a la población. La motivación para el control del azufre ambiental es creciente en función de la magnitud de los costos del daño que causa [Cowel y Apsimon, 1996].

Nuevos materiales y procesos para la reparación de monumentos históricos de Morelia.

Otras metas importantes del presente trabajo son las propuestas de bancos de ignimbrita sanas para su restauración y el diseño de morteros para protección de los elementos verticales expuestos. Así mismo diseñar mezclas de concreto hidráulico para la construcción de subestructuras que soporten la cimentación de los edificios antiguos con problemas de hundimientos, y lograr concreto de alto desempeño con agregados pétreos naturales que no tienen tratamiento y evaluar al mismo tiempo el efecto de los aditivos a las mezclas a edades tempranas principalmente.

Las ignimbritas sanas o extraídas de los bancos de cantera han sido caracterizadas física, química, mecánica y petrológicamente para su uso como material de construcción de nueva creación [Alonso, 1996]. Asimismo ha sido estudiada la matriz en rocas deterioradas [Alonso, Bedolla y Martínez Gómez, 1998], los Reglamentos de Construcción Vigentes en el Estado de Michoacán y el Distrito Federal, hablan de resistencias mecánicas a la compresión del orden de 100 Kg/cm², como mínimo, para su uso como material de mampostería [R. de Mich., 1999 y RDF, 1996]; sin embargo, como el material es particular de la región no existen a la fecha estudios comparativos sobre cómo y cuánto, el deterioro de estas ignimbritas afecta su resistencia mecánica. Una búsqueda bibliográfica revela que lo publicado acerca del deterioro de monumentos corresponde en su inmensa mayoría a rocas como el granito, el mármol, la caliza y la arenisca. No existen trabajos publicados de otros autores sobre el deterioro de ignimbritas. En el deterioro de monumentos históricos de granito se encontró un efecto de disolución que se desarrolla a lo largo de los planos de los folios de las micas [Robert et al 1992]; algunas de las ignimbritas locales presentan micas como la Biotita y la Muscovita, lo que ha dado origen a controversia sobre si provienen o no de la misma caldera.

La explotación comercial en los bancos locales se realiza con explosivos y maquinaria, por la poca dureza de las ignimbritas.

Las andesitas y el concreto.

Otro tipo de rocas ígneas extrusivas son las andesitas, productos volcánicos muy abundantes en la región. Las andesitas son agregados pétreos idóneos para diseñar nuevos materiales como los morteros, concretos hidráulicos, concretos asfálticos, bloques prefabricados, adocretos. En este caso se caracterizaron bancos de andesitas para diseñar mezclas de concreto hidráulico que soporten diferentes solicitaciones mecánicas, con distintos aditivos para modificar las propiedades de las mezclas fluidas y endurecidas.

Puesto que de las rocas ígneas extrusivas sólo un pequeño porcentaje son ignimbritas o riolitas, y el mayor volumen de las eyecciones volcánicas son rocas como dacitas y andesitas, es muy importante caracterizar algunos bancos de agregados pétreos del Estado de Michoacán.

El concreto hidráulico en la obra de tipo civil tiene un papel fundamental por el bajo costo de su mantenimiento, su estabilidad volumétrica y su apariencia. Las obras monumentales de roca no deben ser restauradas con concreto hidráulico por la diferencia entre sus coeficientes de dilatación térmica que darán lugar a falta de comportamiento monolítico, con su consiguiente baja adherencia.

Algunos monumentos preconquista, como Teotihuacán, Montealbán, Mitla, Chichén Itzá, Uxmal fueron restaurados hace dos y tres décadas y en ellos puede claramente apreciarse el concreto en elementos estructurales como vigas en techumbres y pórticos, así como en sus taludes en forma de adhesivo de la mampostería. Su fin era, al decir de los arqueólogos de la época, que fuera obvia la parte moderna, ahora no se emplean materiales cuya existencia no esté totalmente comprobada y documentada.

El uso del concreto hidráulico es relativamente reciente: 1789, entonces su uso queda restringido a monumentos arquitectónicos construidos después de esa fecha, según el comité técnico del ICCOMOS.

La finalidad del capítulo tres que trata del concreto hidráulico, en la presente tesis es encontrar un empleo idóneo para los bancos de andesitas existentes y en explotación actualmente; de manera directa no puede ser empleado el concreto hidráulico en la restauración de edificios de ignimbrita de Morelia, pero sí está siendo empleado en la construcción de banquetas y ductos para instalaciones ocultas y lograr que en el Primer Cuadro no existan instalaciones aéreas. El concreto se requiere también para construir fosos perimetrales en los edificios de ignimbrita que presenten daño severo por humedad capilar en sus fachadas.

Los morteros.

El rol físico del mortero para controlar el movimiento del agua a través de la roca es muy importante para determinar dónde son depositadas las sales dañinas.

Las sales solubles contenidas en todos los morteros que se emplean como recubrimientos, son muy similares después de 28 días de curado [Duffy et al 1993]. El agua producto de la condensación causa disolución del material de la matriz. Los ciclos de condensación- evaporación causan migración de las sales disueltas y recristalización en cualquier sitio, por ejemplo eflorescencias y subeflorescencias, que debilitan al material y causan pérdida del valor estético. Los materiales porosos, por ejemplo las rocas y morteros, pueden disminuir su resistencia mecánica. En otros casos la presencia de una película de agua puede disminuir la energía libre superficial del material, debilitándolo. [Winkler, 1985]

La restauración puede realizarse de manera empírica como se observa con el uso de morteros de cemento hidráulico [Rubio, et al 1998] en las juntas de las pirámides del Sol y la Luna en Teotihuacán, realizadas hace poco mas de tres décadas cuando el problema a resolver se resumía a altas resistencias (la estática) sin tomar en cuenta la estética, o la historia que mencionaba los morteros antiguos. Otros constructores han resuelto el problema estético con el uso de elementos de concreto simulando rocas naturales. Los plafones en las vigas precoladas de concreto está formados y diseñados con la misma forma, color y textura que el plafón dañado original [Tigue y Hoigard,

2000], pero en nuestro país existe un procedimiento de restauración normado y emitido por el INAH con obligatoriedad legal, cuyo incumplimiento es fuertemente penalizado.

Cuando Morelia fue nombrada Patrimonio de la Humanidad, tácitamente los gobiernos federal, estatal y municipal adquirieron el compromiso de preservar los monumentos. Una de las opciones viables para la preservación y conservación era la de recubrir los elementos verticales como muros y fachadas con morteros. Inicialmente los monumentos del Centro Histórico estuvieron recubiertos con morteros de cal y arena, en proporción en volumen 1:3 [Silva Ruelas, 1990], pero a principio de la década de los años 60's, al Ing. Manuel Rodríguez [Rodríguez, 2001], supervisor de Obras Públicas del Municipio, le fue encomendada la tarea de "descubrir" el edificio que hoy ocupa la Secretaría de Salud, lo que desató una fiebre por retirar los morteros de los edificios; incluso la Catedral estuvo recubierta con mortero de albañilería muy delgado y coloreado. El acto de retiro de los morteros coincidió con un incremento en el uso de los vehículos automotores funcionando con combustible fósil en la ciudad.

Los morteros de albañilería que juntaron (palabra muy empleada en el argot de la ingeniería civil y significa unieron, pegaron, adhirieron) los sillares de ignimbritas en los edificios, son los que la fecha se conservan. Tradicionalmente cuando se realizaba alguna construcción de tipo civil, se invitaba a los familiares y amigos a que colaboraran en las actividades que requerían fuerza bruta, tal hecho obligaba a reuniones sociales donde debía ofrecerse comida a los invitados; entonces, del hecho de darle uso a los desperdicios de la comida, nace el uso de materiales orgánicos en los morteros, tales como la leche (los mamíferos rumiantes fueron traídos a América por los españoles), la sangre de bovino (mismo origen), lana de cordero, cola, algodón, fibras de lechuguilla, copra, clara de huevo, huevo completo, mucílago de cactáceas, savia y pétalos de flores como la nochebuena, [Sickels, 1999] y estos aditivos para los morteros fueron clasificados según el efecto que producían en las mezclas. Dado que la Ciudad de Morelia se encuentra en una zona de alta sismicidad, varios edificios históricos se han revisado para saber si son sismorresistentes [Meli Piralla, 1998], y se ha encontrado en la mayoría de ellos mezclas de mortero con arena volcánica natural del Banco de Joyitas; esta arena ha sido ampliamente estudiada en la región [Martínez Molina, W., 2001]; dicho banco está situado a 18 Km de la ciudad. También se encontró en algunos

edificios mortero elaborado con arena de río, de las márgenes del Río Chiquito, que actualmente tiene un cauce artificial y cruza la ciudad de Este a Oeste.

Las rocas empleadas en los monumentos estuvieron en su inmensa mayoría adheridas con morteros de cal, llevando agregados pétreos de río en Europa y localmente con agregados pétreos volcánicos; las propiedades del adhesivo, cal en todos los casos, fueron modificadas con diversos aditivos. Los mayas, una de las antiguas civilizaciones americanas con mayores adelantos técnicos y científicos, empleaban ya morteros de albañilería de cal tanto con fines estructurales, adhiriendo rocas calizas, como con fines de ornato en los estucos. Los microanálisis realizados en los estucos muestran que el uso de las rocas calizas era amplio, tanto en interiores como en exteriores. Su uso dependía de la finura de los granos después de la calcinación de las calizas; el material grueso se empleaba para fabricar morteros de unión y aplanado rústico mientras que el material fino se usó con fines netamente estéticos [Villegas et al 1995]. La cultura maya estaba asentada especialmente en la Península de Yucatán lo que los proveyó con abundantes rocas calizas, que son el producto primario para la obtención de cal [Magaloni et al 1995], las etnias del centro del país como los Nahuas, ya conocían el proceso de conversión de la roca caliza sedimentaria que contenía carbonato de calcio, en cal hidráulica u óxido de calcio con calcinación y lo usaron ampliamente, ejemplo de ésta técnica son los aplanados existentes en las Pirámides de Teotihuacán [Barba et al 1995].

En Europa se empleaban principalmente leche de bovino, sangre de bovino y huevos, en América se emplearon los productos mencionados hasta después de la llegada de los españoles; inicialmente se emplearon mucílagos de cactáceas, algodón, lana de cordero [Carbonell De Masy, 1993]. A la fecha existen aproximadamente 1300 especies de cactáceas clasificadas, de las cuales nuestro país cuenta con 1089 especies. [Camacho , 2001 y Aguilar, 1999]. Los estudios realizados localmente en la elaboración de morteros con leche [Ochoa , 2001], cactáceas y sangre [García, 2001] han mostrado excelente comportamiento mecánico a edades tempranas.

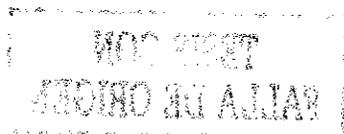
En muchos de los casos estudiados se apreció que los morteros mostraron una alta reactividad al medio ambiente dando lugar a cristales de sales que deterioraron las

rocas que recubrían. La reactividad ha sido cuantificada de manera directa en los morteros que se han despegado de los monumentos y en experimentos que reproducen las características ambientales en cámaras de laboratorio [Zappia, et al 1994]

La función de los morteros de cal de albañilería no es sólo estética, es de protección superficial en elementos verticales de mampostería. Su uso no impide la formación de costras exteriores o pátinas. La composición de las pátinas depende del sustrato: mármol, caliza o arenisca [Sabbioni et al 1998]. Los componentes de carbón presentes en las pátinas alteradas sobre los morteros pueden tener tres orígenes diferentes: (1) carbonato de calcio derivado casi exclusivamente de los materiales subyacentes [Pie, K., 1987], (2) deposición de partículas ambientales conteniendo carbón elemental [Turpin y Huntzicker, 1995], (3) descomposición de la roca por ambiente biológico [Sáiz-Jiménez, 1995]

Los estándares para realizar las pruebas de determinaciones de calidad físicas y mecánicas en las rocas sanas están contenidos en las normas de materiales de construcción de la American Society for Testing and Materiales [ASTM, 2000]. Puesto que tratándose de rocas deterioradas provenientes de los monumentos, no se permite que con fines de investigación se deteriore el patrimonio, las rocas deterioradas suelen ser analizadas en los contados casos en que son removidas para ser reemplazadas o consolidadas, según lo indicado por la UNESCO [Colloque International, 1978]. Lo mismo ocurre con los morteros antiguos de albañilería que han sido estudiados y descritos en diversos trabajos [Sherwood, 1999; Charola y Henriques, 1999; Thompson y Groot, 1999; Fontaine et al 1999] pero para los cuales tampoco existen estándares internacionales para realizar pruebas.

En algunos casos ha sido posible el empleo de técnicas no destructivas [Qasrawi, 2000; ASTM, 1993; British Standard 1986] para calificar la resistencia mecánica en muros de edificios que muestran signos de deterioro y poder dictaminar si deben apuntalarse, reemplazarse, reforzarse o en el mejor de los casos dictaminar que son resistentes.



En este trabajo la catedral de Morelia es el monumento elegido para calificar y cuantificar su deterioro. Su construcción duró aproximadamente 84 años, terminándose en 1744. Sus dimensiones son 77.00m x 30.00m de superficie mientras que sus torres tienen una altura aproximada de 66.80 metros sobre el nivel de piso terminado y sólo son superadas, en nuestro país, por las torres de la Catedral de Puebla con 70.00 m de altura [Silva Mandujano, 1984]

La limpieza.

A la fecha en nuestro país los métodos de limpieza superficial de monumentos deben estar aprobados por el INAH. El método más empleado y recomendado por ellos es con mucílago de nopal y cepillo de cerdas vegetales. En algunos edificios, como en la casa Montejo de Mérida, Yucatán; ya ha sido empleado con éxito el rayo láser [Lazzarinni et al, 1978; Tenorio, 1997], que volatiliza las pátinas dejando impecables las rocas, pinturas o cubiertas. La limpieza con rayos láser fue descubierta de manera accidental por un fotógrafo griego que deseaba una nitidez importante en las fotografías de algunas esculturas antiguas y tomó fotografías con láser, después de repetidos intentos descubrieron que éstas mostraban una clara limpieza en sus superficies. Algunos métodos no tan empíricos como la baba de nopal o tan sofisticados como el empleo de rayos láser, han sido usados y ampliamente descritos [Clifton, 1986; Lal Gauri, 1986; Boyer, 1986; Jones, 1986]

Capítulo 2.

EL EFECTO DEL AZUFRE AMBIENTAL EN EL DETERIORO DE LAS IGNIMBRITAS EN LA CATEDRAL DE MORELIA, MÉXICO

Introducción.

En este capítulo se reportan los resultados del daño en bloques de ignimbrita empleados para la construcción de uno de los principales monumentos arquitectónicos en la Ciudad de Morelia, la catedral, que pertenece a la Lista del Patrimonio Cultural de la Humanidad de la UNESCO, Morelia está localizada en el cruce del Cinturón Volcánico Mexicano, la Sierra Madre Occidental, las Placas de Cocos y Rivera.

Se emplearon una combinación de técnicas analíticas para caracterizar las propiedades mecánicas, físicas y químicas de los bloques de ignimbritas retirados durante la campaña de restauración de la Catedral y que fueron donados por las autoridades civiles, sociales y eclesiásticas. Estas técnicas incluyen resistencia mecánica con el esclerómetro o martillo de Schmidt, microscopía electrónica de barrido con microanálisis químico, petrografía, análisis de S y C con técnica de calcinación, Fluorescencia y Difracción de Rayos X; comparando los resultados obtenidos con los de las rocas sanas provenientes de las canteras de los alrededores.

Se encontró que los bloques obtenidos de las canteras, o rocas sanas, presentaron menores valores de resistencia mecánica que aquellos valores obtenidos de los bloques provenientes de las fachadas de la catedral, por tanto los bloques obtenidos de las canteras estudiadas a la fecha no se recomienda, sean empleados para reposición en monumentos; los monumentos no fueron construidos con bloques provenientes de los bancos actualmente en explotación.

Se encontró también una clara correlación entre los contenidos de azufre ambiental y el deterioro mecánico de las ignimbritas de la catedral. Las principales fuentes de emisión de azufre ambiental son vehículos automotores y una fábrica de

papel situada al suroeste de donde provienen los vientos dominantes, concluyéndose que el daño es de origen antropogénico.

Las ignimbritas son rocas ígneas extrusivas también llamadas flujos piroclásticos o cenizas volantes, productos muy comunes encontrados en todos los asentamientos tectónicos; principalmente están compuestas de riolita, dacita y andesita; muchas de las ignimbritas son riolitas, algunas de las composiciones químicas están zonificadas, indicando el taponamiento de grandes calderas de magmas [Cas y Wright, 1988]. Las muestras caracterizadas en este estudio fueron nombradas como se indica en la Tabla 2.1. Cuando el porcentaje de sílice en las ignimbritas es de alrededor del setenta por ciento se les suele llamar riolitas, ver Tablas 2.2, 2.3 y 2.4. En adición, dependiendo del porcentaje de sílice contenido, las rocas ígneas son clasificadas como rocas ácidas si contienen 66 % o más del mismo [Best, 1981].

La mayoría de monumentos en Morelia fueron hechos de bloques de ignimbritas, que son muy abundantes en esta región de México. Muchas de las otras ciudades históricas de México no fueron construidas con estas rocas, como los basaltos del centro histórico de la Ciudad de México o las calizas de los monumentos Mayas.

Los estudios de deterioro en ignimbritas están ausentes de la literatura. El daño a los edificios de ignimbritas puede ser causado por diferentes factores entre los cuales la contaminación del aire y los contaminantes producidos por la combustión de gasolinas juegan un papel importante. Como se sabe el NO_x y el SO_2 son los principales químicos responsables del deterioro de otras rocas como el mármol [Gauri y Holdren, 1981]. También se conocen otros mecanismos mediante los cuales los contaminantes ambientales (atmosféricos) pueden dañar los materiales expuestos al medio ambiente, tales como la abrasión, depositación y remoción, ataque químico directo, ataque químico indirecto y corrosión electroquímica. La humedad, la temperatura, el congelamiento y el deshielo influyen la manera como los contaminantes dañan a los materiales [Yocom, 1979]. Se ha encontrado en la superficie del mármol deteriorado, una roca metamórfica, la presencia de sulfatos provenientes de la conversión de dióxidos de azufre catalizados por las partículas enriquecidas con hierro [Cheng y

Castillo, 1984]. Un problema importante en la albañilería de los edificios antiguos es el daño a los morteros, las pruebas de laboratorio han mostrado que la reactividad al SO₂ es mayor en el mortero que la que presentó la piedra [Zappia et al, 1994]. Esto refuerza el hecho de los morteros de algunas fachadas han desaparecido completamente [Coursimault et al, 1995].

El clima en Morelia es templado (Figura 2.1), pero aún en zonas templadas, la radiación solar (Figura 2.2) produce tanta destrucción como el congelamiento. El agua en todas sus formas (Figuras 2.3 y 2.4) es el agente que promueve acciones químicas, deterioro gradual de los materiales y daña activamente a los edificios [Felden, 1982]. La devitrificación en las rocas es una clase de alteración, pero no existen estándares como la ASTM [Annual Book of American Society for Testing and Materials Standards 2000] que permitan cuantificar el daño en los edificios. El pH del agua de lluvia en Morelia es de 6.0 (ver Tablas 2.5, 2.6 y 2.7) y las ignimbritas son un tipo de roca ácida, entonces es posible descartar el ataque químico y sugerir deterioro físico de las rocas, un mecanismo que ha sido ampliamente investigado [Camuffo, 1995]. En la mayoría de las fachadas de los monumentos, los morteros han sido empleados para evitar el daño antropogénico por el medio ambiente y minimizar la evaporación del agua y la capilaridad, que dejan sales que crecen dentro de los poros de las rocas y eventualmente las fracturan. Estos fenómenos se repiten en cada estación lluviosa [Colloque International Alteration et Protection des Monuments en Pierre, 1978; Griffiths y Roberts, 1999]. Si el polvo y las partículas pulverulentas son depositadas en las fachadas de los edificios, ellas destruyen los monumentos, no sólo por las mismas partículas sino por la velocidad de los vientos que las depositan [Riley et al 1998]. Los productos de la devitrificación de las ignimbritas son arcillas o suelos ambientales y existen técnicas especiales para caracterizarlos [Goldstein et al, 1996; Schiavon y Zhou, 1996]. Se ha observado que en las fachadas que están de frente a los vientos dominantes son más susceptibles de deteriorarse que aquellas superficies que están protegidas [Leuzzi y Monti, 1998], pues los vientos depositan partículas antropogénicas en los poros de las ignimbritas [Aragón, 1999]. En nuestro caso de estudio es importante encontrar los mecanismos de deterioro de los bloques de ignimbritas en los monumentos y por supuesto, la estrategia de restauración.

Metodología.

El gobierno local y las autoridades religiosas proveyeron los bloques del balaustrado de la catedral de la ciudad de Morelia, que se ha deteriorado después de 344 años de servicio, desde 1657. La catedral estuvo totalmente terminada en 1744 [Silva,1984], el balaustrado está situado a 70.0 metros snpt, donde también se aprecia como cada bloque del balaustrado fue esculpido. Todas las caras del balaustrado estuvieron expuestas a la atmósfera. La sección más pequeña de cada componente es de sección cuadrada y esta parte fue cortada en "rebanadas" de 2.5 cm de espesor para realizar análisis químicos, pruebas mecánicas y observaciones microestructurales.

Un juego de muestras de ignimbritas dañadas por el medio ambiente y otro proveniente de los bancos de cantera aledaños fueron recolectados para análisis de difracción y fluorescencia de rayos X.

La difracción de rayos X se realizó en material pulverizado en mortero de ágata hasta pasar la malla 400 ASTM. Para corroborar la presencia de arcillas, la difracción se repitió en muestras de roca triturada, sumergida en agua desionizada, baño de ultrasonido por diez minutos, adicionado con HCl para acelerar la precipitación, el material precipitado se analizó, posteriormente el material se metió al horno con etilen glicol a 60 °C durante 24 horas, y de nuevo se sometió a drX, posteriormente, dado que es un proceso destructivo, la muestra se calcinó a 500 °C y nuevamente se analizó por drX.

Además de la FRx, se realizaron análisis de porcentaje de S y C en un equipo de sistema de calcinación LECO CS-244, con absorción de rayos infrarrojos usando polvos de los bloques, obtenido de la parte central de las caras de las "rebanadas". Los nombres de las muestras se indican en la Tabla 2.1.



Tabla 2.1. Nomenclatura de las ignimbritas caracterizadas.

Muestra	Procedencia
IPM	Ignimbrita Palacio Municipal
ISA	Ignimbrita San Agustín
ICF	Ignimbrita Catedral Fachada
ICB	Ignimbrita Catedral Balaustrado
ICBE	Ignimbrita Catedral Balaustrado Exterior
ICBI	Ignimbrita Catedral Balaustrado Interior
IC	Ignimbrita Cointzio (Sana)
IJ	Ignimbrita Jamaica (Sana)
IT	Ignimbrita El Tejocote (Sana)

Las ignimbritas del Palacio Municipal y de San Agustín, se incluyeron en los análisis pues en tales sitios se colocaron las estaciones de análisis de calidad del aire.

Se emplearon esquirlas de los bloques para realizar observaciones microestructurales en un instrumento MEB-EDS, recubiertas con cobre para asegurar la conductividad y se emplearon también esquirlas para el análisis petrográfico en un microscopio óptico de luz transmitida polarizada. Las secciones delgadas fueron cortadas y pulidas con carburo de silicio números del 200 al 600; limpiadas en equipo de ultrasonido.

La determinación directa del esfuerzo de ruptura a la compresión implica que los especímenes de roca deben ser probados hasta el colapso. Este procedimiento no es adecuado para muestras de monumentos históricos, por esta causa se han desarrollado técnicas no destructivas para cuantificar propiedades como la dureza y la resistencia, como el martillo suizo o esclerómetro y la frecuencia ultrasónica [Qasrawi, 2000]. Para

determinar la resistencia de los bloques de las fachadas, se empleó el esclerómetro, prueba descrita en la ASTM C805 [American Society for Testing and Materials, 1993] y la BS 1881 [British Standard 1986]. Los valores así obtenidos fueron comparados con los encontrados en las rocas sanas (Tabla 2.8). Las pruebas mecánicas de los bloques se realizaron con un esclerómetro manual, aplicándose en la parte central de cada una de las “rebanadas” y el informe es el promedio de tres mediciones.

Resultados.

Una ignimbrita típica tiene la composición indicada en las Tablas 2.2 y 2.3 [Alonso, Bedolla y Martínez Gómez, 1998; Rubio et al 1998]. La larga exposición ambiental causa daños en la matriz de las ignimbritas devitrificándolas en cristales de aristas redondeadas, arcillas y polvos.

Tabla 2.2. Resultados de la Fluorescencia de Rx en las ignimbritas.

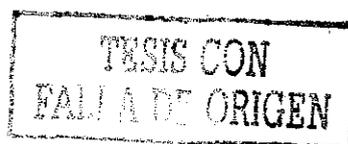
M	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PXC	Σ	S
IPM	74.77	0.148	13.14	1.71	0.011	0.034	1.03	3.21	4.68	0.022	0.98	99.67	0.093
ISA	64.482	0.387	13.610	3.116	0.026	0.763	1.989	2.922	3.160	0.114	5.06	99.63	0.039
ICF	69.47	0.365	13.31	3.01	0.021	0.522	1.62	2.68	3.14	0.092	5.69	99.92	0.013
ICB	67.02	0.404	13.49	3.23	0.098	1.327	2.99	2.98	3.29	0.104	5.10	100.03	0.024
ICBE	68.74	0.381	13.961	2.891	0.027	0.826	1.191	3.141	3.420	0.079	4.96	100.62	0.409
ICBI	69.238	0.399	13.971	3.008	0.031	0.751	2.059	3.181	3.407	0.081	4.64	100.77	0.111
IC	72.076	0.407	14.124	3.097	0.048	0.224	1.443	3.889	4.367	0.098	0.64	100.41	<0.010
IJ	76.467	0.199	12.239	1.671	0.034	0.147	0.893	3.444	4.306	0.056	0.54	100.00	<0.001
IT	76.675	0.150	12.723	1.222	0.018	0.350	0.705	2.918	4.562	0.030	1.42	100.77	<0.001

Tabla 2.3. Elementos traza en ppm, presentes en las ignimbritas.

M	Rb	Sr	Ba	Y	Zr	Nb	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Th	Pb
IPM	161	99	930	23	152	7	29	<2	<3	7	22	27	13	32
ISA	131	240	995	20	262	7	40	11	10	8	48	133	15	18
ICF	152	220	2465	36	233	8	46	7	7	7	29	79	4	81
ICB	126	249	936	49	251	7	42	5	25	10	23	65	5	45
ICBE	133	209	858	25	249	7	36	12	9	197	17	69	21	21
ICBI	135	232	898	25	310	8	38	6	11	28	34	291	20	17
IC	147	170	963	21	254	6	36	9	7	3	15	70	19	13
IJ	157	106	963	16	167	6	17	6	14	11	28	61	16	13
IT	168	105	1059	15	147	6	28	<2	9	6	15	33	18	16

Las ignimbritas típicamente contienen plagioclasas como la albita y la anortita; cuarzo. Todos esos fenocristales minerales están embebidos en una matriz vítrea. La inspección petrográfica revela que los principales componentes de la ignimbrita después de largas exposiciones al medio ambiente son cuarzo, albita, montmorillonita, cristobalita, anortita, esquirlas de vidrio. Lo anterior concuerda con los minerales encontrados por otros métodos como la DRx, Tabla 2.4. Los productos del deterioro ambiental son también llamados minerales accesorios, usualmente en la forma de montmorillonita y partículas pulverulentas.

Tabla 2.4. Resultados de la Difracción de Rx, coincidentes con lo observado en secciones petrográficas. En todas las muestras se encontró material vítreo no susceptible a los rayos X o criptocristalino.



M	Especies Mineralógicas
IPM	Cristobalita, feldespatos, smectita (montmorillonita), zeolitas (mordenita y clinoptilolita)
ISA	Plagioclasa (andesina), smectita (montmorillonita), zeolitas (mordenita y clinoptilolita)
ICF	Feldespato, cristobalita y smectita (montmorillonita), zeolitas (mordenita y clinoptilolita)
ICB	Feldespato, cristobalita, cuarzo, smectita (montmorillonita), zeolitas (mordenita y clinoptilolita)
ICBE	Plagioclasa (andesina), smectita (montmorillonita), zeolitas (mordenita y clinoptilolita)
ICBI	Plagioclasa (andesina), smectita (montmorillonita), zeolitas (mordenita y clinoptilolita)
IC	Cuarzo, plagioclasas (andesina), cristobalita
IJ	Cuarzo, plagioclasas (andesina)
IT	Cuarzo, plagioclasas (andesina), smectita (montmorillonita), zeolitas (mordenita y clinoptilolita)

Detalles de la microestructura de la ignimbrita del balaustrado se muestran en las Figuras 2.7 a 2.13. La Figura 2.7 muestra la estructura de la superficie externa de la muestra, que estuvo directamente expuesta al aire. La matriz está profundamente devitrificada y pulverulenta; donde una parte de ese polvo es de origen antropogénico externo y rico en azufre y carbón.

La Figura 2.8 muestra un detalle microestructural de las vesículas de pumicita inmersas en la matriz que funcionan como concentradores de esfuerzos mecánicos y a partir de las cuales se inician las grietas que se propagan y conducen al colapso de las piezas. En la Figura 2.9 se observan un crecimiento de material antropogénico ambiental depositado sobre un fenocristal. El microanálisis indicó que está compuesto de S y C, y es típico de ignimbritas expuestas al medio ambiente. Las Figuras 2.10, 2.11

2.12 y 2.14 muestran partículas antropogénicas contaminantes provenientes de la quema de fósiles que son transportadas por el viento y depositadas en las superficies de monumentos en la ciudad de Morelia. La Figura 2.13 muestra las fases cristalinas del sulfato de calcio claramente definidas, en la Figura 2.14 se muestra la presencia de una partícula antropogénica rica de Fe, también producto de la quema de combustibles. La Figura 2.15 grafica el gradiente de distribución del contenido de azufre, obtenido con la técnica descrita, en el eje de las ordenadas izquierdo contra la resistencia mecánica de la ignimbrita cuantificada con el esclerómetro, en kg/cm², en el eje de las ordenadas derecho; el eje de las abscisas muestra las dos caras expuestas al medio ambiente del balaustrado elegido como típico y las diferentes profundidades, "rebanadas", donde se efectuaron las mediciones.

La concentración de azufre en las ignimbritas recientemente excavadas de los bancos de cantera es muy pequeño. Las Tablas 2.2 y 2.9 muestran los valores tanto de rocas sanas como de ignimbritas deterioradas. En la Figura 2.15, usando la escala derecha, los resultados de las pruebas mecánicas muestran altos niveles de azufre asociados a severo deterioro mecánico, puesto que la roca deteriorada presentó resistencias de 75 kg/cm² o menores. En el caso de rocas sanas, los rangos de resistencia son de 75-100 kg/cm² y los contenidos de azufre son menores de 0.015 % en peso (Tablas 2.2 y 2.8)

Las Tablas 2.5 a 2.8 muestran las características de calidad del aire de la ciudad de Morelia. Sólo existen valores reportados a la fecha y son menores que los permitidos por las leyes nacionales.

Tabla 2.5. Informe de los estudios de calidad del aire realizados en el centro histórico de Morelia, en PST, Partículas Suspendidas Totales [Valdés Vázquez, J., 2001]

Período	PST	SO ₂	O ₃ Inst.	O ₃ Prom.	NO ₂ Inst.	NO ₂ Prom
Feb-Mar 1995	31	3	20	8	11	7
May-Jun 1995	13	1	16	7	9	5

Oct-Nov 1995	21	1	21	6	20	9
19-21 Nov 1998	62	7	46	--	16	--
4-7 May 2000	60	--	64	--	2	--
23-29 Mar 2001	23	6	20	--	5	--
Julio 2001	65	3	14	--	12	--

Tabla 2.6. Informe de calidad de aire permitido y tiempo mínimo recomendado para cada contaminante [Valdés Vázquez, J., 2001]

Contaminante	Concentración	Período de monitoreo
Partículas suspendidas totales PST	275 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	24 horas
Bióxido de Azufre SO_2	0.113 ppm	24 horas
Bióxido de Carbono CO_2	13 ppm	8 horas
Bióxido de Nitrógeno NO_2	0.21 ppm	1 hora
Ozono O_3	0.11 ppm	1 hora

Tabla 2.7. Valores de calidad del aire aceptados en las NOM-038 y NOM-CCCAT-004-ECOL/1993. IMOCAs, Índice Michoacano de Calidad del Aire.

IMOCAs	Calidad del Aire
0-100	Satisfactoria
101-200	No satisfactoria
201-300	Mala
301-500	Muy Mala



Tabla 2.8. Resultados de las propiedades físicas y mecánicas de ignimbritas de tres bancos de roca sana aledaños a la ciudad de Morelia, contra los valores sugeridos por el * Reglamento de Construcciones del Estado de Michoacán.

Solicitud	*	Cointzio	Jamaica	Tejocote
Densidad Aparente, T/M ³ o g/cm ³ ASTM C99-52 (76)	1.50 mín	1.56	1.49	1.63
Absorción de Agua ASTM C 97-47 (77)	4 máx	25.55	22.25	16.63
Gravedad Especifica ASTM C97-52(56)	2.3 mín.	1.44	1.44	1.60
Módulo de Ruptura a la Flexión, Kg/cm ² ASTM C97-52(76)	--	25.04	42.15	51.63
Esfuerzo de Ruptura a la Compresión, Estado Seco, Kg/cm ² ASTM C170- 50(76)	100 mín	47.03	61.51	73.86
Desgaste Mecánico, Prueba Los Ángeles %, ASTM C241-51(76)	30 máx.	41.00	43.00	18.00
Intemperismo Acelerado, porcentaje	10 máx	30.00	35.00	13.00

Tabla 2.9. Resultados de los contenidos de carbono y azufre, en porcentaje en peso con el método de calcinación para las ignimbritas sanas y deterioradas.

M	% C	% S
IPM	0.20115	0.16098
ISA	0.26345	0.18306
ICF	0.29224	0.21055
ICB	0.43295	0.21552
ICBE	0.38351	0.12493

ICBI	0.10523	0.19951
IC	0.03072	0.00301
IJ	0.06355	0.01245
IT	0.05869	0.00003

Morelia no es una ciudad industrial y no existen grandes fuentes de emisiones de azufre. La fuente más importante de azufre ambiental es la combustión de fósiles, cuyos porcentajes de azufre han decrecido de 800 a 500 ppm en las últimas décadas y actualmente a 300 ppm [Schifter, 2000]. El número de vehículos automotores en la Ciudad es de aproximadamente 250,000. También existe la contribución del combustible diesel de los vehículos pesados y de transporte colectivo, que contiene azufre en un rango similar de composición [Schifter, 1998].

Además de la lluvia (Figura 2.3), el viento (Figuras 2.15 y 2.17) y los agentes naturales deletéreos como el meteorismo, metasomatismo, metamorfismo, abrasión mecánica; el azufre ambiental parece ser la principal sustancia antropogénica asociada al deterioro de la catedral. Las emisiones de azufre en la ciudad deben ser reducidas en el futuro, si exitosamente se reducen los contenidos de azufre en los combustibles o se reduce el tráfico en el primer cuadro. Otra posibilidad es el empleo de recubrimientos o polímeros consolidantes para prevenir el deterioro de la ignimbrita. Muchos otros monumentos (1,113) en la ciudad fueron construídos con bloques de ignimbritas y recubiertos con morteros de albañilería por muchos años. En los años 60's las autoridades obligaron a los poseedores de inmuebles a "descubrir" los elementos verticales en el centro histórico para mostrar la belleza de las rocas, debido a la exposición ambiental en unas pocas décadas la mayoría de esos edificios estuvieron severamente dañados. La UNESCO recomendó considerar este fenómeno cuando la ciudad fue declarada como Patrimonio de la Humanidad.

Se observa también, en la Tabla 2.3, que el mayor contenido de Ni aparece en la superficie del balaustrado expuesto al medio ambiente, así como la presencia de Sr. La presencia de Cr es remarcable en las superficies mencionadas.

En las Figuras 2.18, 2.19, 2.20 y 2.21 se muestran los resultados de resistencia a la compresión, obtenidos con el esclerómetro, en cada una de las fachadas de la Catedral, metro a metro en sentido perimetral y a las tres alturas mencionadas; en la Figura 2.22 se graficó el promedio de la resistencia mecánica a la compresión para cada fachada con su correspondiente desviación estándar.

Discusión.

Se encontró un incremento del azufre ambiental cerca de las superficies expuestas en los bloques de ignimbrita de la catedral. Este incremento del azufre claramente se correlaciona con un decremento en la resistencia mecánica, la integridad mecánica y la calidad estética, como una función de la profundidad, ver Figura 2.15, que fue la más representativa.

Esta función es particularmente notoria en el caso de los bloques del balastrado que han estado expuestos a las partículas de azufre transportadas por los vientos dominantes. Sin embargo, el factor que ha tomado el papel más importante en el deterioro de los bloques de ignimbrita de la catedral es el azufre de origen antropogénico. Esto implica que aún que todos los monumentos han estado expuesto al medio ambiente por más de 400 años, su daño ha sido causado especialmente en las últimas décadas, que es cuando aparecieron los vehículos automotores accionados con combustible fósil en Morelia. Las ignimbritas sanas estudiadas aquí presentaron resistencias del orden de 75 a 110 kg/cm², por otro lado los bloques de ignimbritas de las paredes de la catedral que fueron estudiados con el esclerómetro, probados en todo su perímetro, metro a metro de manera longitudinal y a tres alturas diferentes a partir del nivel de piso terminado: 0.50, 1.00 y 1.50 metros presentaron valores del orden de 300 a 630 kg/cm². Esto significa que las rocas empleadas para la construcción de la catedral no fueron tomadas de las canteras estudiadas: Cointzio, Jamaica y El Tejocote; no es recomendable emplearlas entonces para reemplazar los bloques dañados.

Con los análisis de Fluorescencia de Rx, Difracción y Petrografía, se observa que los bancos de ignimbrita no provienen del mismo evento volcánico, pero sin embargo los

valores correspondientes a la Catedral, San Agustín (una iglesia testigo) y el Banco El Tejocote, presentan gran similitud. Actualmente existe un problema ejidal en dicho banco y no puede ser explotado.

Los análisis de drX arrojaron la presencia de arcillas y zeolitas, la arcilla presente en las muestras mencionadas es una montmorillonita (smectita) cálcica, las zeolitas encontradas son mordenita y clinoptilolita. La presencia de ambas indica un fenómeno de "deterioro", devitrificación de las ignimbritas, que no está absolutamente, asociada a daño antropogénico. En la Figura 25 se observa una zeolita clinoptilolita [De Pablo, 2002], son las zeolitas las que propiciaron la actividad que cohesionó a la matriz. La presencia de arcillas y zeolitas, son precursoras de daño no antropogénico a intervalos de tiempo geológico.

Durante este estudio también se observó que las ignimbritas que presentaron el mayor daño ambiental eran aquellas cuyos contenidos de Fe y Ca eran mayores. Esto puede ser explicado por la afinidad del S con compuestos que contiene tales elementos. En resumen, el daño de origen antropogénico se refuerza por la presencia de Ni y Cr, en adición al S, en las partículas presentes en las superficies expuestas de los bloques de ignimbritas de la catedral. Estos elementos se deben principalmente a la combustión de fósiles; se comprobó que las partículas enriquecidas con Ni y Cr estuvieron ausentes en todas las observaciones microestructurales con EDS en bloques de ignimbritas sanas.

Se requiere una estrategia de restauración satisfactoria encontrando una cantera con características similares a las presentadas en los bloques de los monumentos o, en su defecto, emplear morteros de albañilería de materiales permitidos como cubiertas protectoras. Se concluye también que la calidad del aire debe ser perfeccionada para preservar las fachadas expuestas de los monumentos construidos con ignimbritas.

La presencia del sulfato de calcio hidratado (yeso) es también un detonante de la desintegración de las ignimbritas al exfoliarlas y deteriorar la matriz de las mismas.

Discriminando entre los componentes naturales y antropogénicos y cuantificando el carbón y el azufre por técnicas de combustión (LECO Mod. CS-44), el yeso,



localizado en las ignimbritas estudiadas, se debe a las depositaciones secas y húmedas del azufre atmosférico y la subsecuente transformación del carbonato de calcio en sulfato de calcio dihidratado, de donde el carbonato de calcio está presente como un compuesto reprecipitado o como un fragmento residual de la roca original.

Puede sugerirse que S, C, Br, Pb y Zn son elementos de origen antropogénico. En resumen S y C están asociados con la emisión atmosférica de fuentes de combustible (plantas termoeléctricas, sistemas de calefacción domésticos y máquinas de diesel), Pb y Br son trazas típicas de la combustión de gasolina y el Zn está relacionado con emisiones de incineradores y con fábricas de producción y/o refinación de Pb [Sabbioni, 1995].

De las gráficas de cuantificaciones medioambientales se desprende que la estación meteorológica recién inició en 1976, mientras que las mediciones de calidad del aire, no son comunes en la ciudad.

La Figura 2.1 muestra que la temperatura mínima provoca congelamiento del agua absorbida en los poros, el incremento de volumen propicia fracturas en los poros, en la Figura 2.2 se pone de manifiesto que la cantidad de horas de radiación solar es muy alta con respecto a las zonas europeas de gran concentración de monumentos. La Figura 2.3 muestra la precipitación pluvial anual de donde se infiere, que la cantidad de agua que arrastra partículas suspendidas para depositarlas en los monumentos, es del orden promedio de 800 mm; dicha agua no sólo desciende sobre los monumentos sino que al llegar a las banquetas es retrodispersada sobre los muros por su caída libre y la que se acumula es removida por los autos.

En la Figura 2.6, la planta de la catedral muestra la dirección de los vientos dominantes y el arroyo de la calle posterior de la catedral, lo que explica en menor medida que aún que los vientos dominantes provienen del SO, el edificio anterior protege a la catedral en la parte inferior que es donde se realizaron las cuantificaciones con el esclerómetro.

La Figura 2.7 muestra la primera fase del proceso de despositaciones de sulfato de calcio y en la Figura 2.8, se observa la estructura tubular de una vesícula de pumicita, muy común en el banco del Tejocote y en múltiples ignimbritas de monumentos del centro histórico; tal estructura cuando el evento volcánico, es una válvula de escape de gases magmáticos.

En la Figura 2.9, el crecimiento de sulfato de calcio ha aumentado en su volumen; en las Figuras 2.10, 2.11, 2.12 y 2.14 se muestran partículas de origen antropogénico, se encuentran en las superficies expuestas de las ignimbritas y también a profundidades menores a tres pulgadas. Como morfología de fondo en las fotomicrografías de las ignimbritas puede observarse con claridad el vidrio volcánico, compuesto mayormente de Si, con presencia de elementos como Ca, Al, Fe.

La Figura 2.15 es la más representativa de los múltiples bloques provenientes de la catedral, que fueron cortados en rebanadas y analizados mecánicamente y de donde también por calcinación se obtuvieron sus porcentajes en contenido de S y C, las abcisas son el espesor total de este balaustrado elegido como ejemplo, y ambas superficies (0 y 15 cm) estuvieron expuestas por más de 400 años; las ordenadas del lado izquierdo con el porcentaje en peso del contenido de azufre que contuvo cada profundidad y en las ordenadas indicadas en el lado derecho, se cuantifica la resistencia mecánica con el esclerómetro.

Las Figuras 2.16 y 2.17 muestran la velocidad y dirección de los vientos dominantes en Morelia, la dirección del viento coincide con los levantamientos que se han realizado de los inmuebles y los daños a los mismos, la velocidad del viento es suficiente para transportar partículas aéreas y depositarlas en las superficies de los elementos expuestos de los monumentos, pero no suficiente para provocar desgaste mecánico (abrasión) por fricción.

En la Figura 2.18, se graficó el comportamiento mecánico de la fachada norte de la catedral, cabe destacar que es la fachada más protegida de los vientos dominantes y como al frente está el atrio y no colinda con el arroyo de la calle de donde pudiera salpicarse agua producto de la esorrentía. La medición mecánica a 0.50 metros de

altura es en promedio la que presentó el mejor comportamiento mecánico, perennemente está humedecida y al no secarse no hay sales producto de la evaporación del agua. En la Figura 2.19 los valores de la resistencia mecánica son muy similares entre sí, la fachada sur está protegida del viento dominante en la parte inferior, pero la banqueta que la separa del arroyo vehicular es de 60 centímetros de ancho escasamente, ahí queda demostrada la pertinencia de la protección del arroyo vehicular y de un diseño de drenaje pluvial.

La Figura 2.20, muestra el comportamiento mecánico de la fachada este de la catedral, que colinda con la plaza de Armas, zona húmeda y poblada de vegetación, mientras que la fachada oeste, Figura 2.21, colinda con la plaza Ocampo, una explanada adoquinada sin tránsito vehicular, de ahí los valores mayores de resistencia en las zonas inferiores de la fachada oeste.

Las Figuras 2.23, 2.24, 2.25 y 2.26, son microfotografías de los bancos de roca sanas estudiadas; en ellas se aprecia vidrio volcánico devitrificándose, pero con morfología tendiente a zeolita mordenita (De Pablo, 2002)

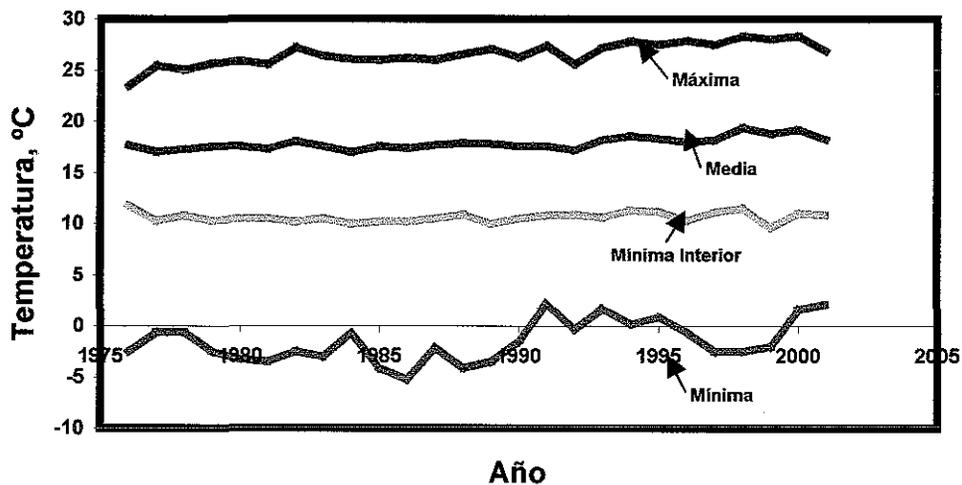


Figura 2.1. Temperatura mínima, mínima interior, media y máxima anuales, registradas en ° Celsius.

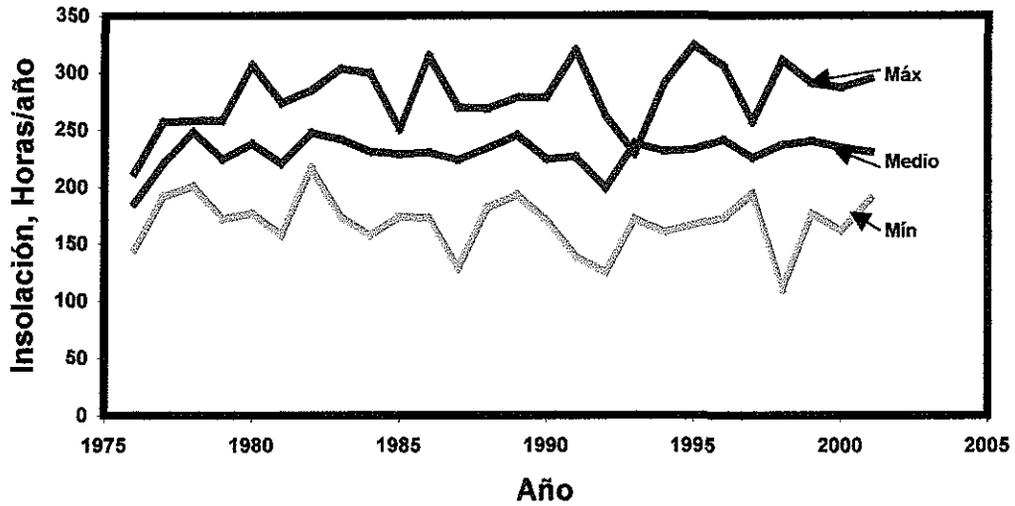


Figura 2.2. Radiación solar ó insolación, promedio anual mínimo, medio y máximo, en horas.

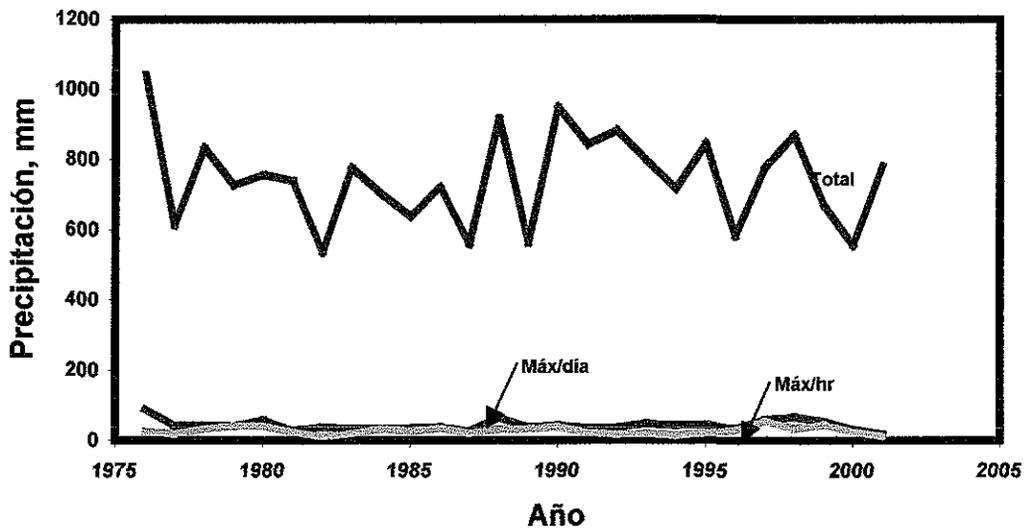


Figura 2.3. Precipitación pluvial anual valor total y máximos registrados diarios y horarios por año, en milímetros.



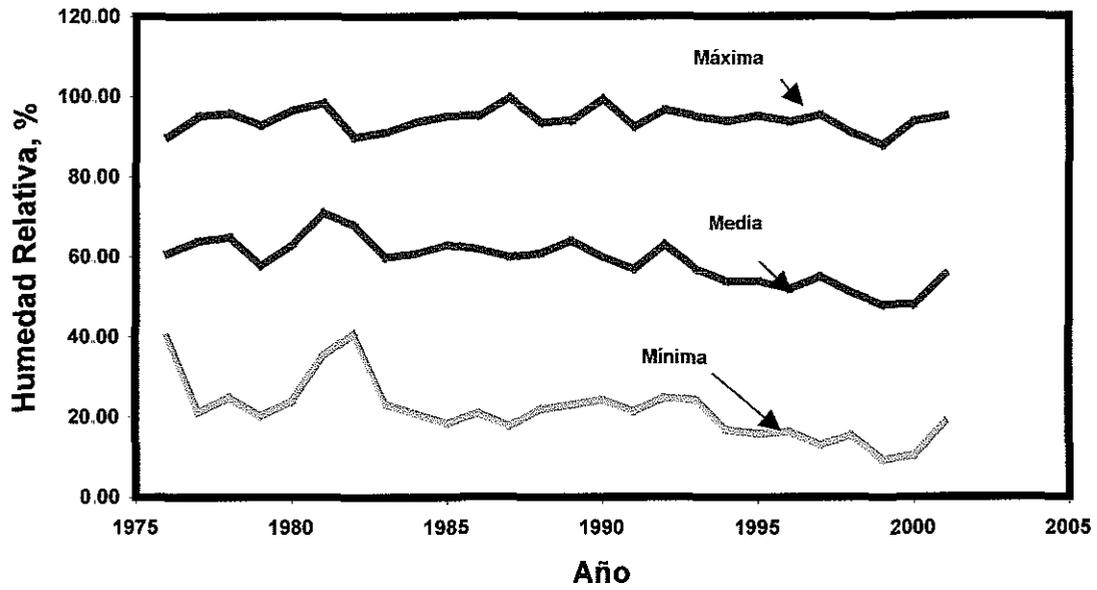


Figura 2.4. Humedad relativa ambiental, porcentajes mínimo, medio y máximo anuales, en porcentaje.



Figura 2.5. Fachada de la Catedral de Morelia, Michoacán.

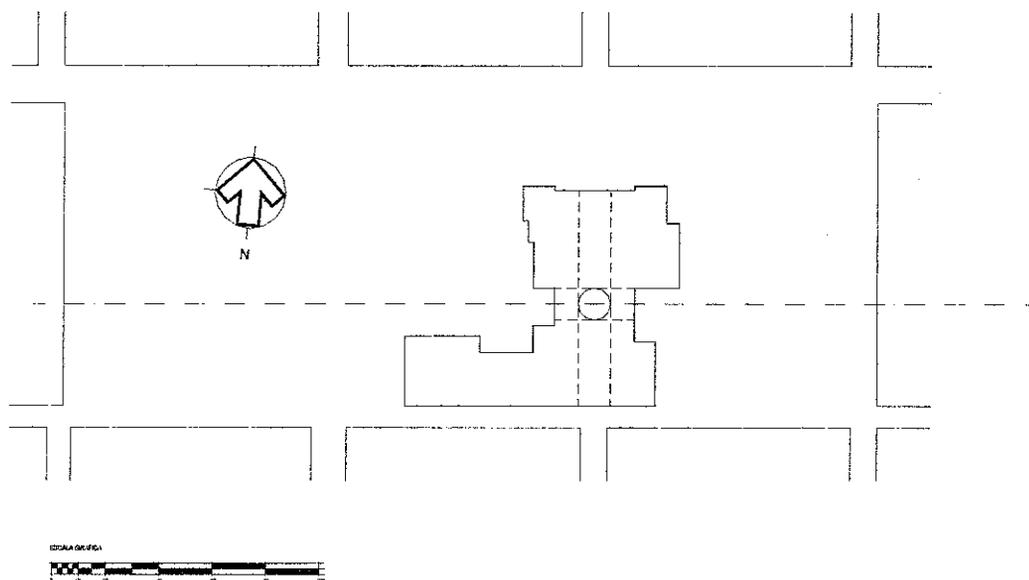


Figura 2.6. Planta de localización y orientación de la catedral.

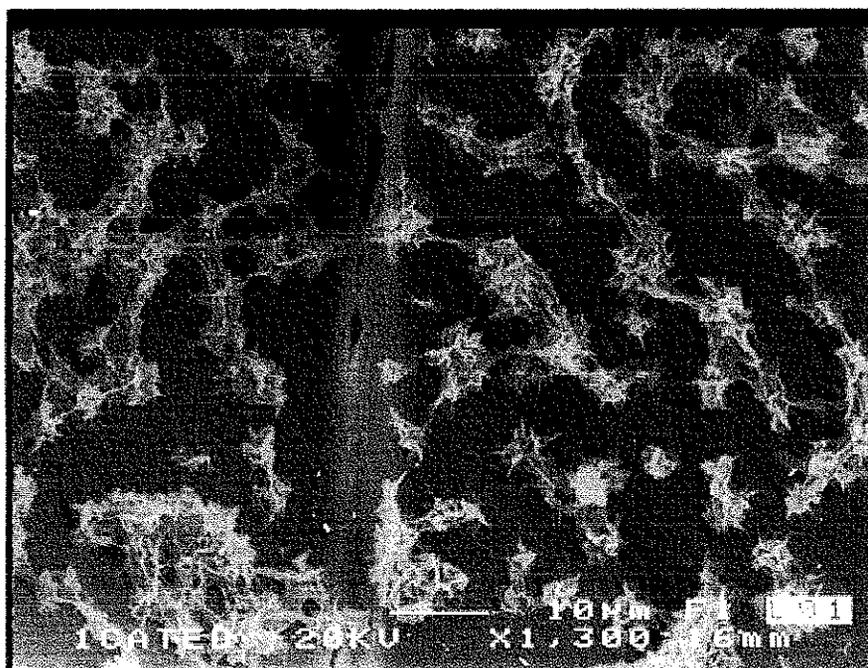


Figura 2.7. Depósitos de sulfato de calcio sobre ignimbrita de la catedral.

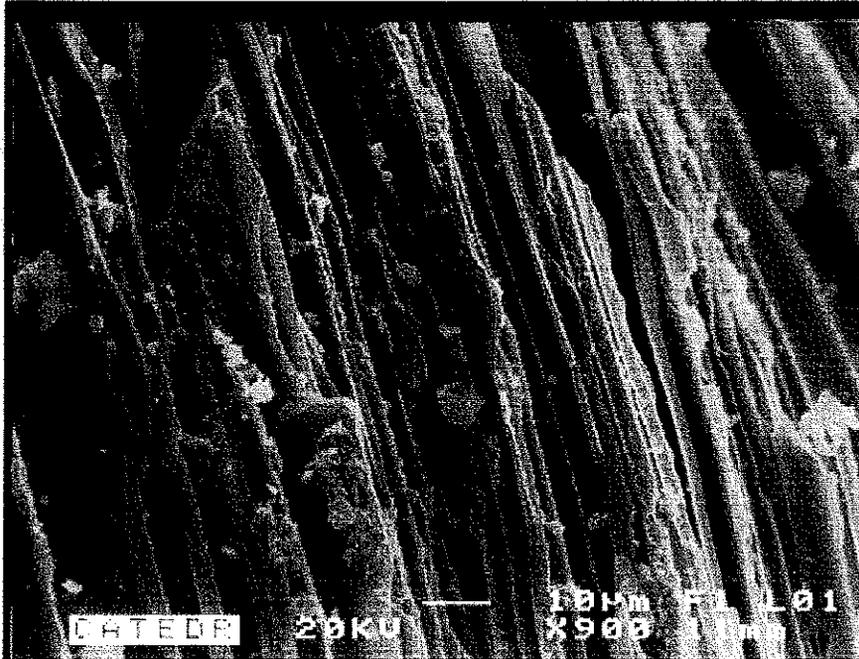


Figura 2.8. Vesícula de pumicita, ignimbrita de la catedral.

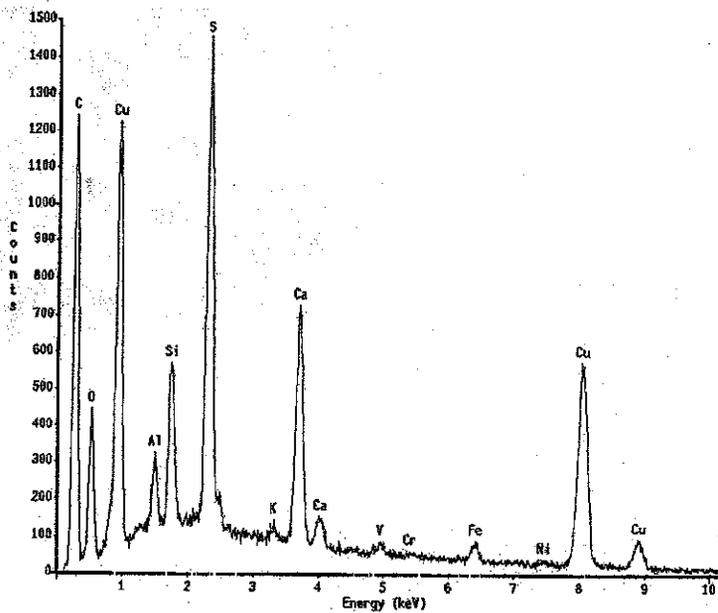


Figura 2.9. Crecimiento de sulfato de calcio sobre vidrio volcánico. Ignimbrita catedral.

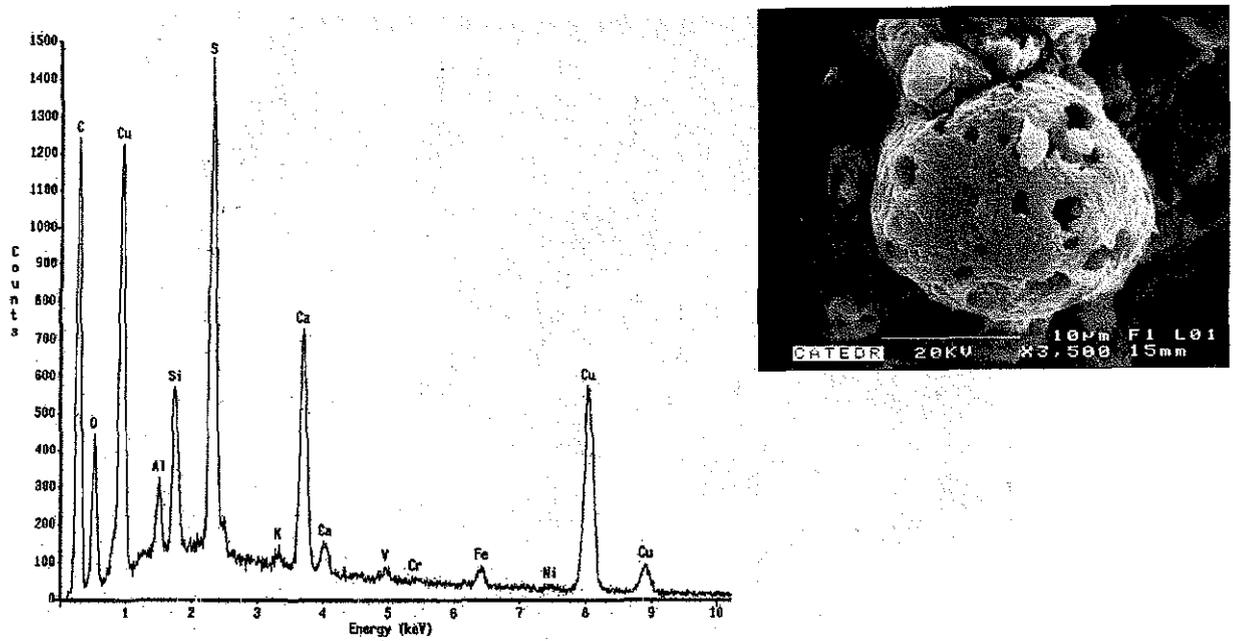


Figura 2.10. Partícula antropogénica, fachada expuesta balaustrado de la catedral.

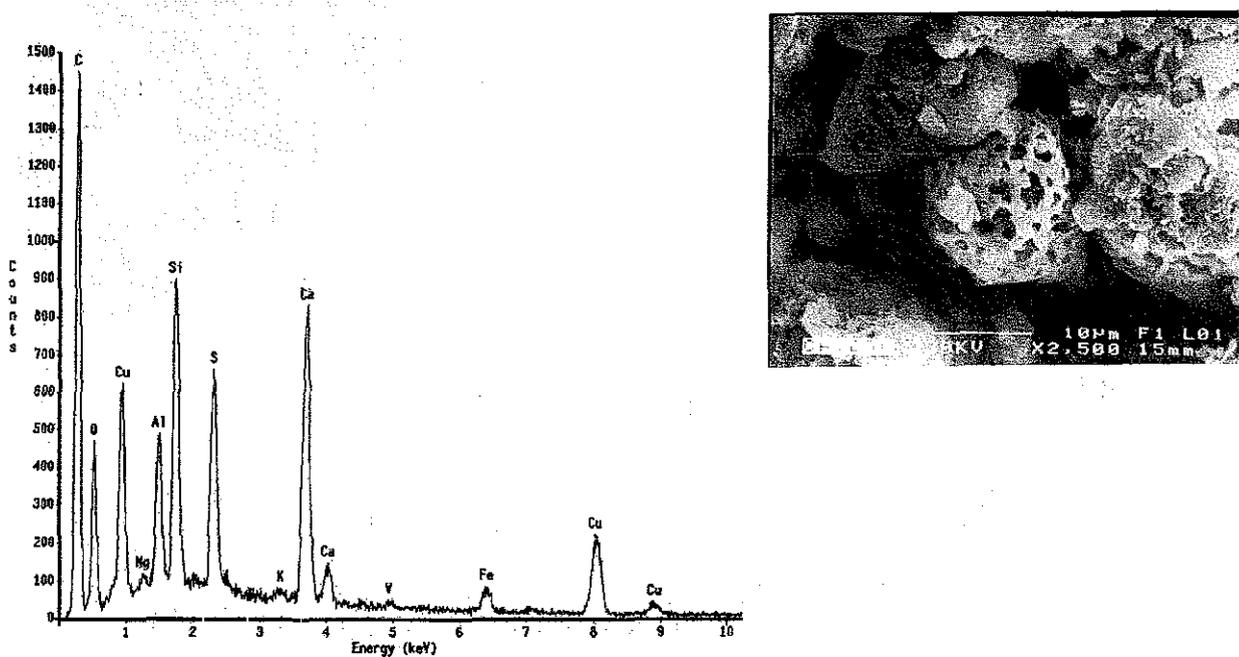


Figura 2.11. Partícula antropogénica, fachada expuesta balaustrado de la catedral, una pulgada de penetración.

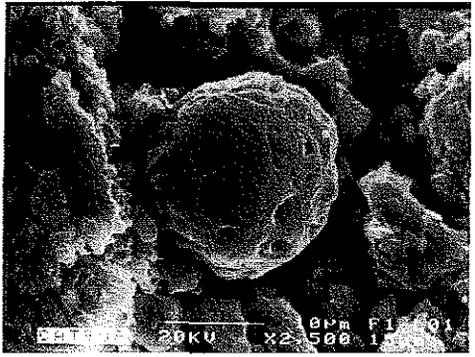
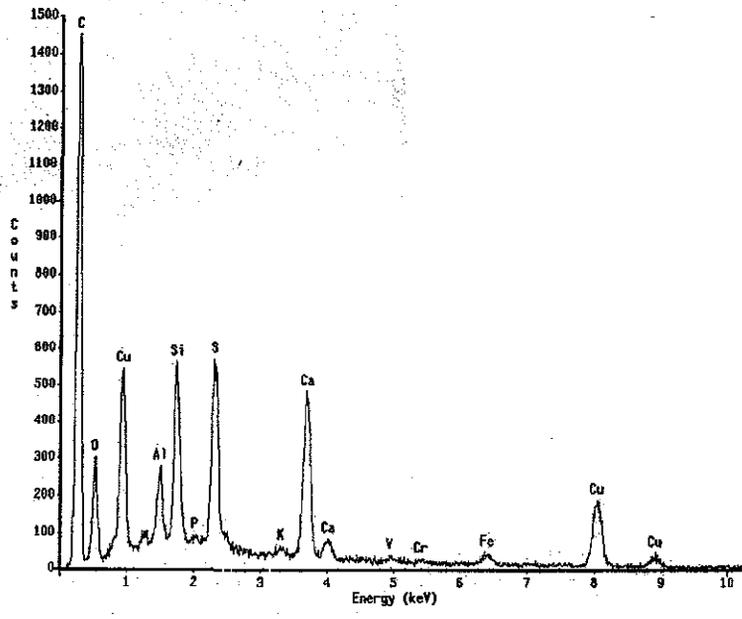


Figura 2.12. Partícula antropogénica, fachada expuesta balaustrado de la catedral, una pulgada de penetración.

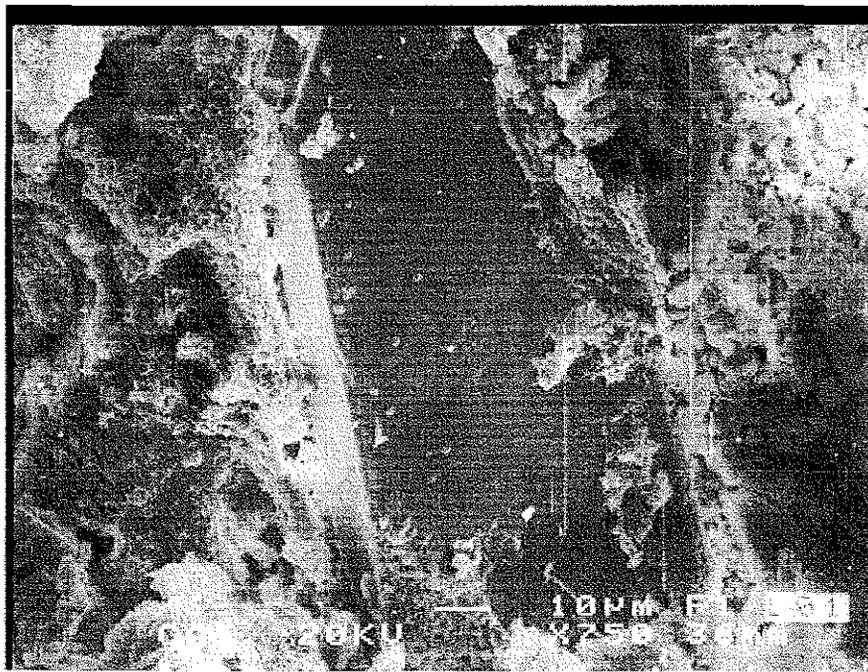


Figura 2.13. Matriz de ignimbrita dañada de la catedral, superficie expuesta.

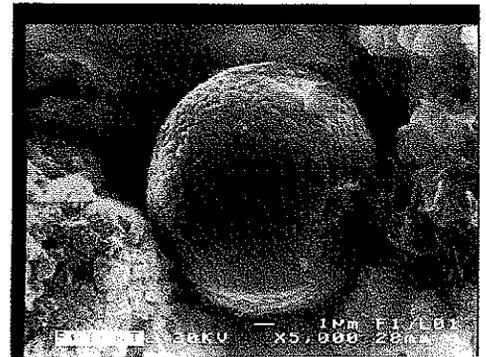
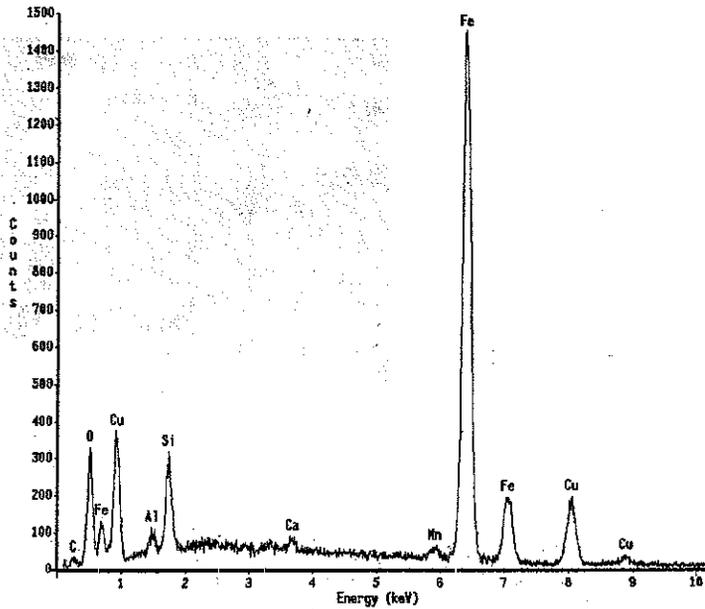


Figura 2.14. Partícula antropogénica rica en Fe, balastrado de la catedral.

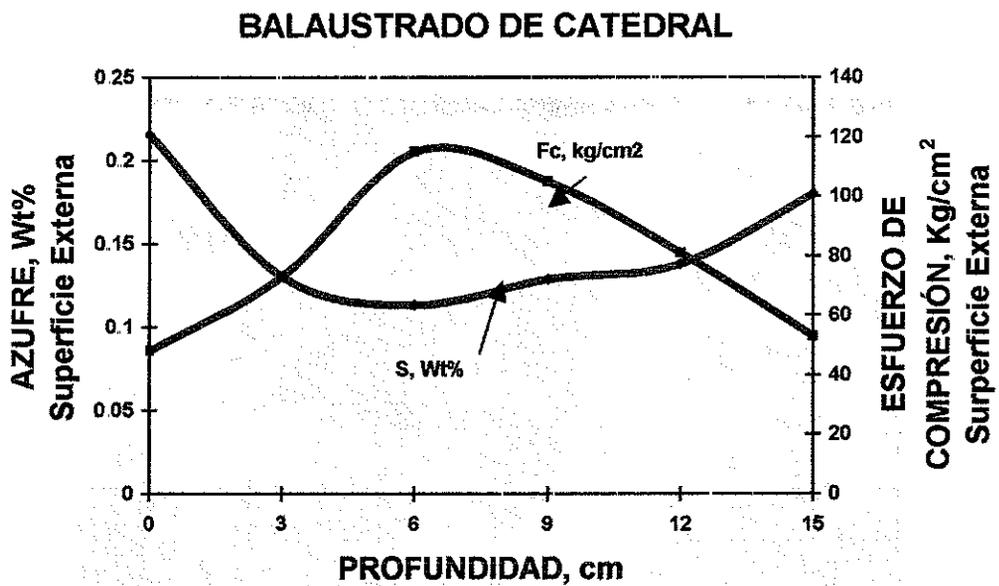


Figura 2.15. Gradiente de distribución del contenido de azufre en porcentaje en peso en balastrado de la catedral en las ordenadas de la izquierda, las abscisas indican la profundidad de las "rebanadas" caracterizadas y las ordenadas de la derecha muestran el esfuerzo de compresión con el esclerómetro de Schmidt.

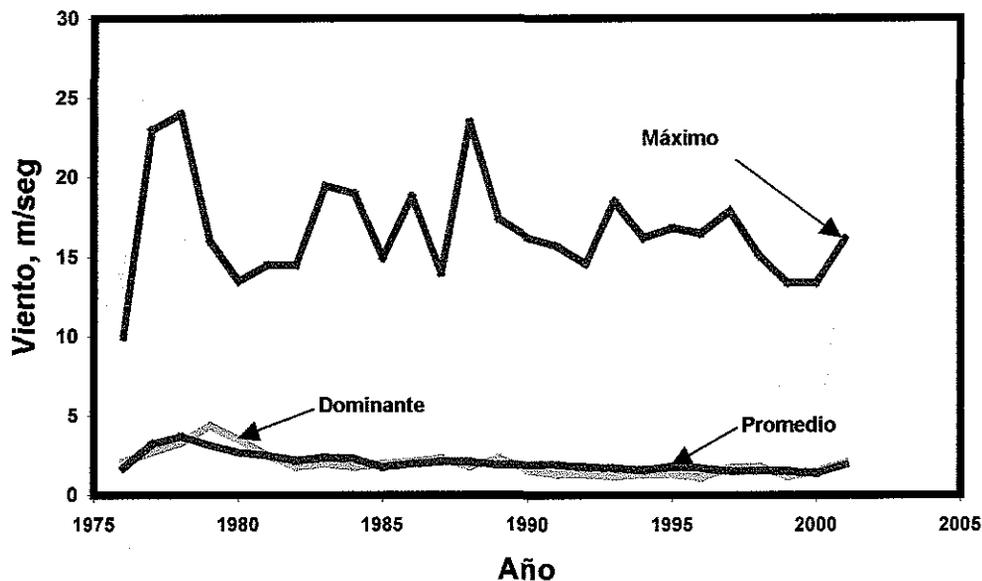


Figura 2.16. Velocidad del viento, valores anuales máximo, medio y dominante, en metros/segundo.

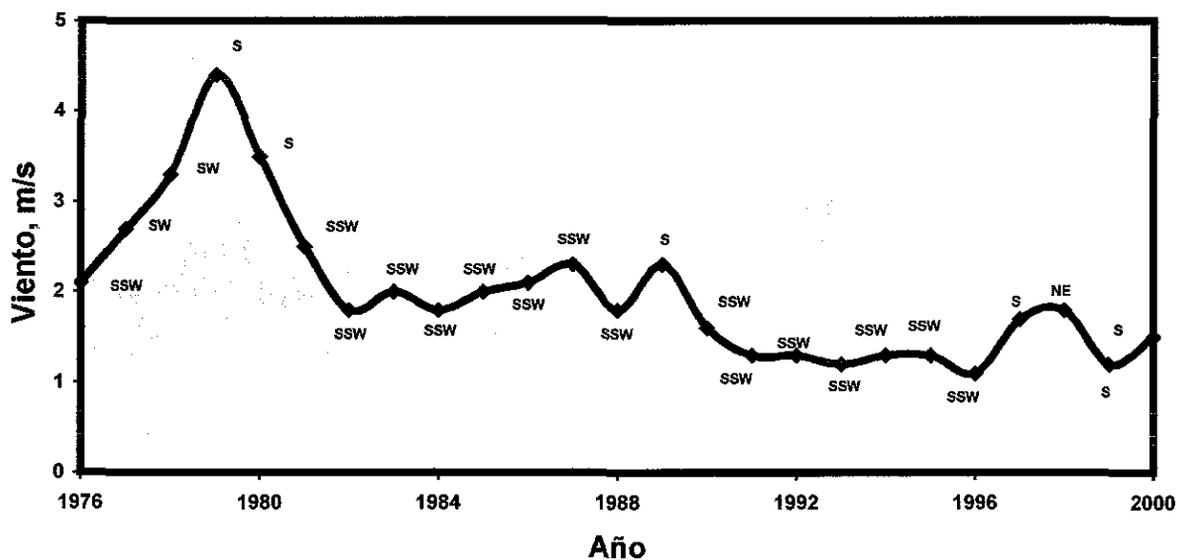


Figura 2.17. Velocidad promedio y dirección de los vientos dominantes en metros / segundo.

Esfuerzo Compresión obtenido con Esclerómetro Fachada Norte

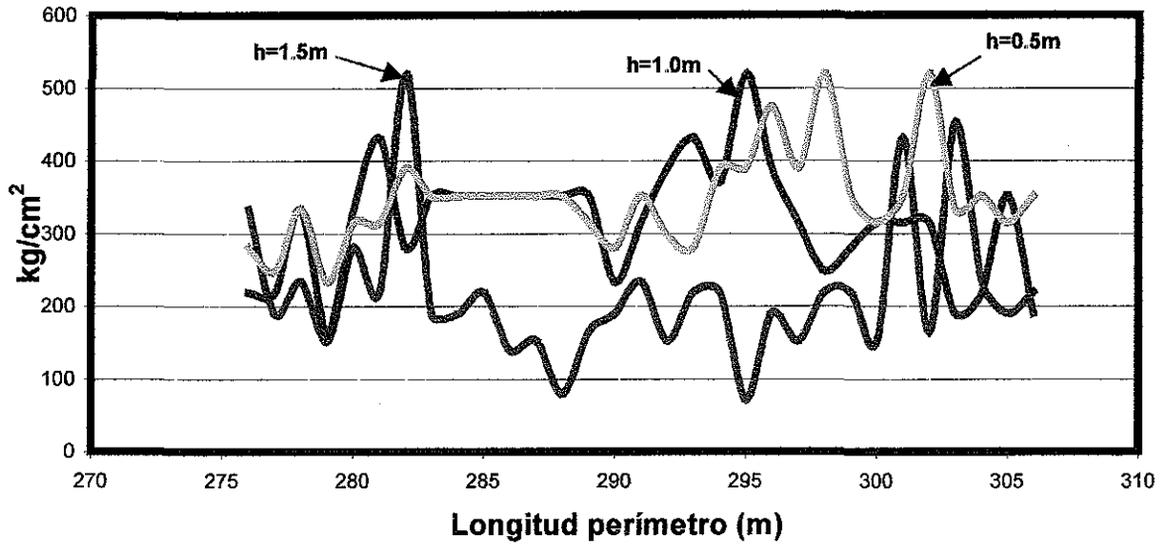


Figura 2.18. Resistencia mecánica en kg/cm² con esclerómetro, valores perimetrales en fachada norte de la catedral, metro a metro y a tres alturas a partir del nivel de piso terminado; 0.50, 1.00 y 1.50 m.

Esfuerzo a la Compresión obtenido con el Esclerómetro Fachada Sur

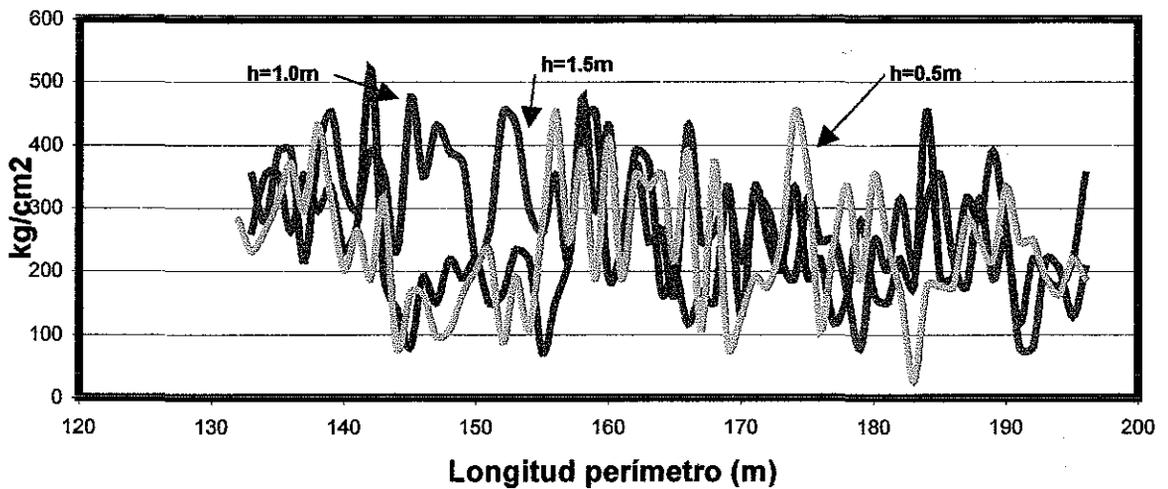


Figura 2.19. Resistencia mecánica en kg/cm² con esclerómetro, valores perimetrales en fachada sur de la catedral, metro a metro y a tres alturas a partir del nivel de piso terminado; 0.50, 1.00 y 1.50 m.

Esfuerzo de Compresión obtenido con el Esclerómetro Fachada Este

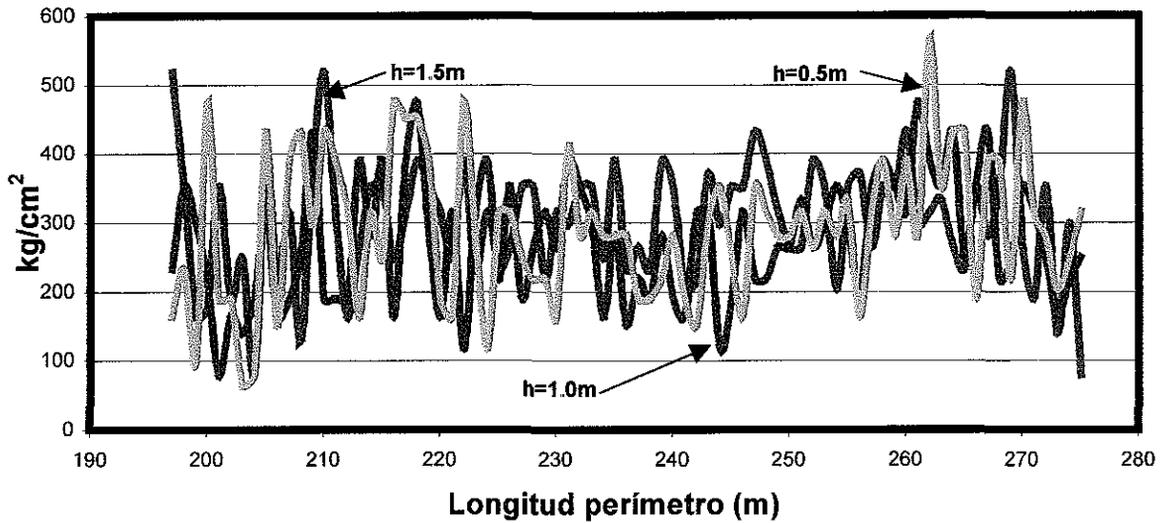


Figura 2.20. Resistencia mecánica en kg/cm^2 con esclerómetro, valores perimetrales en fachada este de la catedral, metro a metro y a tres alturas a partir del nivel de piso terminado; 0.50, 1.00 y 1.50 m.

Esfuerzo a la Compresión obtenido con Esclerómetro Fachada Oeste

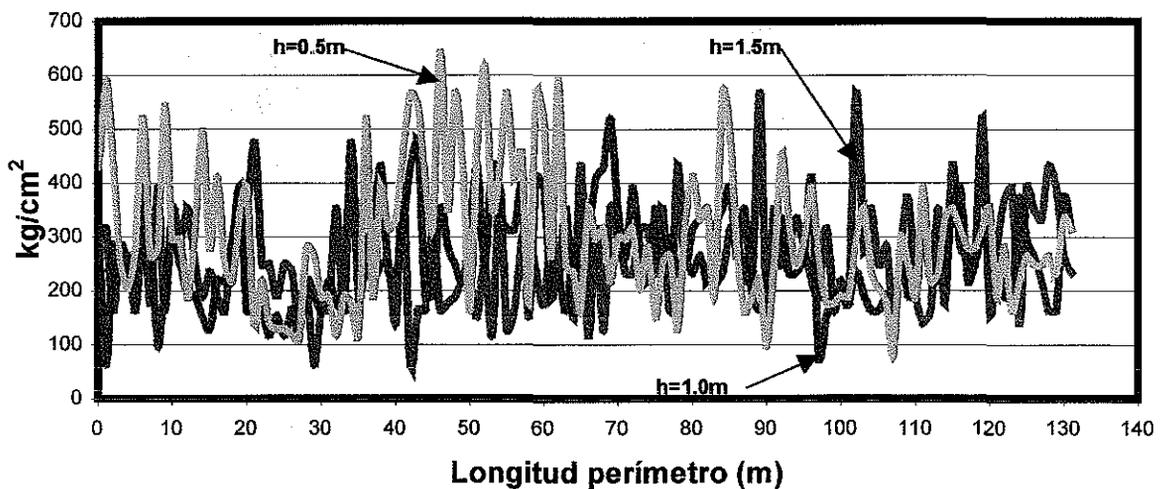


Figura 2.21. Resistencia mecánica en kg/cm^2 con esclerómetro, valores perimetrales en fachada oeste de la catedral, metro a metro y a tres alturas a partir del nivel de piso terminado; 0.50, 1.00 y 1.50 m.

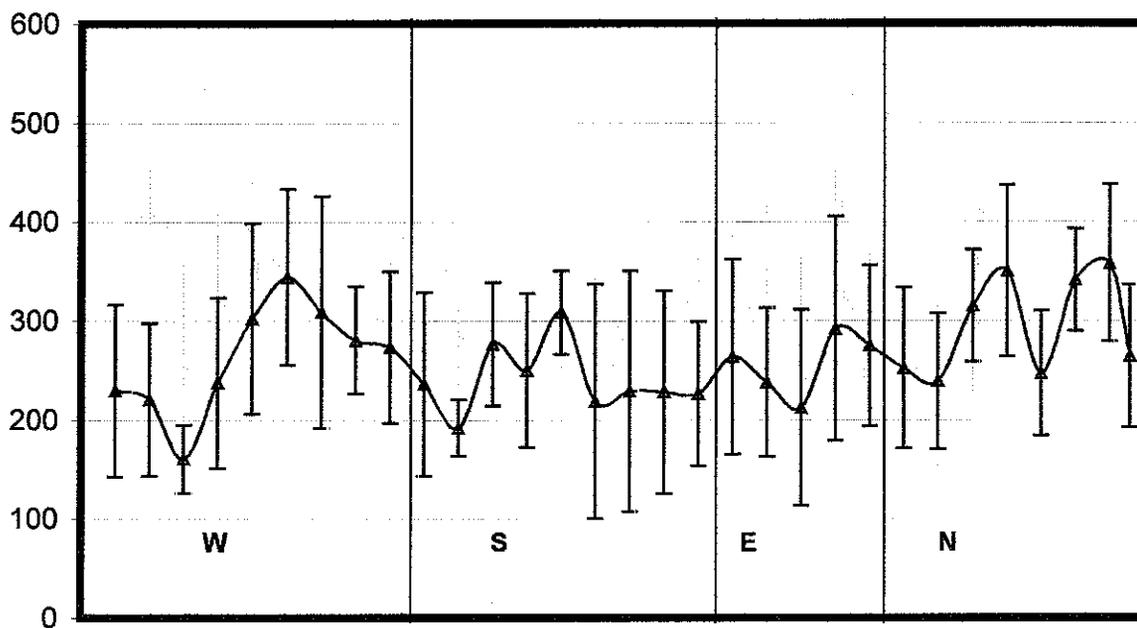


Figura 2.22. Promedio de resistencia mecánica en kg/cm^2 con esclerómetro, por fachada con su correspondiente desviación estándar.

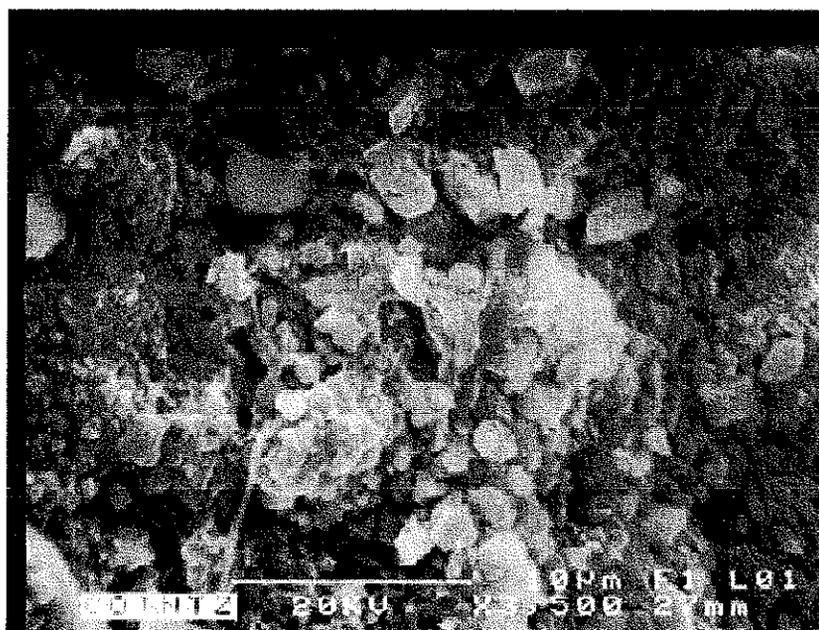


Figura 2.23. Ignimbrita del banco de Cointzio.



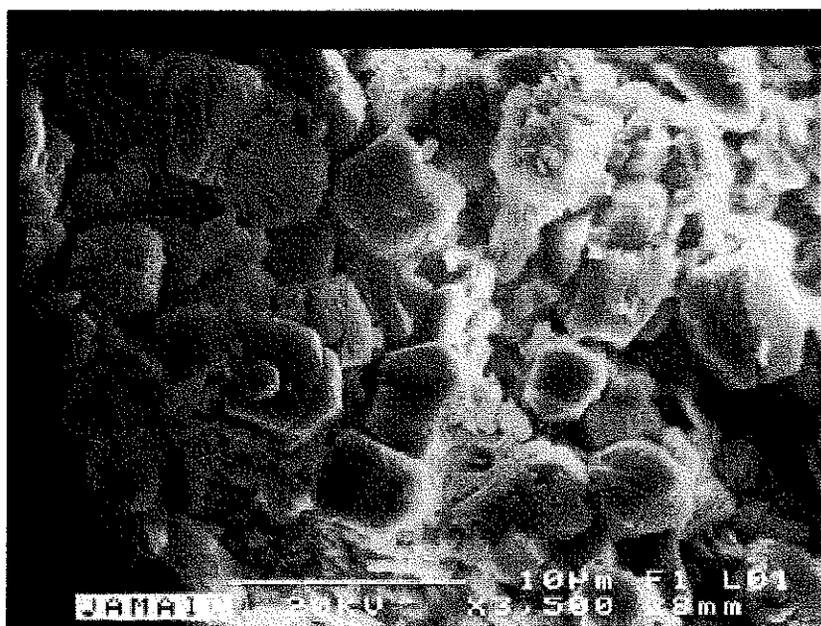


Figura 2.24. Ignimbrita del banco de Jamaica.



Figura 2.25. Ignimbrita del banco El Tejocote.

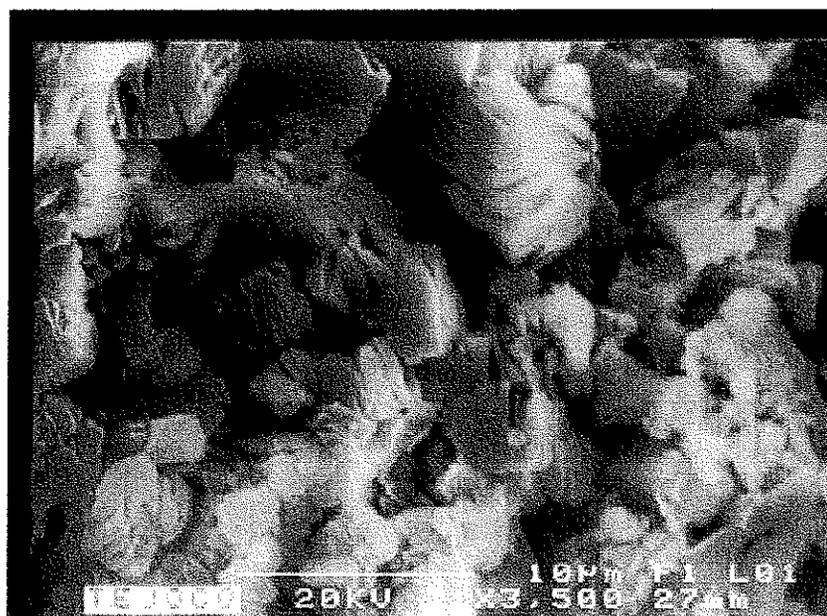


Figura 2.26. Ignimbrita del Banco El Tejocote.

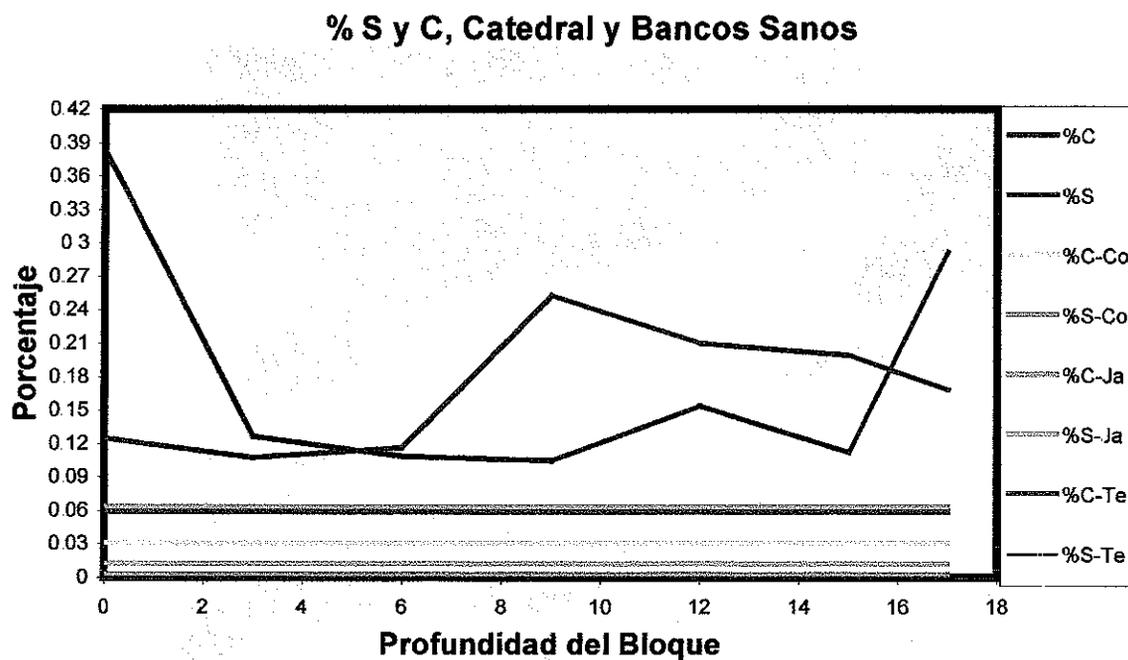


Figura 2.27. Porcentaje de azufre y carbono.

% S y C, Catedral y Bancos Sanos

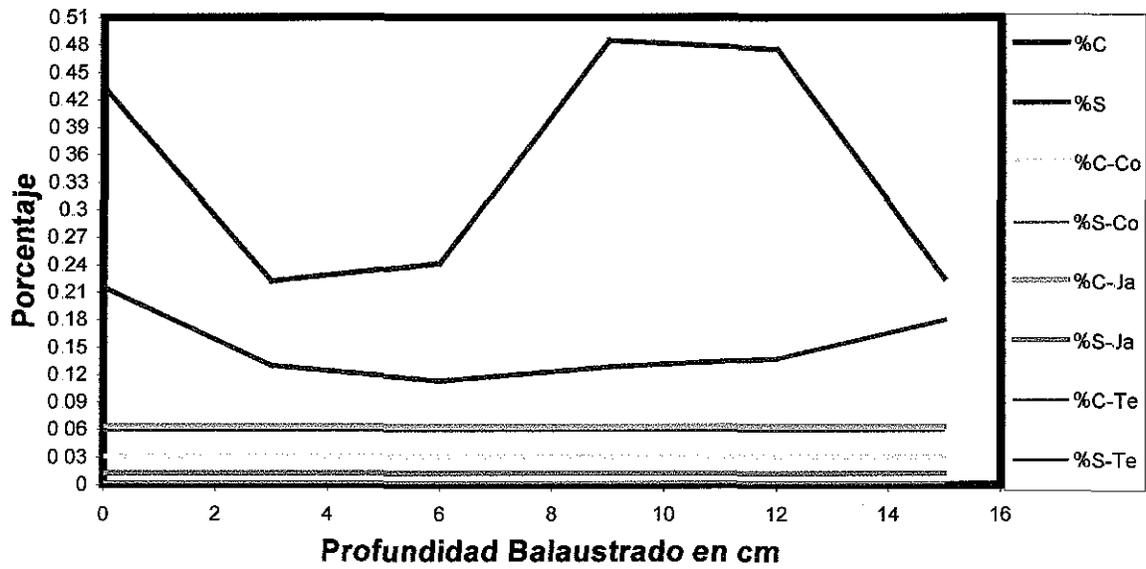


Figura 2.28. Porcentaje de azufre y carbono.

Handwritten scribble or mark.

64

Faint, illegible text or markings at the bottom of the page.

Capítulo 3.

CONCRETO ELABORADO CON AGREGADOS ÍGNEOS EXTRUSIVOS, ANDESITAS DE LOS BANCOS LOCALES.

Introducción.

Los problemas de humedad por capilaridad perimetral en los muros de los monumentos de ignimbritas presentan resistencia a erradicarse. El método por excelencia para el problema de capilaridad es la construcción de fosos perimetrales de concreto rellenos de material pétreo de $TM \geq 4$ ". El empleo de consolidantes químicos o impermeabilizantes no resuelve el problema, puesto que la humedad del subsuelo penetra por la superficie horizontal inferior. Lo anterior dirigió entonces la investigación al estudio de mezclas de concreto elaboradas con agregados pétreos del estado, con variables como fibra de vidrio como refuerzo, acelerantes del fraguado, reductores de agua, superfluidificantes, métodos de curado.

Actualmente el cemento hidráulico es el material de construcción que más se produce en el mundo. Forma macrocompósitos que se calculan para tener una vida útil de 50 a 100 años y su mantenimiento es casi nulo, motivo por el que la gran mayoría de las obras civiles sean construidas con concreto hidráulico (hospitales, escuelas, iglesias, museos, plantas de tratamiento, centrales eléctricas, presas, puentes, etc). México es uno de los principales productores de cemento hidráulico. Hace una o dos décadas se producían en el país alrededor de 8 tipos de cemento hidráulico diferentes, según el uso que tendrían. Ahora se ha cambiado la producción de cementos de acuerdo a la nueva norma, que los clasifica de acuerdo a tres aspectos: tipos de cemento (6), clase resistente (5) y características especiales (4). Frecuentemente los cambios en la calidad del cemento o cementos con características específicas se hacen por medio de aditivos químicos, puesto que puede ser más práctico o económico utilizar aditivos químicos para las mezclas y producir en lo general el mismo tipo de cemento. En México apareció la última Norma en el Diario Oficial de la Federación, a principios del año 1999, denominándosele Norma Mexicana NMX-C-414-OMNCCE-1999. En este nuevo marco

jurídico, la elaboración de las normas mexicanas queda a cargo del sector privado por conducto de los organismos nacionales de normalización. Por la necesidad de estos organismos privados, se crea y desarrolla el ONNCCE (Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación)

Según el último censo del INEGI, se habla de que en nuestro país, el material de construcción más usado es el concreto hidráulico: una mezcla de agua, agregados pétreos, adhesivo y en algunas ocasiones aditivos. Según ese censo a la fecha se cuenta con un parque habitacional de 22 millones de unidades, pero anualmente, en México, se forman 700,000 parejas y se estima entonces que, en los próximos 5 años, se requerirán 3.5 millones de viviendas adicionales. La participación económica del costo del cemento en la construcción es del 8.45 % disminuyendo en los casos de vivienda de interés social al 4.24 %. La relación del cemento en el concreto es del 10-15 % del volumen total (12% en promedio) pero su costo es del 58 %, lo que viene a impactar en forma importante en el costo final de las construcciones.

El cemento empleado en el presente estudio es un CPP 30R, Cemento Pórtland Puzolánico con un contenido de yeso + clínker del 50-94 %, materiales puzolánicos de 6-50%, y minoritarios del 0-5%, valores permitidos en porcentaje de masa. Los materiales puzolánicos incluyen puzolanas naturales, artificiales y/o cenizas volantes. No contiene escoria granulada de alto horno, humo de sílice ni caliza.

La clase resistente 30R indica que su resistencia a la compresión en N/mm^2 , es de 20 unidades como mínimo a los 3 días y a los 28 días podrá variar de 30 a 50 unidades; los tiempos de fraguado inicial y final continúan siendo de 45 minutos para el fraguado inicial y de 10 horas para el fraguado final. La máxima expansión permitida en autoclave es de 0.80 % y la máxima contracción es de 0.20 %

El cemento Pórtland, utilizado como ingrediente activo en la fabricación de concreto hidráulico, se produce al pulverizar el clínker, material constituido principalmente por silicatos de calcio, con algunos aluminatos de calcio y aluminoferritos de calcio y que, usualmente, contiene una o más formas de sulfato de calcio (yeso, anhidrita) como adición en la molienda [Harutyunyan et al, 2000; Zhang y Han, 2000;



Bonavetti et al, 2000]. La palabra hidráulico implica que la reacción química de la formación del gel de tobermollita o tobermorita se da en presencia de agua. Existen también cementos de otros tipos como los naturales, asfálticos, hidráulicos.

Uno de los principales problemas que puede presentar un concreto es la conocida reacción álcali-agregado [Alkali-Aggregate Reactions 1988; Natesaiyer y Hover, 1988; Manual de Tecnología del Concreto, 1994]. La reacción entre el gel de cemento y algunas especies contenidas en los agregados pétreos, provoca la aparición de cristales que fracturan al concreto y disminuyen su resistencia mecánica. Las andesitas, en lo general, al tener entre sus componentes sílice amorfa, suelen presentar una moderada o baja reacción álcali-agregado al mezclarse con el concreto [Neville, 1992].

Las andesitas de bancos de agregados pétreos explotados en la región centro de Michoacán (Joyitas, Cerritos, Naranja, Los Limones, Tocumbo, Cerrito Colorado, Tribasa, Mázcuta, Comanja) fueron analizadas por medio de difracción y fluorescencia de rayos X para conocer las especies mineralógicas presentes en ellos y los elementos cualitativa y cuantitativamente presentes en estas rocas ígneas a fin de estar en posibilidad de dictaminar si a futuro pudieran presentar problemas de reacciones álcali-agregado.

Los agregados pétreos deben caracterizarse según lo indicado por la American Society for Testing and Materials (ASTM), que a su vez es una copia modificada de la British Standard. En México se emplea el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal y en la Entidad los valores deben cumplir con lo indicado por el Reglamento de Construcciones para el Estado de Michoacán.

En los casos de agregado pétreo andesítico volcánico, se clasifica en el argot ingenieril como natural si se emplea tal y como lo provee la naturaleza, con sólo algún tamizado para eliminar sobretamaños; triturado, cuando se somete a reducción de tamaño mecánico a fin de disminuir su granulometría o volverla más heterogénea, y

artificial, que es el agregado pétreo para concreto proveniente de fundiciones y escorias de altos hornos.

Metodología.

En nuestro caso particular se caracterizaron agregados pétreos, entre gravas y arenas, que específicamente pudieron clasificarse como andesitas.

Tanto los agregados gruesos y finos de los Bancos de Joyitas, Cerritos, Cerrito Colorado, Tangamandapio, Tocumbo, Los Limones, Mázcuta, Comanja y Tribasa, fueron caracterizados física, mecánica, química y geológicamente, para diseñar y elaborar mezclas de concreto hidráulico con cemento Pórtland CPP 30 R, empleando aditivos del grupo ASTM 494 como acelerantes, fluidificantes, superfluidificantes y fibras; sometidos a sollicitaciones mecánicas de compresión simple, tensión indirecta, módulo de ruptura a la flexión y módulo de elasticidad dinámico. El curado se realizó en camas de arena y una de las mezclas no fue curada.

Los estándares de caracterización de los agregados pétreos, finos y gruesos, cemento y mezclas frescas y endurecidas han sido elaborados por la American Society for Testing and Materials. La metodología para el diseño de mezclas de concreto se diseñó por el American Concrete Institute, dosificadas en peso y elaboradas en revolvedora mecánico-eléctrica, en el Laboratorio de Materiales "Ing. Luis Silva Ruelas"

Los agregados pétreos utilizados en este estudio fueron muestreados en sus bancos de explotación, en los diferentes frentes de ataque. Las pruebas se realizaron por triplicado y los resultados son el promedio de las tres mediciones. En los casos en que uno de los tres resultados varió en ± 10 por ciento respecto a los otros dos, se repitió la prueba y se desechó el valor que presentó la variación.

Para los análisis de fluorescencia y difracción de rayos X, el material se pulverizó en un mortero de ágata hasta que el material pasó por la malla No. 400, ASTM.



Previamente el agregado pétreo se cuarteó hasta tener una muestra representativa de 50 gramos, que fue la que se sometió a molienda.

Los materiales locales estudiados sí son heterogéneos, presentan los tamaños descritos en las pruebas de granulometría, pero no contienen el porcentaje ideal. Las implicaciones que representa son que si hay sobre tamaños los huecos dejados deberán ser llenados por lechada de cemento, que implica mayor costo o, por otro lado, si se trata de material muy fino, redundará en el hecho de presentar mayor área superficial que deberá ser cubierta por una mayor cantidad de lechada de cemento [Chan et al,2000]

El concreto hidráulico aquí estudiado se diseñó inicialmente según el Método de las Curvas de Duffus Abrams, pero al realizar las mezclas de prueba se observó en todos los casos que debían hacerse correcciones por humedad actual y absorción en todos y cada uno de los casos, por lo que se diseñó entonces con el Método del American Concrete Institute, ACI, [ACI, 1998] que permite mayores relaciones $A/C \approx 0.50$ [Persson, 2001; Appa Rao, 2001-a; Appa Rao, 2001-b; Curtis, 2000]

En lo general el concreto se diseña a fin de economizar el cemento, que forma aproximadamente del 10 al 15 % en peso del concreto y que es asimismo el elemento más costoso del concreto, por lo que su uso debe optimizarse de tal manera que se pueda lograr la máxima resistencia mecánica con el menor contenido de cemento posible.

Experimentación.

Los agregados pétreos se estudiaron según estándares indicados en la ASTM: Método para la Gravedad Específica y Vacíos en los Agregados (finos y gruesos) ASTM C29/C29M-97; Especificación para agregados para concreto ASTM C33-99a^{ε1}; Humedad actual en agregado fino ASTM C70-94; Método de prueba para gravedad específica y porcentaje de absorción en agregado grueso ASTM C 127-88 (1993) ^{ε1}; Método de prueba para gravedad específica y porcentaje de absorción en agregado fino

ASTM C 128-97; Método de prueba para análisis granulométrico por tamizado de agregados finos y gruesos ASTM C136-96^a; Método de prueba de contenido de arcillas y/o partículas deletéreas en agregados C142-97.

Todas la mezclas de concreto hidráulico se realizaron en el laboratorio con revolvedora mecánica-eléctrica y fueron dosificadas en peso. A las mezclas frescas se les cuantificó: Elaboración y Curado del Concreto en campo ASTM C31/C31M-98; Método de prueba de revenimiento en concreto hidráulico C 143/C 143M-98; Método de muestreo de concreto fresco C172-99; Método de prueba para elaborar y curar especímenes de concreto en laboratorio C 192/ C 192M-98.

Las mezclas endurecidas se sometieron al Método de Prueba para Esfuerzo de compresión (f_c) en especímenes cilíndricos ASTM C39/C39M-99; Método de prueba para esfuerzo a la flexión (M_R) en vigas con el método de los tres apoyos ASTM CC78-94; Método de prueba para frecuencias resonantes fundamentales transversales, longitudinales y torsionales (E_d) en especímenes de concreto C 215-97^{e1}; Especificación de aditivos químicos para concreto C 494/ C 494M-99^a; Método de prueba de esfuerzo de ruptura a la tensión (f_T) de especímenes cilíndricos de concreto C 496-96; Práctica de Cabeceo de especímenes de concreto C 617-98; Especificación de concreto reforzado con fibras C 1116-97.

Las edades de prueba fueron 3, 7, 14, 21, 28 y 45 días; para cada una de las pruebas mecánicas descritas antes se probaron 10 especímenes, es decir para probar la resistencia a la tensión de una mezcla, se probaron 60 cilindros a la tensión (6 edades x 10 especímenes)

El valor más significativo del concreto es su resistencia a la compresión [Martínez M. et al, 2001], que en América se prueba en cilindros con relación diámetro a altura de 1:2, cabeceados con azufre; para cambios en el comportamiento mecánico las mezclas fueron modificadas con químicos y también se estudió su comportamiento. La resistencia a la tensión se cuantificó con la Prueba Brasileña ideada por Máximo Carneiro (ASTM C496-96), conocida también como prueba de tensión indirecta,

realizada en cilindros de concreto con la misma relación diámetro a altura de 1:2, en donde la carga se distribuye de manera uniforme con una solera de metal de $\frac{1}{2}$ ", sobrepuesta a una tira de cuero de 1" x 13".

El M_R y el E_d , se cuantificaron en vigas (prismas) de concreto de 15x15x60 cm, el M_R [Lègeron y Paultre, 2000] es una prueba destructiva, mientras que el E_d , es una prueba ultrasónica, no destructiva. Los especímenes primero se probaron de manera no destructiva y posteriormente se probaron hasta la falla, que en todos los casos ocurrió en el tercio medio.

Todas las pruebas mecánicas destructivas se realizaron en una Máquina Universal de Pruebas marca Forney, con capacidad de 150 toneladas y aproximación de 1 a 5 Kg, dependiendo del rango.

El módulo de elasticidad dinámico se cuantificó con el equipo conocido como Grindosonic, con programa Emod en el Departamento de Materiales Cerámicos del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas. El E_d es un valor índice para el diseño de estructuras de concreto, especialmente en zonas cuyo coeficiente de sismicidad es alto, que es nuestro caso específico.

Los valores que se encuentran cuantificados son el promedio de las diez mediciones para cada caso; resumiendo se probaron 14 mezclas diferentes x 3 especímenes (cilindros para f_c y f_T , y vigas para M_R) x 6 edades de prueba (3, 7, 14, 21, 28 y 45 días) x 10 especímenes en cada caso dando un total de 2520 de especímenes de concreto.

Los análisis de difracción y fluorescencia de rayos X, se realizaron en el Laboratorio (LUGIS) del Instituto de Geología de la UNAM. Para el análisis cuantitativo de la FRx se empleó el programa Majors.QAN y para la obtención de los elementos traza, el Traza.QAN.

Se caracterizaron doce tipos de agregados pétreos con difracción y fluorescencia de rayos X; seis agregados pétreos finos o arenas y seis agregados gruesos o gravas.

Con los agregados descritos se elaboraron 14 mezclas de concreto y 5 de ellas emplearon aditivos, una mezcla no se curó.

Resultados.

Los bancos (B) de agregado pétreo se han designado con números del 1 al 12, las muestras (M) pulverizadas y analizadas se han llamado también con los mismos números. Las 14 mezclas de concreto elaboradas con los 12 agregados estudiados fueron designadas con la letra C (concreto) y un número según se resume en las tablas. Los resultados de las pruebas realizadas al cemento motivo de la investigación se resumen en la tabla 3.1, la calidad de las fibras empleadas en la Mezcla 4, se muestra en la tabla 3.2; la nomenclatura de los Bancos de Material estudiados, se resume en la tabla 3.3.

Tabla 3.1. Calidad del cemento Pórtland empleado en las mezclas.

Prueba física	Unidad	ASTM C150	Huichapan
Tiempo fraguado inicial	Minutos, mínimo	43	117
Tiempo fraguado final	Minutos, máximo	373	227
Expansión en autoclave	Porcentaje, máximo	0.80	0.04
Compresión 3 días	Kg/cm ²	130	269
Compresión 7 días	Kg/cm ²	200	316
Compresión 28 días	Kg/cm ²	289	378

Tabla 3.2 Características físicas de las fibras de polipropileno empleados en la mezcla 4.

% Ab	G _E	L Fib	Pto. Ig	C Tér	C Eléct	R sal/ac	Res Ten	E 10 Ksi
0	0.9	3/4"	590 ° C	Baja	Baja	Alta	0.775 k/c ²	3.5 kN/mm ²

Tabla 3.3. Nomenclatura de los agregados pétreos de los bancos estudiados para la elaboración de concreto hidráulico.

B	Banco	Agregado	Tipo
1	Santiago Tangamandapio	Arena	Volcánico natural
2	Tocumbo	Grava	Volcánico natural
3	Los Limones	Arena	Volcánico natural
4	Cerrito Colorado	Grava	Volcánico natural
5	Tribasa	Grava	Triturado
6	Joyitas	Grava	Volcánico natural
7	Joyitas	Arena	Volcánico natural
8	Cerritos	Greña	Volcánico natural
9	Mázcuta	Arena	Volcánico natural
10	Mázcuta	Grava	Volcánico natural
11	Comanja	Arena	Volcánico natural
12	Comanja	Grava	Volcánico natural

Los resultados de los análisis de fluorescencia de rayos X, Elementos traza presentes en los agregados y difracción de rayos X, se incluyen en las Tablas 3.4, 3.5 y 3.6 respectivamente.

Tabla 3.4. Fluorescencia de rayos X, en porcentaje, para los agregados de los bancos indicados.

B	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	PXC	Σ (%)
1	54.56	1.044	18.651	6.914	0.118	3.022	7.465	3.531	1.998	0.359	2.44	100.11
2	54.96	0.941	17.887	7.369	0.119	5.172	7.341	3.197	1.015	0.208	1.68	99.89
3	58.93	0.899	16.816	6.113	0.101	3.501	6.423	3.40	1.926	0.279	1.87	100.26

4	52.75	1.117	17.886	7.688	0.130	4.248	7.337	3.735	2.151	0.47	2.02	99.53
5	57.00	0.872	18.138	6.732	0.105	3.506	7.414	3.443	1.492	0.182	1.38	100.26
6	60.28	0.829	17.294	5.848	0.105	3.241	6.183	3.559	1.786	0.226	0.59	99.94
7	60.19	0.834	17.213	5.907	0.103	3.501	6.098	3.485	1.780	0.218	0.90	100.23
8	57.74	1.17	16.901	7.809	0.125	3.638	6.195	3.763	1.858	0.391	0.38	99.97
9	53.00	1.447	18.043	8.295	0.131	5.291	7.124	3.685	1.290	0.386	0.57	99.26
10	54.29	1.367	17.936	8.114	0.126	4.804	7.024	3.881	1.399	0.372	0.17	99.48
11	56.70	1.012	17.877	7.310	0.110	4.494	6.780	3.828	1.476	0.295	0.15	100.03
12	55.32	0.97	16.923	7.971	0.120	6.501	6.393	3.641	1.368	0.280	0.11	99.60

Tabla 3.5. Elementos traza en partes por millón, presentes en los bancos de andesita.

B	Rb	Sr	Ba	Y	Zr	Nb	V	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Th	Pb
1	36	1334	944	19	283	9	177	57	25	129	143	154	<4	8
2	16	624	446	14	169	8	149	195	27	119	79	179	4	11
3	36	849	742	18	253	9	146	82	20	103	134	137	<4	18
4	38	1275	971	19	278	11	179	80	29	133	120	146	<4	10
5	38	828	441	17	169	4	165	86	20	92	29	77	<4	12
6	36	791	712	18	237	8	127	77	16	92	25	87	<4	17
7	37	779	686	18	235	9	140	98	20	94	31	89	<4	42
8	38	632	665	25	289	16	149	76	21	69	42	112	<4	12
9	23	603	364	23	206	11	199	125	22	92	35	94	<3	5
10	25	603	385	23	200	10	198	116	21	74	38	94	<3	32
11	26	574	431	18	167	8	179	126	18	72	42	86	<3	33
12	24	530	404	18	154	7	185	176	23	138	35	88	<3	8

Tabla 3.6. Minerales existentes en los bancos de andesita, todos ellos presentaron material criptocristalino, no susceptible a los rayos X.

B	Especie Mineralógica
1	Plagioclasa (anortita, albita, andesina)
2	Plagioclasa (anortita, albita, andesina)
3	Plagioclasa (anortita, albita, andesina)
4	Plagioclasa (anortita, albita, andesina)
5	Plagioclasa (anortita, albita, andesina)
6	Plagioclasa (anortita, albita, andesina)
7	Plagioclasa (anortita, albita, andesina)
8	Plagioclasa (anortita, albita, andesina)
9	Plagioclasa (anortita, albita, andesina)
10	Plagioclasa (anortita, albita, andesina)
11	Plagioclasa (anortita, albita, andesina)
12	Plagioclasa (anortita, albita, andesina)

Las especies mencionadas son comunes en los feldespatos, silicatos; las plagioclasas suelen variar entre albita ($\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$) y anortita ($\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$), siendo intermedia la andesina (mezcla de $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ y $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$).

Los agregados pétreos finos y gruesos de los bancos, se caracterizaron según los estándares de la ASTM. Para el diseño de las mezclas de concreto, los valores obtenidos se incluyen en la Tabla 3.7, mientras que la Tabla 3.8 indica la manera en que los agregados se mezclaron para elaborar las mezclas de concreto, así como los casos en que se agregaron aditivos y la forma de curado de los especímenes. La Tabla 3.9 resume el método de diseño de las mezclas, la relación A/C en peso, las cantidades en peso de los sólidos y el peso volumétrico de la mezcla de concreto.

Tabla 3.7. Caracterización ASTM del agregado pétreo para mezclas de concreto; A, arena y G, grava.

B	Pétreo	G _E	% Abs	PVSS	PVSV	Eq.Ar.	Gran.
		ASTM C127-84 (adim)	ASTM C127-84 (%)	ASTM C29-87 Kg/m ³	ASTM C29-87 Kg/m ³	ASTM C187-82 (%)	ASTM C136-84 MF/TM
1	A Tangamandapio	2.20	7.52	895	1011	80.00	2.76
2	G Tocumbo	1.84	12.88	1059	1162	--	¾"
3	A Limones	2.37	5.65	1353	1500	83.00	3.03
4	G C. Colorado	2.21	10.00	1222	1365	--	¾"
5	G Tribasa	1.72	7.47	1058	1320	--	¾"
6	A Joyitas	2.42	4.16	1291	1446	95.00	2.93
7	G Joyitas	2.22	10.56	1270	1374	--	1"
8	A Cerritos	2.48	5.09	1119	1465	85.00	2.98
9	A Mázcuta	2.33	6.31	1120	1180	91.30	3.30
10	G Mázcuta	1.77	12.40	770	850	--	¾"
11	A Comanja	2.28	5.76	1228	1283	92.00	2.98
12	G Comanja	2.04	6.18	1080	1131	--	1"

Tabla 3.8. Mezclas de concreto hidráulico, indicando los agregados pétreos empleados y el método de curado en cada caso.

M	Arena	B	Grava	B	Aditivo	Curado
C1	Joyitas	6	Joyitas	7	--	C. arena
C2	Joyitas	6	Triturado	5	Fluidificante	C. arena
C3	Cerritos	8	Joyitas	7	--	C. arena
C4	Joyitas	6	Joyitas	7	Fibras	C. arena

C5	Joyitas	6	Joyitas	7	--	C. arena
C6	Joyitas	6	Joyitas	7	Superfluidificante	Pila agua
C7	Mázcuta	9	Mázcuta	10	--	C. arena
C8	Joyitas	6	Triturado	5	--	C. arena
C9	Los Limones	3	Tocumbo	2	--	C. arena
C10	Joyitas	6	Joyitas	7	--	Sin curado
C11	Tangamandapio	1	C. Colorado	4	--	C. arena
C12	Joyitas	6	Joyitas	7	Acelerante	C. arena
C13	Joyitas	6	Joyitas	7	Fluidificante	C. arena
C14	Comanja	11	Comanja	12	--	C. arena

Tabla 3.9. Consumo de materiales en cada mezcla de concreto, así como método de diseño y aditivo empleado.

Mezcla	Método	Rel. A/C En peso	Cem. Kg/m ³	Arena Kg/m ³	Grava Kg/m ³	Aditivo Lt/m ³	PVconcreto Kg/m ³
C1	ACI	0.57	342	799	768	---	2104
C2	ACI	0.57	350	877	826	Fluidif.	2253
C3	ACI	0.57	350	550	750	---	1850
C4	Abrams	0.41	478	815	557	Fibras	2046
C5	Abrams	0.41	478	815	557	---	2046
C6	ACI	0.52	362	765	750	S.Fluidi.	2065
C7	ACI	0.564	509	769	382	---	1947
C8	ACI	0.57	350	877	826	---	2253
C9	ACI	0.57	400	687	650	---	1965
C10	ACI	0.57	310	690	950	---	2127
C11	ACI	0.54	548	639	852	---	2235

C12	ACI	0.57	310	690	950	Aceler.	2127
C13	ACI	0.57	310	690	950	Fluidif.	2127
C14	ACI	0.564	347	742	748	- - -	2033

Los resultados promedios de mezclas ensayadas se agruparon en tres categorías: mezclas elaboradas exclusivamente con agregados pétreos, arena y grava, del Banco de Joyitas, incluyendo los casos de aditivos o no curado; el segundo grupo corresponde a las mezclas de los Bancos de Joyitas, Cerritos y Tribasa de Morelia y el tercer grupo corresponde a los Bancos de agregados pétreos de Mázcuta (Municipio de Coeneo), Comanja (Municipio de Comanja), Los Limones y Tocumbo (Municipio de Tocumbo) y Cerrito Colorado y Tangamandapio (Municipio de Santiago Tangamandapio).

Los resultados de las pruebas de esfuerzo de ruptura a la compresión (f_c) están contenidos en las Figuras 3.1, 3.2 y 3.3; la prueba de ruptura a la tensión indirecta, está graficada en las figuras 3.4, 3.5 y 3.6; las vigas probadas para obtener el módulo de ruptura a la flexión se resumen en las Figuras 3.7, 3.8 y 3.9, y el módulo de elasticidad dinámico está resumido en las Figuras 3.10, 3.11 y 3.12.

Las Figuras 3.13 a 3.22, muestran las observaciones morfológicas de los casos típicos de concreto hidráulico y agregados pétreos aquí estudiados.

Discusión.

En casi todos los casos se observa que el material de prueba existente no se apega a las granulometrías ideales contenidas en los reglamentos, sin embargo, el reglamento de construcciones no es un instrumento legal (como el caso de la Ley de Obra Pública) que pudiera impedir el uso de algún material de construcción, mejor dicho es un conjunto de sugerencias para la elección del material idóneo, en el sentido de proveer mayor vida útil, menor costo, facilidad de manejo.

Los concretos elaborados con grava volcánica natural y grava volcánica triturada, probaron poseer excelentes propiedades mecánicas así como comportamiento mecánico; el valor de diseño de 250 kg/cm², se obtuvo con un margen superior de 25% con un valor de revenimiento de 100 mm y permitiendo relaciones A/C en peso del orden de 0.50, esto es importante porqué significa que es posible bajar el costo del concreto empleando agregados económicos y abundantes en la región y obtener concreto de alto rendimiento.

Los mejores valores de esfuerzo de ruptura a la compresión, tensión indirecta, módulo de ruptura y módulo de elasticidad dinámico, fueron obtenidos para especímenes de concreto elaborados con grava volcánica y aditivo superfluidificante; el empleo de aditivos afectó de manera positiva la reología y permitió una reducción del 10% en la relación A/C sin afectar la trabajabilidad de la mezcla. Adicionalmente, el empleo de este aditivo mejoró las propiedades del concreto elaborado con rocas ígneas extrusivas con respecto al concreto elaborado sin aditivos, de la siguiente manera: esfuerzo de ruptura a la compresión (f_c), 14%; esfuerzo de ruptura a la tensión (f_T), 11%; módulo de ruptura (M_R), 14 % y módulo de elasticidad dinámico (E_d), 4%.

El efecto de aditivos acelerantes sobre las propiedades mecánicas del concreto elaborado con grava basáltica triturada fue a 3 días de edad, el concreto elaborado con acelerante presentó el 73% de la resistencia final mientras que el concreto sin aditivo acelerante sólo alcanzó el 56 % del valor final esperado, el empleo de acelerantes no se recomienda en los casos en que puede permanecer encofrado el concreto, pues la resistencia no se incrementa a edades tardías.

El módulo de elasticidad dinámica (E_d), de la mayoría de los concretos se pudo correlacionar con el esfuerzo de ruptura a la compresión f_c , como $E_d = 17,700 (f_c)^{1/2}$, este resultado puede ser usado de manera indirecta para obtener el esfuerzo de ruptura a la compresión de un concreto, conociendo su E_d obtenido de manera no destructiva. La ventaja del método mencionado es la facilidad de repetición de la cuantificación, hacerlo "in situ". Además, una vez que se conoce el f_c , los valores de f_T y M_R , pueden ser estimados a través de las relaciones lineales; $f_T = 0.10 f_c$ y $M_R = 0.12 f_c$.

El valor del E_d encontrado en este trabajo es remarcable, pues el análisis y diseño de estructuras de concreto está en función de dicho valor que la literatura reportaba como de $10,000 (f_c)^{1/2}$. Al demostrarse que el concreto posee mayor elasticidad, pueden reducirse las secciones de diseño.

El módulo de ruptura a la flexión en los casos de agregado pétreo volcánico presentó comportamiento mecánico similar a concreto con agregado triturado, del orden de 50 kg/cm^2 , que no concuerda con la solicitud de empleo de triturados en casos específicos de concreto sometido a flexión (puentes, vigas gerber).

El M_R encontrado en las mezclas estudiadas puede relacionarse de manera lineal con el f_c como $M_R \approx 0.15 f_c$ y el $f_T \approx 0.11 f_c$, cuando la literatura reporta valores del 6 al 8% del f_c . Los valores fueron obtenidos con agregados pétreos volcánicos.

El empleo de aditivos superfluidificantes, al permitir mezclas fluidas y trabajables, disminuyendo la cantidad de agua de mezclado conservando constante la cantidad de cemento hidráulico y por consiguiente disminuyendo la relación A/C , incrementaron notablemente la resistencia mecánica, Fig. 3.1, 3.2, 3.4, 3.5, 3.7 y 3.8.

El comportamiento elástico-dinámico del concreto en todos los casos fue homogéneo, sin incrementos notables con respecto a la edad de prueba, lo que implica que no es función directa del fraguado del concreto, y sí de la homogeneidad de la mezcla, Fig. 3.10, 3.11 y 3.12, en el caso del concreto con los agregados pétreos de Cerritos y Joyitas, que son los más densos, Fig. 3.11, se obtuvieron valores $> 400,000 \text{ kg/cm}^2$.

Las fotomicrografías de los agregados pétreos muestran agregados con burbujas de gases Figura 3.13, típicas de las rocas ígneas extrusivas, en algunos casos hay superficies de líticos Fig. 3.15, 3.17, 3.19. En los casos de concreto hidráulico se aprecian las ahujas del gel de cemento hidráulico, Figura 3.14. La matriz es similar en todos los casos y se observaron grietas en la matriz, Fig. 3.22, por el tipo de curado. En todas las fotomicrografías de los agregados pétreos se realizaron microanálisis EDS y

los elementos presentes fueron Si, C, O, Ca, Al, Fe; no se observó la presencia de cristales con aristas bien delimitadas, en todas las observaciones fue un factor común la presencia de vidrio volcánico.

La morfología de cristales euhedrales es motivo de la devitrificación de las andesitas, pero es precursora de su actividad puzolánica para su empleo exitoso como material en el concreto hidráulico.

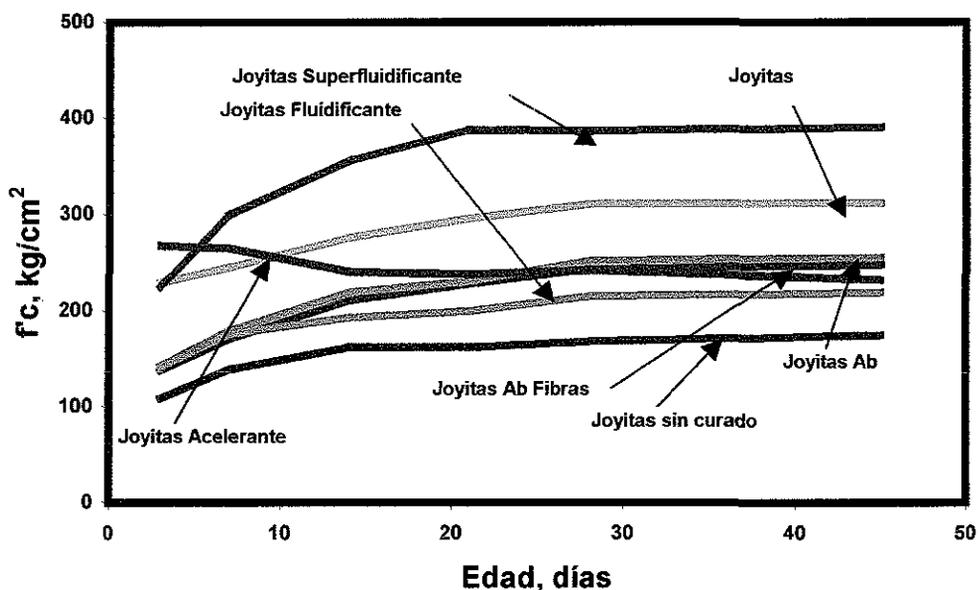


Figura 3.1. Esfuerzo de ruptura a la compresión, f_c en kg/cm^2 , concreto hidráulico con agregado pétreo de Joyitas, condiciones de testigo, aditivos químicos, fibras y sin curado.

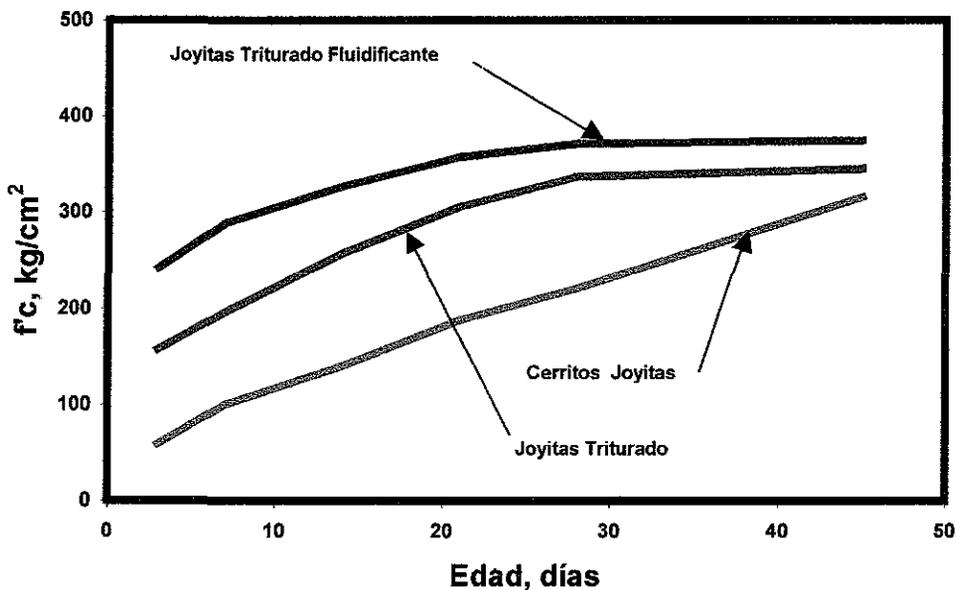


Figura 3.2. Esfuerzo de ruptura a la compresión, f_c en kg/cm², concreto hidráulico con agregado de Joyitas, Cerritos y Tribasa.

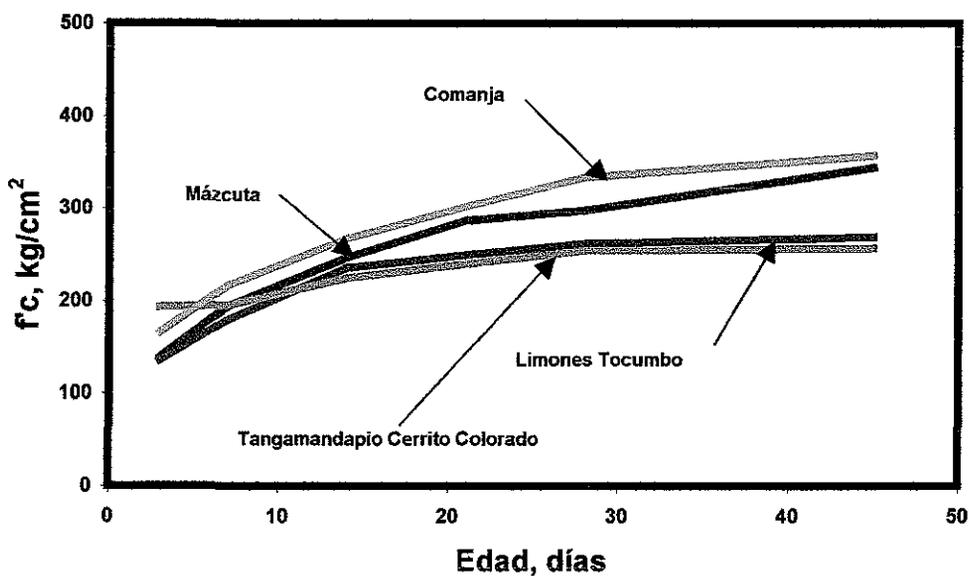


Figura 3.3. Esfuerzo de ruptura a la compresión, f_c en kg/cm², concreto hidráulico con agregados pétreos volcánicos de los municipios de Santiago Tangamandapio, Tocumbo, Mázcuta y Comanja.

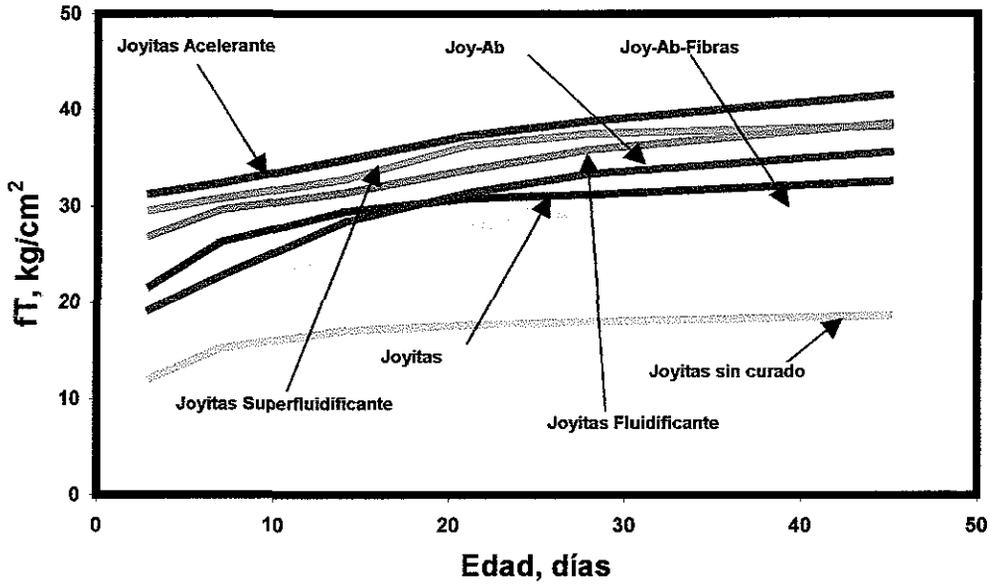


Figura 3.4. Esfuerzo de ruptura a la tensión, f_T , concreto hidráulico con agregado pétreo de Joyitas, condiciones de testigo, aditivos químicos, fibras y sin curado.

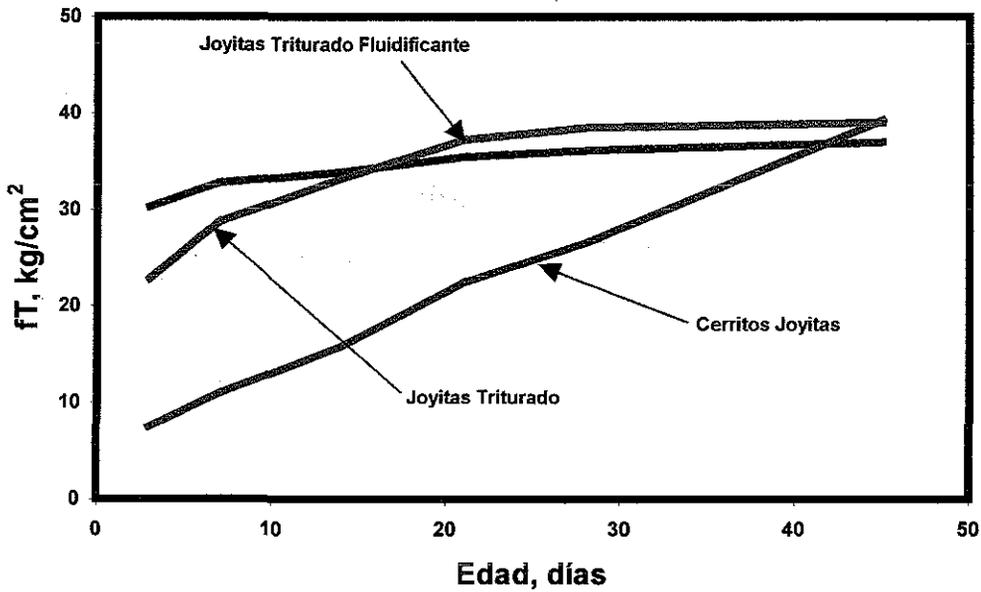


Figura 3.5. Esfuerzo de ruptura a la tensión, f_T en kg/cm^2 , concreto hidráulico con agregado pétreo de Joyitas, Cerritos y Tribasa.

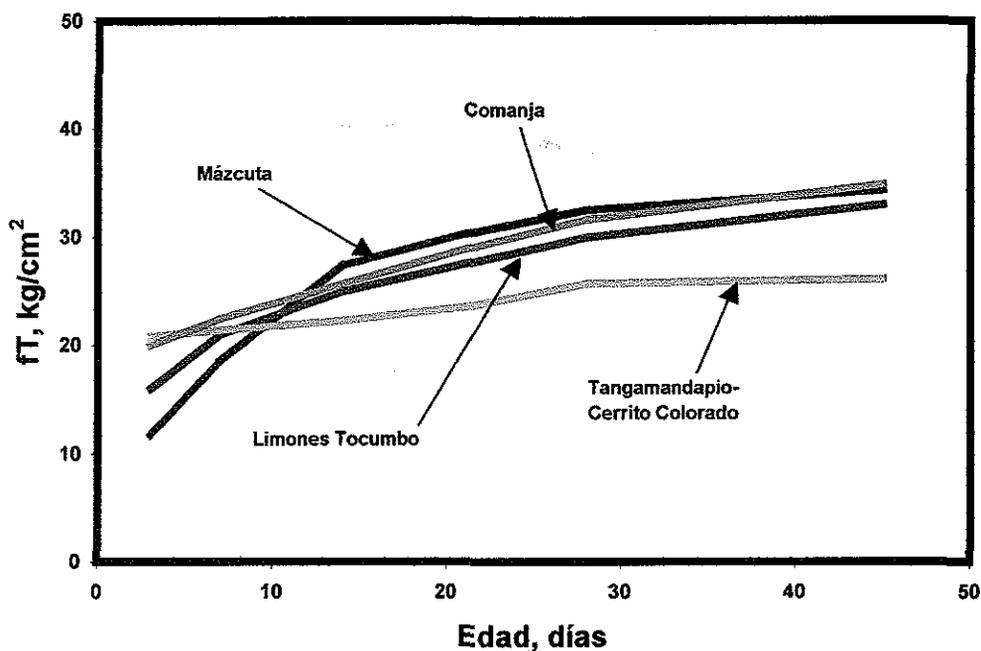


Figura 3.6. Esfuerzo de ruptura a la tensión, f_T en kg/cm^2 , concreto hidráulico con agregado pétreo de los municipios de Santiago Tangamandapio, Tocumbo, Mázcuta y Comanja.

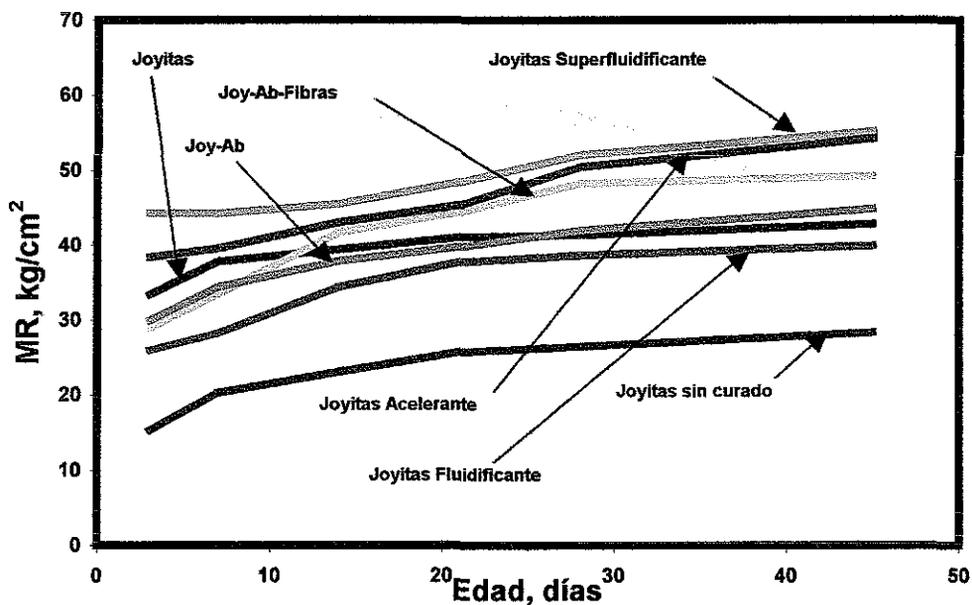


Figura 3.7. Esfuerzo de ruptura a la flexión, M_R en kg/cm^2 , concreto hidráulico con agregado pétreo de Joyitas, condiciones de testigo, aditivos químicos, fibras y sin curado.

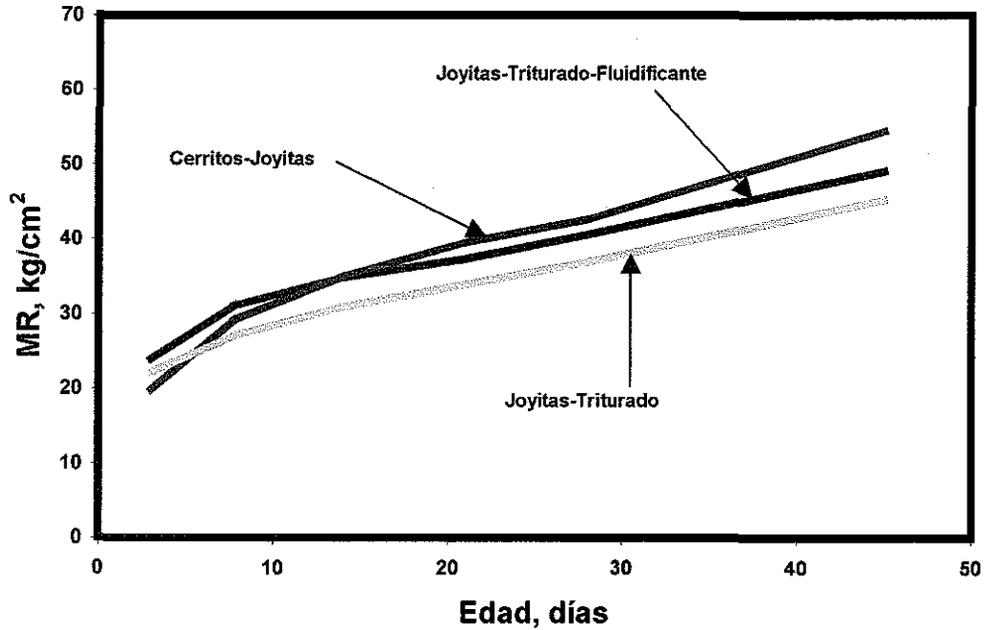


Figura 3.8. Esfuerzo de ruptura a la flexión, MR en kg/cm², concreto hidráulico con agregado pétreo de Joyitas, Cerritos y Tribasa.

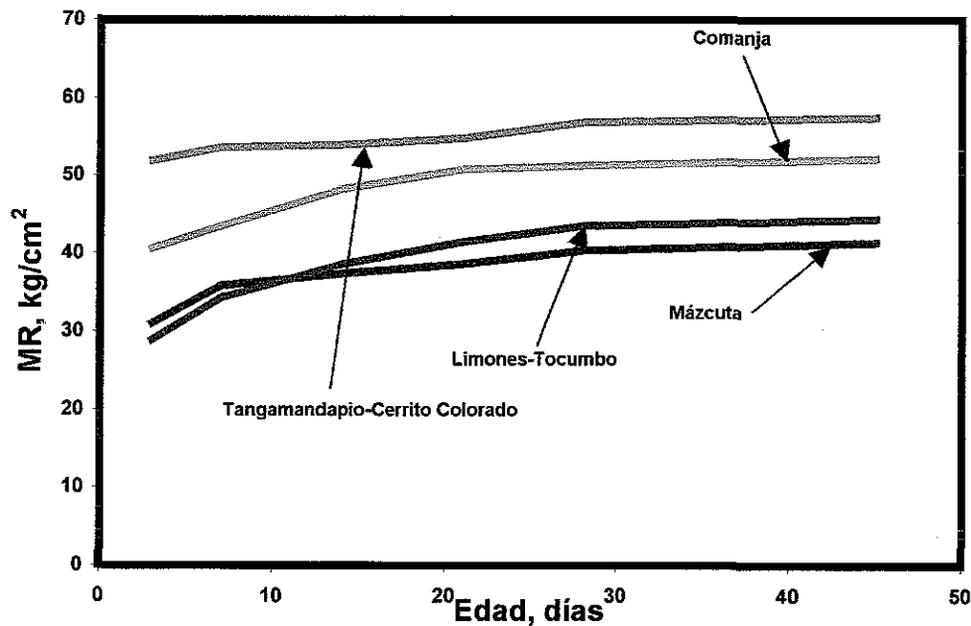


Figura 3.9. Esfuerzo de ruptura a la flexión, MR en kg/cm², concreto hidráulico con agregados pétreos de los municipios de Santiago Tangamandapio, Tocumbo, Mázcuta y Comanja.

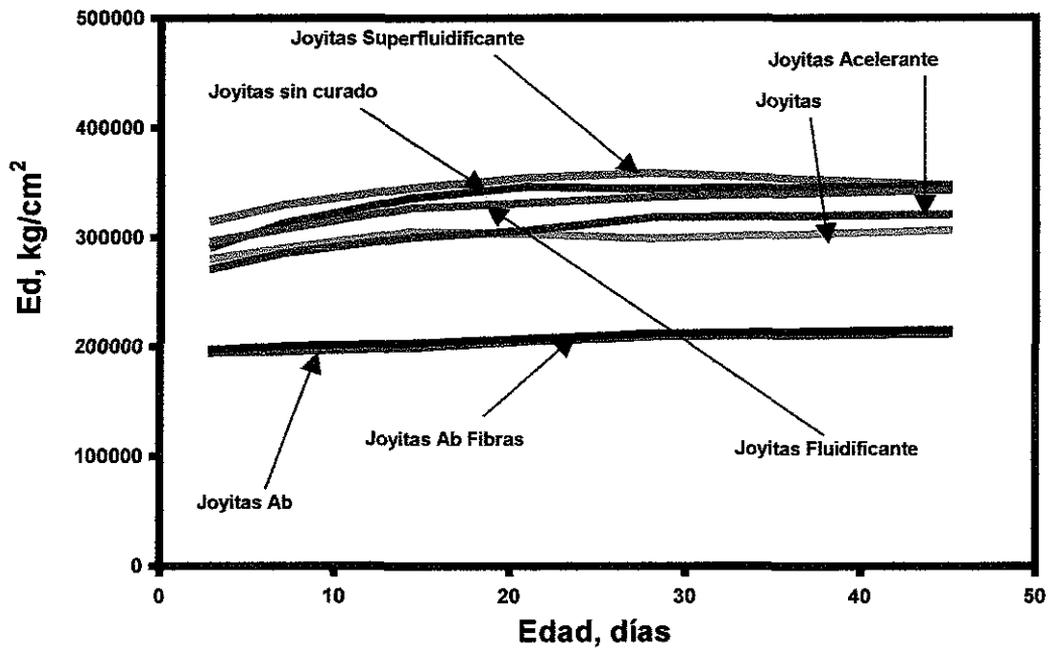


Figura 3.10. Módulo de elasticidad dinámico, E_d en kg/cm^2 , concreto hidráulico con agregado pétreo de Joyitas, condiciones de testigo, aditivos químicos, fibras y sin curado.

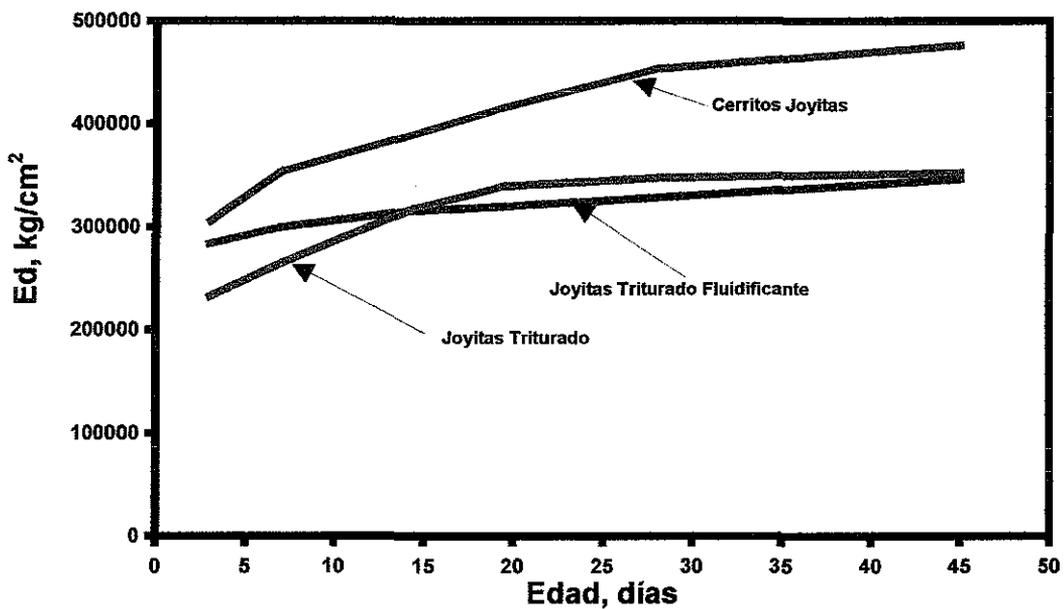


Figura 3.11. Módulo de elasticidad dinámico, E_d en kg/cm^2 , concreto hidráulico con agregados pétreos de Joyitas, Cerritos y Tribasa.

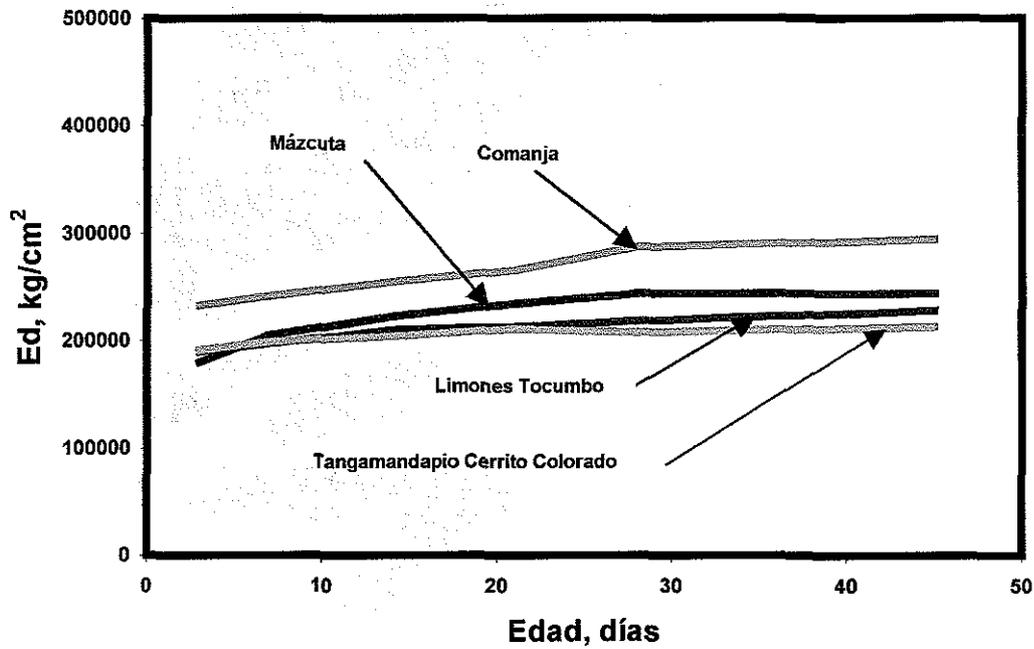


Figura 3.12. Módulo de elasticidad dinámico, Ed en kg/cm², concreto hidráulico con agregados pétreos de los municipios de Santiago Tangamandapio, Tocumbo, Mázcuta y Comanja.

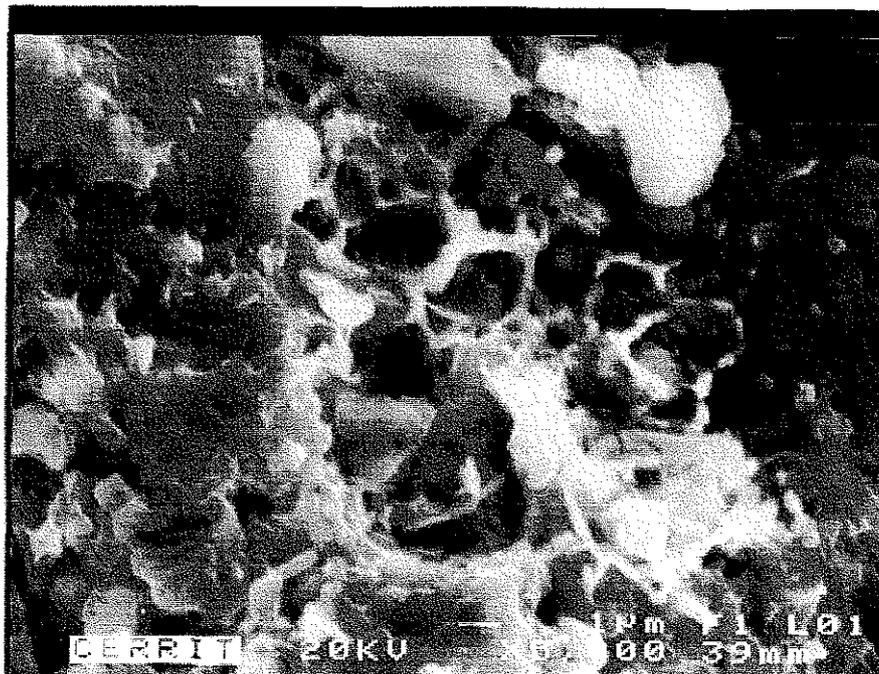


Figura 3.13. Agregado pétreo fino volcánico de cerritos, espuma volcánica.

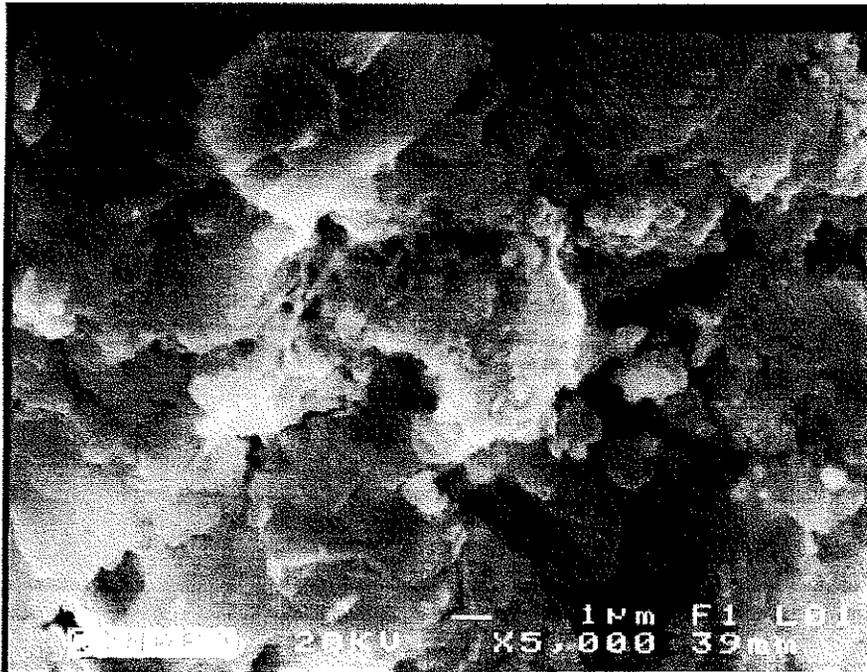


Figura 3.14. Concreto hidráulico con agregado pétreo de Cerritos y Joyitas, al centro superior izquierdo agujas de gel de cemento hidratado.

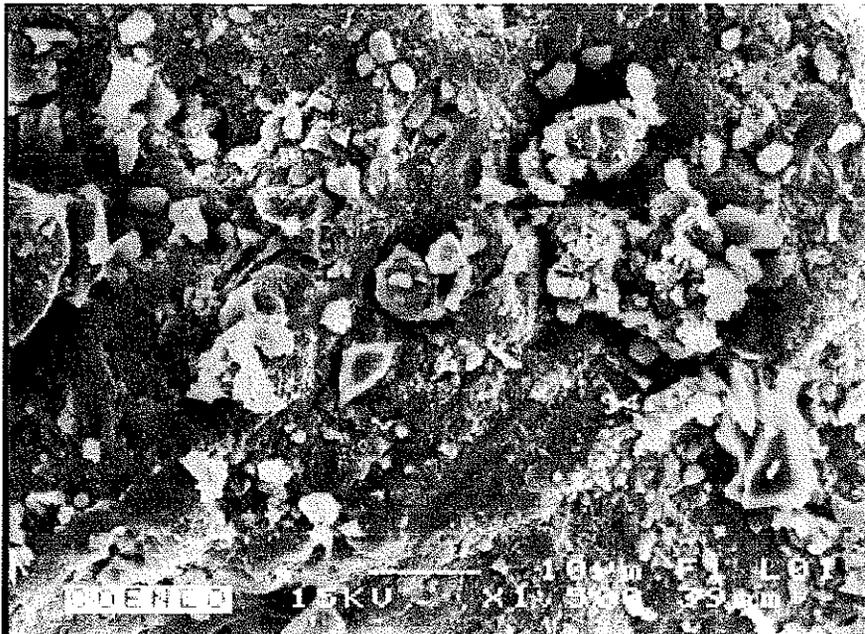


Figura 3.15. Agregado pétreo del banco Mázcuta.



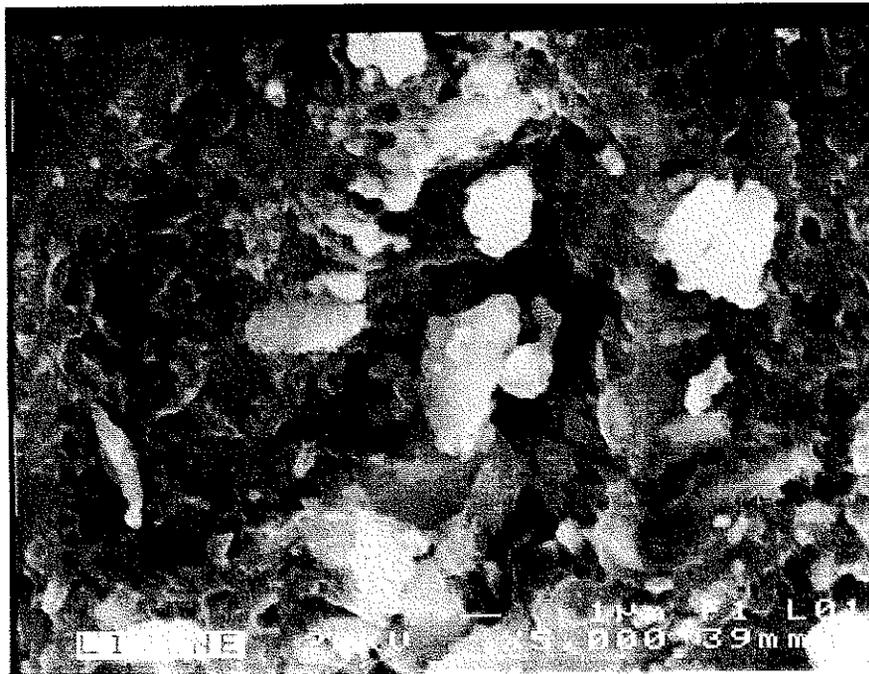


Figura 3.16. Agregado pétreo del banco Los Limones, poco soldado y presencia de burbujas de gases.

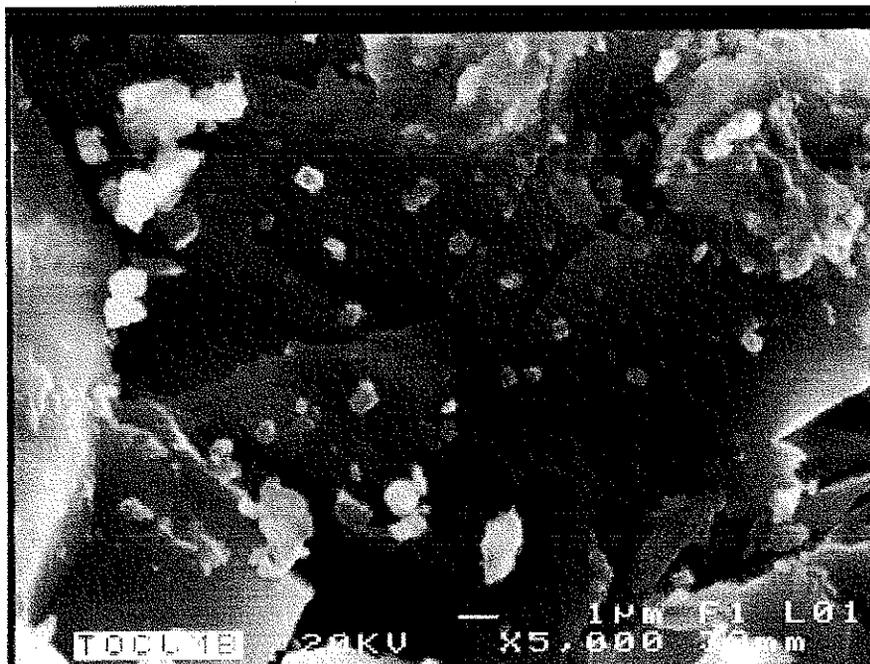


Figura 3.17. Agregado pétreo del banco de Tocumbo.

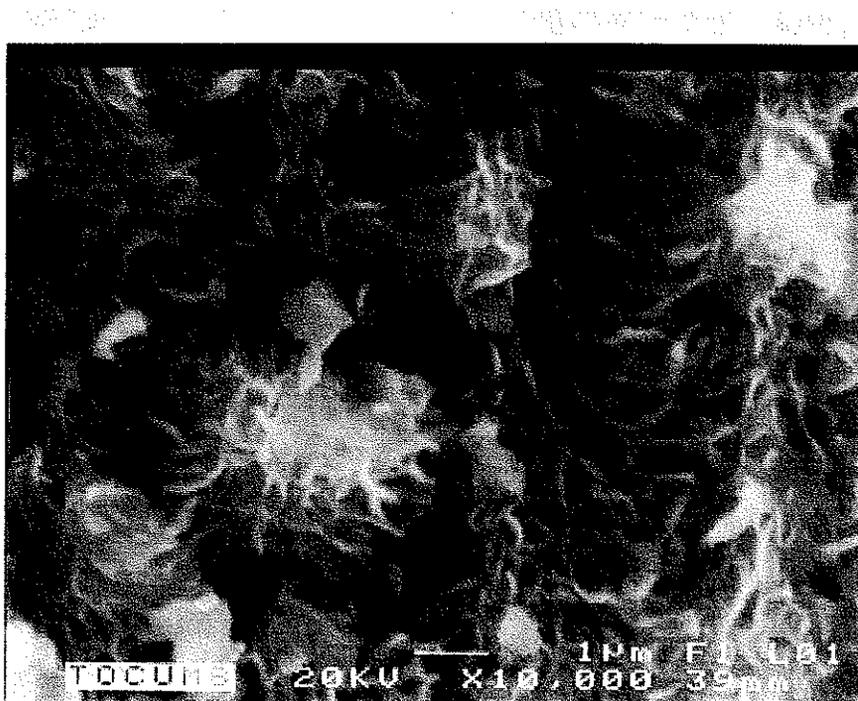


Figura 3.18. Concreto con agregado pétreo de Los Limones y Tocumbo.

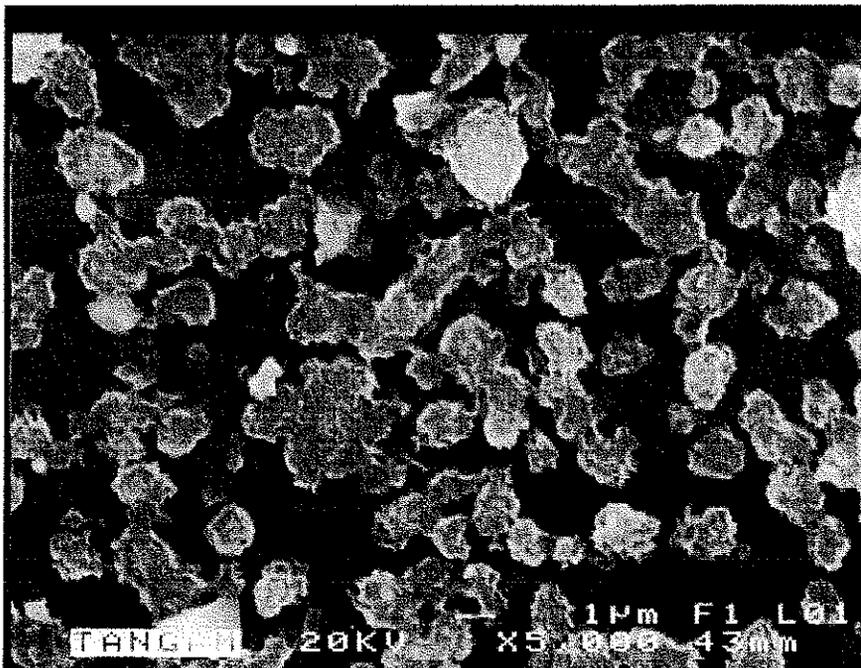


Figura 3.19. Agregado pétreo de Santiago Tangamandapio.

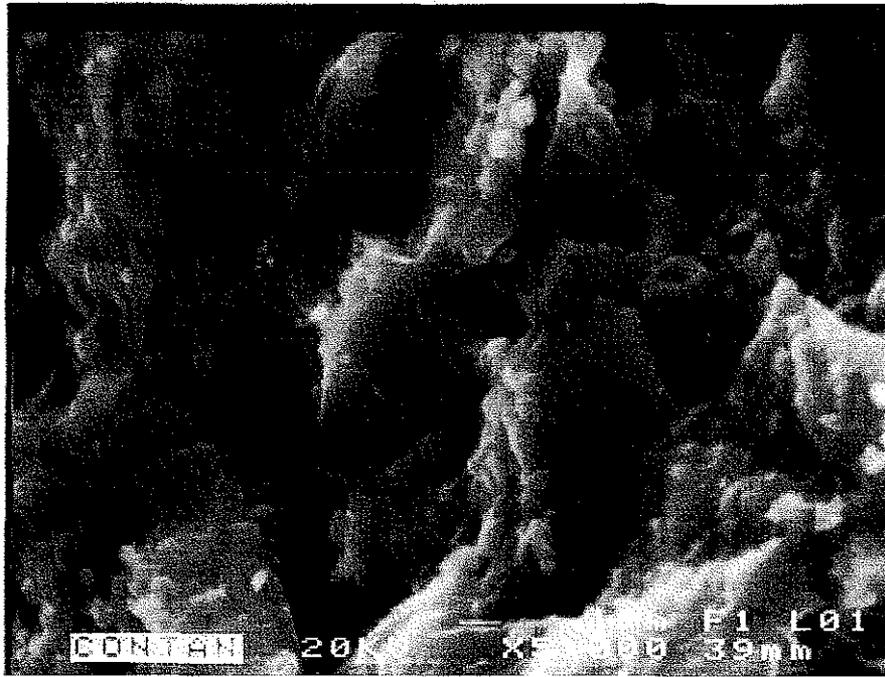


Figura 3.20. Concreto con agregado pétreo de Santiago Tangamandapio.



Figura 2.21. Concreto con agregados pétreos de Cerritos y Joyitas.

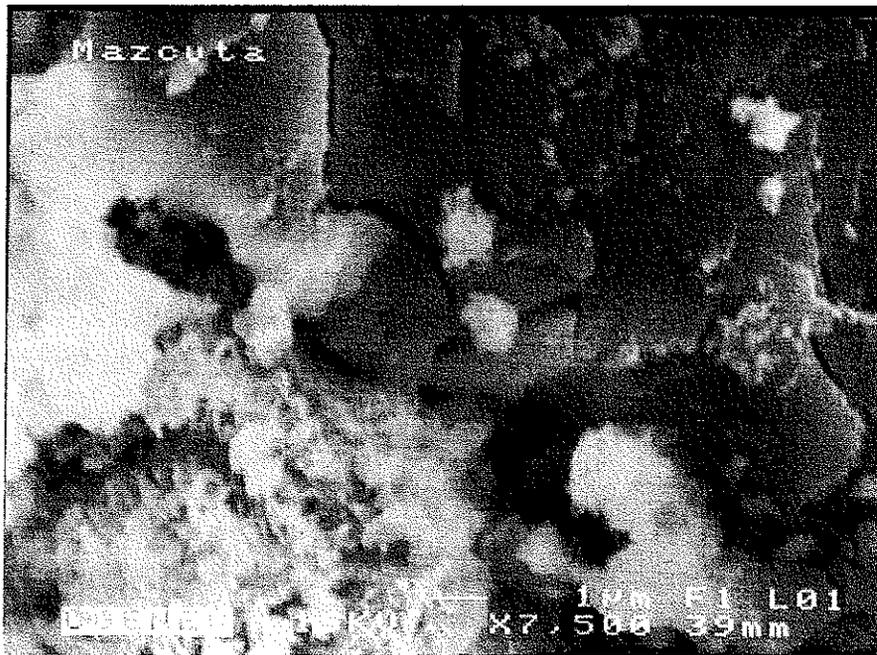


Figura 3.22. Concreto con agregado pétreo de Mázcuta.

Capítulo 4.

MORTEROS PARA RESTAURACIÓN.

Introducción.

Dado que el reemplazo de bloques de ignimbrita en los monumentos no debe ser hecho con dos de los bancos actualmente en explotación, Cointzio y Jamaica y el banco el Tejocote no está en explotación, y puesto que los fosos de concreto no protegen los muros de partículas ambientales, gases, lluvia, etc., la investigación tuvo que dirigirse ahora al hecho de proponer morteros que protegieran a los monumentos. Los morteros debieron al mismo tiempo cumplir con requisitos físicos, mecánicos, estéticos, arquitectónicos, históricos. Los únicos morteros de albañilería permitidos por las autoridades en restauración fueron aquellos cuyo adhesivo fuera cal hidráulica, sin aditivos químicos comerciales. El estudio comenzó con la investigación de aditivos de época que mejorasen las propiedades mecánicas de los morteros.

En el Neolítico inició la vida sedentaria del hombre y éste aprendió a emplear el fuego, para fines cerámicos y alterar el color de los pigmentos minerales [Miranda, 1972]. Al inicio del siglo III a.C. en Roma, comenzó a generalizarse el empleo de mortero de cal-arena, por influencia de Grecia [Encarta, 2001]. Vitrubio, arquitecto e ingeniero romano, constructor en la época del Emperador César Augusto, escribió un tratado de arquitectura en 10 libros en papel pergamino. Su concepto de la arquitectura es el mismo expuesto antes por Platón que en su tomo II cita: "... la cal debe provenir del calcinado de la piedra caliza, ya suave, ya dura, pero necesariamente blanca. La cal fabricada con piedra de grano fino, del tipo más duro, resultará buena para las partes estructurales. La cal de piedras porosas servirá como estuco, la proporción para arena excavada de banco será de tres partes de arena y una de cal; si se usare arena de río o arena de playa marina, se usarán dos partes de arena y una de cal...", esto mismo, actualmente ha sido usado con éxito como argamasa de mamposterías naturales y artificiales [Silva Ruelas, 1990]

Los romanos propagaron el uso del mortero de cal como adhesivo y recubrimiento, y ellos mismos lograron perfeccionarlo adicionándole puzolanas (abundantes en su región) al mortero de cal [Callebaut et al, 2001], produciendo su carbonatación sin necesidad de exposición atmosférica y al contacto con el agua, dando lugar a un endurecimiento en menor tiempo [Meli, 1998].

En Montalbán, Oaxaca, México se empleó el mortero de cal en el preclásico superior (600 a. C. a 100 d. C.) en pisos [Ochoa Manzo, 2001]: los mayas también lo emplearon en sus estucos murales [Magaloni et al, 1995]

Los naturales mexicanos ante la imposibilidad de calcinar totalmente las calizas idearon la adición de aditivos [Bravo Hollis y Sánchez Mejorada, 1991] y/o fibras para mejorar la resistencia mecánica de los morteros.

En 1549 en la ciudad de Morelia, se construyó el primer edificio de cal y canto (mampostería), el convento de San Miguel y en 1550 el Virrey ordenó se situaran unas "calderas" (hornos) al norte del valle de Guayangareo, cerca de Cuitzeo para la calcinación de la cal [Ramírez Romero, 1994].

Los morteros antiguos empleados para la adhesión y recubrimiento de construcciones de mampostería tuvieron además de la cal y agregado pétreo, aditivos naturales orgánicos abundantes en la región. La palabra mortero viene del latín y significa mortarius que es el recipiente donde se cocía la caliza para convertirla en cal de uso en albañilería.

Los morteros pueden clasificarse de dos maneras, por el tipo de fraguado y por el tipo de aglutinante.

Por el tipo de fraguado. A) Mortero Físico. El fraguado se da sin recursos químicos, se lleva a cabo en morteros de barro, de suelo refractario, asfalto y resinas; B) Mortero químico. El fraguado se lleva a cabo por medio de una reacción química, por ejemplo los morteros de cal, cemento, yeso y mortero comercial.



Por el tipo de aglutinante: A) Mortero aéreo. Fragua al contacto con el aire, como los morteros de arcilla, yeso y cal hidratada, B) Mortero hidráulico. Fragua en contacto con el agua o en presencia de humedad como el yeso hidráulico, cal hidráulica, mortero comercial y de cemento, y C) Mortero bituminoso. Se emplea bitumen (asfalto, hidrocarburo) en su elaboración.

El mortero de cal hidráulica se clasifica como mortero químico hidráulico pues endurece por medio de una reacción química, fragua en lugares húmedos y en contacto con agua disminuye su tiempo de fraguado, debido a la presencia de silicatos y aluminatos de cal, que dan la característica hidráulica a los morteros. Su resistencia está vinculada directamente con el agua de mezclado.

El mortero de cal hidratada es un mortero químico aéreo, pues endurece gracias a una reacción química y a la intemperie. El fraguado no se da en lugares húmedos ni en presencia de agua, la dosificación es determinante en su elaboración, pues al presentar mayores contracciones por la evaporación del agua de amasado que los morteros de cal hidráulica, debe emplearse un árido que absorba los cambios volumétricos por temperatura y que favorezca el incremento de CO_2 , para que se carbonate el hidróxido de carbono del interior; proceso muy lento que puede durar varios meses [Carbonell de Massy, 1993]

Las propiedades de la cal en los morteros pueden observarse en las dos fases de la elaboración del mortero, en estado plástico y endurecido; en estado plástico logra consistencia adecuada para su colocación y en estado endurecido presenta buena adherencia. Como en el concreto hidráulico, su trabajabilidad depende de la cantidad de agua de mezclado y de la capacidad de la cal de retenerla. Los morteros de cal presentan mucha elasticidad (poca rigidez), lo que les permite vibrar en los movimientos telúricos y los asentamientos diferenciales, originándose daños menores.

Una ventaja de los morteros de cal es que pueden curarse por sí mismos: el agua que entra por las fisuras, disuelve una pequeña cantidad de hidróxido de calcio del mortero y el agua absorbe además dióxido de carbono del aire, entonces éstos

reaccionan formando carbonato de calcio, CaCO_3 , llenando de nuevo cualquier fisura [Mortero, 1994]

La cal es un derivado de la piedra caliza, se suele encontrar en la naturaleza de tres formas: piedra caliza (CaCO_3 , carbonato de calcio), cal viva (CaO , óxido de calcio) y cal hidratada $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ó hidróxido de calcio; ciclo de la cal, Figura 4.1.

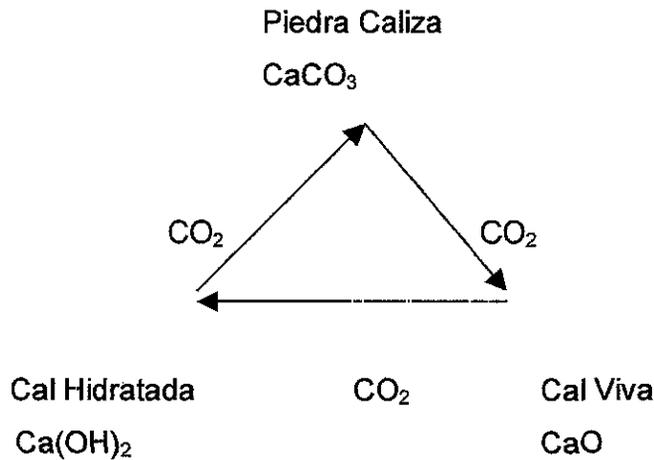


Figura 4.1. Ciclo de la cal.

La caliza es una roca de origen sedimentario que se formó a partir de sedimentos llevados de manera eólica, pluvial, fluvial. Está compuesta básicamente por carbonato de calcio ($\geq 50\%$) y por carbonato de magnesio ($\leq 30\%$); también contiene impurezas como sílice, alúmina, óxidos de hierro. En presencia de ácido clorhídrico, efervesce. La forma más pura de calcita y magnesia es blanca, pero la más común es grisácea, café pálido o negruzca [Wiley y Sons, 1998]. Su gravedad específica es de 2.72 a 2.94, con dureza de 3.0 a 3.5 en la escala de Mohs.

Por su origen la caliza puede ser considerada como:

Orgánica. Formada por la precipitación y acumulación de las partes duras de los organismos (invertebrados marinos, arrecifes de coral, bancos conchíferos).

Inorgánica. Formada por la evaporación de agua en sitios donde hubo acumulación de minerales de calcio.



Química. La caliza también se forma cuando el agua que hace contacto con las rocas contiene ácido carbónico disuelto. La disolución de las calizas provoca la formación de conductos a través de su masa que se van ensanchando paulatinamente, no sólo por solución sino por abrasión, llegándose a formar enormes cavernas.

Por su contenido químico, las calizas son:

Caliza rica en calcio. Si su contenido de $MgCO_3 \leq 5\%$.

Caliza magnesiana. Si el $MgCO_3$ es $> 5\%$.

Caliza dolomítica. Contiene $30\% \leq MgCO_3 \leq 45\%$.

Caliza fosfórica. Si la roca caliza tiene fosfato de calcio, se usa como fertilizante: en México se ha encontrado en la sierra en el estado de Zacatecas.

La cal viva tiene la peculiaridad de no endurecer sumergida en agua, en contraste con la cal hidráulica. Se obtiene a partir de piedra caliza triturada que contenga $CaCO_3 + MgCO_3 \geq 95\%$ y calcinándose entre 880 y 900 °C.

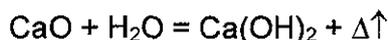
La calcinación se hace siguiendo este proceso:

La caliza se precalienta a 120-150 °C hasta perder el agua que contiene al momento de la extracción de la cantera. Se provoca en la caliza su disociación en CaO y CO₂ a temperaturas de 880 a 900 °C. El CO₂ se pierde en la atmósfera, quedando como producto aprovechable el CaO.



El óxido de calcio obtenido de manera endotérmica se conoce como cal viva, caracterizándose por:

Ser un material sólido en forma de grumos de color blanco de intensidad variable, dependiendo de su pureza química, tener peso específico entre 3.08 y 3.30 y ser también un material inestable por su avidez de agua (higroscopía), pH = 12.5, en presencia de agua libera calor. En presencia de agua produce:

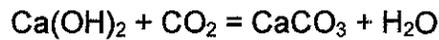


La cal viva puede transformarse en cal apagada o cal hidratada, Ca(OH)₂.

La reacción anterior puede también producirse cuando el CaO absorbe el vapor de agua de la atmósfera y de las sustancias vegetales y animales con que está en contacto. En el proceso de apagado la temperatura puede elevarse hasta 160 °C.

La cal hidratada tiene las siguientes características: es de color extremadamente blanco, conteniendo partículas $\leq 1 \mu$, con peso volumétrico $\approx 0.57 \text{ kg/cm}^3$ y pH = 12.5, no reacciona con el agua, pero es soluble en ella.

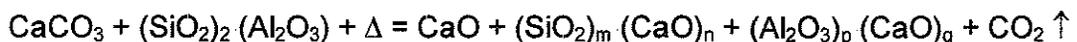
El endurecimiento de la cal se lleva a cabo muy lentamente, por la evaporación del agua de amasado con que se formó la pasta y la carbonatación por absorción de CO_2 del aire para formar CaCO_3 y MgCO_3 , reconstituyendo la caliza original.



La cal hidratada sigue los siguientes seis procesos para su fabricación,

1. Explotación del banco de caliza.
2. Trituración.
3. Calcinación: precalentado, calcinación y enfriado.
4. Apagado.
5. Molienda.
6. Envasado y almacenamiento.

La cal hidráulica es el producto de la calcinación de roca caliza rica en sílice, aluminio y una cantidad de arcilla de 5 a 20 % y la temperatura de calcinación debe ser > de 1000 °C para que se disocien los silicatos presentes en la arcilla. Los productos de la descomposición de la arcilla SiO_2 y Al_2O_3 , reaccionan con el CaO, dando origen a silicatos y aluminatos de calcio no hidratados, que ligados al CaO dan como resultado la cal hidráulica. De manera aproximada se puede escribir,



La indeterminación de los subíndices de los silicatos y aluminatos se debe a que varían de acuerdo a las temperaturas alcanzadas.

A la fecha existe gran controversia entre los restauradores y científicos en el área de materiales, pues los primeros que son quienes a la fecha ostentan el derecho a dictar las directrices en la restauración, sólo permiten que los monumentos sean intervenidos utilizando las mismas técnicas con que fueron construidos y no permiten bajo ningún motivo o circunstancia el empleo de materiales o técnicas nuevas [Bronski y Gabby, 1999; Thompson y Groot, 1999]; los segundos que abogan por el uso de técnicas modernas de limpieza y conservación, como por ejemplo la limpieza de monumentos por medio de la técnica del rayo láser (en México se ha usado sólo en la limpieza de la fachada de un edificio en la Ciudad de Mérida, Yucatán)

Para estar en posibilidad de proponer morteros para restaurar los monumentos de mampostería de lgnimbritas de la Ciudad de Morelia, Michoacán, se experimentó en este trabajo con los morteros de albañilería antiguos descritos en la bibliografía. Partiendo siempre de la premisa de que deben ser distinguibles a simple vista las intervenciones en los monumentos [Bronski y Groot, 1999] y de que la filosofía de la restauración debe partir de un correcto diagnóstico que permita decidir entre limpieza, restauración o reposición [Alessandrini y Tabasso, 1999] especialmente en los daños de humedad y eflorescencia [Atkinson, 1999; Sherwood, 1999; Van Balen et al, 1999]

El árido fino o arena empleada en estos morteros es una roca ígnea extrusiva natural del banco de Joyitas, descrita ya en el capítulo de propiedades físicas y según los estándares de la ASTM, el Módulo de Finura para las arenas en los morteros, es menor que el sugerido para el concreto. El adhesivo es cal, que es un material producto de la caliza que a su vez es una roca sedimentaria, de la cual existen dos bancos principales en el Estado. El uso de cemento hidráulico no se permite pues debe calcinarse a aproximadamente 1450° C, y en la antigüedad era punto menos que imposible llevar a los materiales a tal temperatura.

Metodología.

Los morteros se realizaron en proporción 1:2, una parte de cal por dos partes de arena en peso y el agua necesaria para lograr una mezcla plástica, con fluidez del 115 %. Todos se realizaron en la Sección de Resistencia del Laboratorio de Materiales "Ing. Luis Silva Ruelas" de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Michoacana. No existe un método internacional aceptado para diseñar mezclas de mortero, pero se siguieron las directrices del Dr. Abrams [Appa Rao, 2001-b] para diseño de mezclas de concreto.

El agregado pétreo se muestreó del banco Joyitas y se le realizaron las pruebas físicas y mecánicas descritas en la ASTM. Todos los ensayos se realizaron por triplicado y el promedio de las tres cuantificaciones es lo indicado aquí. En los casos en que uno de los tres valores fue diferente en $\pm 10\%$ con respecto a los otros dos, se desechó y se repitió la prueba.

Las mezclas fueron elaboradas y mezcladas manualmente, así como la preparación de los tres tipos de especímenes, dosificadas en peso.

Los aditivos que se agregaron a los morteros fueron, emulando a los morteros antiguos, leche fresca de ganado bovino [Ochoa, 2001], sangre del sacrificio del ganado bovino [García R., 2001], algodón [García A., 2002], lana de cordero [Álvarez, 2001], yema [González, 2002] y clara de huevo [Márquez, 2002], miel de colmena [Rivera, 2002], mucílago de nopal [Camacho, 2001], leche acidificada y crema de leche [Ponce de León, 2002], manteca de cerdo [Ávalos, 2002]. También se elaboró y probó una mezcla testigo [Ibarra, 2002] de mortero de cal como valor de referencia, para las tres sollicitaciones mecánicas, sin aditamento alguno, con fines de comparación.

Experimentación

Los aditivos que se estudiaron desde el punto de vista de su efecto en la resistencia mecánica sobre los morteros son: leche sin pasteurizar, como existía

antiguamente, en tres proporciones con respecto al líquido de mezclado leche: agua 25, 50 y 75 %; mucílago de cactácea blanca del género *Opuntia* [Aguilar Becerril, G., 1999], que en el lenguaje coloquial se le llama nopal. El uso del mucílago, de sus almidones, en los morteros es para retener el agua de amasado y favorecer el fraguado y se usaron dos concentraciones: alta y baja. En un litro de agua se pusieron a hervir 650 grs y 300 grs de cactus, respectivamente; sangre, producto del sacrificio de ganado bovino, sin aditivos o anticoagulantes, en proporción con respecto al agua de 10, 15 y 20 %; miel de abeja diluida en agua en proporción 3 y 7 %; clara de huevo en proporción 30, 40 y 50 %; yema de huevo en proporción 30 y 50 %; manteca de cerdo en proporción en peso de los sólidos de 5 y 8 %; leche acidificada (agria) en proporción 75 % y acideces de 20, 40 y 60 grados ; crema de leche disuelta en agua en proporción 2 y 4 %; lana de cordero en proporción de 0.10, 0.20 y 0.30 % en peso de los sólidos; algodón en proporción de 0.10 y 0.30 % en peso de los sólidos y por supuesto el testigo del mortero sin aditamento alguno.

En total se probaron 11 aditivos (leche, leche agria, crema, nopal, sangre, miel, clara, yema, manteca, algodón y lana), de algunos de ellos se hicieron pruebas con diferentes contenidos (leche, 3; leche agria, 3; crema, 2; nopal, 2; sangre, 3; miel, 2; clara, 3; yema, 2; manteca, 2; algodón, 2; lana, 3), dando un total de 28 mezclas, incluido el testigo. Todas y cada una de las mezclas se probaron a 7, 14, 21, 28, 45, 60 y 90 días de edad, para cada prueba mecánica y cada edad se probaron un promedio de 6 especímenes.

Las pruebas mecánicas practicadas a los especímenes de mortero fueron esfuerzo de ruptura a la compresión, f_c , en cubos de 5x5x5 cm; esfuerzo de ruptura a la flexión, f_f , en vigas de 5x5x20 cm y esfuerzo de ruptura a la tensión, f_t , en briquetas de $\frac{3}{4}$ x 1 $\frac{1}{2}$ x 4 pulgadas; en total se probaron 28 mezclas x 3 sollicitaciones mecánicas x 6 especímenes x 7 edades de prueba, es decir aproximadamente 3528 especímenes, sin contar con los especímenes fabricados en la investigación preliminar para estar en posibilidad de proponer los porcentajes aquí estudiados.

La compresión y la flexión de los morteros fueron obtenidas en la Máquina Universal de Pruebas Tinius Olsen con capacidad de 50 toneladas y aproximaciones de

1 Kg. Los cubos fueron cabeceados con arena sílica de Canadá (<mallá No. 30 y >mallá No. 16, ASTM), las vigas se probaron con el método de los tres apoyos de carga, simplemente apoyados y la fractura ocurrió en el tercio medio en todos los casos. Respecto a las pruebas de tensión se realizaron en la Máquina Michaelis, los especímenes no requirieron preparación alguna.

Resultados.

Las fibras de la lana de cordero tenían una longitud en promedio de 9 a 12 centímetros: tal longitud ocasionó en los especímenes preliminares que la fibra se ensortijara, pues al llevar las muestras a la falla se observó en todas ellas que la fibra no se distribuyó de manera homogénea ya que tendió a aglutinarse en las esquinas. Para evitar tal fenómeno las fibras se redujeron de tamaño a $3 \leq \text{longitud fibra} \leq 5$ centímetros. El diámetro de las fibras observadas con MEB fue de 15 a 30 micras. Lo descrito ocurrió también con la fibra vegetal del algodón, siendo necesario reducir su tamaño y desmenuzarla: la fibra de algodón observada con MEB presentó diámetros del orden de 6 a 20 micras, en promedio.

La composición de la Cal Hidráulica, en porcentaje, se indica en la Tabla 4.1, la cual deberá tener >10 % de Silicatos para que fragüe bajo el agua. La caliza al ser una roca sedimentaria suele contener arcillas y su presencia está limitada por los valores indicados en la Tabla 4.2. La cal, como todos los materiales empleados en la construcción de obras de tipo civil debe analizarse según los estándares de la ASTM. Las pruebas se indican en la Tabla 4.3; los resultados de los agregados pétreos finos o arena se incluyen en la Tabla 4.4. Las pruebas mecánicas para caracterizar los morteros para su uso como adhesivo en mamposterías, protección al medio ambiente y/o estética se indican en la Tabla 4.5. La Tabla 4.6 resume todas las mezclas de mortero caracterizadas aquí, así como los diferentes aditivos vegetales y animales empleados para mejorar sus propiedades.



Tabla 4.1. Composición en porcentaje, de la cal hidráulica para su uso como material de construcción.

CaO (Óxido de Calcio)	64.00
SiO ₂ (Sílice)	24.00
Al ₂ O ₃ (Alúmina)	4.50
Fe ₂ O ₃ (Óxidos de Hierro)	1.00
MgO (Óxido de Magnesio)	1.00
SO ₃ (Anhídrido Sulfúrico)	0.50
Pérdidas por calcinación	5.00

Tabla 4.2. Contenido de arcilla en las rocas calizas sedimentarias.

Naturaleza del producto	Índice Hidráulico	% arcilla en la caliza	Tiempo de fraguado	Observaciones
Cal grasa o magra	0.00-0.10	0.00-5.30	Fraguado lento	Fragua sólo en aire
Cal débilmente hidráulica	0.10-0.16	5.30-8.20	16-30	Días
Cal medianamente hidráulica	0.16-0.31	8.20-14.80	10-15	Días
Cal propiamente hidráulica	0.31-0.42	14.80-19.10	5-9	Días
Cal eminentemente hidráulica	0.42-0.50	19.10-21.80	2-4	Días
Cal límite o cemento lento	0.50-0.65	21.80-26.70	1-12	Horas
Cemento rápido	0.65-1.20	26.70-40.00	5-15	Minutos

Tabla 4.3. Estándares de calidad de la cal hidráulica.

Prueba	Estándar	Resultado
Calidad de la cal	ASTM C110-00	Cal hidratada
Finura de la cal hidratada	ASTM C110-00	9.21 % retenido
Consistencia normal de la pasta	ASTM C110-00	58 %, penetración 19 mm
Fluidez de la mezcla	RConstrucción	115 %

Tabla 4.4. Pruebas de calidad en el agregado pétreo para su empleo en morteros de albañilería.

Prueba	Estándar	Resultado
Muestreo del agregado	ASTM D 75	500 g
Porcentaje de absorción	ASTM C128-97, DGN C165	1.78 %
Gravedad específica G_E	ASTM C128-97, DGN C165	2.33
Peso vol. Seco suelto PVSS	ASTM C29/C29M-97, DGN C73	1.14 g/cm ³
Peso vol. Seco comp. PVSV	ASTM C29/C29M-97, DGN C73	1.16 g/cm ³
Imp. Orgánicas (colorimetría)	ASTM C40-99, DGN C78	No. 1
Equivalente de arena	ASTMD 2419	98.19 %
Material que pasa la malla 200	ASTM C117-95, DGN C84	5.87 %
Granulometría, MF	ASTM C136-96 ^a , DGN C77	3.03

Tabla 4.5. Solicitaciones a los especímenes endurecidos de mortero de cal.

Prueba	Estándar	Dimensión espécimen
Compresión f_c	ASTM C109-63-2000	5x5x5 cm
Tensión f_t	ASTM C190-59-2000	de $\frac{3}{4}$ x 1 $\frac{1}{2}$ x 4 plg
Flexión f_f	ASTM C78-2000	5x5x20 cm

Tabla 4.6. Nomenclatura y resumen de morteros estudiados.

Mezcla	Aditivo	Proporción aditivo
T	Ninguno-testigo	No
L-75	Leche	75 %
L-50	Leche	50 %
L-25	Leche	25 %

N-A	Mucílago de nopal	Alta Concentración
N-B	Mucílago de nopal	Baja Concentración
S-20	Sangre	20 %
S-15	Sangre	15 %
S-10	Sangre	10 %
W-1	Lana de Cordero	0.1 %
W-2	Lana de Cordero	0.2 %
W-3	Lana de Cordero	0.3 %
A-1	Algodón	0.1 %
A-3	Algodón	0.3 %
H-3	Miel de abeja	3 %
H-7	Miel de abeja	7 %
LA-60°	Leche ácida, 75%	75 %, 60°
LA-40°	Leche ácida, 75%	75 %, 40°
LA-20°	Leche ácida, 75%	75 %, 20°
C-2	Crema leche	2 %
C-4	Crema leche	4 %
M-3	Manteca	5 %
M-8	Manteca	8 %
C-30	Clara de huevo	30 %
C-40	Clara de huevo	40%
C-50	Clara de huevo	50 %
Y-30	Yema de Huevo	30 %
Y-50	Yema de Huevo	50 %

Los aditivos de los morteros se clasificaron para graficarlos de manera conjunta, en: vegetales; mucílago de nopal, miel de colmena y comparados en el testigo, fibras;

lana de cordero y algodón, contra el testigo, lácteos; leche fresca, leche agria, crema de leche y el testigo, animales; sangre de ganado bovino, manteca de cerdo y el testigo; albúmina, es el grupo formado por yema y clara de huevo, comparados con el testigo.

Los resultados de los especímenes probados a la compresión simple se encuentran en las Figuras 4.1, 4.2, 4.3, 4.4 y 4.5. Los resultados de los promedios de las pruebas de tensión simple están contenidos en las Figuras 4.6, 4.7, 4.8, 4.9 y 4.10 y las Figuras 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 y 4.15 muestran los resultados de las pruebas de ruptura a la flexión. Las Figuras 4.16 a 4.52 muestran la morfología típica de los morteros de albañilería observadas con MEB, la microscopía se realizó recubriendo las muestras con cobre.

Discusión.

Se diseñaron un conjunto de morteros elaborados a la usanza antigua que satisfacen los requisitos de resistencia mecánica, colocación e historia, con la estética y durabilidad, que también son permitidos por las autoridades del INAH y UNESCO.

Estos morteros de cal toman varios años para fraguar, por medio de su proceso de carbonatación en presencia de la atmósfera circundante, ésto es una ventaja para los monumentos, pues le confiere una propiedad elástica de deformarse y adaptarse a los cambios de forma, debidos a hundimientos diferenciales por el peso de la estructura sobreyacente al terreno, o por el acomodo por las cargas aplicadas a medida que se avanza en la construcción, por las irregularidades de los bloques de piedra y sus consiguientes cambios en el espesor de los morteros con que son adheridos.

Todos los morteros fueron estudiados desde el punto de vista de su comportamiento mecánico bajo sollicitaciones de compresión (f_c), tensión (f_t) y flexión (f_f), que emulan lo que ocurre en los muros de los monumentos: compresión, debida a cargas vivas y muertas; tensión debida a cargas accidentales como vientos, sismos y flexión debida a hundimientos diferenciales por cambios estacionales (lluvia-sequía) en el suelo donde se asientan.

Los resultados de las pruebas mecánicas obtenidas fueron comparados en todos los casos contra un mortero testigo que no contiene aditivos, elaborado exclusivamente con agua, cal y arena.

Se observa que los morteros elaborados con mucílago de cactáceas presentan buen comportamiento mecánico en general, sin embargo los morteros elaborados con leche de ganado bovino fueron los más elásticos y a edades tardías presentan los mejores comportamientos mecánicos, pero la leche al tener partículas oleosas presenta poca evaporación, retardando el fraguado, lo que no ocurre en los casos del mucílago que básicamente está compuesto de sílice y calcio.

Los morteros de cal mecánicamente caracterizados, presentaron valores muy por debajo ($f_c = 5$ a 25 kg/cm^2) de los sugeridos por el actual reglamento de construcciones, que sugiere valores de $f_c = 40$ a 70 kg/cm^2 , para los casos de morteros de cemento, pero por otra parte los valores de $40-70 \text{ kg/cm}^2$, son para adherir muros de mampostería de espesores de $10-30 \text{ cm}$, mientras que los morteros de cal son para protección y adhesión de muros con espesores de 60 cm a 1.50 m .

El empleo de las arenas volcánicas naturales del Banco de Joyitas, logró que los valores de resistencia a la tensión directa, en función de la resistencia a la compresión, fueran superiores, $f_t \cong 25$ a $50 \% f_c$, a los obtenidos en los casos de concreto hidráulico, donde $f_t = 11\% f_c$; también resultaron superiores, en 5% , a las pruebas realizadas en morteros elaborados con arenas redondeadas de río, que no se encuentran en los alrededores.

Aún que los morteros de cal adicionados con mucílago de nopal no fueron los que obtuvieron las resistencias más altas en las sollicitaciones mecánicas, a la fecha son los que se usan con éxito para recubrir los muros de los monumentos; existe reticencia por el gremio de los restauradores para el empleo de aditivos como la leche y el huevo, que no requieren de ninguna preparación previa y cuyo empleo mejora las propiedades mecánicas.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Los morteros de cal no se emplean en construcciones civiles de concreto, pero la cal sí se emplea en los morteros terciados; cemento-cal-arena-agua.

La caracterización de los morteros antiguos de albañilería de cal, con los mejores comportamientos mecánicos, debe continuar estudiándose bajo otras sollicitaciones como permeabilidad, reflectancia, adherencia, cortante.

Empíricamente se ha demostrado que la lechada de cal es un importante re-aglutinante en los morteros expuestos y en los casos en que desea conservarse el estuco original.

La cal empleada cumple ampliamente con los requisitos de calidad indicados por los reglamentos vigentes.

De las cinco figuras donde se resume el comportamiento de los morteros de cal con aditivos orgánicos, puede determinarse que los valores superiores a 18 kg/cm² sólo fueron alcanzados por el mucílago de nopal (Fig. 4.1) y los morteros con leche de ganado bovino (Fig. 4.3). El mortero testigo presentó valores de 12 kg/cm². Los morteros con aceites animales presentaron problemas de fraguado por la mínima evaporación (Fig 4.3, manteca de cerdo y sangre de ganado bovino; Fig.4.4, crema de leche), sin embargo se emplean debido a su aspecto estético, por la reflectancia.

Las fibras, en las sollicitaciones a la compresión, no incrementaron la resistencia, ocurrió que aumentaron el área superficial a recubrir, en los casos de tensión y flexión, las fibras tampoco incrementaron la resistencia (Fig. 4.7 y 4.12). En las fotomicrografías de puede apreciar que las fibras de lana, por efecto de la suarda, no presentaron adherencia con la matriz; en el caso del algodón sí hubo adherencia, pero no fue posible su total dispersión en la matriz. En las fotomicrografías se aprecia que o no hubo adherencia o no hubo distribución homogénea de las fibras mencionadas, lo que redundó en pobres resistencias mecánicas.



Los morteros con leche y mucílago de nopal, presentaron también buen comportamiento, con respecto al testigo, en esfuerzos a la tensión simple y la flexión, Fig. 4.6, 4.8, 4.11 y 4.13.

Los morteros con clara de huevo presentaron un comportamiento muy uniforme, sin incrementos notables en su resistencia con respecto a la edad de prueba, Fig. 4.5, 4.10 y 4.15 y en todos los casos fueron inferiores a los valores obtenidos con el mortero testigo.

En las fotomicrografías de las diferentes matrices, a excepción de los casos de fibras como el algodón y la lana, no hubo cambios significativos en la morfología. Las matrices son cohesivas. La cohesión se apreció muy especialmente en los morteros de base láctea, la cohesión es una propiedad que en los morteros suele asociarse a la densidad y la resistencia mecánica tanto a compresión como a tensión y flexión.

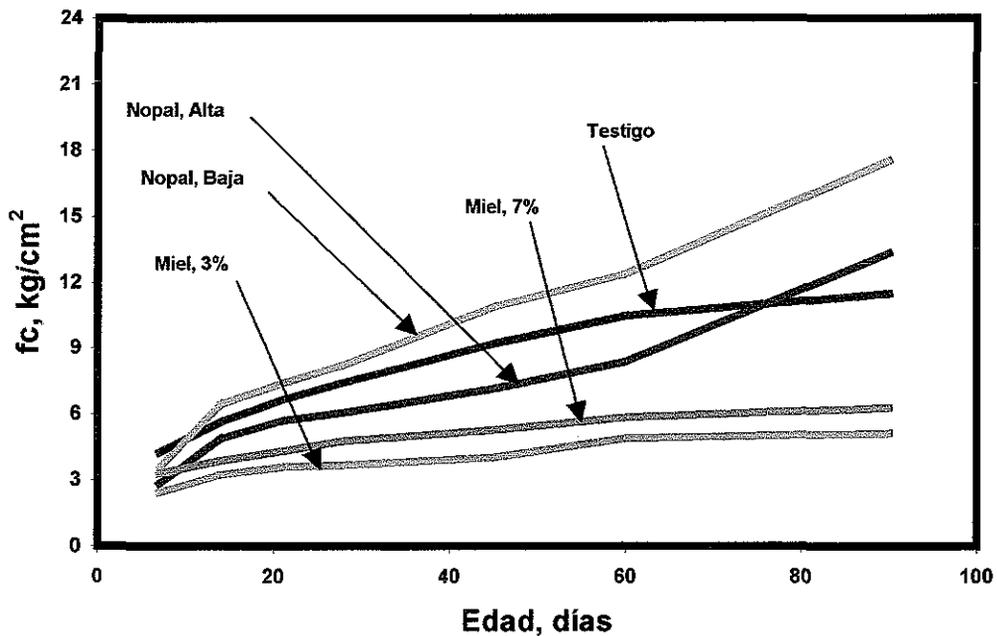


Figura 4.1. Esfuerzo de ruptura a la compresión, f_c en kg/cm^2 , morteros de cal adicionados con mucílago de nopal y miel de abeja, contra el mortero testigo.

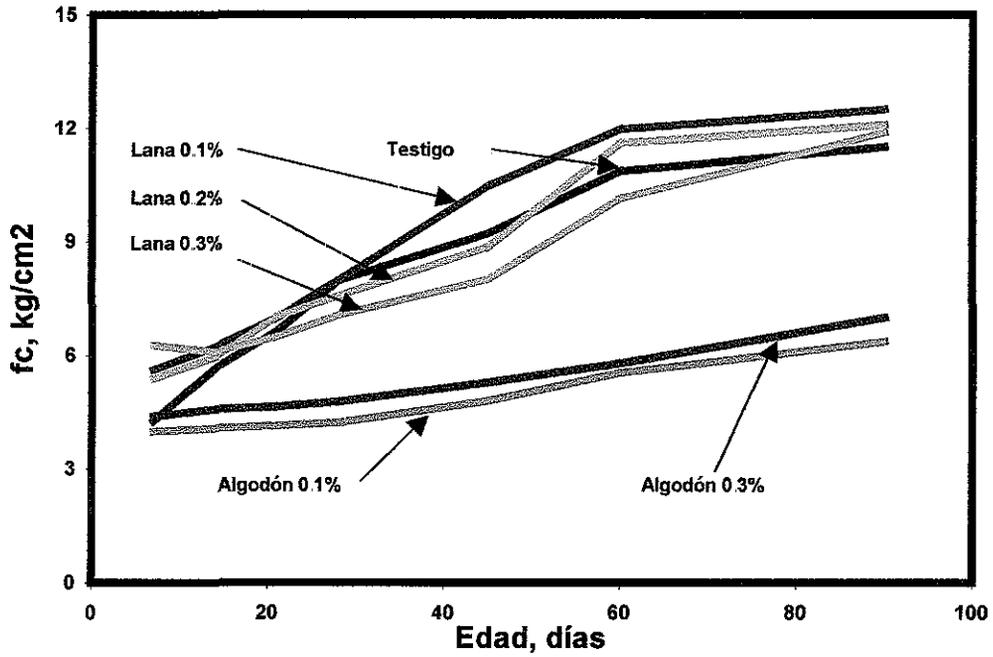


Figura 4.2. Esfuerzo de ruptura a la compresión, f_c en kg/cm^2 , morteros de cal adicionados con fibras de algodón y lana de cordero, contra mortero testigo.

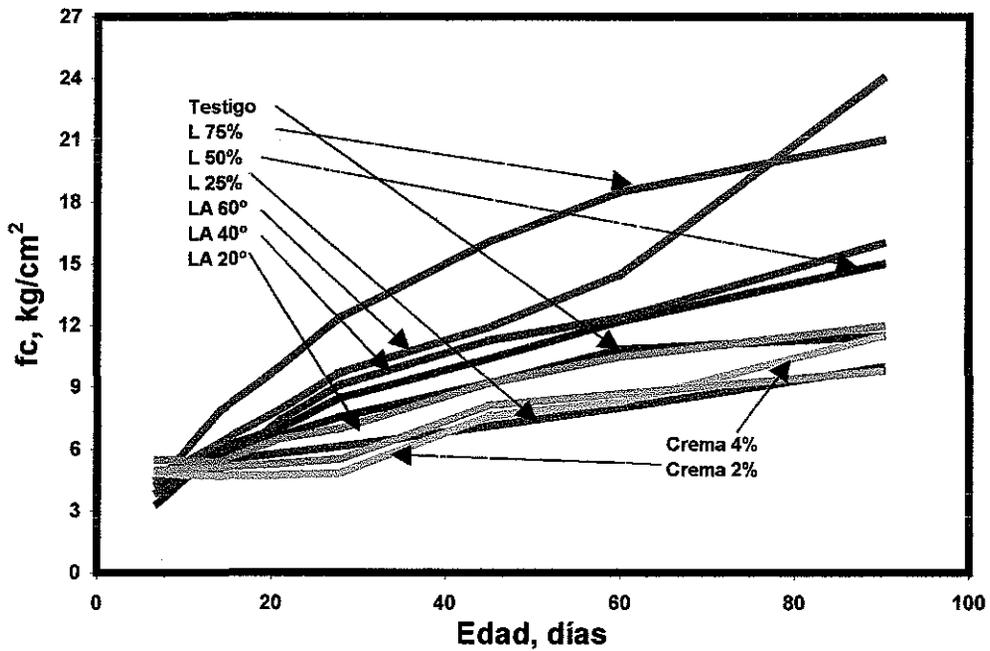


Figura 4.3. Esfuerzo de ruptura a la compresión, f_c en kg/cm^2 , morteros de cal adicionados con leche, leche ácida y crema de leche, contra mortero testigo.

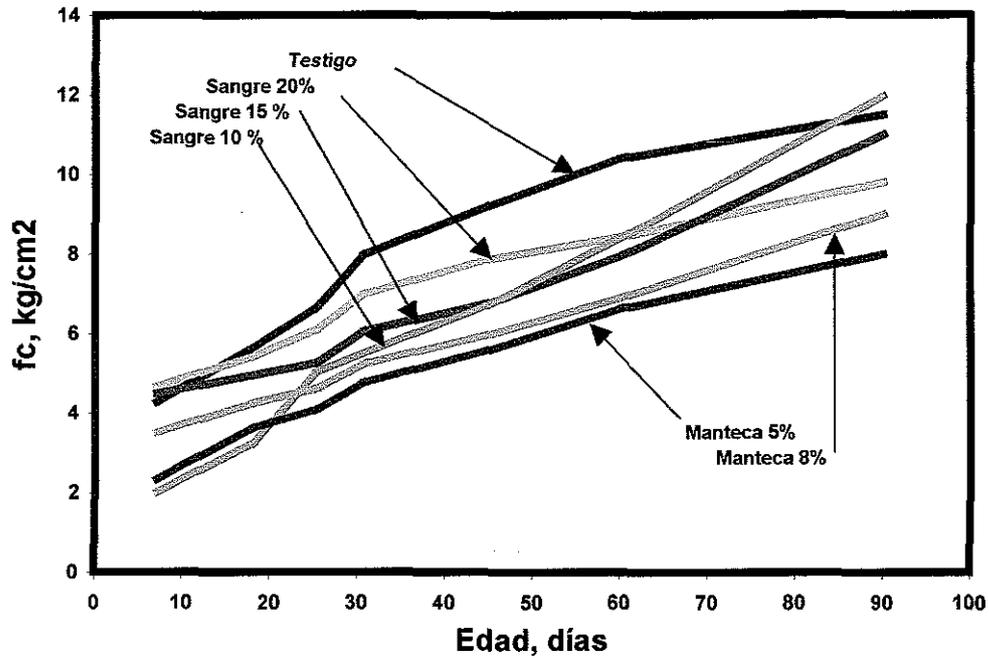


Figura 4.4. Esfuerzo de ruptura a la compresión, f_c en kg/cm^2 , morteros de cal adicionados con sangre de bovino y manteca de cerdo y manteca de cerdo, contra mortero testigo.

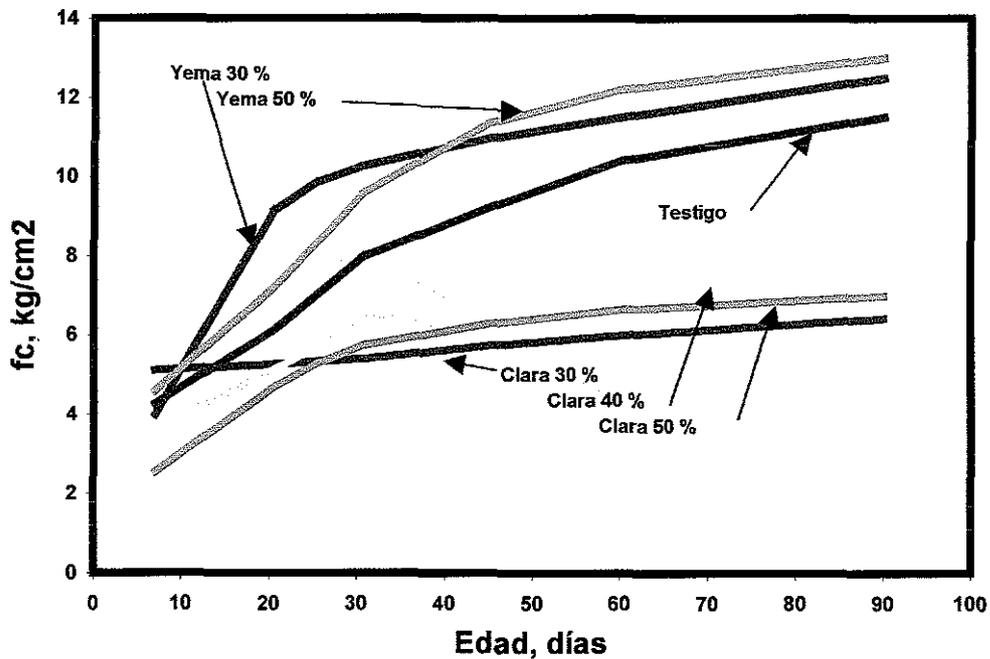


Figura 4.5. Esfuerzo de ruptura a la compresión, f_c en kg/cm^2 , morteros de cal adicionados con yema y clara de huevo, contra mortero testigo.

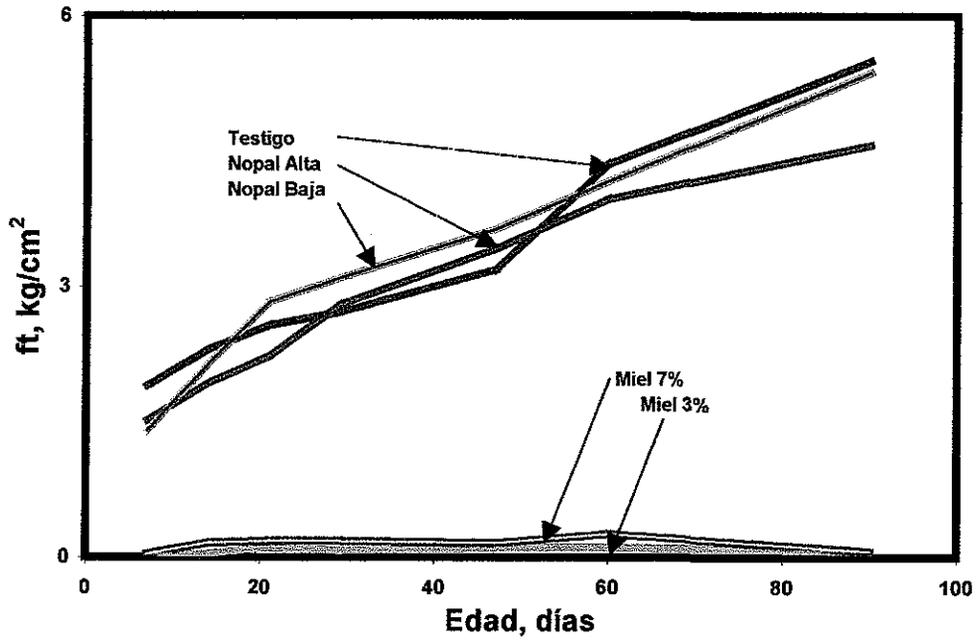


Figura 4.6. Esfuerzo de ruptura a la tensión, ft en kg/cm^2 , mortero de cal adicionado con mucílago de nopal y miel de colmena, contra mortero testigo.

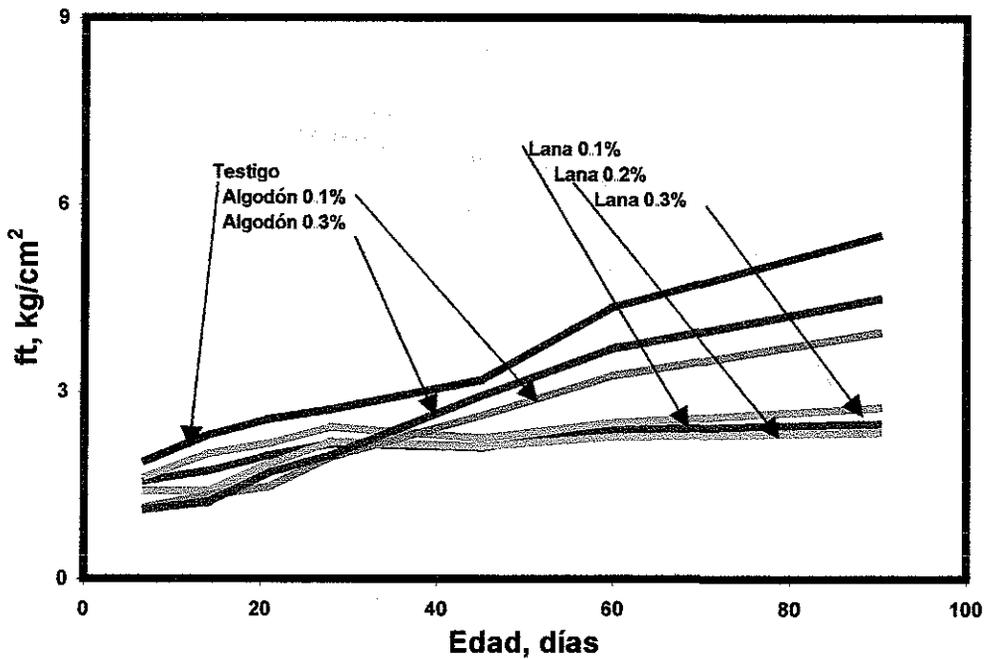


Figura 4.7. Esfuerzo de ruptura a la tensión, ft en kg/cm^2 , mortero de cal adicionado con algodón y lana de cordero, contra mortero testigo.

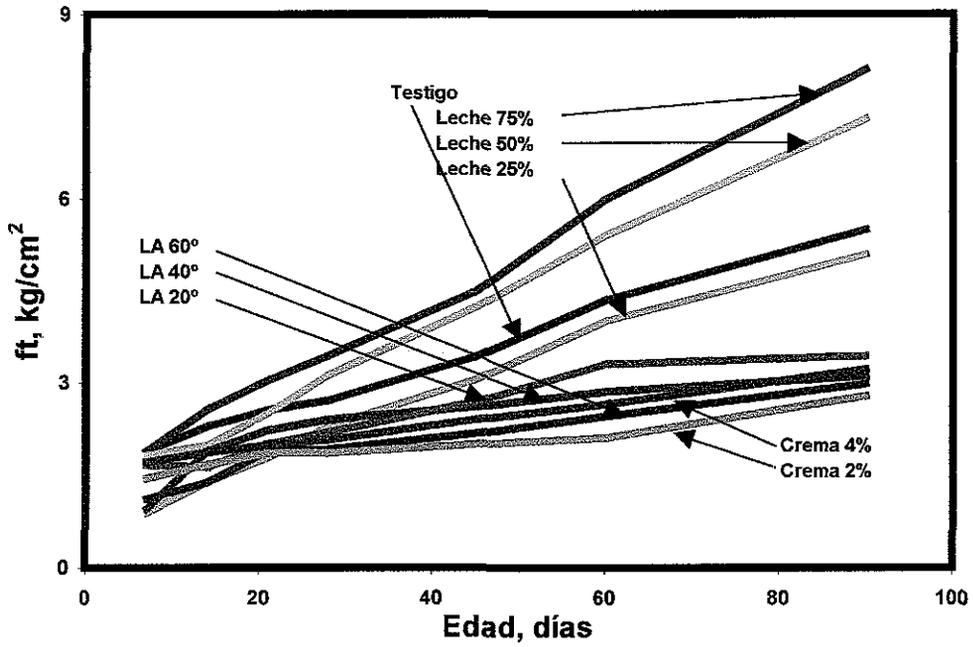


Figura 4.8. Esfuerzo de ruptura a la tensión, ft en kg/cm^2 , mortero de cal adicionado con leche, crema de leche y leche ácida, contra mortero testigo.

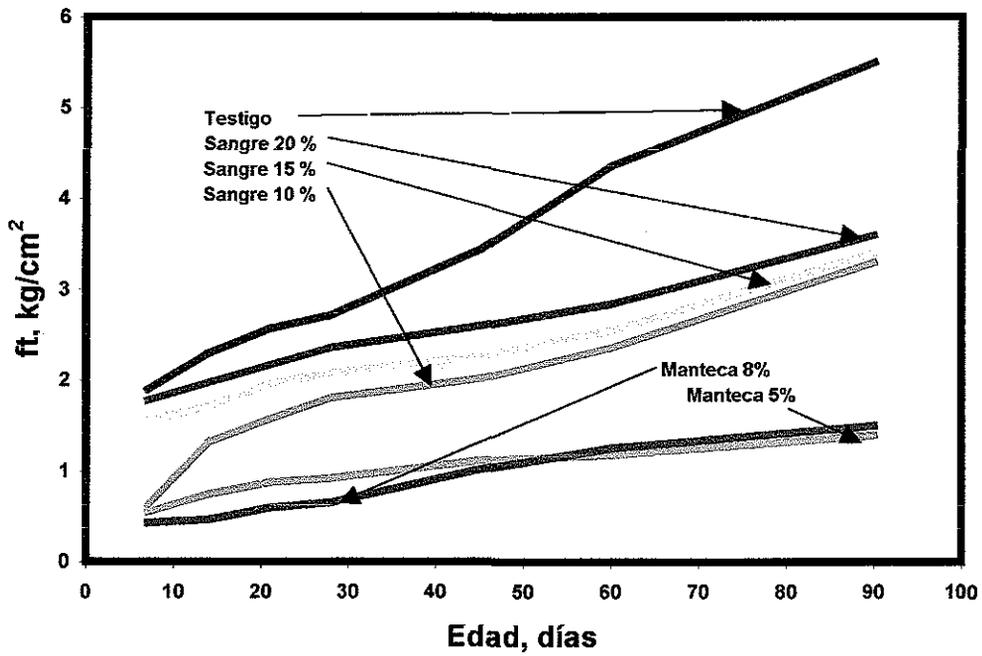


Figura 4.9. Esfuerzo de ruptura a la tensión, ft en kg/cm^2 , mortero de cal adicionado con sangre de ganado bovino y manteca de cerdo, contra mortero testigo.

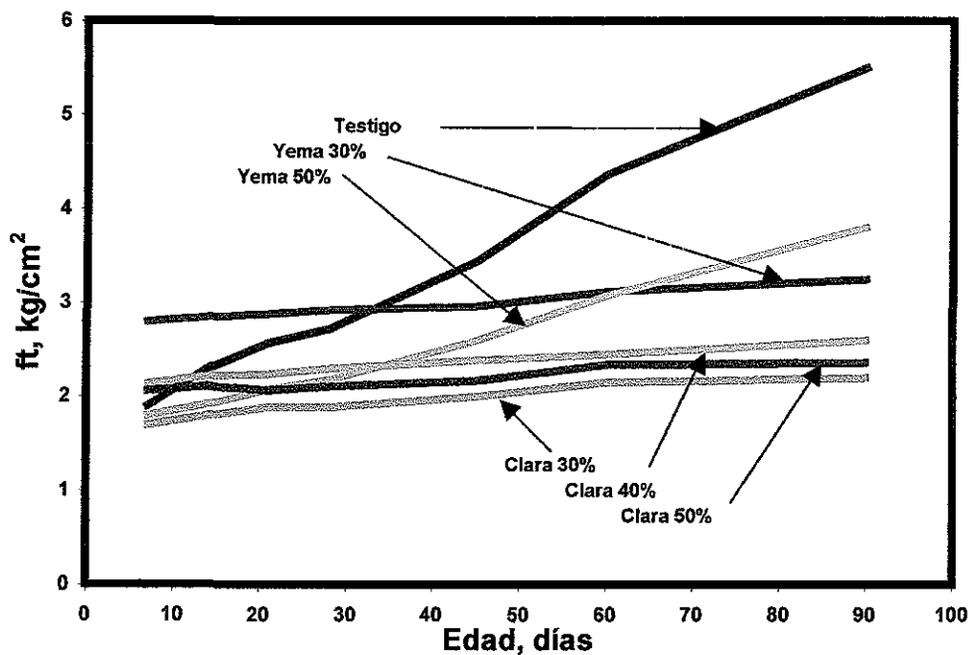


Figura 4.10. Esfuerzo de ruptura a la tensión, f_t en kg/cm^2 , mortero del adicionado con yema y clara de huevo, contra mortero testigo.

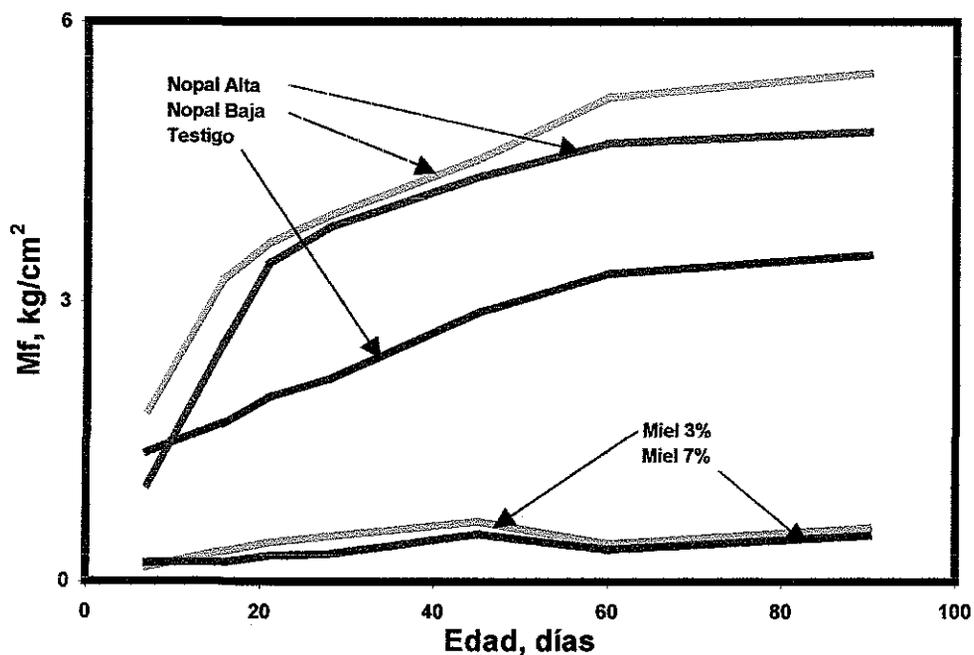


Figura 4.11. Esfuerzo de ruptura a la flexión, M_f en kg/cm^2 , mortero de cal adicionado con mucílago de nopal y miel de abeja, contra mortero testigo.

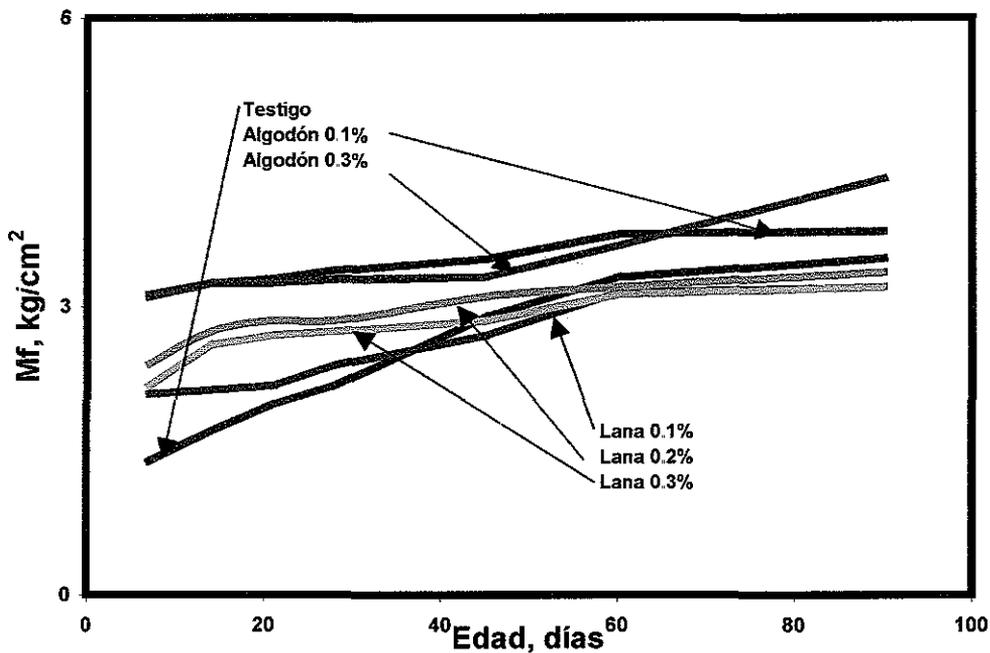


Figura 4.12. Esfuerzo de ruptura a la flexión, Mf en kg/cm², mortero de cal adicionado con algodón y lana de cordero, contra mortero testigo.

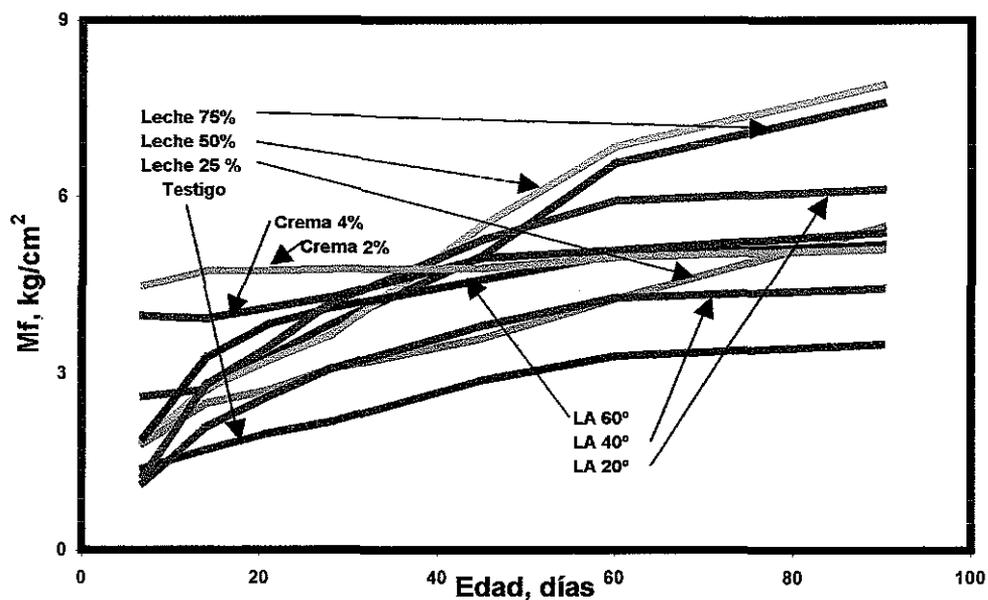


Figura 4.13. Esfuerzo de ruptura a la flexión, Mf en kg/cm², mortero de cal adicionado con leche, crema de leche y leche ácida, contra mortero testigo.

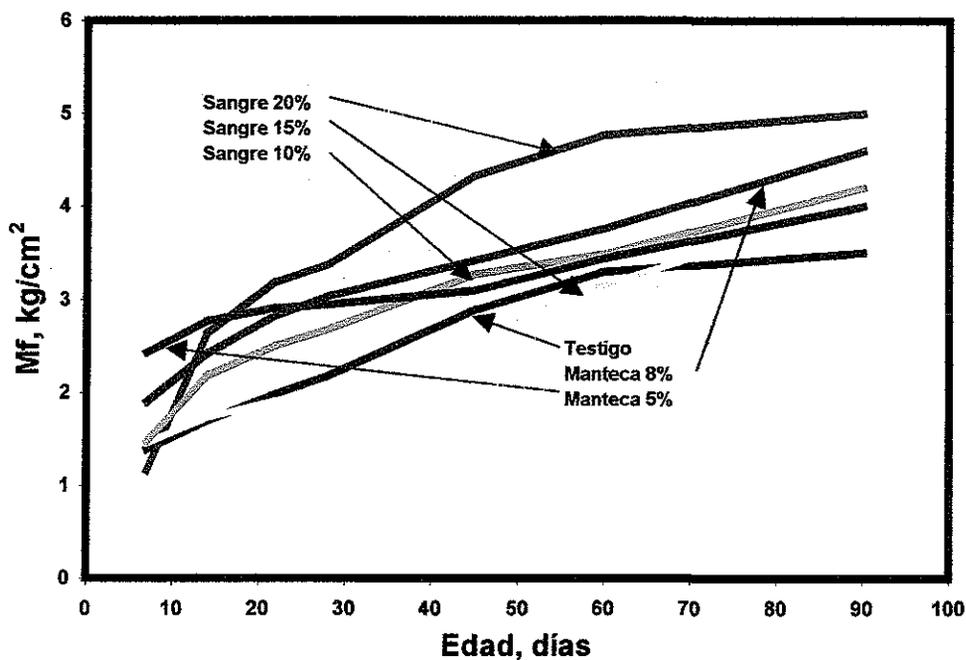


Figura 4.14. Esfuerzo de ruptura a la flexión, M_f en kg/cm^2 , mortero de cal adicionado con sangre deganado bovino y manteca de cerdo, contra mortero testigo.

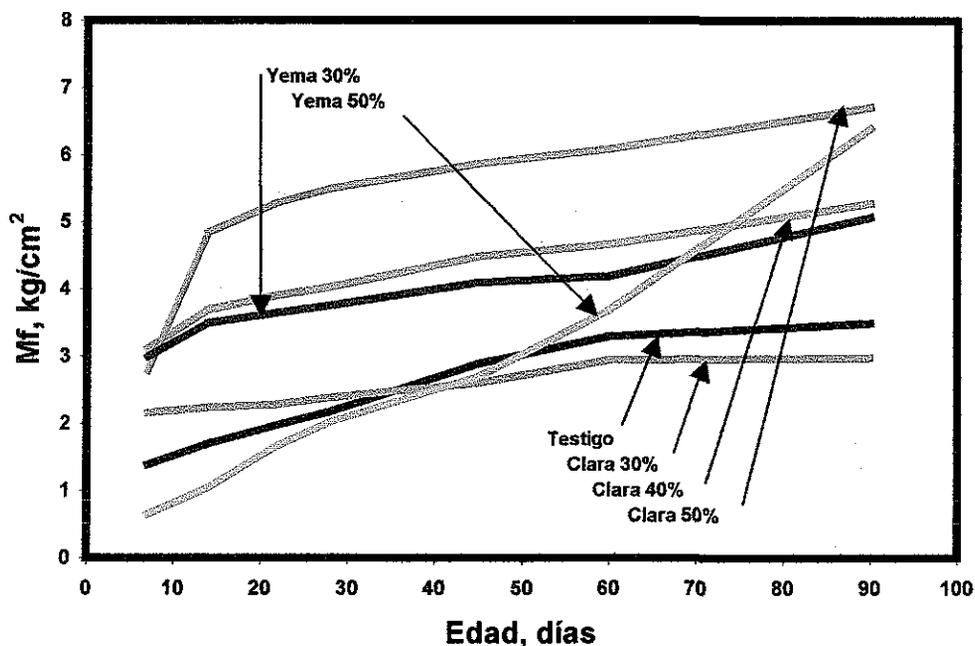
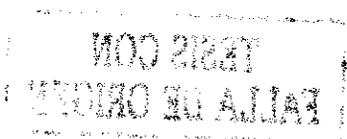


Figura 4.15. Esfuerzo de ruptura a la flexión, M_f en kg/cm^2 , mortero de cal adicionado con yema y clara de huevo, contra mortero testigo.



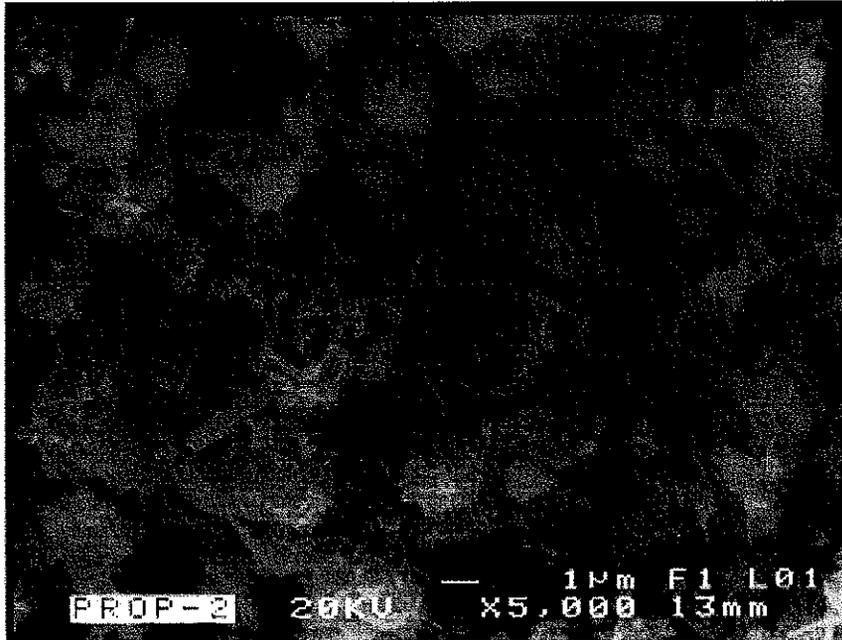


Figura 4.16. Mortero terciado de cal: cemento: arena y agua, agujas de hidratación del cemento pórtland.

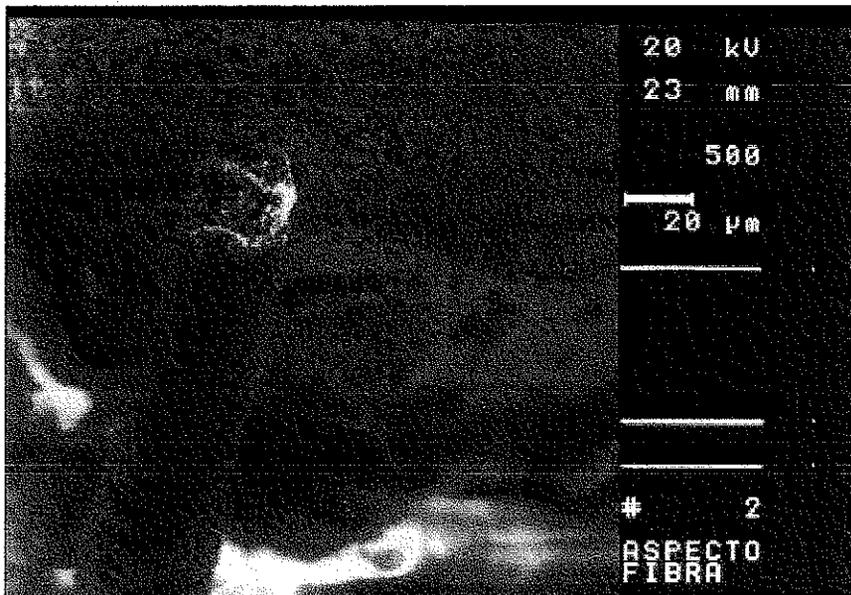


Figura 4.17. Fibra, lana de cordero, mortero de cal.

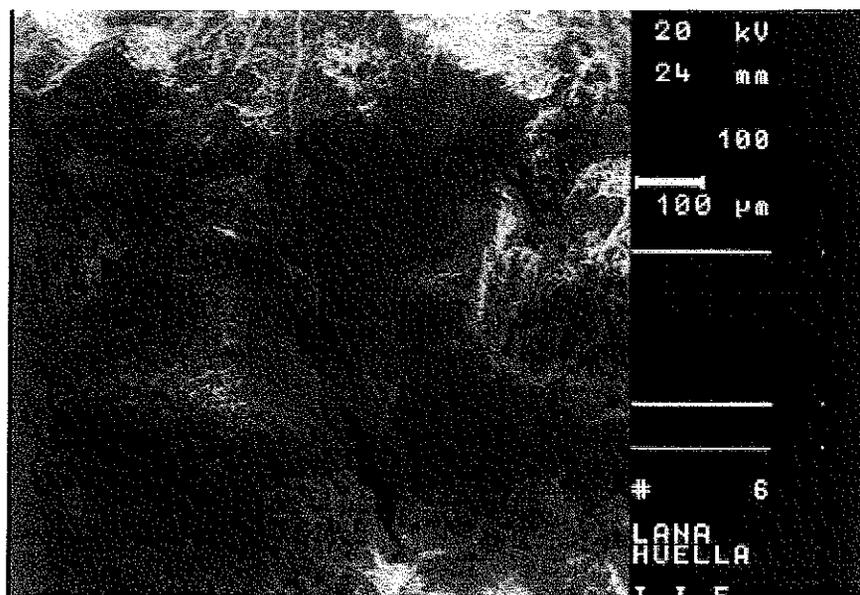


Figura 4.18. Huella de fibra, lana de cordero, mortero de cal.

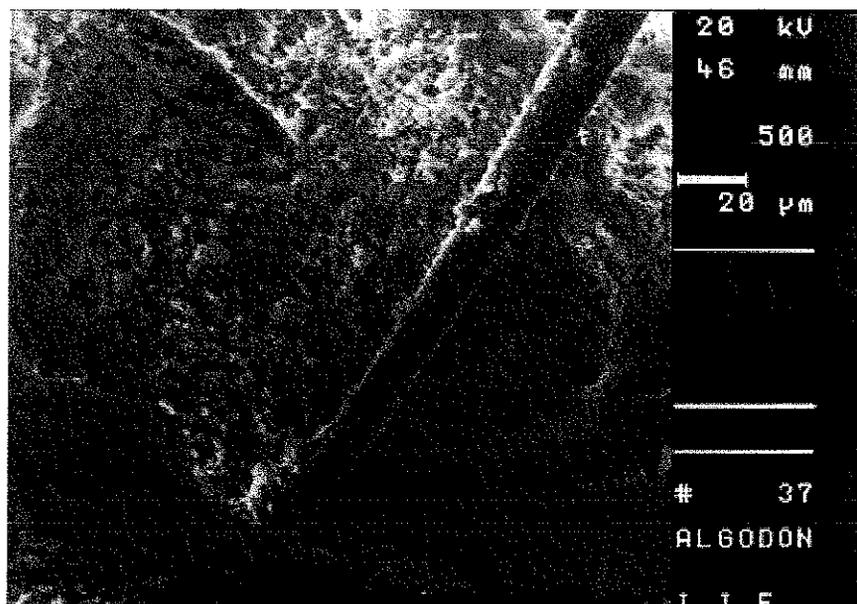


Figura 4.19. Fibra de algodón, mortero de cal.

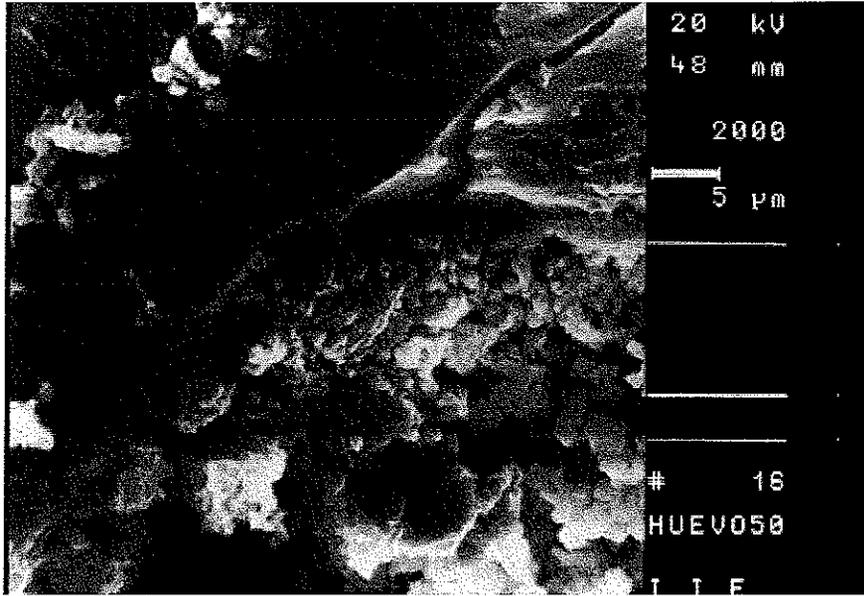


Figura 4.20. Mortero de cal con huevo al 50%.

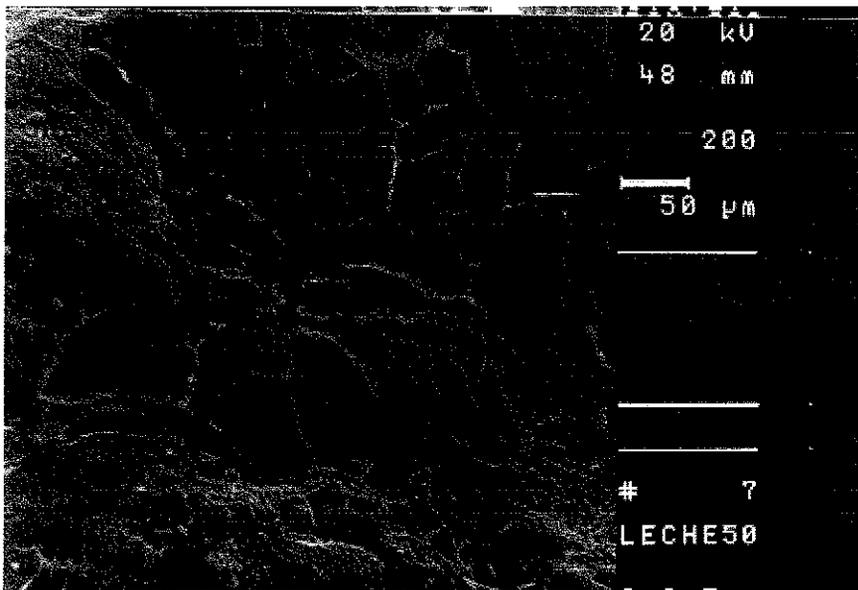


Figura 4.21. Mortero de cal con leche de ganado bovino al 50%.

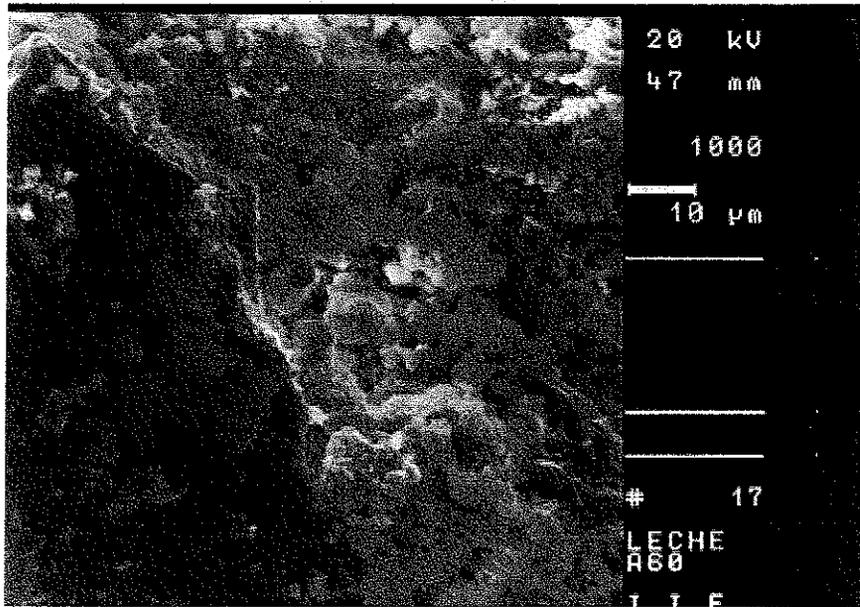


Figura 4.22. Mortero de cal con leche ácida.

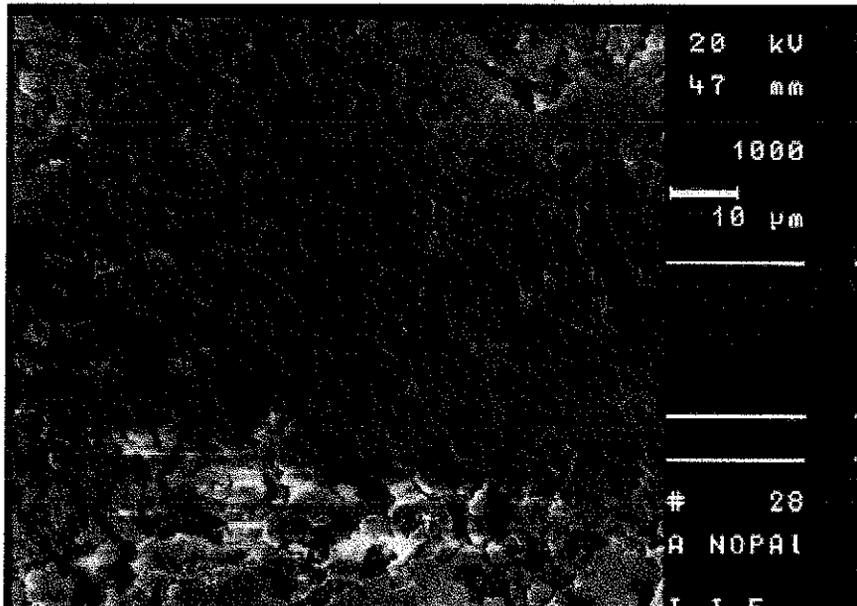


Figura 4.23. Mortero de cal con mucílago de nopai.

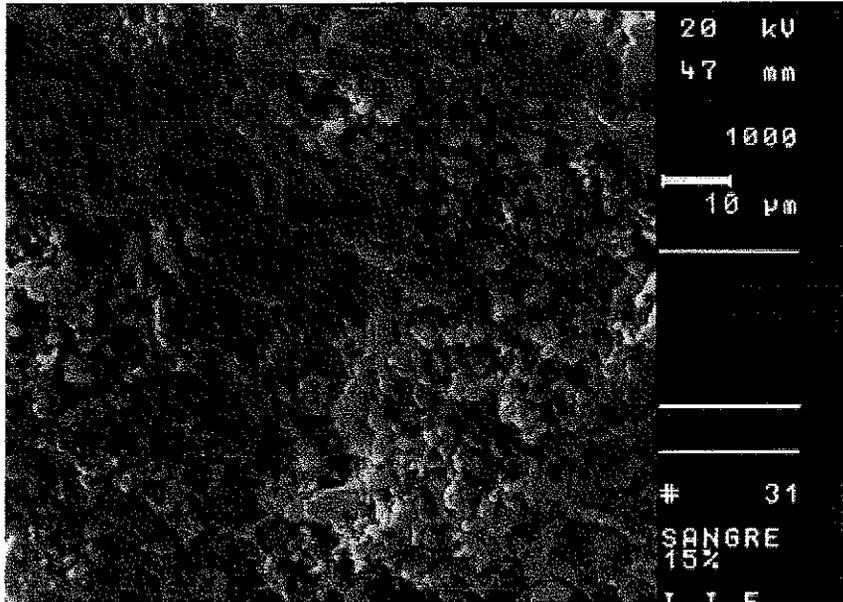


Figura 4.24. Mortero de cal con sangre de sacrificio de ganado bovino, al 15%.

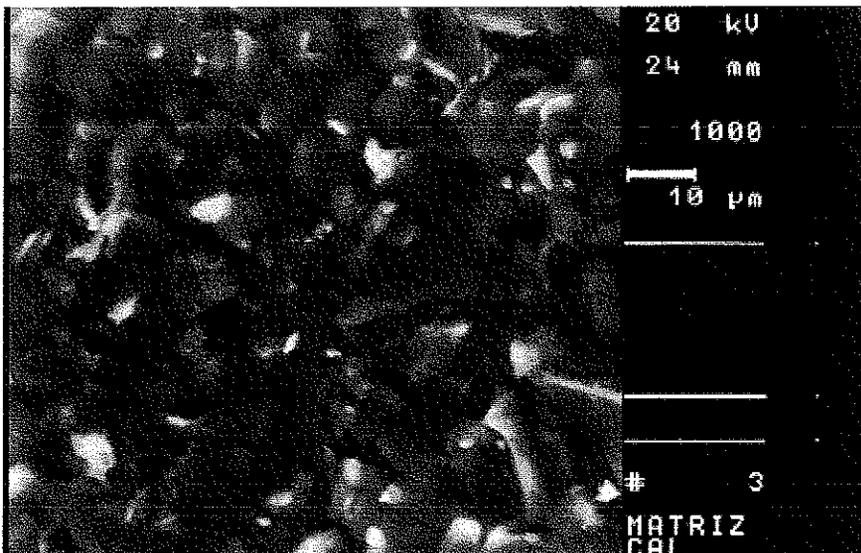


Figura 4.25. Mortero de cal, matriz sin aditivos.

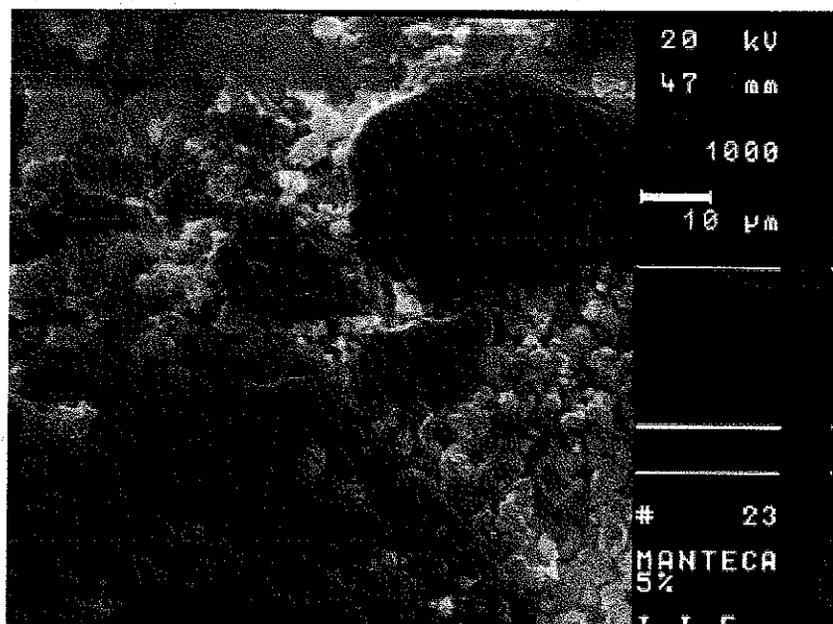


Figura 4.26. Mortero de cal con manteca de cerdo al 5%.



Capítulo 5.

CONCLUSIONES.

Ignimbritas.

La originalidad del tema impide la comparación de los parámetros evaluados con similares, ya que no existe bibliografía registrada en el tema, se realizó una evaluación considerando las rocas sanas y las deterioradas.

Las condiciones meteorológicas de la ciudad de Morelia durante los últimos años (1976 fecha en que inició el registro, a 2002), muestran que la temperatura, sí disminuye hasta valores cercanos al punto de congelación del agua. Por lo que es imprescindible evitar la humedad por capilaridad para evitar fallas por exfoliación. La velocidad del viento de alrededor de 2-4 m/seg sí es suficiente, para transportar partículas antropogénicas como las encontradas por MEB y depositarlas en las fachadas expuestas de los monumentos, pero no es suficiente para provocar el desgaste mecánico de los bloques de ignimbrita. Las fachadas expuestas a los vientos dominantes presentaron mayores problemas de deterioro.

La atmósfera ácida, $\text{pH} \approx 6$, actuante sobre las ignimbritas, rocas ácidas, no es la causa directa del deterioro. El daño no es tampoco exclusivamente geoquímico, puesto que las especies mineralógicas presentes, como las plagioclasas, que son las que posiblemente puedan devitrificarse, existen en tan pequeña cantidad inmersas en las matrices vítreas de las ignimbritas que representan una cantidad ínfima. Las especies que presentan mayor afinidad por el azufre ambiental son los feldespatos sódicos como la andesina, albita, anortita, labradorita y éstas también existen en cantidades pequeñas en las ignimbritas, sin embargo la presencia de arcillas, como la montmorillonita y de zeolitas como la clinoptilolita y la mordenita, dan idea de un deterioro inherente a la roca, imposible de evitar pero afortunadamente en tiempos de dimensión geológica; la cinética de la aparición de los minerales mencionados sí está en función de los efectos antropogénicos sobre los pétreos.

Muchos de los fenocristales inmersos en la matriz son cristales de cuarzo, que es estable bajo condiciones químicas como las descritas.

Las ignimbritas deterioradas de los monumentos presentan mayores contenidos de azufre, en forma de sulfato de calcio. Las rocas sanas de los bancos aledaños no presentan afinidad mineralógica con las provenientes de los monumentos, sus propiedades mecánicas son del orden de 70-100 kg/cm² mientras que las de los monumentos presentan resistencias mecánicas de 120-650 kg/cm²; esto último también confirma que el daño de los monumentos no es exclusivamente debido a la humedad capilar donde las resistencias son superiores a las de los bancos. No se sugiere entonces reemplazar los bloques de los monumentos con los tres bancos aquí estudiados, habrá que estudiar bancos no locales para el suministro de bloques de ignimbrita. En las partes atacadas por la capilaridad no se encontraron partículas antropogénicas debidas a quema de combustibles fósiles.

Concreto.

La propuesta de los fosos perimetrales de concreto en los monumentos históricos ha sido exitosa en la Casa Natal de Morelos y en el Primitivo y Nacional Colegio de San Nicolás de Hidalgo, así como en la catedral. Las manchas de humedad por capilaridad han descendido a niveles de 25 % con respecto a los niveles existentes.

Los agregados pétreos abundantes en la región, sí pueden emplearse para diseñar y elaborar concreto de alto rendimiento, pues mostraron actividad puzolánica, especialmente los bancos de Cerritos y Joyitas en Morelia.

Las edades de prueba de los especímenes son las indicadas por las normas vigentes nacionales e internacionales así como el número de especímenes para cada una de las solicitudes evaluadas.

Fueron logros el haber demostrado que los agregados pétreos volcánicos naturales incrementan los valores del módulo de ruptura a compresión, contrariamente a



lo sugerido por la literatura especializada, así como haber encontrado que el valor del módulo de elasticidad del concreto es superior al reportado. El valor de $E_d = 17,000 (f_c)^{1/2}$, permitirá disminuir las secciones resistentes de concreto.

El método de diseño del ACI, permitió relaciones A/C del orden de 0.54, para resistencia de $f_c = 250-300 \text{ kg/cm}^2$ con consumos de cemento menores a media tonelada por metro cúbico de concreto. El empleo de reductores de agua, fluidificantes y superfluidificantes, aumentó la trabajabilidad de las mezclas de concreto, máxime que los fijos debían tener elementos verticales armados y esbeltos, sin menoscabo de la resistencia mecánica.

El empleo de andesitas locales permitió aumentar la resistencia a la tensión indirecta y a la flexión, sin embargo, el módulo de elasticidad dinámico no varió significativamente con la edad o el fraguado, como se observa en las Figuras 3.10, 3.11 y 3.12

En el caso del empleo de acelerante de fraguado sí se observó, Fig. 3.1, 3.2 y 3.3, un aumento en la resistencia de ruptura a la compresión, especialmente a edades tempranas. En la mezcla sin curado en la misma figura, se recomienda que el valor de diseño f_{cR} sea superior a $f_c + \sigma$, si no se incrementa en más de 35 kg/cm^2 no podrá adquirirse la resistencia promedio.

Los valores de f_T y M_R , pueden relacionarse de manera lineal con el f_c , como $f_T = 0.10 f_c$ y $M_R = 0.12 f_c$.

El cemento empleado cumple con las normas de calidad. No existe una norma internacional que agrupe a los aditivos químicos para el concreto.

Los bancos estudiados cumplen con el objetivo de su empleo como agregados estabilizantes de volumen en el concreto hidráulico, tanto en el caso de agregado pétreo volcánico como del triturado. Los valores cuantificados de las propiedades físicas de los agregados, exceptuando el triturado, no cumplen con los valores mínimos sugeridos, pero su uso fue exitoso en las mezclas.

Debe continuarse con la caracterización petrográfica, mineralógica, física y mecánica de los bancos de andesita del Estado, para optimizar su empleo y diseñar mezclas que prolonguen la vida útil del concreto.

Mortero.

Los resultados del trabajo conducen a iniciar un fértil campo en la ingeniería de materiales, con el desarrollo de modernas tecnologías adecuadas para preservar la herencia cultural.

Si el deterioro de los monumentos no puede circunscribirse a la capilaridad, no pueden solucionarse los problemas con sólo la construcción de fosos perimetrales de concreto; por otro lado si los bancos actualmente en explotación no cumplen con los requisitos de resistencia mecánica mínima para reemplazar los bloques de los monumentos, y por supuesto no se permite la aplicación de impermeabilizantes o consolidantes químicos en las superficies expuestas de los monumentos, que impidan que la roca respire y elimine la humedad, sólo queda por proponer el empleo de morteros de albañilería para pegar o juntar las piezas y reponer los faltantes de mortero.

Los morteros de cal mejoran algunas de sus propiedades mecánicas con la adición de algunas materias orgánicas. La materia orgánica para los morteros debe, necesariamente, ser la que reporta la bibliografía que haya sido empleada en la época y al mismo tiempo ser la que los historiadores han corroborado en los archivos de la nación; los monumentos son post-conquista.

Los morteros de cal adicionados con leche sin pasteurizar son los que física y mecánicamente presentaron el mejor comportamiento, seguidos de los morteros adicionados con mucílago de nopal blanco.

Los aditivos como la sangre, la manteca de cerdo, la yema y la crema de leche, presentaron problemas a edades iniciales, en las proporciones estudiadas, por los

componentes oleosos no volátiles, sin embargo, a edades tardías, superaron los valores obtenidos por la muestra testigo.

El refuerzo con fibras animales y vegetales no dió el resultado esperado en la sollicitación de tensión directa, esto puede deberse a la dimensión del espécimen con respecto al refuerzo.

No se justifica el empleo de miel como aditivo para incrementar la resistencia, sólo en los casos estéticos como restauración de interiores. La manteca se recomienda como aditivo en los casos de escorrentía de agua.

A la fecha se están restaurando algunas zonas del centro histórico con mortero adicionado con mucílago de nopal, no por su mejor comportamiento mecánico y sí por considerarse un producto pre-conquista.

Se recomienda continuar con la investigación del comportamiento de los morteros bajos otras sollicitaciones, como permeabilidad, adherencia, abrasión; específicamente en los casos de los morteros con mejor comportamiento mecánico estudiados aquí.

Debe investigarse el comportamiento de las esquirlas de ignimbrita en los morteros de cal de albañilería [De Pablo Galán, L., 2002] ya que se resolverían problemas como: el uso de material de desecho del labrado de bloques, y la estética de los morteros al igualar tonalidad con las ignimbritas.

En la medida que los especialistas en materiales intervengan en la restauración de inmuebles podrán emplearse procedimientos y materiales con mejores resultados, a la par que historiadores, antropólogos, arquitectos, con el fin de preservar y conservar la herencia arquitectónica.

Bibliografía.

Aguilar Becerril, G., "Aspectos fisiológicos, bioquímicos y biofísicos del nopal (*Opuntia SPP*)", Tesis Doctoral, Inst. de Investigaciones Químico Biológicas, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 1999, pp. 2-7

Alessandrini, G. and M. L. Tabasso, "Conservation of Cultural Property in Italy; The UNI Normal Committee for the Definition of Technical Standards", ASTM STP 1355, USA, June 1999, pp 24-30

Alkali-Aggregate Reactions in Concrete, Building Research Establishment Digest, March 1988, 9pp

Alonso, E., "Propiedades físicas y mecánicas de ignimbritas del Municipio de Morelia", Tesis de Maestría, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 1996

Alonso E., E. Bedolla and L. Martínez Gomez. "SEM study on the ignimbrites from ancient monuments in Morelia, Michoacan, Mexico" International Conference on Electron Microscopy ICEM 14, Cancun, Mexico. August 31 to September 4th, 1998 Symposium FF, Vol. III

Alonso E y L. Martínez, "Degradación de las ignimbritas de la Catedral de Morelia, México", Biodeterioro de Monumentos Históricos de Iberoamérica, 1a Reunión Internacional de la Red Temática XV-E, ISBN 987-98903 Sevilla, España, Febrero 2000, pp 72-83

Alonso, E, L. Martínez, W. Martínez, L. Villaseñor and V. Castaño, "Mechanical Properties of an Igneous Aggregates Modified Hydraulic Concrete", Journal of the Advanced Composite Letters, U.K., Volume 10, May 2001-a, pp 67-71

Alonso, E, L. Martínez, W. Martínez and V. Castaño, "Preparation and Characterization of Ancient Masonry Mortars", submitted to Journal of the Advanced Composite Letters, U.K., Dec 2001-b, 5 pp, accepted May 2002

Alonso, E., J. Serrato y L. Martínez, "Comportamiento mecánico de algunos bancos de ignimbritas de la ciudad de Morelia, Michoacán, México", Capítulo del Libro Morelia y su Historia, Primer Foro sobre el Centro Histórico de Morelia, Editorial UMSNH-CIC, ISBN 970-703-076-3, 2001-c, pp 223-229

Alonso, E y L. Martínez, "Morteros en Restauración", Jornadas sobre Prevención y Protección del Patrimonio Cultural Iberoamericano de los Efectos del Biodeterioro Ambiental, CYTED Red Temática XV-E, ISBN: 987-98903-2-9, Oaxaca, Oax, Nov 2001-d, pp 45-64

Alonso, E., L. Martínez, W. Martínez and L. Villaseñor, "Mechanical properties of concrete elaborated with igneous aggregates", Journal of Cement and Concrete Research, Volume 32, Number 2, February 2002, pp 317-322

Alonso, E. and L. Martínez, "Effect of the environmental sulfur on degradation of ignimbrites of monuments in Morelia, Mexico", submitted to Building and Environmental, Elsevier, United Kingdom, September 2002, 15 pp

Álvarez Blancas, A. "Fibras de origen animal como refuerzo de morteros antiguos", Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Junio 2001, pp 23-46

American Concrete Institute, Committee 308, American Concrete recommended practice for selection proportion for concrete, Farmington Hills, USA, 1998

American Society for Testing and Materials, ASTM C805-85, Test for Rebound Number of Hardened Concrete, Phil, USA, 1993

American Society for Testing and Materials, ASTM, Section Four Construction, Volume 04.02, Concrete and Aggregates, SO40200, West Conshohocken, PA., 2000

American Society for Testing and Materials, ASTM, Section Four Construction, Volume 04.08, Soil and Rock (I): D 420- D 5779, SO40800, West Conshohocken, PA., 2000.

Amoroso, G. G. and Fassima, V. "Stone Decay and Conservation, Atmospheric Pollution, Cleaning, Consolidation and Protection", Materials Science Monographs, Number 11, 1983, Editorial Elsevier, Amsterdam

- Annual Book of American Society for Testing and Materials Standards 2000, ASTM, Section Four, Construction, Volume 04.08, Soil and Rock (I): D420-D5779
- Appa Rao, G , "Role of the water-binder ratio on the strength development in mortars incorporated with sílica fume", *Cement and Concrete Research*, Volume 31, Number 3, March 2001-a, pp 443-447
- Appa Rao, G., "Generalization of Abrams' law for cement mortars", *Cement and Concrete Research*, Volume 31, Number 3, 2001-b, pp 495-502
- Arnal Simón, L y Betancourt Suárez M., *Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Ilustrado y Comentado*, Editorial Trillas, Segunda reimpresión 1996, pp 665
- Aragón, A., "Características Físico-químicas y morfológicas del polvo suspendido en el aire de la Ciudad de San Luis Potosí", Tesis Doctoral, Facultad de Química UNAM, 1999, 130-164
- Asimov, I , *Breve Historia de la Química*, Alianza Editorial, Decimoquinta Reimpresión, España, 1996, pp. 9-13
- Atkinson, B K and P.G. Meredith, "The theory of subcritical crack growth with applications to minerals and rocks", *Fracture Mechanics of Rock* Academic Press, London, 1987, pp 113-166
- Atkinson, B., "Weathering and the performance equation: moving towards visual standards", *ASTM STP 1355*, USA, June 1999, pp 52-76
- Ausset, P , J.L. Crovisier, M Del Monte, V. Furlan, F. Girardet, C Hammecker, D. Jeannette and R.A. Lefèvre, "Experimental study of limestone and sandstone sulphation in polluted realistic conditions the Lausanne Atmospheric Simulation Chamber (LASC)", *Atmospheric Environment*, Vol 30, No 18, 1996, pp 3197-3207
- Ausset, P., M Del Monte and R.A. Lefèvre, "Embryonic sulphated black crusts on carbonate rocks in atmospheric simulation chamber and in the field: role of carbonaceous fly-ash", *Atmospheric Environment*, Volume 33, 1999, pp 1525-1534
- Ávalos Gómez, E , "Manteca animal como impermeabilizante en morteros antiguos de albañilería", Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2002, pp 19-24
- Baedecker, P.A., M.M. Reddy, K.J. Reimann and C.A. Sciammarella, "Effects of acidic deposition on the erosion of carbonate stone. Experimental results from the U.S. national acid precipitation assessment program (NAPAP)", *Atmospheric Environment*, Volume 26-B, 1992, pp 147-158
- Baez, A.P., R. D Belmont and H.G. Padilla, "Chemical Composition of Precipitation at Two Sampling Sites in Mexico: a 7-year Study", *Atmospheric Environment*, Volume 31, Number 6, 1997, pp 915-925
- Barba, L., J.L. Córdova, K.F. Link and A. Ortiz, "New Studies in the Building Materials of Teotihuacan, Mexico", *Materials Research Society Symposium Proceedings*, Volume 352, 1995, pp 491-496
- Beloyannis, N and E. Mirtsou "The Arch of Galerius in Salonica. Problems created by pollution, methodology of intervention, works of conservation". *The Science of the Total Environment*, Volume 167, 1995, pp 181-184
- Best, Myron G., *Igneous and Metamorphic Petrology*, Chapter 2: Petrography and Composition of Magmatic Rocks, USA, 1981, 42-43
- Bishop, G.A, Stedman, D.H, de la Garza, J. and Davalos, F.J "On-Road Remote Sensing of Vehicle Emissions in Mexico", *Environmental Science and Technology*, Volume 31, 1997, pp 3505-3510
- Bonavetti, V , H. Donza, V. Rahhal and E Irassar, "Influence of initial curing on the properties of concrete containing limestone blended cement", *Cement and Concrete Research*, Volume 30, Number 5, May 2000, pp703-708
- Boyer, D. W., "Masonry Cleaning – The State of the Art", *Cleaning Stone and Masonry*, ASTM Special Technical Publication 935, 1986, pp. 25-51
- Bravo Hollis, H y H. Sánchez Mejorada, "Las Catáceas de México", UNAM, 1991, pp 522-527

Bibliografía

- British Standard 1881: Part 202, 1986, Recommendations for Surface Hardness Tests by the Rebound Hammer, BSI, U K , 1986
- Bronski, M.B. and B.A. Gabby, "A comparison of principles in several architectural conservation standards", Architectural Conservation, ASTM STP 1355, USA, June 1999, pp 12-23
- Bunauer, S, y L.E. Copeland, "The Chemistry of concrete", Scientific American, Scientific American Incorporated, New York, 1964, pp20-25
- Callebaut, K, J. Elsen, K. Van Balen y W. Viaene, "Nineteenth century hydraulic restoration mortars in the Saint Michael's Church (Leuven, Belgium) Natural hydraulic lime or cement?", Cem & Con Research, Vol 31, No 3, 2001, pp 397-403
- Camacho Sánchez, C. S., "Caracterización de Morteros Antiguos de base orgánica Vegetal", Tesis de Licenciatura de la Facultad de Ingeniería Civil, UMNSH, 2001, pp 76-84
- Camuffo, D "Physical weathering of stones", The Science of the Total Environment, Volume 167, 1995, pp 1-14
- Caneva, G., E. Gori and T. Montefinale, "Biodeterioration of monuments in relation to climatic changes in Rome between 19-20th centuries", The Science of the Total Environment, Volume 167, 1995, pp 205-214
- Carbonell de Massy, M. "Conservación y Restauración de Monumentos", Editorial Vanguard Grafic, España, 1993, pp 18-48, pp45-51
- Carrol, S. A., O'Day, P. A. and Piechowski, M. "Rock-Water Interactions Controlling Zinc, Cadmium, and Lead Concentrations in Surface Waters and Sediments, U.S. Tri-State Mining District. 2. Geochemical Interpretation", Environmental Science and Technology, Volume 32, Number 7, 1998, pp 956-965
- Cas, R A F. and J.V. Wright, "Volcanic Successions, Modern and Ancient", Edit. Unwin-Hyman, London, Chapter 8, Ignimbrites and Ignimbrites Forming Eruptions, 1988, pp 233-266
- Cercasov, V, A. Pantelica, M. Sálágean and H. Schreiber, "Application of INAA and XRFA in a comparative environmental study", Journal of Radio-analytical and Nuclear Chemistry, Volume 204, 1996, pp 173-181
- Cercasov, V., A. Pantelica, M. Sálágean and H. Scheiber, "Comparative evaluation of some pollutants in the airborne particulate matter in eastern and Western Europe: Two-city study, Bucharest-Stuttgart" Environmental Pollution, Volume 108, 1998, pp 331-337
- Chang, R, Química, Sexta Edición, Editorial McGraw Hill, 1999, pp 708
- Chan, S.Y.N., N.Q. Feng and M.K.C. Tsang, "Mechanical Properties of high strength concrete incorporating carrier fluidifying agent", ACI Materials Journal, Volume 97, Number 2, March 2000, pp 108-114
- Charlson, R.J., S.E. Schwartz, J.M. Hales, R.D. Cess, J.A. Coakley Jr., J.E. Hansen and D.J. Hofman. "Climate forcing by anthropogenic aerosols" in Science, Volume 255, 1992, pp 423-430
- Charola, A. E. y F. M. A. Henriques, "Lime mortars: some considerations on testing standardization", The Use of and Need for Preservation Standards in Architectural Conservation, ASTM STP 1355, Lauren B. Sickels-Taves, Editor, June 1999, pp. 142-151
- Cheng, R.J. and R. Castillo, "A Study of Marble Deterioration at City Hall, Schenectady, New York", Journal of the Air Pollution Control Association, Volume 34, Number 1, 1984, pp 15-19
- Chotard, T., N. Gimet-Breat, A. Smith, D. Fargeot, J.P. Bonnet and C. Gault, "Application of ultrasonic testing to describe the hydration of calcium aluminate cement at the early age", Cement and Concrete Research, Volume 31, Number 3, March 2001, pp 405-412
- Chung, N. and Alexander, M, "Differences in Sequestration and Bioavailability of Organic Compounds Aged in Dissimilar Soils", Environmental Science and Technology, Volume 32, Number 7, 1998, pp 855-860
- Clifton, J. R. and McClure Godette, "Performance Tests for Graffiti Removers", Cleaning Stone and Masonry, ASTM Special Technical Publication 935, 1986, pp. 14-24

Cobourn, W.G., K.L. Gauri, S. Tamblir, S. Li and E. Saltik, "Laboratory measurements of sulfur dioxide deposition velocity on marble and dolomite stone surfaces", *Atmospheric Environment*, Volume 2, 1993, pp 193-201

Colin, J.L., J.L. Jaffrezo and J.M. Gros. "Solubility of major species in precipitation: factors of variation", *Atmospheric Environment*, Volume 24-A, 1990, pp 537-544

Colloque International Alteration et Protection des Monuments en Pierre Methods experimentales. Essais Recommandés pour mesurer l'altération des pierres et évalúes l'efficacité des methods de truittent. UNESCO-Rilem, Volume 5, Paris, France June 5-9, 1978

Cooke, R.U. and G.B. Gibbs "Crumbling Heritage? Studies of stone weathering in polluted atmospheres", *Atmospheric Environment*, Volume 28, Number 7, 1994, pp 1355-1356

Coursimault, A., Donati, J. and Viellard, H. "La pollution Automobile due aux hydrocarbures aromatiques monocycliques á Paris", *The Science of the Total Environment*, Number 1-3, Volume 169, 1995, pp 17-23

Cowel, D. and Apsimon, H. "Estimating the Cost of Damage to Buildings by Acidifying Atmospheric Pollution in Europe", *Atmospheric Environment*, Volume 30, Number 17, 1996, pp 2959-2968

De Pablo Galán, Liberto, Instituto de Geología de la UNAM, Comunicación Personal, 2002

Del Monte, M., C. Sabbioni and O. Vittori, "Urban stone sulphation and oil-fired carbonations particles", *Science of the Total Environment*, Volume 36, 1984, pp 369-376

Diario Oficial de la Federación. NOM-CCAT-004-ECOL/1993. Octubre 22, 1993

Dolske, D. A. "Deposition of atmospheric pollutants to monuments, statues, and buildings", *The Science of the Total Environment*, Volume 167, 1995, pp 15-31

Duffy, A.P., T.P. Copper and S.H. Perry. "Repointing mortars for conservation on a historic stone building in Trinity College, Dublin", *Material Structure*, Volume 26, 1993, pp 302-306

Erdogdu, S., "Compatibility of superplasticizers with cements different in composition", *Cement and Concrete Research*, Volume 30, Number 5, March 2000, pp 767-773

Enciclopedia Encarta®, Microsoft®, Morteros, 2001

Fassima, V., "A survey of air pollution and deterioration of stonework in Venice", *Atmospheric Environment*, Volume 12, 1978, pp 2205-2211

Felden, Bernard M., *Conservation of Historic Buildings*. Butterworth Architecture, Butterworth-Heinemann LTD, 1982, Chapter 7, 91-116

Ferrari, L., M. López-Martínez and G. Aguirre-Díaz, "Space-time patterns of Cenozoic arc volcanism in central México: from the Sierra Madre Occidental to the Mexican Volcanic Belt", *Geology*, Volume 27, Number 4, April 1999, pp 303-306

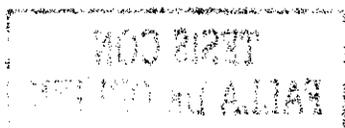
Fontaine, L., M. Thompson and G. T. Suter, "Practice and Research: The Need of Standards for Historic Mortars", *The Use of and Need for Preservation Standards in Architectural Conservation*, ASTM STP 1355, Lauren B. Sickels-Taves, Editor, June 1999, pp 158-174

García Rodríguez, L. "Morteros de Albañilería para Restauración, de base orgánica animal", Tesis de Licenciatura de la Facultad de Ingeniería Civil, UMNSH, 2001, pp 112-117

García Ávila, S. "Morteros antiguos de albañilería para restauración, reforzados con fibra vegetal", Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2002, pp 35-42

Genescá, Joan, Comunicación Personal, Fac. Química, UNAM, 2002.

Goldstein, S. J., Slemmons, A. K. and Canavan, H. E. "Energy-Dispersive X-ray Fluorescence Methods for Environmental Characterization of Soils", *Env. Science and Technology*, Vol 30, No 7, 1996, 2318-2321



- Griffiths, R.F. and Roberts, I.D., "Droplet evaporation from porous surfaces; model validation from field and wind tunnel experiments for sand and concrete", *Atmospheric Environment*, Pergamon; Vol 33, 1999, 3531-3549
- Hamilton, R.S., Revitt, D.M., Vincent, K.J. and Butlin, R.N. "Sulphur and nitrogen particulate pollutant deposition on to building surfaces", *The Science of the Total Environment*, Volume 167, 1995, pp 57-66
- Haneef, S.J., J.B. Johnson, C. Dickinson, G.E. Thompson and G.C. Wood, "Effect of dry deposition of NO_x and SO₂ gaseous pollutants on the degradation of calcareous building stones", *Atm Env Vol 16*, 1992, pp 2963-2974
- Haneef, J.S., S.M. Jones, B.J. Johnson, E.G. Thompson and C.G. Wood, "Effects of air pollution on historic buildings and monuments (1986-1990). Scientific basis for conservation: laboratory chamber studies", *European Cultural Heritage*, Volume 7, Number 1-4, 1993, pp 2-10
- Harutyunyan, V.S., E.S. Abovyan, P.J.M. Monteiro, V.P. Mkrtychyan and M.K. Balyan, "Microstrain distribution in calcium hydroxide present in the interfacial transition zone", *Cement and Concrete Research*, Volume 30, Number 5, March 2000, pp 709-713
- http://sma.gob.mx/sima/dgpc/d_juridica/destilados/aire/especificaciones_combustibles/esp_com_086.pdf
- <http://elmundomotor.com/elmundomotor/2001/05/11/usuarios/989598145.html>
- http://www.unam.mx/serv_hem/nacional/1997/feb97/03feb97/03ec263.html
- Ibarra Bustos, L.B., "Estudio comparativo de morteros con aditivos vegetales y animales", Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2002, pp 25-32
- Indoor Pollution News; July 25, 1994, pp 99
- Jacobs, P., E. Sevens and M. Kunnen, "Principles of computerized X-ray tomography and applications to buildings materials", *The Science of the Total Environment*, Volume 167, 1995, pp 161-170
- Jauregui, E. "Heat island Development in Mexico City", *Atmospheric Environment*, Volume 32, Number 22, 1997, pp 3821-3831
- Juárez Badillo, E. y Rico Rodríguez, A., *Mecánica de Suelos I, Fundamentos de la Mecánica de Suelos*, Editorial Limusa, México, Tercera Edición, Séptima Reimpresión, 1981, pp. 34-49
- Jones, L.D., "Criteria for Selection of a Most Appropriate Cleaning Method", *Cleaning Stone and Masonry*, ASTM Special Technical Publication 935, 1986, pp. 52-70
- Kay, G.N., "Suggested Standards for Glass-Fiber Optics Functional Architectural Lighting in Historic Buildings and Sites", *Architectural Conservation*, ASTM STP 1355, USA, June 1999, pp 33-51
- Kirkitsos, P. and D. Sikiotis. "Deterioration of Pentelic Marble, Portland limestone and Baumberger sandstone in Laboratory exposures to NO₂; a comparison with exposures to gaseous HNO₃", *Atmospheric Environment* Volume 30, Number 6, 1996, pp 941-950
- Kirstein, L.A., C.J. Hawkesworth and F.G. Garland, "Felsic lava or rheomorphic ignimbrites: Is there a chemical distinction?", *Contributions to Mineralogy and Petrology*, Volume 142, Number 3, December 2001, pp 309-322
- Kohyama et al, "Observation of the hydrated form of tubular halloysite by an electron microscope equipped with an environmental cell", *Journal of Clay and Clay Minerals*, Volume 26, 1978, pp 25-40
- Kono, Y. And Y. Osima, "Numerical experiments on the welding processes in pyroclastic flow deposits", *Bulletin of the Volcanic Society*, Jpn 16, 1971, pp 1-14
- Kosmatka, Steven H. y William C. Panarese, *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*, Editorial Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto, A.C., 13 reimpresión, ISBN 968-464-074-9, México, 1992, pp 22-23
- Kurtis, K.E., P.J.M. Monteiro and S.M. Madanat, "Empirical Models to predict concrete expansion caused by sulfate attack", *ACI Materials Journal*, Volume 97, Number 2, March 2000, pp 156-161

- Laefer, D.F., "Geotechnical procedures for at-risk and in-distress structures", Architectural Conservation, ASTM STP 1355, USA, June 1999, pp 211-215
- Lajtai, E.Z., R.H. Schmidtke and L.P. Bielus. "The effect of water on the time-dependent deformation and fracture of a granite", Journal of Rock Mechanics Mineral Science, Volume 24, Number 4, 1987, pp 247-255
- Lal Gauri, K and G.C. Holdren, Jr, "Pollutant effects on stone monuments", Environmental Science and Technology, Volume 15, Number 4, 1981, pp386-390
- Lal Gauri, K. and W. C. Vaughan, "Cleaning Efflorescences from Masonry", Cleaning Stone and Masonry, ASTM Special Technical Publication 935, 1986, pp 3-13
- Lammel, G. and Metzsig, G "Pollutant Fluxes onto the Facades of a Historical Monument", Atmospheric Environment, Volume 31, No 15, 1997, pp 2249-2259
- Lareau, T.J., Horst, R.L., Manuel, E.H. and Lipfert, F.W. In Materials Degradation Caused by Acid rain; Baboian, R., Ed.; ACS Symposium Series 318; American Chemical Society; Washington, D C , 1986, pp 397-410
- Lazzarinni, L., J.F. Asmus et M.L. Marchesini, "Lasers for the cleaning of statuary: initial results and potentialities", 1er Colloque International sur la deterioration des Pierres en oeuvre, International RILEM UNESCO Congress, Volume 2, Prevention and Treatment, La Rochelle, Paris, France, 1978, pp 89-94
- Lee, Y.N. and E.S. Schwartz, "Evaluation of the rate of uptake of NO₂ by atmospheric and surface liquid water", Journal of Geophysics Research, Volume 86, Number 11, 1981, pp 971
- Leet, D. L., y S. Judson. "Fundamentos de Geología Física", Editorial Limusa, Decimonovena Reimpresión, 2000, pp 55-84
- Lefohn, A.S., J.D. Husar and R.B. Husar "Estimating historical anthropogenic global sulfur emissions patterns for the period 1850-1990", Atmospheric Environment, Volume 33, 1999, pp 3435-3444
- Légeron, F., and P. Paultre, "Prediction of Modulus of Rupture of Concrete", ACI Materials Journal, Volume 97, Number 2, March 2000, pp 193-200
- Legros, F., R.S.J. Sparks, S.R. Tait and Y. Yanev, "Discussion on dense welding caused by volatile resorption", Journal of the Geological Society, Volume 157, Number 4, July 2000, pp 893-895
- Leith, S.D., Reddy, M.M., Ramirez, W.F. and Heymans, M.J. "Limestone characterization to Model Damage from Acidic Precipitation: Effect of Pore Structure on Mass Transfer". Environmental Science and Technology. Volume 30, 1996, pp 2201-2210
- Leuzzi, G. and Monti, P., "Particle trajectory simulation of Dispersion Around a Building", Atmospheric Environment, Volume 32, Number 2, 1998, 203-214
- Leysen, L., Roekens, E. and Van Grieken, R., "Air-pollution-induced chemical decay of a sandy-limestone cathedral in Belgium" The Science of the Total Environment, Volume 78, 1989, pp 263-287
- Lothenbach, B., Furrer, G. and Schulín, R. "Immobilization of Heavy Metals by Polynuclear Aluminium and Montmorillonite Compounds", Environmental Science and Technology, Volume 31, Number 5, 1997, pp 1452-1462
- Magaloni, D., R. Pancella, Y. Fruth, J. Cañetas y V. Castaño, "Studies on the Mayan Mortars Technique", Materials Research Society, Symposium Proceedings Volume 352, 1995, pp 483-489
- Manual de Tecnología del Concreto, Comisión Federal de Electricidad, Editorial Limusa, Volúmenes I y II, 1994
- Márquez, M., "Efecto de proteína, clara de huevo, en las propiedades mecánicas de morteros de cal para albañilería", Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2002, pp 25-32
- Marshall, P., "Acid rocks of the Taupo-Rotorua volcanic district", Trans. R. Soc., N.Z. 64, 1935, pp 323-366

- Martínez Gómez, L. "Acero", Coedición de la Secretaría de Educación Pública, Fondo de Cultura Económica y Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, 1989, pp 14-32
- Martínez Molina, W., E. Alonso, L. Villaseñor y L. Martínez Gómez, "Efecto del agregado fino en la elaboración de concreto hidráulico", Ciencia Nicolaita, CIC-UMSNH, Morelia, Mich, 2001, Vol 26 ISBN 0188-9176, pp 119-126
- Mathur, R., J. O. Young, K. L. Schere and G. L. Gipson, "A comparison of numerical techniques for solutions of atmospheric kinetic equations", Atmospheric Environment, Volume 32, Number 9, 1998, pp 1535-1553
- Meli Piralla, R., "Ingeniería Estructural de los Edificios Históricos", Editado por Fundación ICA, 1998, pp 25-28
- Miranda, Ángel, La Evolución del Hombre, Editorial Herrero, México, 1972, pp 15-17
- Mokhtarzadeh, A. And C. French, "Mechanical properties of high-strength concrete with consideration for pre-cast applications", ACI Materials Journal, Volume 97, Number 2, March 2000, pp 136-147
- Monahan, E.C., "The Ocean as source for atmospheric particles" In the Role of Air-Sea Exchange in Geochemical Cycling. NATO ASI Series C: Mathematical and Physical Sciences, Volume 185, Editorial P. Buat-Menard, 1986, pp 129-155 D. Reidel, Dordrecht
- Moropoulou, A., K. Bisbikou, K. Torfs, R. van Grieken, F. Zezza and F. Macri, "Origin and growth of Weathering crusts on Ancient Marbles in Industrial Atmosphere", Atmospheric Environment, Vol 32, No 6, 1998, pp 967-982
- Mortero, cómo especificar y utilizar mortero para mampostería, Ed. The Aberdeen Group, IMCYC, 1994, pp 7-15
- Natesaiyer, K. And K.C. Hover, "In situ Identification of Alkali-Silica Reaction Products in Concrete", Cement and Concrete Research, Volume 18, 1988, pp 455-463
- Neville, S. Adam, Tecnología del Concreto, Tomo I, Tercera Edición, Editorial del Instituto Mexicano del Cemento y el Concreto, ISBN 968-464-079-X, Capítulo 3, 1992, pp163-266
- Newby, P. T., Mansfield, T.A. and Hamilton, R.S., "The sources and economic implications of building soiling in urban areas", The Science of the Total Environment, Volume 100, 1991, pp 347-366
- Nordstrom, D.K. Acid Sulfate Weathering, Soil Science Society of America; Madison, WI, 1982, pp 37-63
- Norma Mexicana NMX-C-414-OMNCCE-1999, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y la Edificación, Aclaración a la Norma publicada el 6 Julio 1999 en el Diario Oficial de la Federación, México, pp 7-20
- Norma Oficial Mexicana, 038, Relativa a la Calidad del Aire, 1993
- O'Brien, P.F., E. Bell, S. Pavia Santamaria, P. Boyland and T.P. Cooper, "Role of mortars in the decay of granite", The Science of the Total Environment Volume 167, 1995-a, pp 103-110
- O'Brien, P.F., E. Bell, T.L.L. Orr and T.P. Cooper. "Stone loss rates at sites around Europe", The Science of the Total Environment, Volume 167, 1995-b, pp 111-121
- Ochoa Manzo, E., "Estudio comparativo de morteros antiguos de base láctea", Tesis de Licenciatura de la Facultad de Ingeniería Civil, UMSNH, 2001, pp 3-50
- Parungo, F., C. Nagamoto, S. Hoyt and H.A. Bravo. "The investigation of air quality and acid rain over the Gulf of Mexico", Atmospheric Environment, Volume 24-A, 1990, pp 109-123
- Perez-Rodriguez, J.L., C. Maqueda, A. Justo, E. Morillo and M.C. Jimenez de Haro, "Characterization of decayed ceramic sculptures decorating the Pardon portico of Seville Cathedral, Spain", Applied Clay Science, Volume 9, 1994, pp 211-223
- Perez-Rodriguez, J.L., C. Maqueda, M.C. Jimenez de Haro and P. Rodriguez-Rubio, "Effect of Pollution on Polychromed Ceramic Statues", Atmospheric Environment, Volume 32, number 6, 1998, pp 993-998

- Persson, B , "Correlating laboratory and field tests of creep in high-performance concrete", *Cement and Concrete Research*, Volume 31, Number 3, March 2001, pp 389-395
- Petuskey, W.T , D A Richardson and D. A. Dolske. "Aspects of the deterioration of sandstone masonry in Anasazi dwelling ruins at Mesa Verde National Park, Colorado, USA". *The Science of the Total Environment*, Volume 167, 1995, pp 145-149
- Peyton, R.L., B.A. Haeffner, S.H. Anderson and C.J. Gantzer. Applying X-ray CT to measure macropore diameters in undisturbed soil cores A.R. Helmut and L.D. Norton, Editors, *Digitization, processing and Quantitative Interpretation of Image Analysis in Soil science and Related Areas*, *Geoderma*, Volume 53, 1992, pp 329-340
- Pie, K , "Aeolian dust and dusts deposits" Academic Press, London, 1987
- Plante, M , G. Cameron and A. Tagnit-Hamou, "Influence of curing conditions on concrete specimens at construction site", *ACI Materials Journals*, Volume 97, Number 2, March 2000, pp 120-126
- Pleyers, G and H.R. Sasse, "Non-destructive determination of the penetration depth of impregnation materials", *Architectural Conservation*, ASTM STP 1355, USA, June 1999, pp 90-101
- Ponce de León, J G , "Morteros de base láctea para restauración", Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2002, pp 22-40
- Pope, R.K., R.I. Ray and B J. Little, "Analysis of Hydrated Biological Specimens in the TEM: Pseudomonas Attachment to Corroding Iron", *The Americas Microscopy and Analysis*, Volume 43, July 2000, pp 15-17
- Poruthoor, S.K., Dasgupta, P.K and Genfa, Z. "Indoor Air Pollution and Sick Building Syndrome: Monitoring Aerosol Protein as a Measure of Bioaerosols", *Env Science and Tech*, Vol 32, No 8, 1998, pp 1147-1152
- Qasrawi, H. Y., "Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted", *Cement and Concrete Research*, Volume 30, April 2000, 739-746
- Ramírez Romero, E., "Zonas históricas de Morelia y Pátzcuaro ante el T L C.", Instituto Michoacano de Cultura del Gobierno del Estado y UMNSH, 1994, pp. 107-140
- Realini, M., Negrotti, R., Appollonia, L and Vaudan, D. "Deposition of particulate matter on stone surfaces; an experimental verification of its effects on Carrara marble", *The Science of the Total Environment*, Volume 167, 1995, pp 67-72
- Reardon, E. J. and Della Valle, S "Anion Sequestering by the Formation of Anionic Clays: Lime Treatment of Fly Ash Slurries", *Environmental Science and Technology*, Volume 31, No. 4, 1997, 1218-1223
- Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal, Arnal Simón, L. y Betancourt Suárez, M. Editorial Trillas, 2ª Reimpresión 1996, pp. 653-655
- Reglamento de Construcciones para el Estado de Michoacán, Colegio de Ingenieros Civiles, Artículo 249 y 253, Mampostería Natural, 1999, pp 135-143
- Riehle, J.R., "Calculated compaction profiles of rhyolitic ash-flow tuffs", *Geological Society American Bulletin*, Vol. 84, 1973, pp 2193-2216
- Riley, W.J , Robinson, A.L., Gadgil, A J. and Nazaroff, W W. "Effects of variable wind speed and direction on random transport from soil into buildings: model development and exploratory results", *Atmospheric Environment*, Volume 33, 1998, 2157-2168
- Rimstidt, J. D , Chermak, J.A and Gagen, P. M., *Environmental Geochemistry of Sulfide Oxidation*; Alpers, C.N., Blowes, D W , Eds , American Chemical Society; Washington, DC, 1994, pp 2-13
- Rivera Gutiérrez, E , "Morteros de albañilería para restauración, como aditivo miel de abeja", Tesis de Licenciatura en Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, 2002, pp 19-24

- Robert, M., V. Verges-Belmin, A.M Jaunet, M. Hevio and P.H Bromblet. "Mise en évidence de deux microsystemes d'altération (chimique et physique) dans les monuments en granite (Bretagne)", J. Delgado Rodriguez, F. Henriquez and F. Telmo Jeremias editors, Proceedings of the 7th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisbon, 1992, pp 129-138
- Rodríguez, Manuel, Ing , Comunicación Personal, Miembro del Consejo de la Ciudad del Centro Histórico y del Patronato Pro Rescate del Centro Histórico, Morelia, Michoacán, Enero 2001
- Rodríguez Navarro, C and E Sebastian, "Role of particulate matter from vehicle exhaust on porous building stones (limestone) sulfation", Science of the Total Environment, Volume 187, 1995, pp 79-91
- Rubio, J.C., E. Alonso, M.E. Contreras and L. Martinez Gomez. Electron microscopy in cement mortars elaborated with volcanic sand from Morelia, Michoacan, Mexico. International Conference on Electron Microscopy ICEM 14, Cancun, Mexico, August 31 to September 4th, 1998. Symposium Z, Vol. II
- Sabbioni, C. "Contribution of atmospheric deposition to the formation of damage layers", Science of the Total Environment, Volume 167, 1995, pp 49-55
- Sabbioni, C., Zappia, G., Ghenidi, N., Gobbi, G. and Favioni, O "Black crusts on ancient mortars", Atmospheric Environment, Volume 32, Number 2, 1998, pp 215-233
- Saiz-Jimenez, C. "Deposition of airborne organic pollutants on historic buildings", Atmospheric Environment, Volume 27-B, 1993, pp 77-85
- Saiz-Jimenez, C. "Deposition of anthropogenic compounds on monuments and their effect on airborne microorganisms" Aerobiologia No. 11, 1995, pp 161-17
- Salmon, L G., Christoforou, C. S., Gerk, T. J., Cass, G. R., Casuccio, G S., Cooke, G. A., Leger, M and Olmez, I. "Source contributions to airborne particle deposition at the Yungang Grottoes, China", The Science of the Total Environment, Volume 165, 1995, pp 33-47
- Saylor, R.D., K.M Butt and L.K. Peters, "Chemical characterization of precipitation from a monitoring network in the lower Ohio River Valley" Atmospheric Environment, Volume 26-A, 1992, pp 1147-1156
- Shao, J.F. "Poroelastic behaviour of brittle rock materials with anisotropic damage", Mechanics of Materials, Volume 30, 1998, pp 41-53
- Sherwood, S. I., "Balk and Caulk- Guidelines for repair of Joints in Historic Stone", The Use of and Need for Preservation Standards in Architectural Conservation, ASTM STP 1355, Lauren B Sickels-Taves, Editor, June 1999, pp. 128-141
- Schiavon, N , G. Chiaviari, G. Schiavon and D. Fabbri, "Nature and decay effects of urban soiling on granitic building stones", The Science of the Total Environment, Volume 167, 1995, pp 87-101
- Schiavon, N. and L. Zhou "Magnetic, Chemical, and Microscopical Characterization of Urban Soiling on Historical Monuments", Environmental Science and Technology, Volume 30, No. 12, 1996, pp 3624-3629
- Schifter, Issac y López Salinas, Esteban, Usos y abusos de las gasolinas, La Ciencia para Todos, Edición conjunta SEP, CONACYT y FCE, 1998
- Schifter, Issac, Comunicación Personal, IPM, 2000
- Schlink, U, O. Herbarth and G. Tetzlaff. "A component time-series models for SO2 data: forecasting, interpretation and modification", Atmospheric Environment, Volume 31, Number 9, 1997, pp 1285-1295
- Sherwood, S.I., "Balk and Caulk-Guidelines for repair of joints in historic stone", Architectural Conservation, ASTM STP 1355, USA, June 1999, pp 128-141
- Sickels, L.B., "Organics versus Synthetics: their uses as Additives in Mortars", Symposium in Mortars, Cements and Grouts used in the Conservation of Historic Buildings, Roma, 1981

- Sickels-Taves, L. B., The Use of and Need for Preservation Standards in Architectural Conservation, ASTM STP 1355, Lauren B Sickels-Taves, Editor and Architectural Conservator, Henry Ford Museum, June 1999
- Silva Ruelas, L. "Los Materiales de Construcción de la Antigua Valladolid", Secretaría de Comunicaciones y Obras Públicas del Gobierno del Estado de Michoacán, 1990, pp. 63
- Silva Mandujano, G., "La Catedral de Morelia, Arte y Sociedad de la Nueva España", Estudios Monográficos, 1984, Coedición UMSNH-Gob. Mich-Instituto Michoacano de Cultura, pp 49-74
- Skoulikidis, T.N 2nd Course: Stone Material in Monuments: Diagnosis and Conservation: Zezza, F., Edit ; Arti Grafiche Pugliesi: Bari, Italy, 1993, pp 139-154
- Smith, R.L., "Ash Flows", Geological Society American Bulletin, Volume 71, 1960a, pp 795-842
- Smith, R.L., Zones and zonal variations in welded ash-flows", US Geol. Surv Prof. Pap., Number 354-F, 1960b, pp. 149-159
- Solebello, L "Polarized Light Microscopy in the Industrial Minerals Laboratory" in the Americas Microscopy and Analysis, Volume 38, 1999, pp 9-10
- Sparks, R.S.J. "Grain Size Variations in ignimbrites and implications for the transport of pyroclastic flows", Sedimentology Volume 23, 1976, pp 147-188
- Sparks, R S J. and L. Wilson, "A model for the formation of ignimbrite by gravitational column collapse", Journal Geol. Soc London, Volume 132, 1976, pp. 441-452
- Spiker, E. C., Comer, V. J., Hosker Jr, R. P. and Sherwood, S.I. Dry deposition of SO₂ on limestone and marble: the role of humidity. Proceedings 7th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone, Lisbon, Portugal, 1992, pp 397-406
- Spiker, E.C., R.P. Hosker, V J. Comer, J.R. White, R.W. Were Jr., F.L. Harmon, G D. Gandy and S.I. Sherwood, "Environmental chamber for study of the depositions flux of gaseous pollutants to material surface", Atmospheric Environment, Volume 16, 1992, pp 2885-2892
- Sweevers, H., Peeters, A. and Van Grieken, R. "Weathering of Leinster granite under ambient atmospheric conditions", The Science of the Total Environment, Volume 167, 1995, pp 73-85
- Tavera Alfaro, X. "Morelia, Patrimonio de la Humanidad", Capítulo I, Coedición Universidad Michoacana, Gobierno del Estado de Michoacán y Ayuntamiento de Morelia, 1995, pp. 11-25
- Tavera Montiel, F. "La Antigua Valladolid, hoy Morelia", Coedición Fac. Ing. Civil y UMSNH, ISBN 970-9056-72-7, 1999, pp. 133-140
- Tenorio Castelleros, D., "Limpieza de Monumentos de Piedra con Rayo Láser", Seminario de Conservación y Restauración de Bienes Culturales de Piedra utilizando Técnicas Convencionales y Rayo Láser, Sala Sahagún, Museo Nacional de Antropología e Historia, México, D.F., 1997
- Thompson, M and C Groot, "RILEM TC Characterization of Old Mortars with Respect to Their Repair", The Use of and Need for Preservation Standards in Architectural Conservation, ASTM STP 1355, Lauren B Sickels-Taves, Editor, June 1999, pp. 152-157
- Tigue, D.B and K R. Hoigard, "Restoration of a Vintage Limestone Portico with Architectural Pre-cast Concrete, Project Case Study Journal, January-February 2000, pp. 88-91
- Torfs, K and Van Grieken, R. "Chemical relations between atmospheric aerosols, deposition and stone decay layers on historic buildings at the Mediterranean coast" *Atm Env*, Vol 31, No 15, 1997, pp 2179-2192
- Torfs, K M., Van Grieken, R.E. and Buzek, F "Use of Stable Isotope Measurements to Evaluate the origin of Sulfur in Gypsum Layers on Limestone Buildings". *Env Science and Tech*, Vol 31, No 9, 1997, pp 2650-2655
- Torraca, G. "Porous Building Materials", ICCROM, Rome, Italy, 1981, pp 55-70

- Turpin, B J. and Huntzicker, J J "Identification of secondary organic aerosol episodes and quantitation of primary and secondary organic aerosol concentrations during SCAQS", *Atm Env*, No. 29, 1995, pp 3527-3544
- Valdés Vázquez, J , Comunicación Personal e Informe 018 de Calidad del Aire de Morelia, Michoacán, México, Empresa Grupo Eréndira de Proyectos Industriales, S.A. de C.V , 2001, pp 177
- Van Balen, K.E.P, S. Ercan and T.C. Patricio, "Compatibility and retreatability versus reversibility; a case of study at the late Hellenistic nymphaeum of sagalassos (Turkey)", *Architectural Conservation*, ASTM STP 1355, USA, June 1999, pp 105-118
- Van Borm, W., y F. Adams, "Source apportionment of air particulate matter in Antwerp, Belgium", *Journal of the Aerosol Science*, Volume 6, 1987, pp 593-596
- Van Borm, W , and F Adams, "Characterization of individual particles in the Antwerp aerosol", *Atmospheric Environmental Science*, Volume 23, Number 5, 1989, pp 1139-1151
- Villegas, M , X. Vázquez, D Ríos, L. Baños y D Magaloni, "Relative Dating of the Stucco Relieves at Palenque, Chiapas, Based on Variation in Material Preparation", *Mat Res Soc, Sym Proc*, Vol 352, 1995, pp 469-481
- Vitrubio Polión, Marco Lucio, *Los Diez Libros de Arquitectura*, Alianza Editorial, España, Segunda Reimpresión 2000, Libro Segundo pp 105-113, Libro Séptimo pp 265-273
- Wadleigh, M A and Blake, D M , "Tracing sources of atmospheric sulfur using epiphytic lichens", *Environmental Pollution*, Number 106, 1999, pp. 265-271
- Wiley, J. & Sons, *Enciclopedia de Tecnología Química*, Editorial Limusa, 1998, pp 270-272
- Willis, V.L., S D. Schiff, D.V. Rosowsky and J K. Nelson, "Lessons learned from the structural Retrofit of a Historic Charleston House", *Architectural Conservation*, ASTM STP 1355, USA, June 1999, pp 175-188
- Wilson, L., "Explosive volcanic eruptions –III Plinian eruption columns", *Geophys Journal Research Astr. Society*, Volume 45, 1976, pp. 543-556
- Winkler, E.M , "A durability index for stone", *Proceedings of the 5th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone*. Lausanne, Switerland, 1985
- Xu, S., Lehmann, R.G., Miller, J.R. and Chandra, G , "Degradation of Polydimethylsiloxanes (Silicones) as Influenced by Clay Minerals", *Env Science and Tech*, Am Chem Soc, Vol 32, No 9, 1998, pp 1199-1206
- Yocom, J.E., "Air pollution damage to buildings on the Acropolis", *Journal of the Air Pollution Control Association*, Volume 29, Number 4, 1979, pp 333-338
- Zappia, G., Sabbioni, C and Gobbi, G. "Non-carbonate carbon content on black and white areas of damaged stones monuments" *Atmospherical Environment*, Volume 27, 1993, pp 1117-1122
- Zappia, G., Sabbioni, C., Pauri, M.G. and Gobbi, G., "Mortar damage due to the airborne sulfur compounds in simulation chamber", *Material Structure*, No. 27, 1994, pp 469-473
- Zeza, F. and F. Macrí, "Marine Aerosol and Stone Decay", *The Science of the Total Environment*, Volume 167, 1995, pp 123-143
- Zhang, X., and J. Han, "The effect of ultra-fine admixture on the rheological property of cement past", *Cement and Concrete Research*, Volume 30, Number 5, March 2000, pp 827-830

