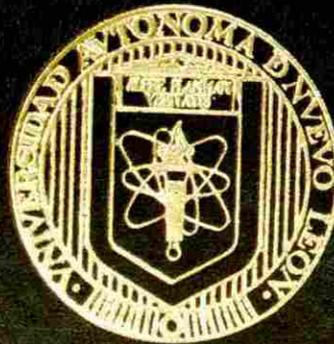


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL



**EFFECTOS DEL DIOXIDO DE CARBONO EN LOS
MORTEROS DE CEMENTO HIDRAULICO
CON CENIZA VOLANTE**

POR:

PEDRO LEOBARDO VALDEZ TAMEZ

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER
EL GRADO DE MAESTRIA EN CIENCIAS CON
ESPECIALIDAD EN INGENIERIA AMBIENTAL**

OCTUBRE DE 1998

TM

TA683

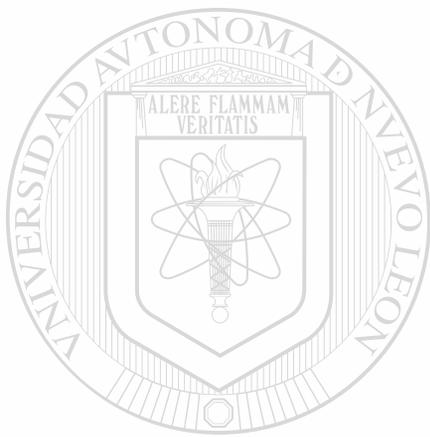
.2

V3

C.1



1080087077



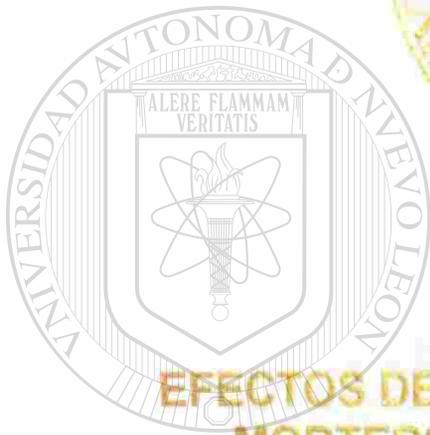
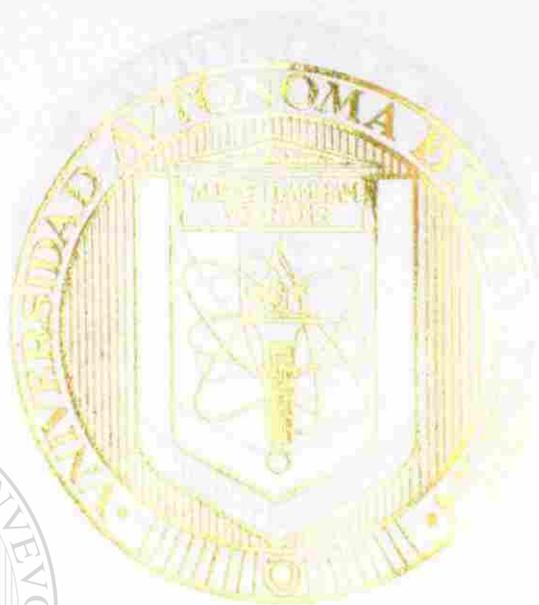
UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



UANL

EFFECTOS DEL DIOXIDO DE CARBONO EN LOS
MORTEROS DE CEMENTO
CON CENIZA VOLCANICA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



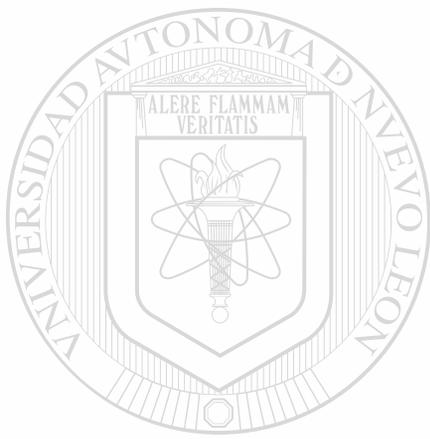
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS
POR

PEDRO LEOBARDO VALDELLANO

Como requisito parcial para obtener el título de
MAESTRÍA EN CIENCIAS Exactas
Ingeniería Ambiental



Octubre de 1998



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

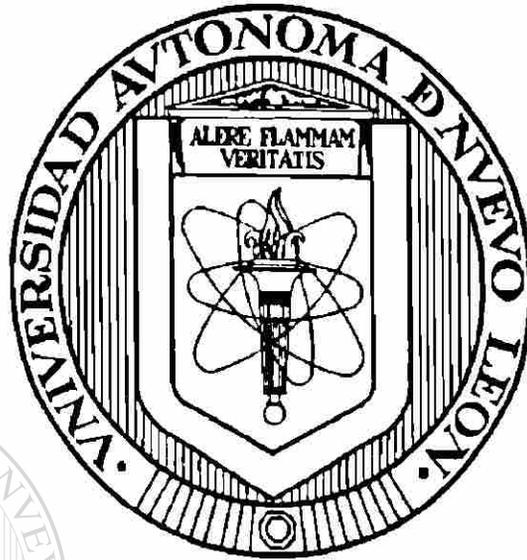
®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**EFFECTOS DEL DIÓXIDO DE CARBONO EN LOS
MORTEROS DE CEMENTO HIDRÁULICO
CON CENIZA VOLANTE**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

POR

PEDRO LEOBARDO VALDEZ TAMEZ

**Como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRÍA EN CIENCIAS con Especialidad en
Ingeniería Ambiental**

Octubre de 1998

DR. RICARDO GONZÁLEZ ALCORTA
SECRETARIO DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
Presente. -

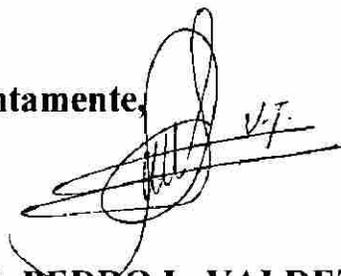
23 de octubre de 1998

Estimado Dr. González:

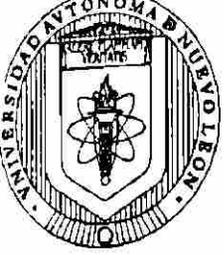
Sirva la presente para solicitar de la manera mas atenta, los trámites necesarios para sustentar mi examen de grado de Maestro en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Ambiental, ya que el pasado 19 de octubre termine mi trabajo de tesis titulado "Efectos del Dióxido de Carbono en los Morteros de Cemento Hidráulico con Ceniza Volante" el cual fue aprobado por mi asesor el Dr. Raymundo Rivera Villarreal y en los aspectos ortográfico, metodológico y estilístico por el Arq. Ramón Longoria Ramírez.

Sin más por el momento y agradeciendo de antemano sus atenciones, quedo de usted.

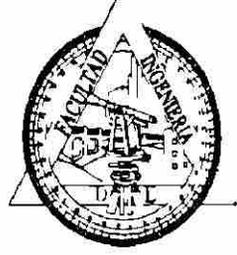
Atentamente,

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'P.L. Valdez Tamez', with a horizontal line drawn through it. To the right of the signature, the initials 'V.T.' are written.

ING. PEDRO L. VALDEZ TAMEZ



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
SECRETARIA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



EFFECTOS DEL DIÓXIDO DE CARBONO
EN LOS MORTEROS DE CEMENTO HIDRÁULICO
CON CENIZA VOLANTE

Aprobación de la Tesis:



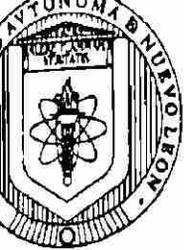
Asesor de la Tesis

Dr. Ing. Raymundo Rivera Villarreal

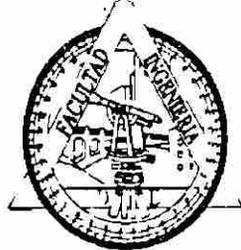
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Secretario de Estudios de Posgrado
Dr. Ricardo González Alcorta



UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
 FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL
 SECRETARIA DE ESTUDIOS DE POSTGRADO



COMPROBANTE DE CORRECCION

Tesista: PEDRO LEOBARDO VALDEZ TAMEZ

Tema de la tesis: EFFECTOS DEL DIÓXIDO DE CARBONO EN LOS MORTEROS DE CEMENTO HIDRÁULICO CON CENIZA VOLANTE.

Este documento certifica la corrección DEFINITIVA del trabajo de tesis arriba identificado, en los aspectos: ortográficos, metológico y estilístico.

Recomendaciones adicionales:

(NINGUNA)

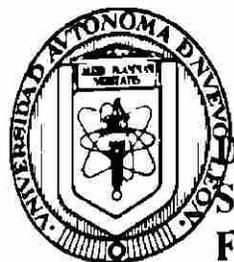
Nombre y firma de quien corrigió:

Ramón L. L. Ramírez
 Arq. Ramón L. L. Ramírez

El Secretario de Postgrado:

Ricardo
 Dr. Ricardo González Alcorta

Ciudad Universitaria, a 23 de octubre de 1998.



INSTITUTO DE INGENIERIA CIVIL

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL U.A.N.L.

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA DEL CONCRETO

DR. RICARDO GONZALEZ ALCORTA

SECRETARIO DE ESTUDIOS DE POSGRADO

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Presente. -

Estimado Dr. González:

Por medio de la presente, comunico a usted que el Ing. Pedro L. Valdez Tamez, quien es pasante de la Maestria en Ciencias con especialidad en Ingeniería Ambiental, ha terminado su tesis titulada "Efectos del Dióxido de Carbono en los Morteros de Cemento Hidráulico con Ceniza Volante", lo anterior de acuerdo a los lineamientos del Reglamento de Exámenes Profesionales de Nuestra Universidad. Favor de continuar con los tramites necesarios para que el Ing. Valdez realice su examen de grado, en el cual no tengo inconveniente en participar.

Sin más por el momento y agradeciendo de antemano sus atenciones, me es grato suscribirme de usted.

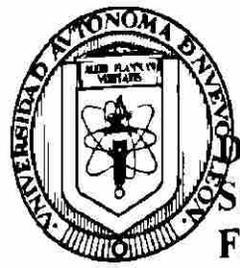
Atentamente,

"Alere Flammam Veritatis"

Ciudad Universitaria, a 19 de octubre de 1998

DR. ING. RAYMUNDO RIVERA VILLARREAL

Asesor de la Tesis



INSTITUTO DE INGENIERIA CIVIL

FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL U.A.N.L.

DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA DEL CONCRETO

DR. RICARDO GONZALEZ ALCORTA

SECRETARIO DE ESTUDIOS DE POSGRADO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

Presente. -

Estimado Dr. González:

Por medio de la presente, comunico a usted que el Ing. Pedro L. Valdez Tamez, quien es pasante de la Maestría en Ciencias con especialidad en Ingeniería Ambiental, ha terminado su tesis titulada "Efectos del Dióxido de Carbono en los Morteros de Cemento Hidráulico con Ceniza Volante", lo anterior de acuerdo a los lineamientos del Reglamento de Exámenes Profesionales de Nuestra Universidad. Favor de continuar con los tramites necesarios para que el Ing. Valdez realice su examen de grado, en el cual no tengo inconveniente en participar.

Sin más por el momento y agradeciendo de antemano sus atenciones, me es grato suscribirme de usted.

Atentamente,

"Alere Flammam Veritatis"

Ciudad Universitaria, a 19 de octubre de 1998

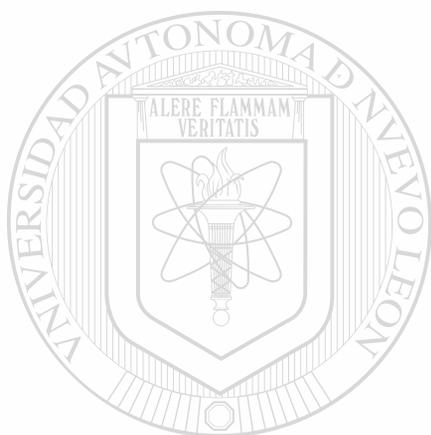
DR. ING. RAYMUNDO RIVERA VILLARREAL

Asesor de la Tesis

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento al Dr. Ing. Raymundo Rivera Villarreal, por haber invertido parte de su tiempo y conocimientos en la realización de la presente investigación, a la Secretaría Académica de la UANL, así como al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico para llevar a cabo mis estudios y elaboración de esta tesis.

A todo el departamento de Tecnología del Concreto y aquellas personas que de alguna forma intervinieron en la realización de este trabajo.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



DEDICADA A:

Mi padre

Leobardo Valdez Cano

La memoria de mi madre

Ma. Isidra Tamez

Mi esposa

Verónica Berumen

La memoria de mis abuelos

Hermenegildo Valdez

Ma. del Carmen Cano e

Inés Tamez



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



RESUMEN

Pedro Leobardo Valdez Tamez

Fecha de Terminación: Diciembre de 1994

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Civil

Título de la Tesis: EFECTOS DEL DIÓXIDO DE CARBONO EN LOS MORTEROS DE CEMENTO HIDRÁULICO CON CENIZA VOLANTE

Número de páginas: 80

Candidato para el grado de Maestría en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Ambiental

Área de Estudio: Ingeniería Ambiental

Propósito y Método del Estudio: La presente tesis consistió en investigar la influencia de la carbonatación sobre morteros utilizando como parte del material cementante ceniza volante. Se determinó la porosimetría y el potencial de hidrógeno (pH), tanto para morteros no carbonatados y carbonatados y para cuatro relaciones Agua/Cementante (0.35, 0.45, 0.55 y 0.65), sustituyendo (en masa) el 25% del cemento por ceniza volante tipo "F" de MICARE (Minera Carbonífera de Río Escondido). Para acelerar el proceso se utilizó una cámara de carbonatación. Se analizaron los resultados tanto de los morteros con y sin ceniza y se observó que en el caso de la resistencia a la compresión a los 28 días de edad, para las cuatro relaciones Agua/Cementante (A/C) los valores permanecen muy similares, gracias a la potencialidad puzolánica de la ceniza. Como los morteros con y sin ceniza fueron sometidos a las mismas condiciones atmosféricas y a la misma concentración de CO₂, se pudo comparar las velocidades de carbonatación y los resultados de pH indicaron que en los morteros que contienen ceniza, la velocidad de carbonatación es más lenta que en aquellos que contienen solo cemento portland. En lo que respecta a la porosimetría, se observó que para las cuatro relaciones A/C con y sin ceniza, el efecto de la carbonatación tendió a disminuir la porosidad. No obstante que al utilizar ceniza volante la porosidad inicial a los 28 días de edad es mayor que en los morteros sin ceniza, al carbonatarse, la porosidad disminuyó en ambos morteros, siendo mucho más significativa en los morteros con ceniza, contribuyendo para esto la reacción puzolánica. Para morteros carbonatados, con y sin ceniza, la forma de los poros tiende a modificarse al igual que su interconexión, lo anterior se puede observar en los análisis porosimétricos presentados en las graficas de la 8 a la 11.

TABLA DE CONTENIDO

Capítulo	Página
1. Introducción	1
2. Efectos relevantes que influyen en la corrosión del acero de refuerzo.	7
2.1 Corrosión del acero inducida por la carbonatación	7
2.2 Permeabilidad y porosimetría del concreto	9
3. El uso de la ceniza volante en el concreto	15
4. Justificación del uso de morteros en la investigación	17
5. Materiales	18
6. Metodología utilizada	19
7. Resultados y discusión	21
8. Conclusiones	23
9. Recomendaciones	25
Bibliografía	26
Tablas	27
Gráficas	47
Anexo fotográfico	60
Apéndice	72
Resumen autobiográfico	80

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN[®]
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

LISTA DE TABLAS

Tabla #		Página
I	Datos estadísticos sobre las condiciones ambientales de Nuevo León en 1997	27
II	Concentración del monóxido de carbono (CO) en el área metropolitana de Monterrey	28
III	Propiedades físicas del cemento	29
IV	Propiedades físicas de la ceniza volante	30
V	Composición química del cemento	31
VI	Composición química de la ceniza volante	32
VII	Propiedades físicas del agregado fino	33
VIII	Proporciones por metro cúbico de mortero para las cuatro relaciones A/C empleadas	34
IX	Propiedades del mortero en estado fresco y endurecido	35
X	Relaciones entre los materiales y los resultados de resistencia a la compresión	36
XI	Coefficiente de permeabilidad (K) en morteros no carbonatados	37
XII	Potencial hidrógeno en morteros no carbonatados y carbonatados	38
XIII	Resultados porosimétricos de muestras no carbonatadas	39
XIV	Resultados porosimétricos de muestras carbonatadas	40
XV	Promedios de los análisis porosimétricos	41
XVI	Reducción en la porosidad total por efecto de la carbonatación acelerada	42
XVII	Distribución del radio del poro por intervalos en morteros no carbonatados	43
XVIII	Distribución del radio del poro por intervalos en morteros carbonatados	44
XIX	Promedios de la distribución del radio promedio del poro por intervalos	45
XX	Relación de los análisis porosimétricos de los morteros no carbonatados y carbonatados sin ceniza y con ceniza volante tipo "F" de MICARE (los datos de los morteros sin ceniza provienen de la tesis del Ing. A. Durán)	46

LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica #		Página
1.	Concentración de CO en el área metropolitana de Monterrey de 1996 a 1998	47
2.	Granulometría del agregado calizo empleado	48
3.	Consumo de cementante vs resistencia a la compresión (fc)	49
4.	Relación A/C vs. Resistencia a la compresión a los 28 días	50
5.	Relación A/C vs. Peso volumétrico saturado superficialmente seco	51
6.	Relación A/C vs. Coeficiente de permeabilidad (K) para morteros no carbonatados	52
7.	Relación A/C vs. Potencial hidrógeno (pH), para morteros no carbonatados y carbonatados	53
8.	Presión vs. Volumen de poros en morteros no carbonatados y carbonatados con y sin ceniza volante (A/C=0.35)	54
9.	Presión vs. Volumen de poros en morteros no carbonatados y carbonatados con y sin ceniza volante (A/C=0.45)	55
10.	Presión vs. Volumen de poros en morteros no carbonatados y Carbonatados con y sin ceniza volante (A/C=0.55)	56
11.	Presión vs. Volumen de poros en morteros no carbonatados y carbonatados con y sin ceniza volante (A/C=0.65)	57
12.	Relación A/C vs. Porosidad total en morteros no carbonatados y carbonatados con y sin ceniza volante	58
13.	Relación A/C vs. Superficie específica de los poros en morteros no carbonatados y carbonatados con y sin ceniza volante	59

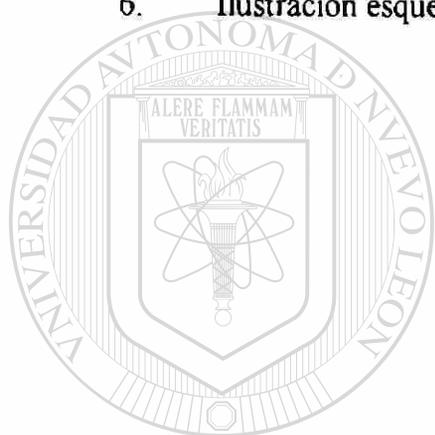
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

LISTA DE FIGURAS

Figura #		Página
1.	Representación esquemática de la neutralización del hidróxido de calcio y la formación de la frontera de carbonatación	8
2.	Celda galvánica que genera la corrosión del acero embebido en el concreto	8
3.	Proceso electroquímico de corrosión del acero de refuerzo en humedad y concreto permeable	9
4.	Aumento en la porosidad debido a una alta relación A/C	11
5.	Comportamiento del mercurio en un análisis porosimétrico para definir el tipo de poros	13
6.	Ilustración esquemática de la porosidad y la permeabilidad	14



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

1. INTRODUCCIÓN

A partir de la revolución industrial, el hombre ha desarrollado velozmente las áreas tecnológicas y científicas. Parte del desarrollo tecnológico está cimentado en la utilización (quema) de combustibles fósiles, los cuales han incrementado enormemente la **concentración de los gases** en la atmósfera. Algunos de esos gases intervienen directamente en las condiciones climatológicas ambientales y, en lo más importante, el ciclo de la vida humana.

Al manto de gases que rodea la tierra se le conoce como atmósfera, la cual contiene alrededor de 5.2×10^{15} toneladas de aire (1); conforme se avanza del nivel del mar a la ionosfera, el aire empieza a disminuir, se estima que aproximadamente el 90% de la atmósfera se halla a menos de 30 km de la superficie del planeta.

El aire, que separa a los seres humanos del vacío del espacio, está formado por una mezcla de gases, de los cuales aproximadamente el 78% es nitrógeno (N_2), el 21% es oxígeno (O_2), el 1% es argón (Ar) y otros constituyentes menores; el más importante de ellos es el dióxido de carbono (CO_2), que ocupa aproximadamente del 0.03% al 0.04%, en el cual nos enfocaremos en este estudio.

El **bióxido de carbono** es un gas incoloro e inodoro que se produce cuando se quema en un exceso de oxígeno cualquier tipo de carbón o de compuestos que contengan carbono e interviene directamente en nuestro ciclo biológico, en el fenómeno denominado lluvia ácida y en el efecto invernadero. Además, y es lo que atañe al presente estudio, **la reacción del CO_2 sobre las estructuras de concreto.**

La transferencia del dióxido de carbono de y hacia la atmósfera es una parte esencial del ciclo del carbono, que empieza con el proceso de **fotosíntesis** conducido por los vegetales y ciertos microorganismos.

Los animales consumen **carbohidratos** y otras moléculas complejas que contienen carbono y, **al respirar**, emiten CO_2 . Cuando las plantas y animales mueren, los microorganismos del suelo los **descomponen**; el carbono de sus tejidos se oxida a CO_2 y retorna a la atmósfera. Además, hay un equilibrio dinámico entre el CO_2 atmosférico y los carbonatos de los océanos y lagos, de esto se sabe poco al respecto. Los volcanes y la **combustión** en las casas, las fábricas y los vehículos automotores constituyen algunas de las principales fuentes de producción del CO_2 en el mundo.

Según el profesor Kumar Mehta de la Universidad de Berkeley, el CO_2 al combinarse con el agua forma el ácido carbonico el cual tiende a bajar el pH a valores cercanos a 6.0 y es considerado como un **ácido muy débil**, éste tiene un efecto despreciable al entrar en contacto con la superficie del concreto.

La actividad humana libera a la atmósfera cerca de 7,000 millones de toneladas de CO₂ al año (ver Foto 1), que se suman a los 750 mil millones de toneladas que ya están ahí. Sin embargo, sólo la mitad de nuestras emisiones (3,000 millones de toneladas) permanecen en la atmósfera (2), el resto es absorbido por los vegetales terrestres y marinos, yace enterrado en sedimentos oceánicos, es absorbido por el agua de mar o se deposita en alguna otra forma. De esa cantidad “faltante” de carbón, aparentemente los océanos eliminan de la atmósfera por lo menos 2,000 millones de toneladas cada año.

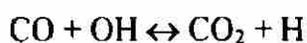
Se cree que la concentración del dióxido de carbono en la atmósfera **ha aumentado de 296 ppm, en 1990, hasta 360 ppm, actualmente** y la concentración de bióxido de carbono se ha incrementado un 0.3% anual y ahora es aproximadamente 30% mayor que antes de la revolución industrial, se estima que su tasa de crecimiento es de 1 ppm anual; si seguimos quemando más combustibles (hulla, petróleo y gas) es muy probable que continúe creciendo esta concentración.

De manera especialmente inquietante, el CO₂ perdura en la atmósfera más de cien años, a diferencia del vapor de agua que permanece ocho días. Estos dos compuestos, más el metano, el óxido nitroso y otros, son de suma importancia en el fenómeno de **invernadero**. Se estima que, de seguir aumentando estas emisiones, la temperatura promedio de la tierra se elevará entre 1 y 3.5 °C, aproximadamente, en los próximos cien años lo cual podría originar una catástrofe.

Stephen Schneider, de la Universidad de Standford, señala que “la deforestación es la causa de casi la mitad del aumento del CO₂, desde el año 1800”.

El **monóxido de carbono (CO)**, es un gas incoloro e inodoro que se forma en la combustión incompleta del carbon u otros compuestos que contienen carbón, el cual arde con facilidad en el oxígeno y es apenas soluble en agua; además, es venenoso ya que puede enlazarse de manera fuerte a la hemoglobina y es uno de los principales contaminantes del aire. En ciudades con tránsito automovilístico pesado, la concentración de CO en el aire es aproximadamente 40 ppm en volumen. Según estudios realizados, el 95% del CO presente en el aire proviene de **emisiones de automóviles**.

La conversión de CO a CO₂, está bien establecida, la reacción principal, que es intrínsecamente rápida (3), se considera que es:



Lo descrito anteriormente, nos da una idea de la importancia del CO₂. En las tablas I y II, podemos observar las condiciones ambientales de Nuevo León en 1997 y la concentración de CO en el área metropolitana de Monterrey, la cual contribuye al aumento del CO₂ en la atmósfera. En la gráfica 1, se muestra el comportamiento del CO en las diferentes épocas del año; de aquí, podemos concluir que en el invierno la concentración de CO₂ en la atmósfera es mayor que cualquier otra época del año, debido a que en ésta consumimos mayor cantidad de energéticos.

Por otro lado, **el concreto** es el material de construcción más ampliamente utilizado en el mundo. Se calcula que el concreto se utiliza cinco veces más en peso que el acero. En algunos países, este porcentaje excede la proporción de 10 a 1. El consumo de concreto hoy en día es aproximadamente una tonelada por cada ser humano, sin embargo, hay que aclarar que para producir una tonelada de cemento estamos produciendo también una tonelada de CO₂.

Este material tan versátil, manejable, moldeable, etc., se produce fácilmente; sólo se requiere una mezcla de cemento, agua, grava y arena para producirlo. Al cabo de unas cuantas horas tenemos una masa endurecida que podemos clasificar como una "roca artificial." Conforme evoluciona el hombre, los cambios tecnológicos y científicos han demostrado que este material puede ser susceptible a una serie de fenómenos físico-químicos que pueden llevar a la destrucción de las estructuras de concreto reforzado.

En nuestros tiempos, tenemos la tecnología para estudiar gran parte de los factores y mecanismos de baja durabilidad del concreto, esto incluye el estudio de cada uno de los componentes del concreto, sus reacciones físico-químicas en el proceso de endurecimiento, su comportamiento mecánico bajo las cargas de servicio, así como su comportamiento en las condiciones de exposición a las cuales trabajará.

El profesor Mehta (4) define a la **macroestructura** del concreto como aquella parte general perceptible para el ojo humano, cuyo límite de resolución es aproximadamente de 1/5 de mm (200µm). El término **microestructura** se usa para la porción magnificada microscópicamente de la macroestructura. La capacidad de magnificación del microscopio electrónico óptico moderno es del orden de 10⁵ veces, lo cual ha sido de gran utilidad tecnológica para resolver, en gran medida, la estructura de los materiales.

El Comité 201 del ACI está encargado del estudio de los procesos de deterioro del concreto hidráulico, además, da una guía de las recomendaciones necesarias para prevenir tales daños.

La carbonatación del concreto es un fenómeno natural, que ocurre todos los días en miles de estructuras de concreto, alrededor del mundo.

En el concreto sin acero de refuerzo, la carbonatación es un proceso generalmente de pequeñas consecuencias dañinas. En el concreto reforzado, sin embargo, este proceso químico aparentemente inofensivo, avanza progresivamente al interior de la superficie expuesta del concreto y crea un ambiente propicio para que el acero de refuerzo pueda ser atacado y corroerse.

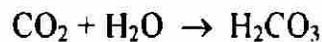
Al igual que los efectos de cualquier otro mecanismo de corrosión del acero de refuerzo, los daños causados por este fenómeno a las estructuras de concreto, requiere de técnicas y materiales costosos para su correcta reparación.

Químicamente, la carbonatación del concreto origina la **disminución de pH** que ocurre cuando el CO_2 del medio ambiente penetra en los poros capilares y reacciona con la humedad dentro de los poros y convierte el hidróxido de calcio de alto pH a carbonatos los cuales son neutros, reduciendo, por consiguiente, el valor del pH.

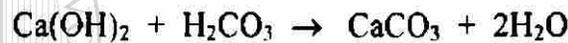
Las reacciones básicas de la carbonatación en el concreto se manifiestan de la siguiente forma:

Fase 1 Los poros en el concreto de peso normal, bajo condiciones cíclicas de humedad, contienen:
- Agua (H_2O)
- Hidróxido de calcio [$\text{Ca}(\text{OH})_2$]

Fase 2 Cuando el CO_2 del aire entra en los poros del concreto, se forma ácido carbónico.



Fase 3 El ácido carbónico neutraliza el hidróxido de calcio y forma Carbonato de calcio sólido, de pH neutral (5).



Alto pH Bajo pH pH neutro

El agua contiene calcio y magnesio, generalmente en forma de bicarbonatos. $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$ y $\text{Mg}(\text{HCO}_3)_2$, encontrándose el primero en mayor cantidad.

Este compuesto aparece en el agua, constituyendo el siguiente equilibrio:



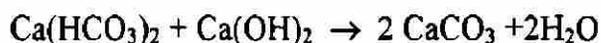
En la ecuación anterior se aprecia que es necesaria la presencia de una cantidad libre de CO_2 para mantener el equilibrio, que definiremos como CO_2 de equilibrio, y que no es perjudicial al concreto.

Si la cantidad de CO_2 libre existente es mayor que la correspondiente a la de equilibrio, éste puede disolver más cal [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] y provoca que el agua se transforma en agresiva, denominándose a este CO_2 como “agresivo” (6).

El mecanismo del ataque de las aguas con CO_2 agresivo es el siguiente.

Sobre la superficie del concreto existe CaCO_3 , como consecuencia de la reacción del CO_2 de la atmósfera con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$. El efecto del CaCO_3 por esta reacción es aumentar la impermeabilidad del concreto, ya que actúa como sellante debido a su **baja solubilidad**.

Sin embargo, si este concreto entra en contacto con agua y con CO₂ agresivo, se efectuará la reacción:



El carbonato de calcio obstruye los poros, pero después es atacado nuevamente por el agua agresiva, repitiéndose el proceso hasta poner en peligro la estructura. El agua con CO₂ agresivo puede aparecer en aguas subterráneas, embalses, etc. Después de diversos estudios se ha concluido que el agua que contiene más de 20 ppm de CO₂ agresivo (7), puede generar una carbonatación rápida de la pasta de cemento hidratada.

El proceso de carbonatación es completamente natural y es afectado también por variables naturales, consecuencia de las condiciones donde se encuentre el concreto. La tasa de carbonatación depende principalmente del contenido de **humedad**, de la **permeabilidad** del concreto y de la **concentración** de CO₂ disponible en el ambiente.

Para que la carbonatación se lleve a cabo, debe estar presente la humedad. Los procedimientos de reacción de carbonatación son más rápidos cuando la **humedad relativa ésta entre el 50 y 75%** (8). Cuando la humedad es menor, hay insuficiente agua en los poros del concreto para que se disuelvan cantidades importantes de hidróxido del calcio. Arriba del 75% de humedad relativa, la situación es inversa y los poros llegan a bloquearse con agua. Aunque se permite que libremente se disuelva el hidróxido de calcio, el ingreso del CO₂ en los poros saturados es restringido en gran medida.

Un concreto permeable puede carbonatarse rápidamente. Pudieran añadirse a las estructuras de concreto reforzado muchos años de protección contra la corrosión, si simplemente los constructores siguieran algunas prácticas para producir concretos de baja permeabilidad. Esto incluye: a) la utilización de relaciones A/C bajas, b) el mejorar el vibrado, c) usar puzolanas, como la ceniza volante, y d) hacer un curado apropiado. Todas estas prácticas reducirán la permeabilidad y, por consiguiente, sería más difícil la difusión del CO₂ en el interior del concreto.

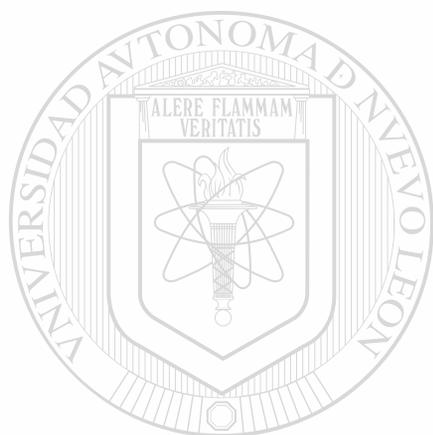
Para que se lleve a cabo la carbonatación del concreto, basta con la pequeña concentración presente en la atmósfera (0.03%). Cabe señalar que esta concentración puede incrementarse en lugares específicos como estacionamientos con poca ventilación, túneles, cierto tipo de industrias, laboratorios, etc., acelerándose el proceso si las condiciones climáticas y propias del concreto lo permiten.

En la presente investigación se utilizó una **cámara sellada**, en la cual se inyectó gas con una **concentración de CO₂ al 5 %**, para **acelerar el proceso de carbonatación**. La cámara cuenta con un ventilador en el interior, para recircular el gas en toda el área y una ventila para retirar el aire atmosférico mientras se inyecta el CO₂.

Para determinar el pH de las muestras no carbonatadas y carbonatadas se utilizó un potenciómetro digital. En ambos casos las muestras se pulverizaron pasando la malla

#50 y con una relación 1:5 en agua destilada, el mortero se disolvió y se determinó el pH.

Para determinar el momento en que el mortero se carbonató, se utilizó un indicador basado en **fenolftaleína** disuelta en alcohol isopropílico. Cuando el mortero tiene alcalinidad mayor de pH 12.0, el rocío de la solución de fenolftaleína sobre él se toma violeta y cuando se ha carbonatado, ya no hay cambios en el color.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



2. EFECTOS RELEVANTES QUE INFLUYEN EN LA CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO

2.1. CORROSIÓN DEL ACERO DE REFUERZO INDUCIDA POR CARBONATACIÓN

El acero embebido en la pasta de cemento, en proceso de hidratación, forma rápidamente una delgada capa de óxido llamada **pasivadora**, la cual se adhiere fuertemente al acero subalterno y da una completa protección contra la reacción con el oxígeno y el agua. Este estado del acero es conocido como **pasivación**. El mantenimiento de la pasivación es condicional sobre un adecuadamente alto pH del agua del poro en contacto con la capa de pasivación. Por lo tanto, cuando el bajo pH alcanza la vecindad de la superficie del acero de refuerzo, se remueve la película protectora de óxido y la corrosión puede llevarse a cabo si están presentes el oxígeno y la humedad necesarios para las reacciones de corrosión.

La **hidratación del cemento** es una reacción entre el cemento y el agua, la cual **forma un gel** alrededor de cada grano de cemento. El gel forma una matriz entre los granos de arena y las partículas de agregado, uniendo la masa de concreto. La reacción de hidratación libera álcalis como un subproducto y la solución del poro rápidamente llega a ser una solución saturada de hidróxido de sodio y potasio con hidróxido de calcio, y con una **alcalinidad mayor de pH 13.0**.

El exceso de hidratación de calcio es precipitado como pequeños cristales de mineral denominado **portlandita**, por toda la matriz de cemento hidratado. El mantenimiento de un alto pH es responsable de la formación de la película pasivadora sobre la superficie del acero de refuerzo embebido.

Una reserva de hidróxido de calcio sólido sirve como un acondicionador que previene que decaiga el pH del concreto. Sin embargo, el agua de pH neutral que pasa sobre la superficie del concreto lentamente, reduce los niveles de hidróxido de calcio, mientras que el material sólido dentro de la solución es reducido por los efectos de la disolución del agua. Mientras más ácida sea el agua, el proceso de disolución será más rápido.

La reducción del contenido de hidróxido de calcio por disolución es un proceso lento. La reducción ocurre mucho más rápidamente cuando el CO₂ atmosférico penetra al concreto a través de sus poros capilares (canales residuales dejados por el proceso de hidratación). El CO₂ reacciona con y remueve el hidróxido de calcio. El frente de carbonatación se establece con el avance de la reacción del exterior de la superficie del concreto al interior (Fig. 1). Este fenómeno se explicó anteriormente con mayor detenimiento.

PROCESO DE CARBONATACIÓN

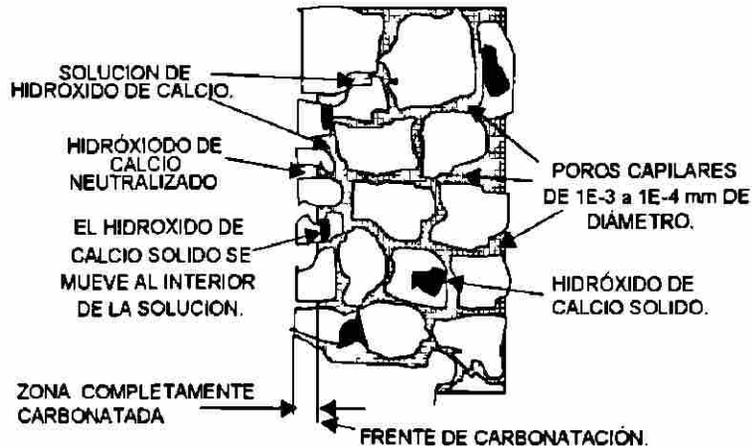


Fig. 1 Representación esquemática de la neutralización del hidróxido de calcio y la formación del "frente de carbonatación".

Uno de los efectos de la carbonatación es que ésta crea las condiciones requeridas para la corrosión del acero de refuerzo; la siguiente etapa sería la de formación de óxido. Para que se produzca la corrosión, se requieren el oxígeno y el agua, además de un mecanismo electroquímico que envuelve la formación de la celda de corrosión con un ánodo, un cátodo y un flujo de corriente entre ellos (Fig. 2). En la barra de refuerzo fluyen los electrones; a través de ella, del ánodo al cátodo. El circuito se complementa por vía de un electrolito, el cual comprende el agua y los iones disueltos dentro de los poros de la matriz de la pasta de cemento hidratada. La consecuencia de este flujo de corriente es la liberación de iones de metal dentro de la solución del ánodo y la complementaria reducción del oxígeno disuelto en el cátodo para formar iones hidroxilos (OH^-). Cuando el concreto de los alrededores de la barra llega a estar carbonatado, es probable que un número de celdas de corrosión aparezcan a lo largo de la barra del área afectada, tal vez separada por unos pocos milímetros. El resultado es una corrosión uniforme general, sobre la superficie del acero que produce óxido de hierro insoluble, el cual ocupa un volumen mayor que el del hierro y, por lo tanto, produce fuerzas de expansión que causan grietas y despostillamientos en el recubrimiento.

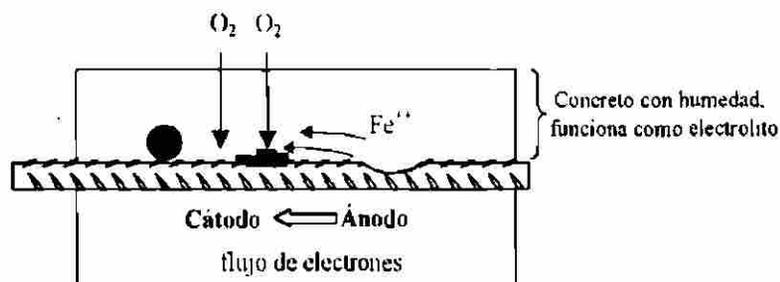


Fig. 2 Celda galvánica que genera la corrosión del acero embebido en el concreto

La tasa de corrosión sobre la superficie es gobernada por diferentes factores como: a) la resistividad eléctrica del concreto (afectada por el contenido de humedad), b) la temperatura y la velocidad con que el oxígeno llega al sitio del cátodo (para concretos carbonatados, el oxígeno es normalmente disponible). Es muy importante identificar la presencia de algunos cloruros en el concreto. En un concreto nuevo, con un pH de 12 a 13, se requiere de una concentración de iones de cloruro entre 7,000 a 8,000 ppm, para iniciar la corrosión del acero embebido. Sin embargo, si se reduce el pH a valores de 10 a 11, por efecto de la carbonatación basta con valores menores a 100 ppm para que dé inicio la corrosión. La corrosión forma diversos óxidos, los cuales pueden llegar a aumentar su volumen de un 600 a un 700%, generando fuerzas expansivas de gran magnitud, como se puede apreciar en la Fig. 3.

PRODUCTOS DE OXIDACIÓN DEL HIERRO

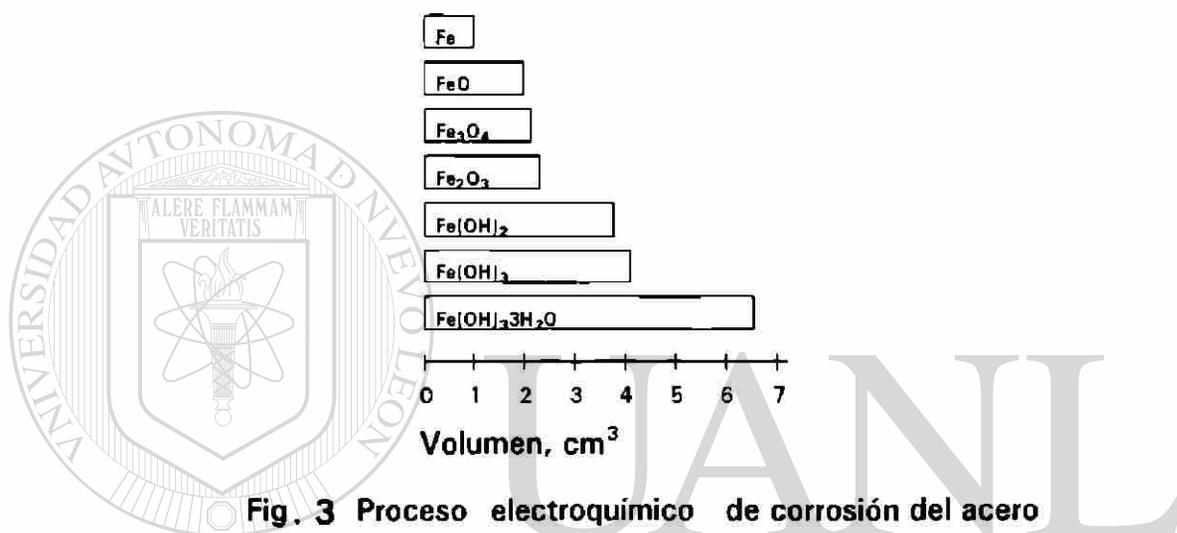


Fig. 3 Proceso electroquímico de corrosión del acero de refuerzo en humedad y concreto permeable

2.2. PERMEABILIDAD Y POROSIMETRÍA DEL CONCRETO

La permeabilidad del concreto es una propiedad relacionada íntimamente con su durabilidad; ésta representa la facilidad con la cual el agua u otros fluidos se pueden mover a través de él; de este modo, se presenta el transporte de agentes agresivos en el interior del concreto (9), su importancia es crítica para muchos tipos de problemas que experimenta el concreto, por ejemplo:

- Ataque de sulfatos: Movimiento de los iones sulfato en el interior del concreto donde ocurren reacciones químicas adversas, produciendo expansiones.
- Resistencia a la congelación: Flujo de agua para aliviar los esfuerzos causados por la formación de hielo.
- Reacción álcali-agregado: Movimiento de los iones alcalinos a los agregados y agua produciendo geles que se hinchan.

Resistencia al fuego:	Escape de vapores de capas calentadas causando botaduras.
Corrosión del acero:	Movimiento de iones cloruro a la superficie del acero.
Carbonatación:	Difusión del CO ₂ al interior del concreto carbonatándolo para iniciar posiblemente la corrosión del acero de refuerzo.

La permeabilidad afecta las propiedades térmicas del concreto, ya que éste puede ingresar el agua modificando la temperatura en el interior del concreto. El movimiento del agua, a través de un espesor de concreto, no sólo puede ser causado por la carga mínima del agua, sino también por la humedad diferencial en ambos lados del concreto, o bien, por la presión osmótica.

Tanto la pasta de cemento como los agregados contienen poros, además de los huecos producidos por la compactación incompleta o por el sangrado. La mayoría de los buenos concretos tienen una absorción menor que el al 10%.

La permeabilidad del concreto no es una simple función de su porosidad, sino que depende también del tamaño, la distribución y continuidad de los poros. Así pues, aunque el gel de cemento tiene una porosidad del 28%, su permeabilidad es sólo del orden de 7×10^{-16} m/s (10). Esto se debe a su estructura extremadamente fina de la pasta de cemento endurecida, en la que los poros y las estructuras sólidas son muy pequeñas y numerosas, mientras que en las rocas, aunque en menor número, los poros son mucho más grandes y producen mayor permeabilidad. Por esta razón, el agua puede fluir con más facilidad por los poros capilares que por los poros más pequeños del gel de cemento. La pasta de cemento, como un todo, es de 20 a 100 veces más permeable que el propio gel. De aquí que la porosidad capilar controle la permeabilidad de la pasta del cemento.

La permeabilidad de la pasta de cemento varía conforme progresa la hidratación (Fig. 4). En una pasta fresca, el flujo de agua está controlado por las dimensiones, la forma y la concentración de los granos originales del cemento. Conforme avanza la hidratación, la permeabilidad disminuye rápidamente, debido a que el volumen bruto del gel (incluyendo sus poros), es aproximadamente 2.1 veces el del cemento sin hidratar, y entonces, el gel va llenando gradualmente algunos de los espacios que antes estaban llenos de agua.

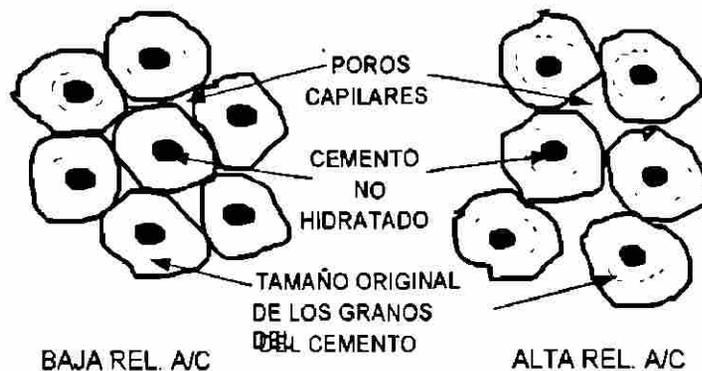


Fig. 4 Aumento en Porosidad Debido a una Alta Relación A/C

Se sabe que la interface pasta-agregado es más porosa que la pasta en bruto; asimismo, el coeficiente de permeabilidad para los concretos es generalmente 100 veces mayor que para las pastas comparables, mientras que para morteros, los hay de 3 a 10 veces mayores.

La distribución del tamaño del poro está fuertemente influenciada por la temperatura del curado: las altas temperaturas incrementan el volumen de mesoporos.

El flujo en los poros capilares puede ser descrito por la ley de Darcy, para el flujo laminar a través de un medio poroso.

La permeabilidad de agua de los morteros en estudio se obtuvo mediante la utilización de un permeámetro de procedencia italiana marca MATEST, el cual contiene cuatro cámaras en donde se introducen las probetas por analizar, éstas pueden trabajar simultáneamente o individualmente, la presión máxima de trabajo del agua sobre las probetas de mortero puede variar de 0 a 30 bares.

Para obtener el coeficiente de permeabilidad de Darcy (K) se utilizó la siguiente ecuación:

$$K = \frac{C_c \times h}{A \times t \times p}$$

donde:

- C_c = Agua permeada (cm³)
- h = Altura del espécimen (cm)
- A = Superficie del espécimen (cm²)
- t = Tiempo de permeabilidad (s)
- p = Presión hidráulica (cm de col. de agua)

Los poros del concreto de peso normal cubren una fracción considerable de la pasta, teniendo un rango de tamaños muy grande. Una clasificación tradicional, sugerida por Powers y Brownyard (11) considera dos clases de poros: **poros gel**, asociados con la formación de los productos de hidratación (gel de cemento), los cuales son intrínsecos,

mientras que los **poros capilares** son considerados como remanentes del espacio llenado por el agua.

Los microporos son considerados una forma de porosidad intrínseca aunque hay buenas razones para incluir, además, los mesoporos más pequeños. Ambos, **meso y macroporos, componen el sistema de poros capilares.**

En la pasta de cemento, estos poros forman una continuidad, la cual puede ser medida utilizando el porosímetro por intrusión de mercurio (MIP) hasta los poros gel (pequeños mesoporos). El MIP es el método más usado para las predicciones de permeabilidad.

La determinación del tamaño del poro por la técnica de intrusión de mercurio está basada en el comportamiento de líquidos no húmedos en los capilares.

La presión requerida es una función del tamaño del poro; la relación entre el tamaño del poro y la presión ejercida cuando el poro es considerado como cilíndrico, es expresada como:

$$pr = -2\sigma \cos\theta$$

donde:

- p = Presión absoluta ejercida
- r = Radio del poro
- σ = Tensión superficial del mercurio
- θ = Angulo de contacto mercurio-material

Esta relación es comúnmente conocida como la **ecuación de Washburn**. Si bien en casi cualquier sustancia porosa hay poros no cilíndricos, esta ecuación se usa generalmente para calcular la distribución del tamaño de los poros, de los datos obtenidos a través de la porosimetría por intrusión de mercurio.

El equipo utilizado para determinar la porosimetría de los morteros en estudio es de procedencia italiana y de marca CARLO ERBA, y está compuesto por:

La Unidad Macroporo 120, la cual es utilizada para el llenado (bajo vacío) del mercurio en los bulbos contenedores de muestras (dilatómetros); con este equipo, se pueden detectar poros con radios de hasta 18,000 Amstrong (Å) y hasta una presión atmosférica (12).

La Unidad Porosímetro 2000, ya con el dilatómetro conteniendo la muestra y el mercurio se pasa a esta unidad y se le aplican hasta 2000 bares ($\approx 2000 \text{ kgf/cm}^2$), este equipo funciona automáticamente y puede detectar poros en un intervalo de 75000 a 37 Å, la información es tratada mediante un software (Milestone 200) haciendo más amigable el manejo de la información.

En un análisis porosimétrico se puede obtener la siguiente información:

- La porosidad total
- El tipo del poro
- El tamaño del poro
- La superficie específica de los poros
- La densidad de la muestra

Para definir el tipo de poro es necesario observar el comportamiento del mercurio en el ciclo de extrusión en la curva de presión contra volumen (Fig. 5). Según su comportamiento los poros pueden clasificarse como: cuello de botella, cilíndrico, cónico y plano.

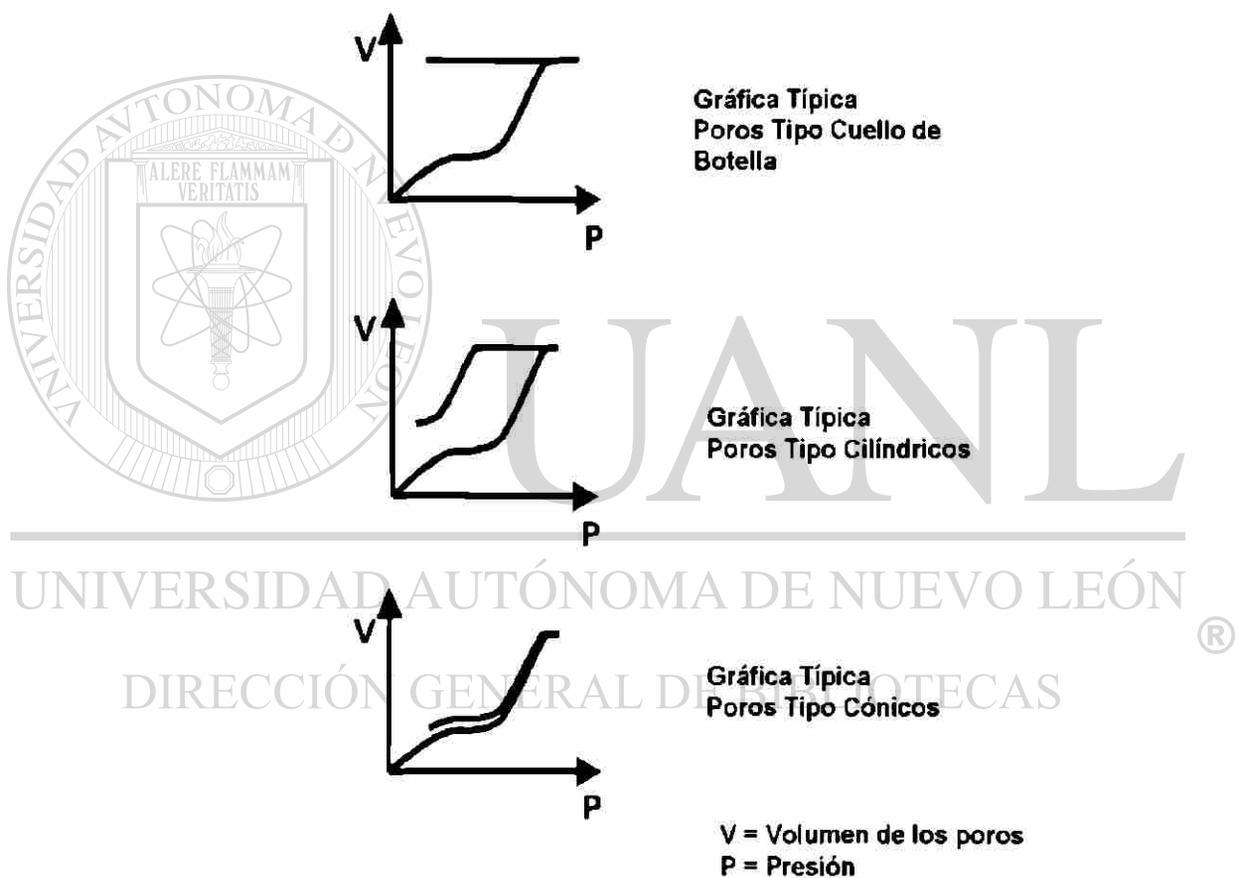


Fig. 5 Comportamiento del Mercurio en un Análisis Porosimétrico Para Definir el Tipo de Poro

En el cuello de botella, el mercurio permanece dentro de los poros, en el tipo cilíndrico la mayor parte del mercurio desaloja el poro conforme se libera la presión, en el tipo cónico el mercurio desaloja completamente los poros, el último, conocido como plano, se aplica principalmente para muestras de grafito y todo tipo de muestras de tipo laminado en estratos, el mercurio permanece en el poro y no sale, caso similar al tipo de cuello de botella.

La Fig. 6 muestra una representación esquemática de la porosidad y permeabilidad de diversos tipos de concreto.

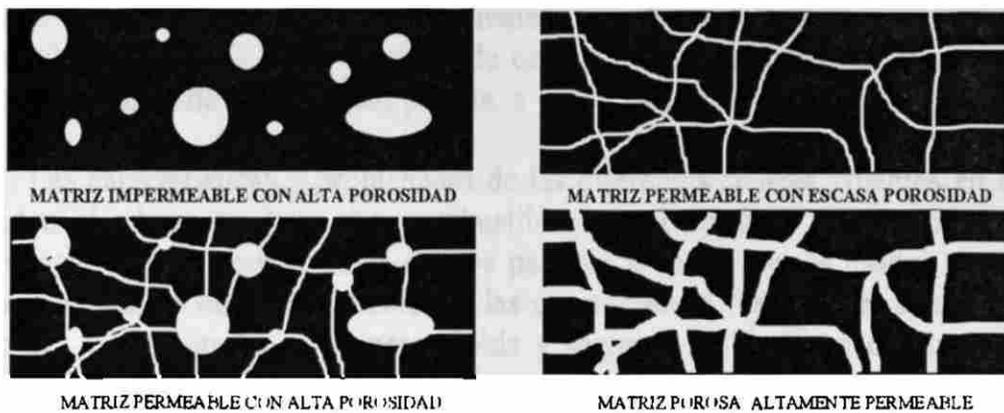


Fig. 6 Ilustración esquemática de la porosidad y permeabilidad.

Powers y Brownyard clasificaron los poros por su tamaño como sigue:

- Poros gel Menores a 100 Å
- Poros capilares De 100 a 100,000 Å
- Huecos de aire Mayores a 100,000 Å

La IUPAC (Unión Internacional de Química Pura y Aplicada) los clasifico como sigue:

- | | | |
|-------------------|---------------------|-----------------------------|
| • Microporos | Menores a 25 Å | } Predominan en el concreto |
| • Mesoporos | De 25 a 500 Å | |
| • Macroporos | De 500 a 100,000 Å | |
| • Ultramacroporos | Mayores a 100,000 Å | |

Recordando que:

$$1 \text{ Å} = \frac{1 \text{ mm}}{10,000,000} \quad ; \quad 1 \text{ Å} = 0.1 \text{ nm} \quad ; \quad 1 \text{ nm} = \frac{1 \text{ mm}}{1,000,000}$$

3. EL USO DE LA CENIZA VOLANTE EN EL CONCRETO

El término "ceniza volante" se usa a menudo para describir cualquier partícula fina de material precipitado de chimeneas de hornos industriales que calcinan combustibles sólidos (13). La cantidad de ceniza volante colectada de los hornos de un sitio pueden variar de una tonelada por día, a varias toneladas por minuto.

Las características y propiedades de las diferentes cenizas volantes en el mundo dependen de la naturaleza del combustible y del tamaño del horno usado. La pulverización de los combustibles sólidos para los grandes hornos usados en estaciones de energía crea un inmediato problema; las cenizas secas "deben" ser colectadas de las chimeneas y depositadas de manera rápida y segura. La similitud de algunas cenizas volantes con puzolanas naturales de origen volcánico ha alentado el uso de estas en conjunción con el cemento portland para la producción de concreto. No todas las cenizas volantes son convenientes para esta aplicación; sin embargo, las reacciones químicas inestables pueden tener efectos adversos en los procesos de hidratación o en la estabilidad final del producto terminado.

Se puede definir a la **puzolana** como el conjunto de aquellos materiales silíceos o silíceos y aluminosos, los cuales por sí solos poseen muy poco o ningún valor cementante, pero finamente dividido y en presencia de humedad, reaccionan con el hidróxido de calcio $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ a temperatura ambiente para formar compuestos con propiedades cementantes.

Las cenizas volantes capaces de reaccionar con el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ a la temperatura del laboratorio pueden actuar como materiales puzolánicos. Su actividad puzolánica es atribuible a la presencia de SiO_2 y Al_2O_3 en forma amorfa.

Las cenizas volantes pueden ser subdivididas en dos categorías, de acuerdo con su origen:

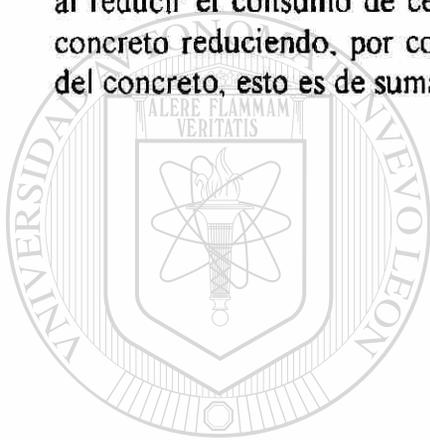
Clase F: Ceniza volante producida normalmente por la calcinación de antracita o carbón bituminoso el cual reúne los requerimientos aplicables a esta clase. La ceniza volante clase F tiene propiedades puzolánicas.

Clase C: Ceniza volante producida normalmente por la calcinación de lignito o carbón sub-bituminoso el cual reúne los requerimientos aplicables a esta clase. Además de las propiedades puzolánicas, la ceniza del tipo C sólo posee algunas propiedades cementantes. Algunas cenizas volantes clase C pueden tener contenidos de cal que exceden al 10%.

El tamaño predominante de las partículas de la ceniza volante es de 30 micrones(μm) y están formadas principalmente por partículas esféricas sólidas de vidrio. Algunas veces podemos encontrar un pequeño número de esferas vacías las cuales son llamadas **cenoesferas** (completamente vacías) y **plenoesferas** (empaquetado con numerosas esferas pequeñas), esta forma de las partículas ayuda a que el concreto con

ceniza volante tenga mejor acabado y sea más fácil de bombear, hay que recordar que las partículas de cemento tienen forma angular, semejante a una roca triturada.

La ceniza es un subproducto industrial contaminante que proviene de la industria carboeléctrica y se obtiene al calcinar carbones con impurezas, su disposición a los lugares de almacenamiento después de su colección, así como el propio almacenamiento tienen un valor económico importante que repercute en los costos de producción de la energía eléctrica. En la industria del concreto, la ceniza volante se ha utilizado con éxito, ya que reduce el costo de producción por metro cúbico de concreto y gracias a su forma, composición química y tamaño de las partículas, su valor cementante es cercano al valor del cemento portland. La ceniza volante tiene un valor actual en Monterrey de \$100.00 por tonelada; en cambio, el cemento portland tiene un valor de \$1,200.00 por tonelada. En el Departamento de Tecnología del Concreto de la Facultad de Ingeniería Civil, se han realizado investigaciones aumentando los consumos de ceniza en el concreto, ya sea en adición o en sustitución en hasta más del 100%. Los resultados muestran las bondades físico-químicas y mecánicas que ésta otorga al concreto; además al reducir el consumo de cemento, disminuimos el calor generado en la hidratación del concreto reduciendo, por consiguiente, los posibles agrietamientos en el estado plástico del concreto, esto es de suma importancia en colados de concreto masivo.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

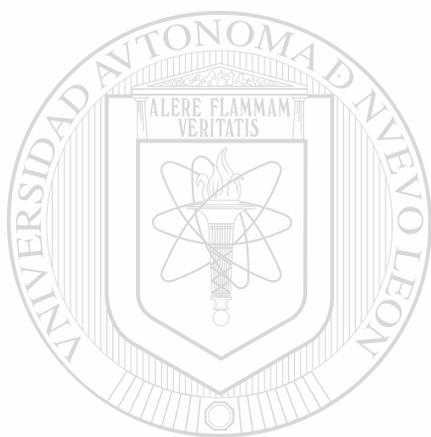


DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

4. JUSTIFICACIÓN DEL USO DE MORTERO EN LA INVESTIGACIÓN

El concreto esta constituido del 60 al 80% de su volumen absoluto por agregados. Este porcentaje representa un ahorro económico considerable en la producción de concreto. En la pasta de cemento es donde se producen los cambios volumetricos debido a causas como la retracción plástica y por secado, cambios volumétricos térmicos y reacciones químicas adversas, como la carbonatación. Si no se colocaran los agregados, estos cambios volumétricos generarían una serie de macro y micro agrietamientos, en gran escala, que llevarían, por consiguiente, a disminuir drásticamente su durabilidad.

La carbonatación, propiciadora de la corrosión del acero, es un fenómeno que se lleva a cabo en los productos de hidratación del cemento, es decir en la pasta y no en los agregados, y como no es conveniente fabricar especímenes de pasta por lo explicado anteriormente, se decidió utilizar mortero en lugar de concreto, para observar mejor el efecto de la carbonatación; además, es en la pasta del mortero donde se presentan los poros capilares, la difusión del CO₂ y las reacciones adversas al concreto.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

5. MATERIALES

Para realizar las mezclas de morteros se utilizaron como materiales cementantes, cemento portland tipo I producido por la empresa CEMEX y ceniza volante tipo "F" de MICARE. Las propiedades físicas, químicas y mecánicas se describen en las tablas de la III a la VI.

La ceniza volante utilizada en la presente investigación proviene de la planta N° 1 de la termoeléctrica de Río Escondido, la cual se clasifica como "F", de acuerdo con la especificación ASTM C 618-95. Cumple satisfactoriamente con los límites del índice de actividad a la resistencia confirmando sus propiedades puzolánicas y la cantidad total de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ es del 92.5 % contra un mínimo del 70.0 % que establece la norma ya mencionada.

Hoy en día las investigaciones con puzolanas naturales o artificiales se ha desarrollado velozmente, las variables en cada investigación involucran diversos porcentajes de puzolanas en adición o en sustitución, diferentes relaciones A/C, diversas formas de curado, diferentes tipos de cementos, etc. Se optó por utilizar un porcentaje intermedio de sustitución de cemento por ceniza volante, considerando que un 25 % de sustitución sería un valor apropiado, utilizando relaciones A/C de 0.35, 0.45, 0.55 y 0.65.

Se utilizó agregado fino calizo, procedente de la cantera del Cerro de las Mitras, cuyas propiedades físicas y graduación por tamaños consideradas se describen en la tabla VII. En la gráfica N° 2 se observa el análisis granulométrico de la arena utilizada, así como los límites especificados por la ASTM C 33-93.

Las proporciones necesarias para producir un metro cúbico de mortero para las cuatro relaciones A/C se encuentran en la tabla VIII, para todos los casos el mini-revenimiento medido para morteros fue de 5.0 cm.

6. MÉTODOS UTILIZADOS

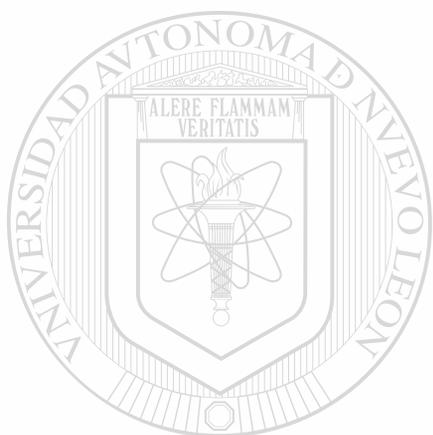
A. CRITERIOS DE DISEÑO

1. Conforme a los criterios del ACI, se diseñaron cuatro mezclas de mortero, con tamaño máximo nominal de 4.8 mm y para las relaciones Agua/Cementante (A/C) 0.35, 0.45, 0.55 y 0.65 y para un mini-revenimiento de 5 cm \pm 1 cm.
2. Las mezclas se efectuaron en un ambiente con temperatura controlada, y utilizando una revolvedora convencional de 100 litros de capacidad (Foto N°2).
3. En todas las mezclas realizadas, el mini-revenimiento fue medido utilizando un cono truncado con dimensiones de 10 cm de diámetro en la base, 5 cm de diámetro en la parte superior y 15 cm de altura (Foto N°3).

B. SE HICIERON LAS SIGUIENTES DETERMINACIONES PARA CADA RELACION A/C

1. Se determinó el contenido de aire atrapado utilizando el método descrito en ASTM C 231-91b.
2. Se moldearon 10 especímenes cilíndricos de 10 cm de diámetro por 20 cm de altura, los cuales permanecieron 24 horas en sus moldes bajo condiciones de laboratorio (Foto N°4), posteriormente fueron desmoldeados y llevados al cuarto de curado por un periodo de 28 días, a una temperatura de $23 \pm 1.7^\circ\text{C}$ y con una humedad relativa superior al 95% (Foto N°5).
3. Se ensayaron a compresión tres cilindros que habían sido curados durante 28 días, de acuerdo con método ASTM C 39-96 (Foto N°6).
4. Se determinó la absorción de los morteros no carbonatados a la edad de 28 días, conforme a la ASTM C 642-97, utilizando las fracciones resultantes de los ensayos a compresión.
5. Para realizar la prueba de permeabilidad al agua, a la edad de 28 días, uno de los especímenes se cortó en secciones perpendiculares a su eje en cuatro gajos de aproximadamente 4.5 cm de altura cada uno, para posteriormente ensayar cada gajo y obtener un resultado promedio. Se utilizó una cortadora con disco diamantado, para lograr dichos cortes (Fotos N°7 y 8).
6. Para realizar los análisis porosimétricos del mortero no carbonatado, un espécimen se cortó en gajos, los cuales fueron triturados para seleccionar muestras con tamaño de partículas que pasaran la malla # 4 y se retuvieran en la malla # 8. Estas muestras se colocaron en un desecador (que contiene sílica gel) hasta su peso constante (Foto N°9), posteriormente se realizaron las pruebas empleando un porosímetro por intrusión de mercurio (Fotos N°10, 11 y 12).
7. Una parte de las muestras obtenidas en el inciso 6, se colocó en la cámara de carbonatación acelerada (Foto N°13)
8. El periodo de carbonatación acelerada, después de un curado de 28 días, fue de cinco meses, tiempo en el que se carbonataron todas las muestras de mortero para las diferentes relaciones A/C (Foto N°14).
9. Se realizaron las pruebas porosimétricas para morteros carbonatados, empleando el porosímetro por intrusión de mercurio

10. Utilizando un **potenciómetro digital**, se determinaron los potenciales de hidrógeno (pH), tanto para morteros no carbonatados como para morteros carbonatados. Los morteros no carbonatados se analizaron a los 28 días y los morteros carbonatados, después de cinco meses bajo carbonatación acelerada (Foto N°15).



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

7. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la tabla I, se muestran las **condiciones ambientales** de Nuevo León, durante 1997. Como podemos apreciar y de acuerdo a lo descrito anteriormente, la humedad relativa promedio anual fue la adecuada para que se llevara a cabo la carbonatación.

En la gráfica 1 se aprecia la **concentración de CO** en la zona metropolitana de Monterrey. Los picos de noviembre a enero representan la época del año cuando se produce la mayor concentración de CO en la atmósfera, el cual contribuye de forma directa en la formación del CO₂, generador de la carbonatación del concreto.

En la tabla IX se encuentran las propiedades del mortero en el estado fresco y endurecido tales como aire atrapado, mini-revenimiento, absorción, peso volumetrico y resistencia a la compresión. En la tabla X se mencionan algunas relaciones importantes entre los materiales utilizados y los resultados del esfuerzo de compresión.

La relación entre el consumo de cementante, **las relaciones A/C y la resistencia a la compresión** de morteros se presentan en las gráficas N^{os} 3 y 4. Es importante mencionar que, comparando los resultados de compresión de las mismas relaciones A/C de los morteros fabricados sólo con cemento portland, según una investigación del Ing. A. Durán, los resultados son muy similares a los morteros fabricados con cemento portland y ceniza volante, a los 28 días de edad, para una sustitución del 25% del cemento. Lo anterior confirma la potencialidad puzolánica de la ceniza de MICARE.

El **peso volumétrico** obtenido para las cuatro relaciones A/C disminuyó de 2,200 a 2,160 kg/m³ al aumentar la relación A/C como se aprecia en la gráfica N^o5. Como era de esperarse la **absorción** aumenta conforme aumenta la relación A/C, como se aprecia en la tabla IX. Para morteros con A/C de 0.35, la absorción fue del 5.2%, mientras que para el mortero con A/C, de 0.65 fue del 6.7%.

En cuanto a la **permeabilidad al agua**, en los morteros sin carbonatar el coeficiente de permeabilidad (Darcy) aumenta al aumentar la relación A/C, como era de esperarse, ya que el concreto es menos denso, sin embargo, comparando los resultados con los morteros sin ceniza obtenidos en la tesis del Ing. A. Durán, la permeabilidad de los morteros fabricados con la misma relación A/C disminuye en aproximadamente un 10^o o, como se puede apreciar en la gráfica N^o6, demostrando con esto un efecto benéfico de la ceniza volante.

La gráfica N^o7 presenta el **pH** de morteros no carbonatados y de los carbonatados. Al aplicar el proceso acelerado de carbonatación, para un mismo tiempo de exposición, la tendencia de los morteros es disminuir el pH, conforme se incrementa la relación A/C, esto se debe a las diferencias de los consumos de cemento (tabla VIII), ya que en el caso de morteros con relaciones A/C altas, es menor el consumo de cemento; por lo tanto, hay menor cantidad generada de hidróxidos y la estructura de los poros es más abierta, facilitando la difusión del CO₂ y, por lo tanto, la carbonatación (tabla XV). Este fenómeno se observa en relación inversa, para los morteros con relaciones A/C bajas. Al

comparar los resultados de los morteros con ceniza volante y sin ceniza para el mismo tiempo y condiciones de carbonatación, al utilizar la ceniza volante **el avance de la carbonatación es menor** variando para relaciones A/C tan bajas como 0.35 de ser prácticamente igual a ir incrementando progresivamente, al aumentar la relación A/C.

Los **análisis porosimétricos** realizados a los morteros no carbonatados y a los carbonatados, para las cuatro relaciones A/C, con y sin ceniza, se muestran en las gráficas de la N°8 a la 11, en éstas podemos observar el comportamiento del mercurio en los poros para los ciclos de intrusión y extrusión. Al analizar los resultados para el caso de los morteros con ceniza, se aprecia **una reducción** en la porosidad, por efecto de la carbonatación, de un 3.5 a un 7.7%, al ir aumentando la relación A/C, ya que el CO₂ reacciona con el hidróxido de calcio y forma carbonatos de calcio que ocupan mayor volumen que el hidroxido, reduciendo por consiguiente la porosidad. Para los morteros sin ceniza la reducción varió de 7.4 a un 3.1% respectivamente. En el caso de la distribución del radio promedio del poro por intervalos, tanto para morteros no carbonatados como carbonatados, predominan los macro y mesoporos, conforme se aumenta la relación A/C tiende a disminuir los mesoporos y aumentar los macroporos, esto es comprensible ya que la estructura interna es más débil para relaciones A/C mayores, el comportamiento fue muy similar para los morteros sin ceniza.

Las relaciones entre la porosidad total, tanto para morteros no carbonatados, como carbonatados, con y sin ceniza, para las diversas relaciones A/C, las podemos visualizar en la grafica N°12, en la cual apreciamos que los morteros con ceniza sin carbonatar presentan un incremento en la porosidad, que varía de un 15.6 %, para la relación A/C de 0.35 a un 24.3 % para la relación A/C de 0.65, y al carbonatarse estos valores son reducidos a 12.1 y 16.6% respectivamente. Para el caso de los morteros sin ceniza y sin carbonatar se presenta un incremento en la porosidad, variando de un 13.2 % para la relacion A/C de 0.35 a un 17.4 % para la relación A/C de 0.65, y al carbonatarse estos valores son reducidos a 5.8 y a 14.3% respectivamente.

El comportamiento del mercurio en la etapa de descarga de los análisis porosimétricos realizados a los morteros en estudio muestran que los poros pueden ser clasificados como **cilíndricos**, por lo que hay que alimentar con este parámetro al software Milestone 200, para que realice los cálculos de la **superficie específica** de acuerdo con este modelo matemático. Cabe mencionar que se pueden realizar los análisis y después de observar la gráfica, cambiar el tipo de poro sin afectar los cálculos. En la grafica N°13 se muestra el comportamiento de la superficie específica de los poros cilíndricos, en los morteros para las diversas relaciones A/C.

8. CONCLUSIONES

MORTEROS CON CENIZA:

Los morteros con un pH inicial de aproximadamente 12.7, se sometieron a una carbonatación acelerada, el valor de pH disminuyó de entre 11.3 a 8.7 conforme aumentaba la relación A/C (disminuye el consumo de cemento). Para igual tiempo de exposición al CO₂, entre menor fue el consumo de cemento, el avance de la carbonatación fue mayor, por existir una menor cantidad de hidróxido de calcio por carbonatar. Debido a esta carbonatación, el comportamiento porosimétrico muestra la tendencia siguiente:

- Al aumentar la relación A/C de 0.35 a 0.65, la porosidad se incrementa de un 15.6 a un 24.3% (8.7%), para morteros no carbonatados, al carbonatar los morteros la porosidad disminuye de un 12.1 a un 16.6% (4.5%) respectivamente.
- Al aumentar la relación A/C de 0.35 a 0.65, el efecto de la carbonatación reduce la porosidad en un intervalo de 3.5 a 7.7% respectivamente.
- Conforme se incrementan las relaciones A/C, aumentan los porcentajes de macroporos y se disminuyen los porcentajes de mesoporos, esto es debido a que por efecto de la reacción de carbonatación, la producción de los carbonatos de calcio es mas intensa en los mesoporos y, por consiguiente, disminuyen su contribución a la porosidad total.

COMPARACIÓN DE LOS MORTEROS CON Y SIN CENIZA

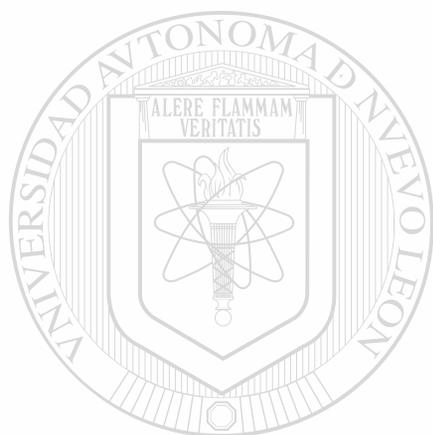
De los resultados obtenidos por el Ing. Alejandro Durán en junio de 1998, quien realizo un estudio de morteros de cemento portland sin ceniza volante y quien utilizó aproximadamente los mismos consumos de cementante total y las mismas relaciones agua – cementante que el presente trabajo, podemos concluir lo siguiente:

- En cuanto a la resistencia a la compresión, no se observan diferencias importantes a los 28 días, considerando que se sustituyó un 25 % de cemento por ceniza volante, lo cual confirma la potencialidad sustitutiva de esta puzolana.
- En la tabla XX se aprecia un cuadro comparativo de los dos estudios para los análisis porosimétricos. Para las cuatro relaciones A/C los morteros con ceniza presentaron un incremento en la porosidad total en un intervalo de 2.3 a 6.9% con respecto a los morteros que solo contienen cemento portland, cabe mencionar que la disminución en la porosidad total al carbonatarse los morteros con ceniza fue muy importante ya que la porosidad inicial fue relativamente alta, porque se iniciaba la reacción puzolanica.
- En lo que respecta al radio promedio de los poros, los porcentajes presentes de ultramacroporos, macroporos y mesoporos, permanecieron en porcentajes muy similares al carbonatarse.
- Como los morteros, en ambos estudios, fueron sometidos a las mismas condiciones de humedad y temperatura, podemos comparar las velocidades de carbonatación, utilizando para esto los resultados del pH (reducción en la alcalinidad) en ambos tipos de morteros. Los resultados indican, de acuerdo con la tabla XII, que en los morteros

que contienen ceniza volante, la velocidad es más lenta que para los morteros que sólo contienen cemento portland.

Los poros predominantes de los morteros se encuentran en un intervalo clasificado como “capilares”, sobre todo en aquellos con altas relaciones A/C. Al presentarse el fenómeno de carbonatación, se aumentará la formación de éstos así como su interconexión (red capilar) permitiendo el acceso, cada vez con mayor facilidad, de los agentes nocivos y propiciadores de baja durabilidad, tales como: la humedad, el oxígeno, etc.

La carbonatación produce carbonatos que son insolubles y reducen la porosidad, aumentando, por consiguiente, la resistencia del concreto; sin embargo, si la concentración de CO_2 aumenta, éste creará un desequilibrio químico, formando bicarbonatos de pH neutro, los cuales reducen la alcalinidad; además, éstos son solubles y pueden ser lixiviados, ampliando los poros y las microgrietas



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

9. RECOMENDACIONES

Para lograr un **concreto durable**, es necesario diseñar adecuadamente las mezclas de concreto y seleccionar los materiales apropiados; lo anterior, es función de las condiciones de **exposición ambiental**, en las cuales trabajará la estructura. La utilización de relaciones A/C menores a 0.50 y la **utilización de complementos cementantes**, como **la ceniza volante**, ayudan de manera significativa a reducir la velocidad de carbonatación y, dado, su efecto puzolánico a más de 28 días con un buen curado, pueden reducir también la porosidad y la permeabilidad del concreto, aumentando por consiguiente su vida útil; además, la ceniza es un contaminante que aparte de disminuir el costo de producción del concreto, ofrece en este uso una forma de controlar su disposición.

El ingreso de CO_2 al interior de **concretos nuevos** se puede evitar, al utilizar una membrana de recubrimiento de baja transmisión de vapor, en la superficie externa del elemento; sobre todo en los lugares con mayor concentración de CO_2 , como los estacionamientos cubiertos o las zonas industriales donde se presenten combustiones; sin embargo, el costo de estas membranas es alto y requiere de mantenimiento periódico, lo cual no se acostumbra en nuestro medio.

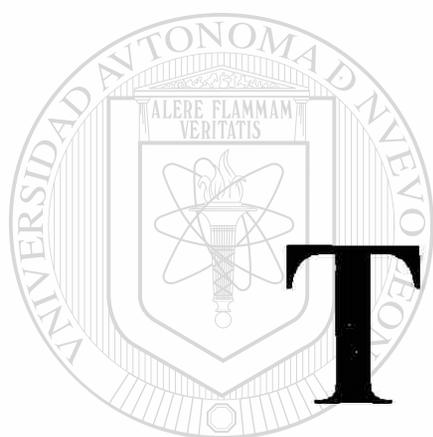
Si ya dio inicio la corrosión del acero y se aprecian botaduras, se puede reparar el área dañada sustituyendo el concreto por un **mortero adecuado**, en la zona carbonatada y 3cm mas allá del acero, y colocando posteriormente una membrana protectora.

En **concretos con grietas**, la carbonatación puede penetrar relativamente rápido en los alrededores de la misma (foto N°18) y si ésta llega al acero de refuerzo, comenzara una corrosion local, por lo que es de suma importancia sellar las grietas con membranas elastomericas, para detener el ingreso de las sustancias agresivas.

Hoy en día, y de acuerdo con investigaciones recientes, se están utilizando con éxito técnicas electroquímicas para transportar álcalis al interior de la zona carbonatada, para con esto, **realcalinizar el concreto**. En este proceso se utiliza una pasta alcalina en la superficie del concreto por realcalinizar, una malla de acero, que es conectada eléctricamente al acero de refuerzo; y, mediante la inyección de un flujo de corriente directa, se conducen los iones alcalinos, de la superficie al interior del concreto. Este proceso puede tomar días o semanas para completar el proceso de realcalinizado.

BIBLIOGRAFÍA

1. Burns, R. A. (1996). *Fundamentos de química*. New York. Prentice Hall: p. 344.
2. “Desentrañando el enigma del clima”. (1998). *National Geographic*. Vol. 2: 5: p. 47.
3. Wark, K., Warner, C. F. *Contaminación del aire*. México Limusa: 392-393. (1997).
4. Mehta, P. K., Monteiro, P. J. M. *Concrete*. (1993). New York, Prentice Hall: 1-16
5. Montañini, R. “Concretes forgotten enemy.” *Concrete Repair Digest*. 330-333. (December 1995/January 1996).
6. Acevedo, C. (1986) *Materiales de construcción*. Cuba: 274-281.
7. ACI Committee 201. *Guide to durable concrete*. ACI Manual of Concrete Practice. Part 1: 201.2R-1 – 201.2R-41. (1998).
8. Davis, H., Rothwell, G. W. (1989). *The effectiveness of surface coating in reducing carbonation of reinforced concrete*. BRE Information.
9. Whiting, D., Walitte, A. (Editores). (1988). *Permeability of concrete*. SP-108 ACI: 2-12.
10. Neville, A. M. (1995). *Properties of concrete*. Longman: 490-495.
11. Powers, T. C., Brownyard, T. L. *Studies of the physical properties of hardened portland cement paste. Part VII*. Proceeding ACI Journal. Vol. 43: 933-992. (1947).
12. Carlo Erba Instruments. *Instruction Manual: Porosimeter 2000 Series*. (1989).
13. Wesche, K. *Fly ash in concrete*. RILEM Report 7: 1-2. (1989).



Tablas

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



TABLA No. I**DATOS ESTADISTICOS SOBRE LAS CONDICIONES
AMBIENTALES DE NUEVO LEÓN EN 1997**

MES	TS	TMAX	TMIN	HR	PPN	EVA
ENERO	13.5	19.7	8.5	71.1	0.4	2.56
FEBRERO	15.9	22.0	11.1	75.0	1.0	2.90
MARZO	20.6	27.2	15.3	74.0	3.0	4.40
ABRIL	20.4	26.2	15.5	76.4	3.6	4.30
MAYO	24.8	30.8	19.5	76.1	3.3	5.51
JUNIO	27.4	33.6	22.5	77.1	2.0	5.69
JULIO	29.4	37.0	23.3	63.0	0.2	8.22
AGOSTO	30.0	37.7	23.4	60.0	0.0	8.40
SEPTIEMBRE	27.7	34.7	21.9	65.0	2.4	6.49
OCTUBRE	22.4	27.9	17.3	74.7	4.9	4.00
NOVIEMBRE	17.4	22.9	13.2	78.9	1.0	2.21
DICIEMBRE	14.5	20.6	9.4	66.1	0.2	2.44
PROMEDIO	22.0	28.4	16.7	71.5	1.8	4.76

DONDE:

TS	Temperatura ambiente °C
Tmax	Temperatura máxima °C
Tmin	Temperatura mínima °C
HR	Humedad Relativa %
PPN	Precipitación, mm
EVA	Evaporación, mm

FUENTE: Observatorio Meteorológico Monterrey.

TABLA No. II

**CONCENTRACIONES DE MONÓXIDO DE CARBONO (CO)
EN EL ÁREA METROPOLITANA DE MONTERREY (ppm)**

AÑO	MES	SE	SO	CE	NE	NO	PROMEDIO
1996	ENERO	1.53	1.59	1.85	1.87	1.24	1.62
	FEBRERO	1.06	1.43	1.49	1.30	1.01	1.26
	MARZO	0.57	0.90	0.94	0.68	0.66	0.75
	ABRIL	0.63	0.82	0.94	0.77	0.65	0.76
	MAYO	0.47	0.87	0.90	0.67	0.67	0.72
	JUNIO	0.46	0.69	0.74	0.57	0.52	0.60
	JULIO	0.60	0.73	0.85	0.58	0.54	0.66
	AGOSTO	0.68	0.78	0.86	0.66	0.57	0.71
	SEPTIEMBRE	0.84	0.87	1.04	0.88	0.69	0.86
	OCTUBRE	1.12	1.17	1.25	1.06	0.73	1.07
	NOVIEMBRE	1.14	1.43	1.50	1.14	0.96	1.23
	DICIEMBRE	1.72	2.00	2.02	2.17	1.47	1.88
1997	ENERO	1.34	1.68	1.65	1.63	1.15	1.49
	FEBRERO	0.98	1.19	1.21	1.17	0.90	1.09
	MARZO	1.05	1.20	1.19	1.02	0.83	1.06
	ABRIL	1.01	1.23	1.23	1.04	0.76	1.05
	MAYO	0.98	1.01	0.92	0.87	0.72	0.90
	JUNIO	0.79	1.00	0.89	0.76	0.65	0.82
	JULIO	0.44	0.72	0.73	0.58	0.48	0.59
	AGOSTO	0.48	0.80	0.71	0.60	0.48	0.61
	SEPTIEMBRE	0.67	1.01	0.87	0.72	0.62	0.78
	OCTUBRE	0.92	1.23	1.18	1.17	0.83	1.07
	NOVIEMBRE	1.16	1.70	1.64	1.38	1.10	1.40
	DICIEMBRE	1.07	1.49	1.48	1.57	1.04	1.33
1998	ENERO	1.15	1.57	1.50	1.66	1.11	1.40
	FEBRERO	---	1.11	1.34	1.09	1.10	1.16
	MARZO	---	0.99	0.97	0.93	0.72	0.90
	ABRIL	---	0.87	0.79	0.77	0.68	0.78

DONDE:

SE Sureste
 SO Suroeste
 CE Centro
 NE Noreste
 NO Noroeste

FUENTE: SIMA (Sistema Integral de Monitoreo Ambiental)

TABLA No. III

PROPIEDADES FÍSICAS DEL CEMENTO

CEMENTO			
Marca		Monterrey	Especificación ASTM C 150-97
Tipo		Portland I	
Peso Volumétrico seco suelto kg/m^3		1250	
Densidad		3.09	
Blaine m^2/kg		360	Min. 280
Tiempos de Fraguado Vicat	Inicial, minutos	96	< 45
	Final, minutos	171	> 375
Resistencia a la Compresión	1 día, MPa (kgf/cm^2)	6.5 (67)	
	3 días, MPa (kgf/cm^2)	19.6 (200)	12.0 (122)
	7 días, MPa (kgf/cm^2)	20.8 (212)	19.0 (194)
	28 días, MPa (kgf/cm^2)	28.4 (289)	
	56 días, MPa (kgf/cm^2)	35.9 (367)	

TABLA No. IV

PROPIEDADES FÍSICAS DE LA CENIZA VOLANTE

CENIZA VOLANTE			
		Especificación ASTM C 618-97	
Tipo			F
Procedencia			Micare
Peso Volumétrico seco suelto kg/m ³			822
Densidad			2.34
Blaine m ² /kg			440
Fineza (malla # 325), % que pasa			5
Absorción %			23.9
Indice de actividad a la Resistencia	% 7 días	76 % ♣	Min. 75%
	% 28 días	84 % ♣	Min. 75%

♣ Porcentaje con respecto a la mezcla de control

TABLA No. V

COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CEMENTO

ANÁLISIS QUÍMICO DEL CEMENTO			
PARÁMETRO	FÓRMULA QUÍMICA	%	ESPECIFICACION ASTM C 150
Dióxido de Silicio	SiO ₂	20.50	
Oxido de Aluminio	Al ₂ O ₃	4.70	
Oxido de Hierro	Fe ₂ O ₃	2.10	
Oxido de Calcio	CaO	64.20	
Oxido de Magnesio	MgO	1.70	MAX. 6.0
Anhidrido Sulfúrico	SO ₃	3.10	MAX. 3.0
Oxido de Sodio	Na ₂ O	0.17	
Oxido de Potasio	K ₂ O	0.77	
Oxido de Titanio	TiO ₂	0.19	
Pantóxido de Fósforo	P ₂ O ₅	0.09	
Oxido de Manganeseo	Mn ₂ O ₃	0.04	
Perdida por Ignición		2.40	MAX. 3.0
S U M A		100	®
Cal Libre	CaO Libre	0.70	
Residuo Insoluble		0.33	MAX. 0.75
Alcalis Totales como Na ₂ O		0.68	MAX. 0.60 *
COMPUESTOS POTENCIALES			
Silicato Tricálcico	C ₃ S	61.80	
Silicato Dicálcico	C ₂ S	12.50	
Aluminato Tricálcico	C ₃ A	8.90	
Aluminoferrito Tetracálcico	C ₄ AF	6.40	

* Requerimiento Químico Opcional

TABLA No. VI

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LA CENIZA VOLANTE

ANÁLISIS QUÍMICO DE LA CENIZA VOLANTE			
PARÁMETRO	FÓRMULA QUÍMICA	%	ESPECIFICACIÓN ASTM C 618 Tipo F
Dióxido de Silicio	SiO_2	60.10	
Oxido de Aluminio	Al_2O_3	27.80	
Oxido de Hierro	Fe_2O_3	4.60	
S U M A	$SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$	92.50	Min. 70 %
Oxido de Calcio	CaO	1.85	
Oxido de Magnesio	MgO	0.65	
Anhidrido Sulfúrico	SO_3	0.90	MAX. 5.0
Oxido de Sodio	Na_2O	0.55	
Oxido de Potasio	K_2O	0.80	
Oxido de Titanio	TiO_2	0.95	
Pentóxido de Fosforo	P_2O_5	0.25	
Perdida por Ignición		1.55	MAX. 6.0
S U M A		100	
Alcalis Totales como Na_2O		1.08	MAX. 1.5 *

* Requerimiento Químico Opcional

TABLA No. VII

PROPIEDADES FÍSICAS DEL AGREGADO FINO

PROPIEDADES FÍSICAS	
Clasificación Petrográfica	Caliza Triturada
Procedencia	Cerro de Las Mitras, Monterrey.
Peso Volumétrico Seco Suelto kg/m ³	1,560
Densidad Seca	2.64
Absorción, %	0.9
GRANULOMETRÍA	
TAMIZ o MALLA	% QUE PASA
3/8"	100
#4	98
#8	90
#16	68
#30	43
#50	20
#100	6

TABLA No. VIII

CANTIDADES EMPLEADAS EN kg PARA PRODUCIR UN m³ DE MORTERO, SUSTITUYENDO EL 25 % EN PESO DE CEMENTO PORTLAND POR CENIZA VOLANTE PARA LAS CUATRO RELACIONES AGUA/CEMENTANTE EMPLEADAS

INGREDIENTE	RELACIÓN			
	0.35 kg/m ³	0.45 kg/m ³	0.55 kg/m ³	0.65 kg/m ³
AGUA	273	232	232	247
REACCIÓN				
ABSORCIÓN	10.2	13.1	13.6	13.7
CEMENTO (75%)	585	387	316	286
CENIZA VOLANTE TIPO "F" (25%)	195	129	105	95
CEMENTANTE TOTAL	780	516	421	381
AGREGADO FINO	1135	1455	1515	1521
% AIRE ATRAPADO	2.5	3.7	4.7	4.3
% DE PASTA	48.1	34.0	30.1	29.2

NOTA: En los presentes proporcionamientos los agregados se consideraron secos, por lo que al momento de la revoltura se adicionó el agua de absorción correspondiente. Para los cuatro proporcionamientos el minirevenimiento medido fue de 5.0 cm.

Las mezclas se realizaron bajo condiciones de humedad y temperaturas controladas conforme a ASTM

TABLA No. IX

PROPIEDADES DEL MORTERO EN ESTADO FRESCO				
PROPIEDAD	RELACION AGUA/CEMENTANTE			
	0.35	0.45	0.55	0.65
MiniRevenimiento	5.0	5.0	5.0	5.0
Aire Atrapado, %	2.5	3.7	4.7	4.3
PROPIEDADES DEL MORTERO ENDURECIDO				
PROPIEDAD	RELACION AGUA/CEMENTANTE			
	0.35	0.45	0.55	0.65
Absorción, %	5.2	6.2	6.5	6.7
Peso Volumétrico Saturado Superficialmente Seco, kg/m ³	2184	2201	2171	2152
Resistencia a la Compresión a los 28 días de edad, MPa (kgf/cm ²)*	58.4 (596)	40.6 (414)	34.7 (354)	27.9 (285)

* En cilindros de 10 cm de diámetro

TABLA No. X
RELACIONES ENTRE MATERIALES Y RESULTADOS DE COMPRESIÓN

SERIE	A/C	A/Ce	a/C	Ce/Cv	σ (kg/cm ²)/kg de C	σ (kg/cm ²)/kg de Ce
1	0.35	0.47	1.46	3	0.76	1.02
2	0.45	0.60	2.82	3	0.80	1.07
3	0.55	0.73	3.60	3	0.84	1.12
4	0.65	0.86	3.99	3	0.75	1.00

DONDE :

- A** AGUA
- a** AGREGADO FINO
- C** CEMENTANTE (Ce + Cv)
- Ce** CEMENTO PORTLAND
- Cv** CENIZA VOLANTE DE MICARE
- σ** ESFUERZO DE COMPRESIÓN DEL MORTERO A LOS 28 DÍAS DE EDAD

TABLA No. XI
COEFICIENTES DE PERMEABILIDAD AL AGUA (K)
PARA MORTEROS NO CARBONATADOS

RELACIÓN A/C	G A J O	K (cm/s)	
		INDIVIDUAL	PROMEDIO
0.35	SUPERIOR	0.108×10^{-10}	0.08×10^{-10}
	MED-SUP	0.089×10^{-10}	
	MED-INF	0.075×10^{-10}	
	INFERIOR	0.048×10^{-10}	
0.45	SUPERIOR	0.98×10^{-10}	0.73×10^{-10}
	MED-SUP	0.85×10^{-10}	
	MED-INF	0.59×10^{-10}	
	INFERIOR	0.50×10^{-10}	
0.55	SUPERIOR	2.0×10^{-10}	1.2×10^{-10}
	MED-SUP	1.3×10^{-10}	
	MED-INF	0.9×10^{-10}	
	INFERIOR	0.6×10^{-10}	
0.65	SUPERIOR	11.0×10^{-10}	9.0×10^{-10}
	MED-SUP	9.5×10^{-10}	
	MED-INF	8.2×10^{-10}	
	INFERIOR	7.3×10^{-10}	

Estas pruebas se realizaron con una presión promedio de agua sobre los morteros de 30 bares y durante 24 horas

TABLA No. XII

**POTENCIAL DE HIDROGENO (pH)
DE MORTEROS CARBONATADOS Y NO CARBONATADOS
PARA LAS CUATRO DIFERENTES RELACIONES AGUA/CEMENTANTE.**

RELACIÓN A / C	CONSUMO DE CEMENTO kg/m ³	pH *	
		MORTERO NO CARBONATADO	MORTERO CARBONATADO Δ
0.35	585	12.7	11.3
0.45	387	12.7	10.3
0.55	316	12.6	9.9
0.65	286	12.7	8.7

* Promedios de dos análisis.

Δ Mismo tiempo de curado; posteriormente carbonatados bajo las mismas condiciones.

TABLA No. XIII

RESULTADOS DE LOS ANALISIS POROSIMÉTRICOS DE MUESTRAS DE MORTEROS NO CARBONATADAS

A/C	ANÁLISIS	P T		SE m ² /g	DENSIDAD g/cm ³	RCU Å	RPP	
		mm ³ /g	%				Å	%
0.35	1	73.25	15.74	12.09	2.75	310	220	27.7
	2	73.19	15.95	11.87	2.71	380	220	27.2
	3	72.93	15.16	11.07	2.72	420	280	26.5
	PROMEDIO	73.12	15.62	11.68	2.73	370	240	27.1
0.45	1	75.22	17.07	9.67	2.74	500	370	25.1
	2	79.59	17.98	10.17	2.76	500	370	23.8
	3	78.86	17.26	10.35	2.65	500	370	24.0
	PROMEDIO	77.89	17.44	10.06	2.72	500	370	24.3
0.55	1	93.78	20.06	12.19	2.67	700	370	20.0
	2	96.51	21.03	12.08	2.76	750	370	19.4
	3	89.72	19.10	10.03	2.63	800	370	20.8
	PROMEDIO	93.33	20.06	11.43	2.69	750	370	20.1
0.65	1	110.70	24.34	11.32	2.66	1100	370	21.9
	2	109.60	23.89	10.75	2.66	1150	370	20.9
	3	113.64	24.67	11.08	2.69	1250	370	22.0
	PROMEDIO	111.31	24.30	11.05	2.67	1350	370	21.6

PT = POROSIDAD TOTAL
 SE = SUPERFICIE ESPECIFICA
 RCU = RADIO CRITICO DEL UMBRAL
 RPP = RADIO PROMEDIO DEL PORO

TABLA No. XIV
RESULTADOS DE LOS ANALISIS POROSIMÉTRICOS DE MUESTRAS DE MORTEROS CARBONATADAS

A/C	ANALISIS	PT		SE	DENSIDAD	RCU	RPP	
		mm ³ /g	%				Å	%
0.35	1	54.58	12.06	3.74	2.51	1400	50	20.3
	2	53.80	12.15	3.90	2.57	1500	50	20.1
	3	52.21	12.10	3.90	2.56	1450	50	19.7
	PROMEDIO	53.53	12.10	3.85	2.55	1450	50	20.0
0.45	1	60.52	13.55	4.48	2.59	1500	150	19.8
	2	58.07	13.00	4.40	2.58	1400	200	18.2
	3	59.78	13.45	4.68	2.60	1600	200	18.4
	PROMEDIO	59.46	13.33	4.52	2.58	1500	180	18.8
0.55	1	63.76	12.49	7.76	2.63	2200	460	13.8
	2	62.85	14.64	7.86	2.73	2400	550	13.6
	3	62.95	14.50	7.81	2.70	2300	550	13.6
	PROMEDIO	63.19	13.88	7.81	2.69	2300	520	13.7
0.65	1	75.71	16.57	8.74	2.63	2900	600	9.0
	2	76.51	16.60	8.66	2.60	3100	530	11.3
	3	75.85	16.58	8.85	2.62	3000	550	10.8
	PROMEDIO	76.02	16.58	8.75	2.62	3000	560	10.4

PT = POROSIDAD TOTAL
 SE = SUPERFICIE ESPECIFICA
 RCU = RADIO CRITICO DEL UMBRAL
 RPP = RADIO PROMEDIO DEL PORO

TABLA No. XV
PROMEDIOS DE LOS ANÁLISIS POROSIMÉTRICOS

MORTERO	A/C	PT		SE M ² /g	DENSIDAD g/cm ³	RCU Å	RPP	
		mm ³ /g	%				Å	%
NO CARBONATADO	0.35	73.12	15.62	11.68	2.73	370	240	27.1
	0.45	77.89	17.44	10.06	2.72	500	370	24.3
	0.55	93.33	20.06	11.43	2.69	750	370	20.1
	0.65	111.31	24.30	11.05	2.67	1350	370	21.6
CARBONATADO	0.35	53.53	12.10	3.85	2.55	1450	50	20.0
	0.45	59.46	13.33	4.52	2.58	1500	180	18.8
	0.55	63.19	13.88	7.81	2.69	2300	520	13.7
	0.65	76.02	16.58	8.75	2.62	3000	560	10.4

PT = POROSIDAD TOTAL
SE = SUPERFICIE ESPECIFICA
RCU = RADIO CRITICO DEL UMBRAL
RPP = RADIO PROMEDIO DEL PORO

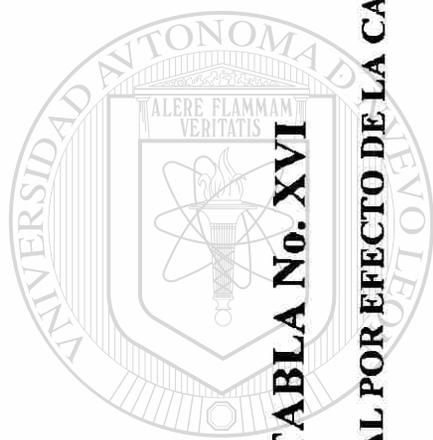


TABLA No. XVI

REDUCCIÓN EN LA POROSIDAD TOTAL POR EFECTO DE LA CARBONATACIÓN ACELERADA

A/C	POROSIDAD TOTAL		REDUCCIÓN %
	MORTERO NO CARBONATADO %	MORTERO CARBONATADO %	
0.35	15.6	12.1	3.5
0.45	17.4	13.3	4.1
0.55	20.1	13.9	6.2
0.65	24.3	16.6	7.7

TABLA No. XVII

**DISTRIBUCIÓN DEL RADIO DEL PORO POR RANGOS
EN MORTEROS NO CARBONATADOS**

A/C	ANÁLISIS	VOLUMEN TOTAL PENETRADO (mm ³ /g)	DISTRIBUCIÓN DEL RADIO DEL PORO POR RANGOS %		
			ULTRAMACROPOROS R > 75,000 Å	MACROPOROS 300 < r ≤ 75,000 Å	MESOPOROS 37 ≤ r < 300 Å
0.35	1	73.25	3	14	83
	2	73.19	3	17	80
	3	72.93	2	24	74
PROMEDIO		73.12	3	18	79
0.45	1	75.22	3	38	59
	2	79.59	3	39	58
	3	78.86	3	37	60
PROMEDIO		77.89	3	38	59
0.55	1	93.78	2	44	54
	2	96.51	2	46	52
	3	89.72	2	47	51
PROMEDIO		93.33	2	46	52
0.65	1	110.70	2	47	51
	2	109.60	2	51	47
	3	113.64	2	53	45
PROMEDIO		111.31	2	50	48

TABLA No. XVIII
DISTRIBUCIÓN DEL RADIO DEL PORO POR RANGOS
EN MORTEROS CARBONATADOS

A/C	ANÁLISIS	VOLUMEN TOTAL PENETRADO (mm ³ / g)	DISTRIBUCIÓN DEL RADIO DEL PORO POR RANGOS %		
			ULTRAMACROPOROS R > 75,000 Å	MACROPOROS 300 ≤ r ≤ 75,000 Å	MESOPOROS 37 ≤ r < 300 Å
0.35	1	54.58	5	30	65
	2	53.80	6	28	66
	3	52.21	5	32	63
PROMEDIO		53.53	5	30	65
0.45	1	60.52	6	38	56
	2	58.07	6	36	58
	3	59.78	5	40	55
PROMEDIO		59.46	6	38	56
0.55	1	63.76	6	50	44
	2	62.85	7	53	40
	3	62.95	6	51	43
PROMEDIO		63.19	6	51	43
0.65	1	75.71	6	59	35
	2	76.51	6	57	37
	3	76.85	6	59	35
PROMEDIO		76.02	6	58	36

TABLA No. XIX
PROMEDIOS DE LA DISTRIBUCIÓN DEL RADIO DEL PORO POR RANGOS

MORTEROS	A/C	VOLUMEN TOTAL PENETRADO (mm ³ /g)	D (%)	DISTRIBUCIÓN DEL RADIO DEL PORO POR RANGOS %		
				ULTRAMACROPOROS r > 75,000 Å	MACROPOROS 300 < r ≤ 75,000 Å	MESOPOROS 37 ≤ r < 300 Å
NO CARBONATADO	0.35	73.12	---	3	18	79
	0.45	77.89	7	3	38	59
	0.55	93.33	28	2	46	52
	0.65	111.31	52	2	50	48
CARBONATADO	0.35	53.53	---	5	30	65
	0.45	59.46	11	6	38	56
	0.55	63.19	18	6	51	43
	0.65	76.02	42	6	58	36

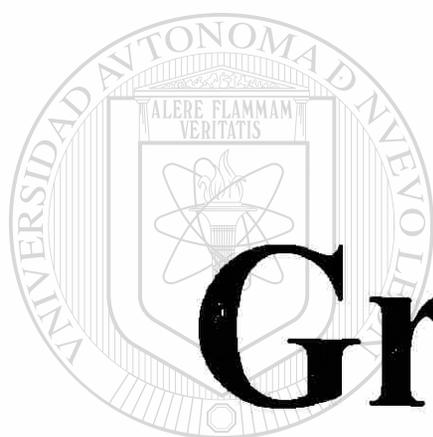
D = Diferencia en la porosidad total con relación a la obtenida para el promedio de los análisis de la relación agua/cementante de 0.35, tanto para morteros no carbonatados como para carbonatados.

TABLA No. XX

RELACION DE LOS ANÁLISIS POROSIMÉTRICOS DE MORTEROS NO CARBONATADOS Y CARBONATADOS CON Y SIN CENIZA VOLANTE TIPO "F" DE MICARE

	pH *	A/Cemento	POROSIDAD TOTAL		REDUCCIÓN %
			MORTERO NO CARBONATADO %	MORTERO CARBONATADO %	
Sin ♦ Ceniza	11.3	0.35	13.2	5.8	7.4
	9.0	0.45	14.5	8.5	6.0
	8.5	0.55	14.4	11.3	3.6
	8.1	0.65	17.4	14.3	3.1
	pH*	A/Cementante	%	%	%
Con Ceniza	11.3	0.35	15.6	12.1	3.5
	10.3	0.45	17.4	13.3	4.1
	9.9	0.55	20.1	13.9	6.2
	8.7	0.65	24.3	16.6	7.7

- Morteros Carbonatados
- ♦ A. DURÁN

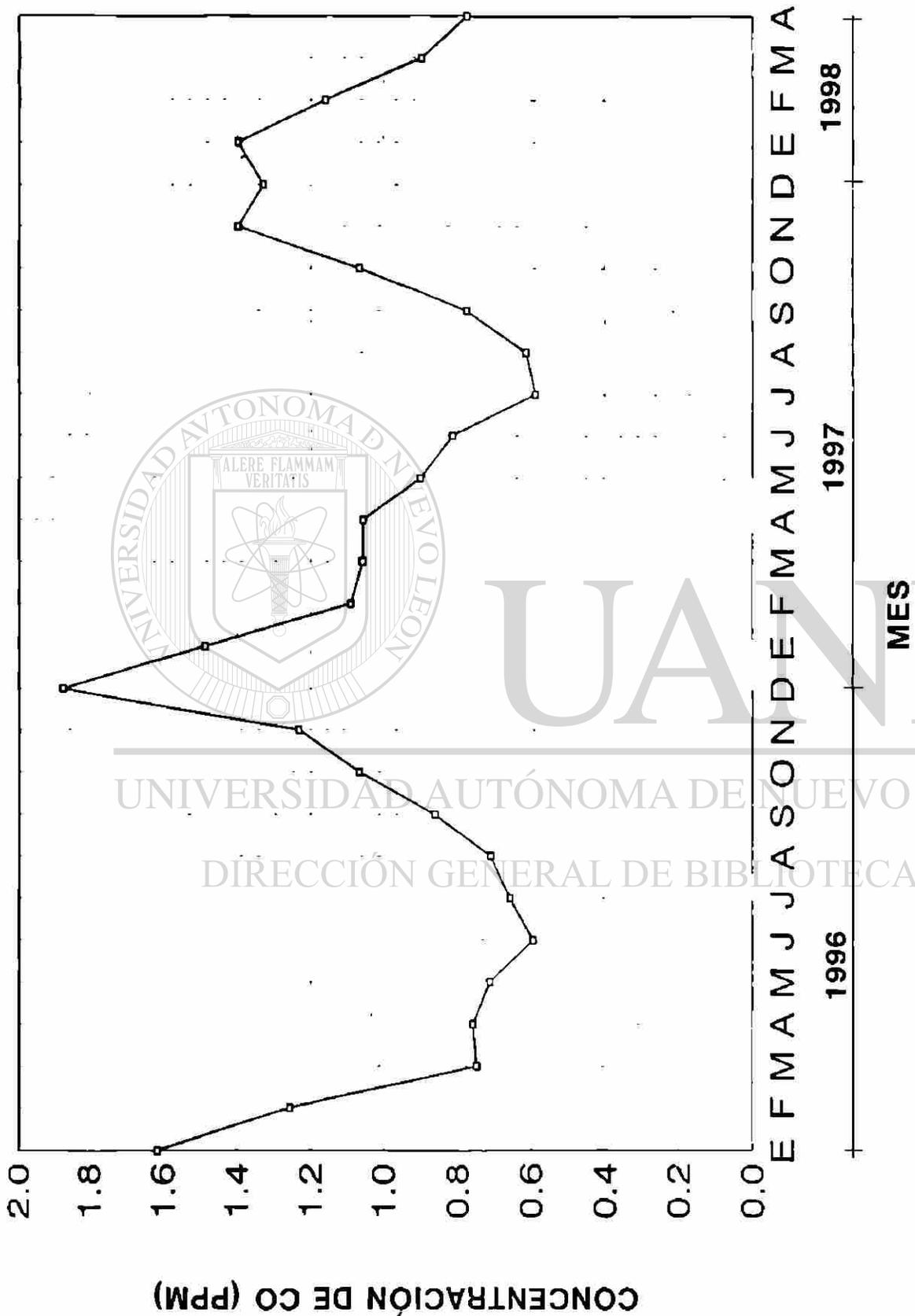


Gráficas

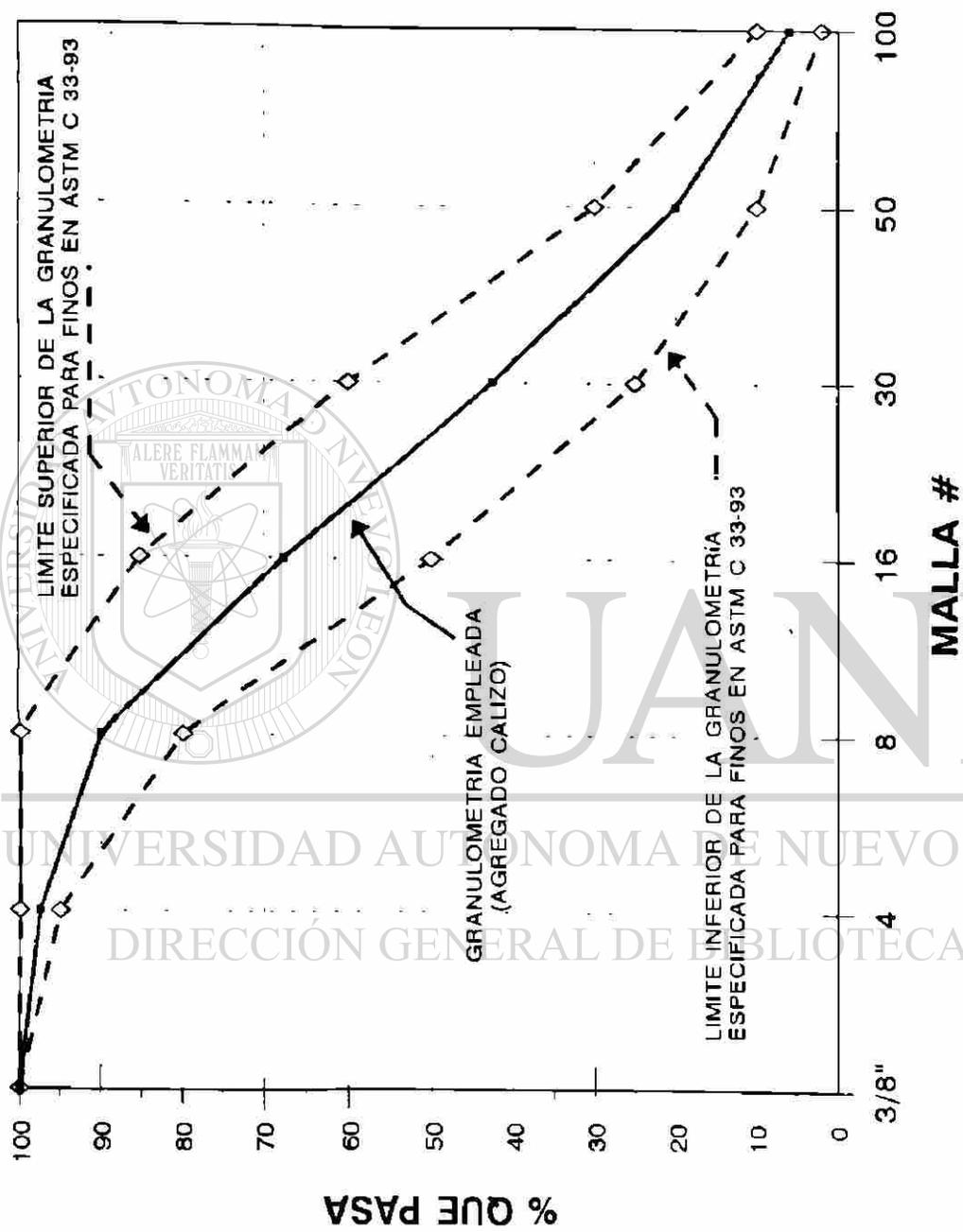
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

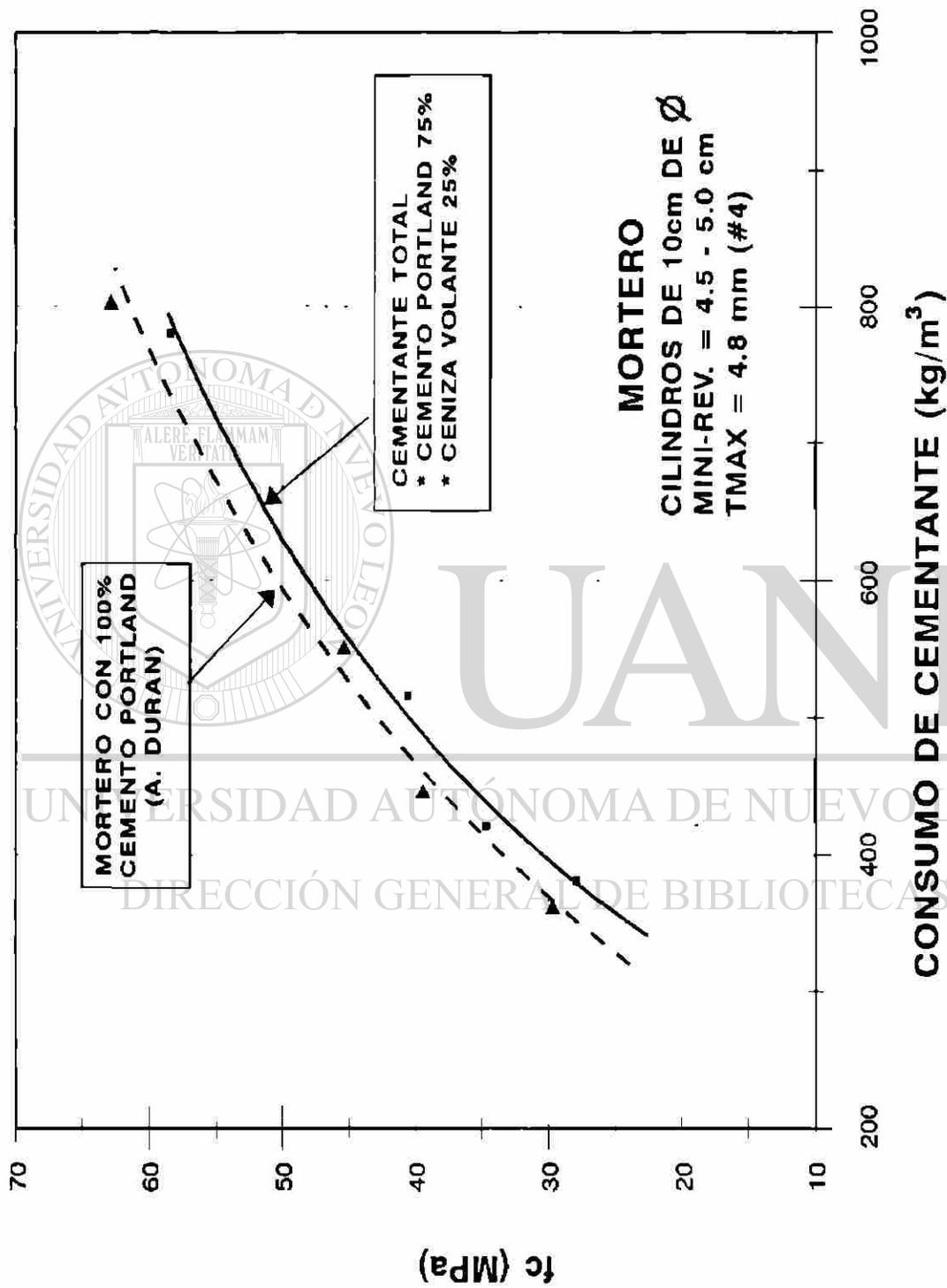




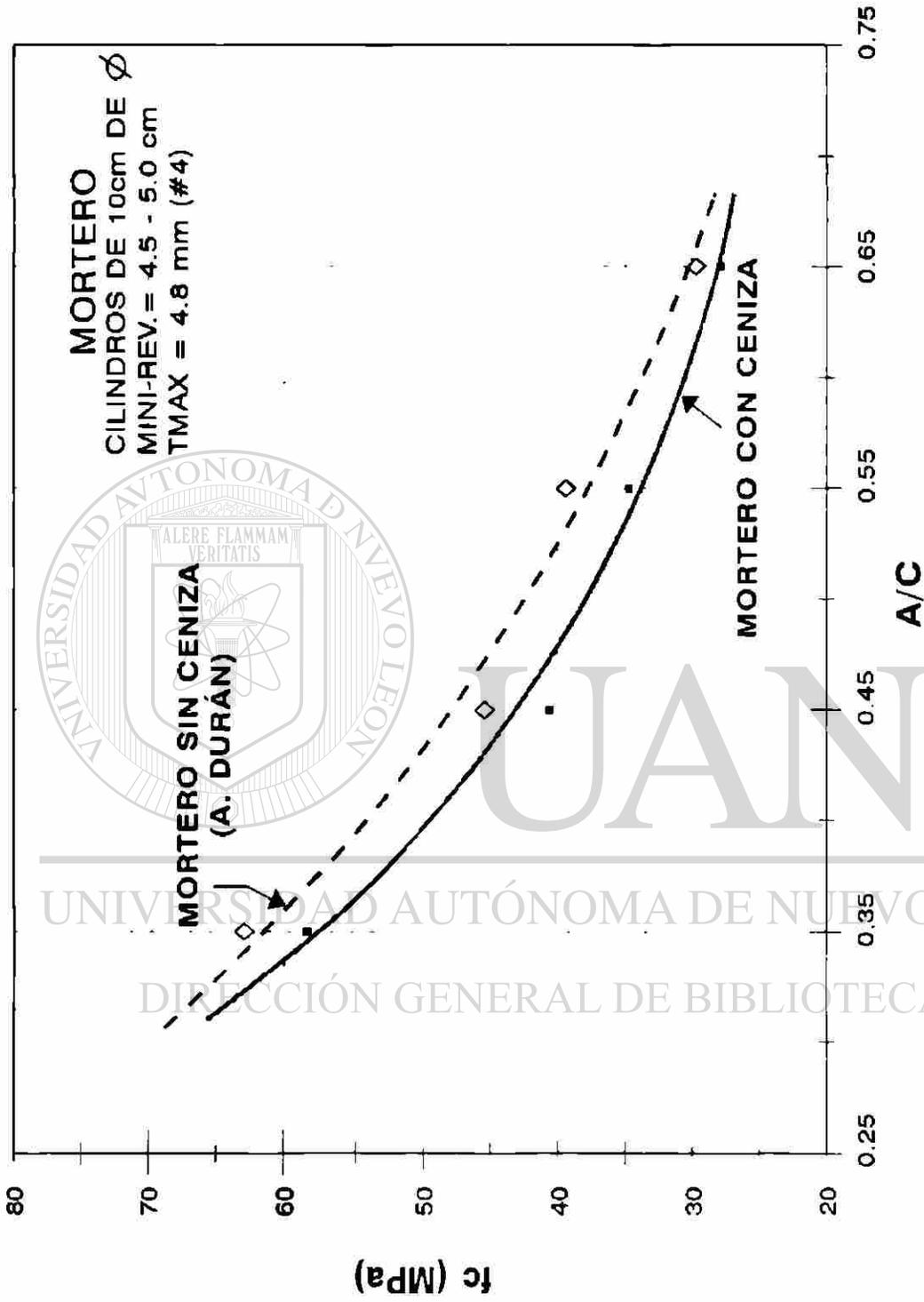
GRÁFICA 1.- CONCENTRACIÓN DE CO EN LA ZONA METROPOLITANA DE MONTERREY, N.L.



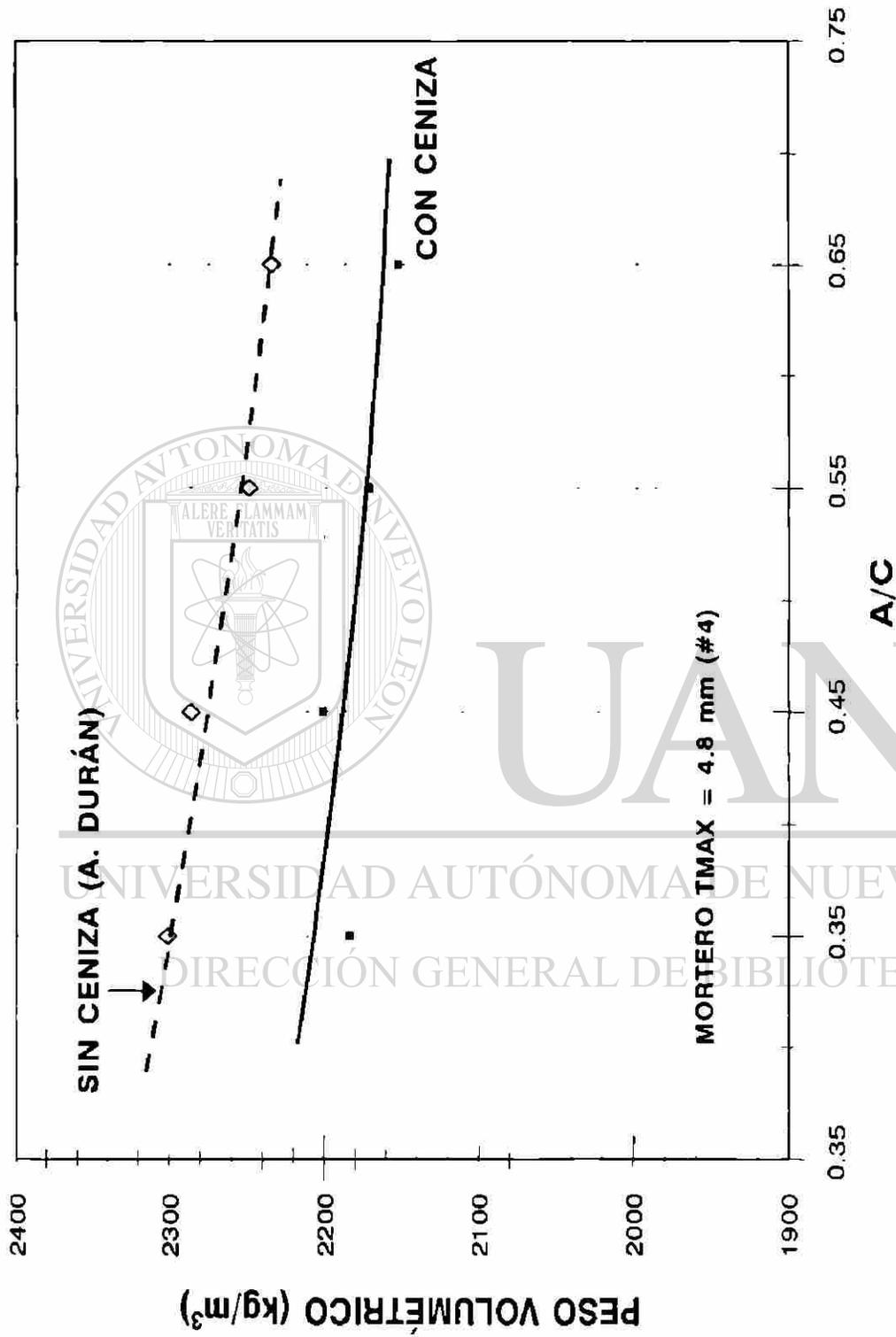
GRÁFICA 2.- GRANULOMETRÍA DEL AGREGADO EMPLEADO DETERMINADA DE ACUERDO A ASTM C 136-95a



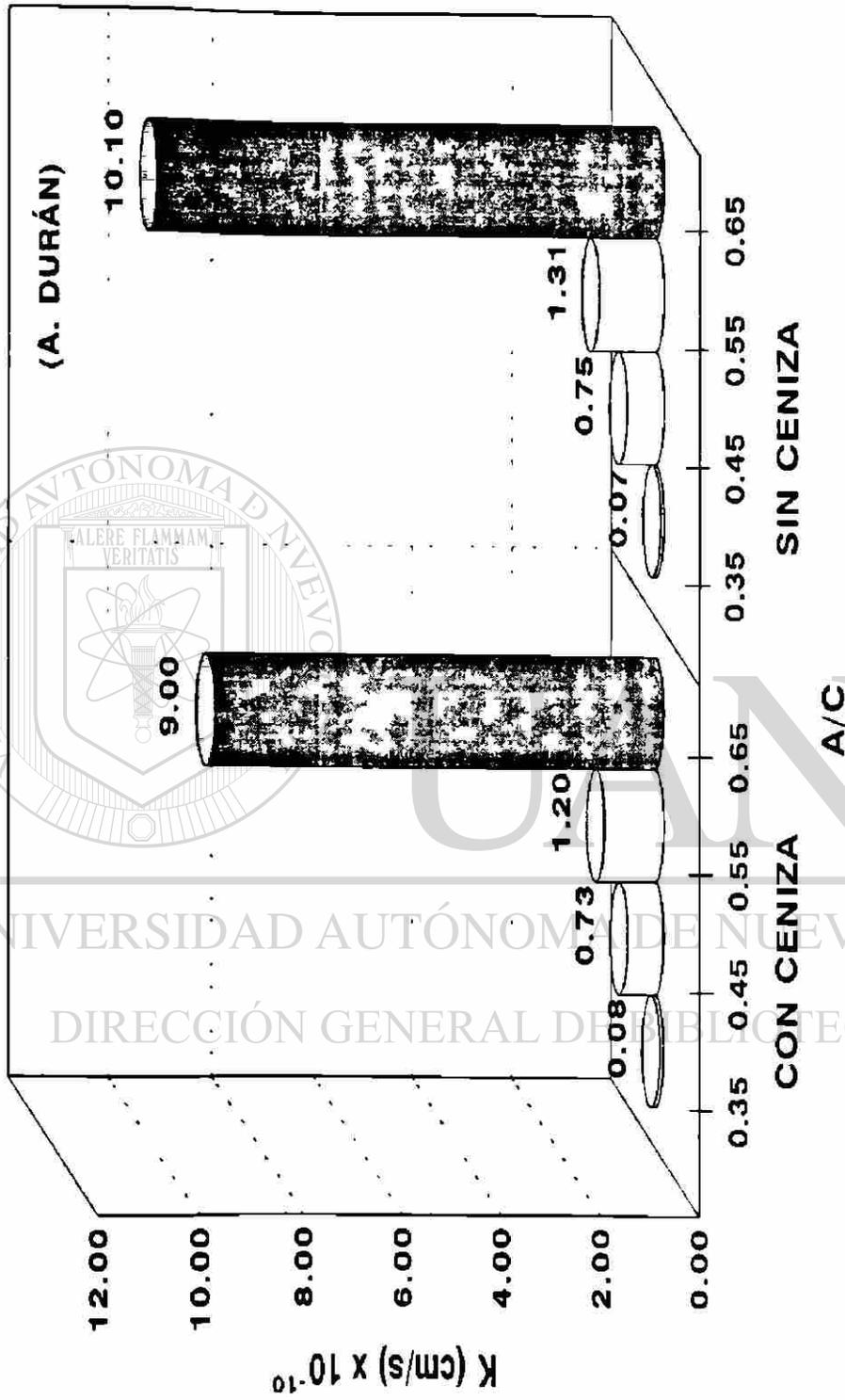
GRÁFICA 3.- CONSUMO DE CEMENTANTE Vs RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN (fc) A LOS 28 DÍAS DE EDAD



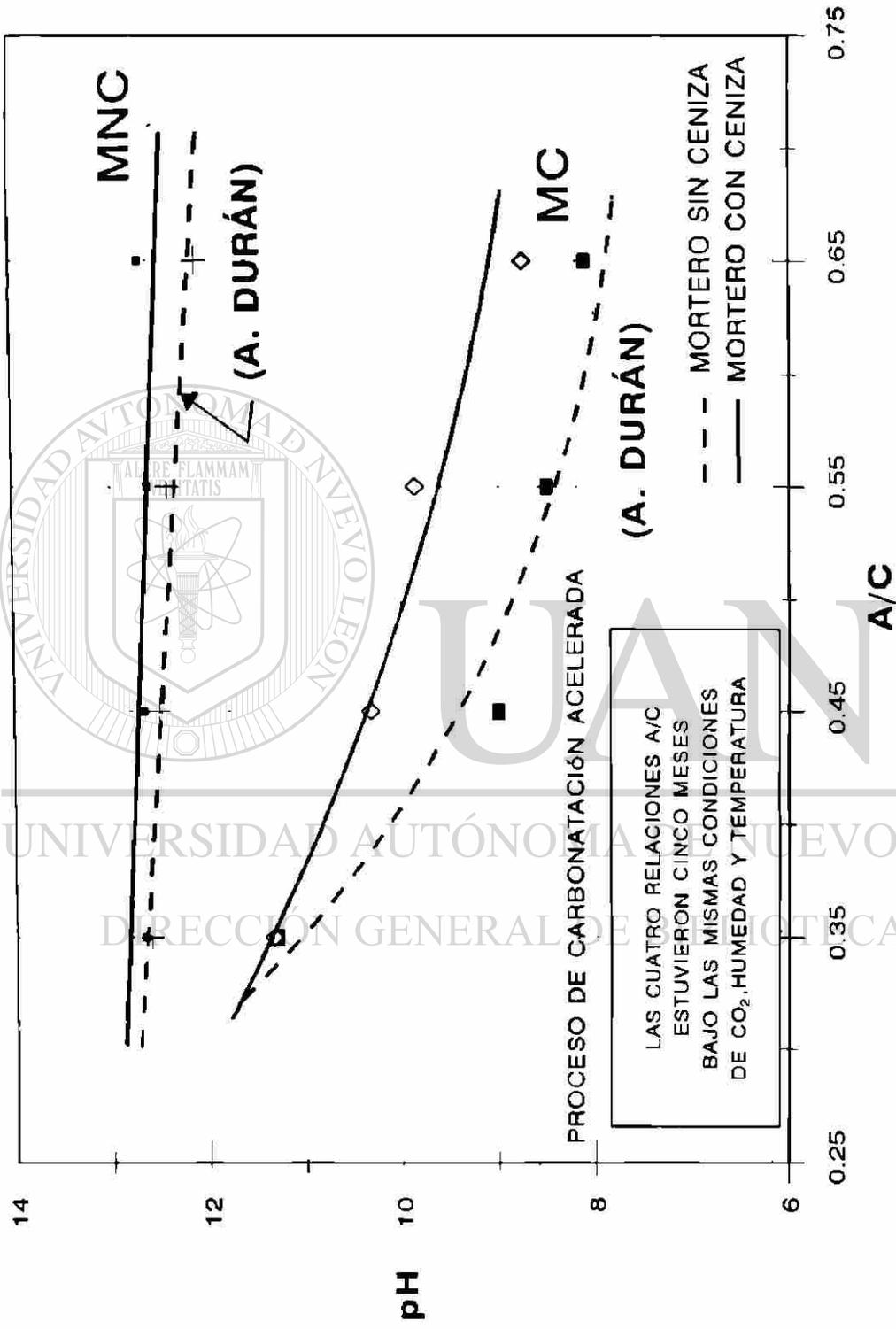
GRÁFICA 4.- RELACIÓN AGUA/CEMENTANTE (A/C) VS RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN A LOS 28 DÍAS (fc)



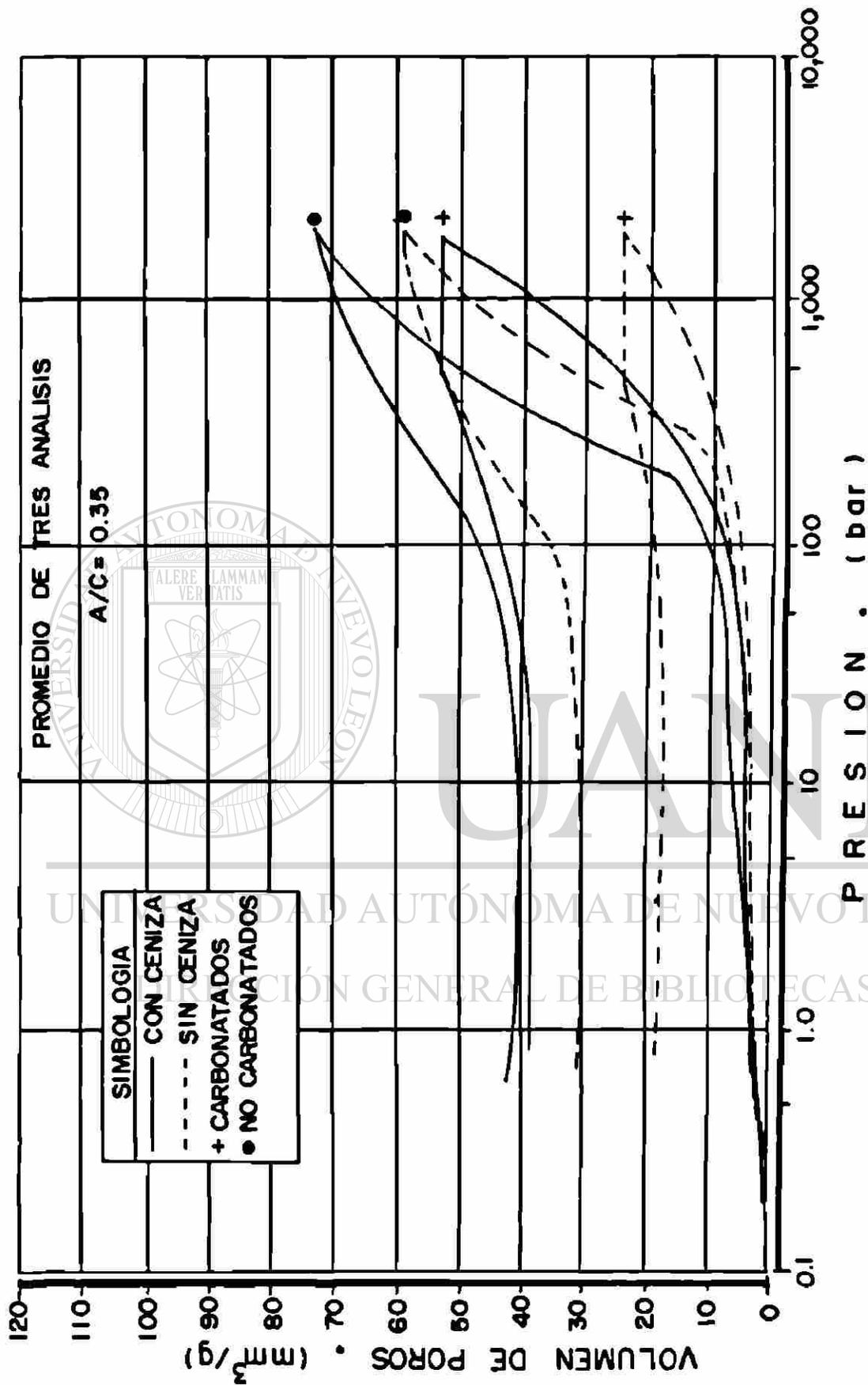
GRÁFICA 5.- RELACIÓN AGUA/CEMENTANTE (A/C) Vs PESO VOLUMÉTRICO SATURADO SUPERFICIALMENTE SECO (PVSSS) A LOS 28 DÍAS



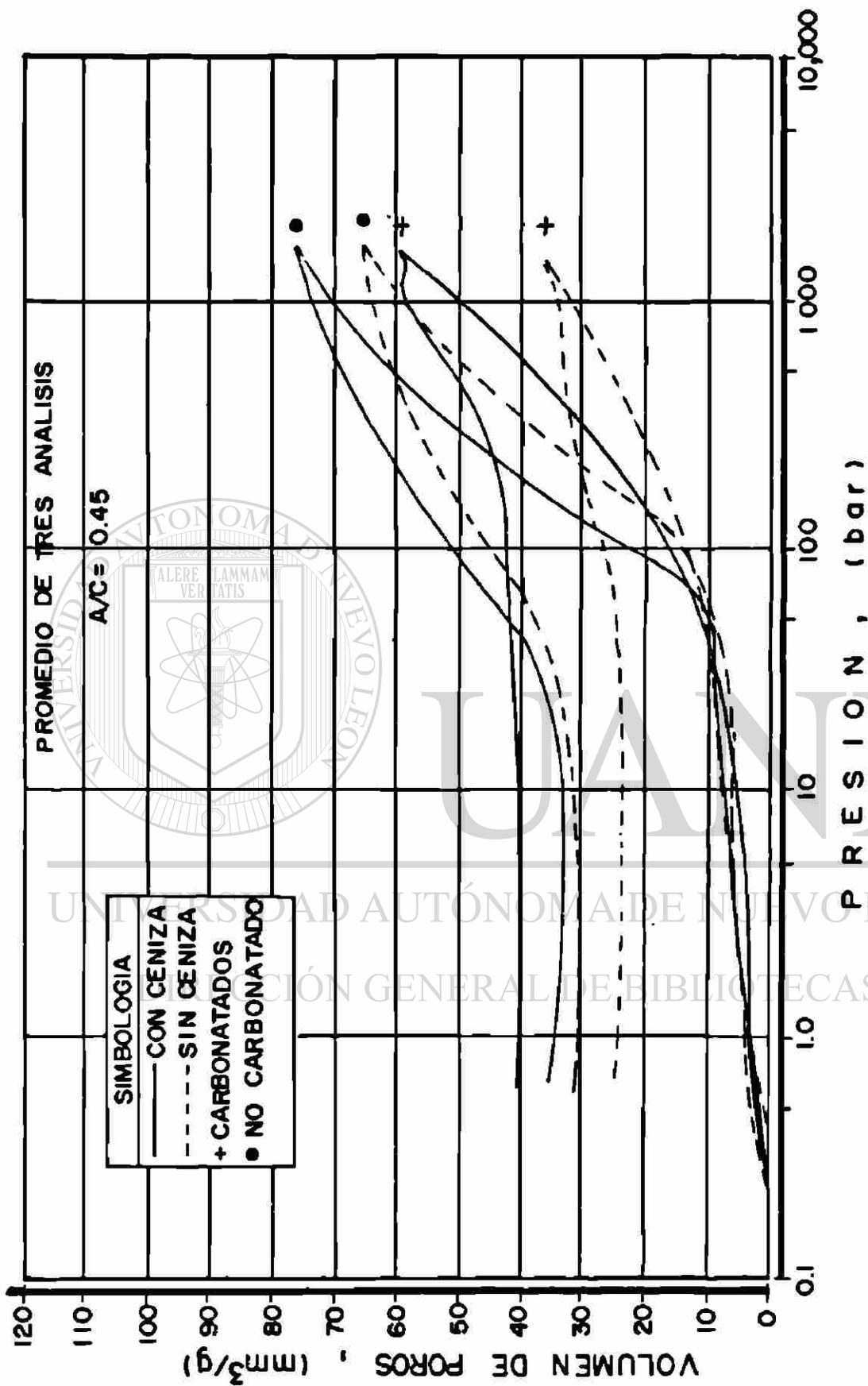
**GRÁFICA 6.- RELACIÓN AGUA CEMENTANTE (A/C) Vs
COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD (K)
PARA MORTEROS NO CARBONATADOS**



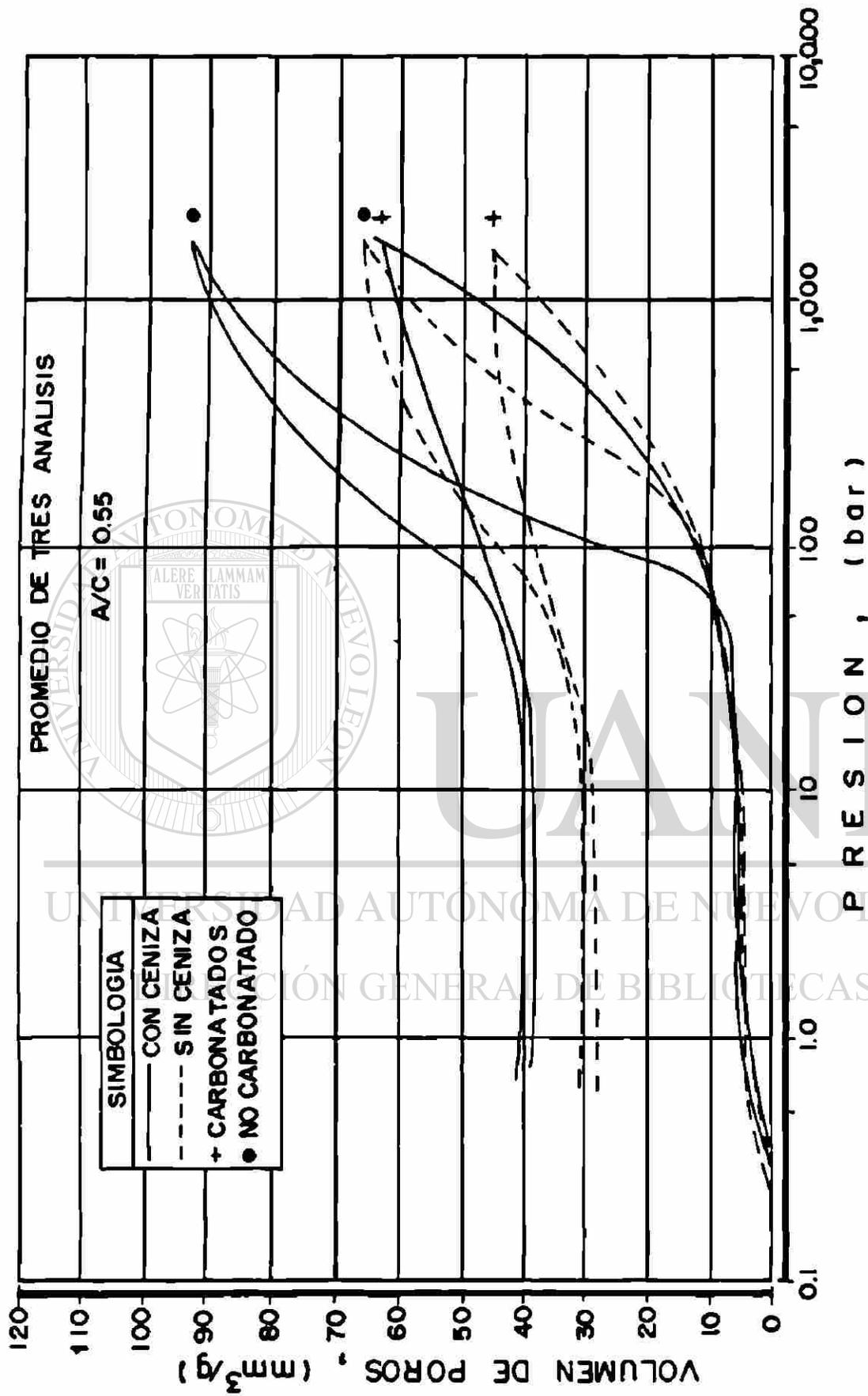
GRÁFICA 7.- RELACIÓN AGUA/CEMENTANTE (A/C) Vs pH DE MORTEROS NO CARBONATADOS(MNC) Y CARBONATADOS(MC)



ANALISIS DE POROSIDAD
**GRAFICA 8 - PROMEDIO DE PRESION Vs. VOLUMEN DE POROS
 PARA MORTEROS NO CARBONATADOS (MNC)
 Y CARBONATADOS (MC).**

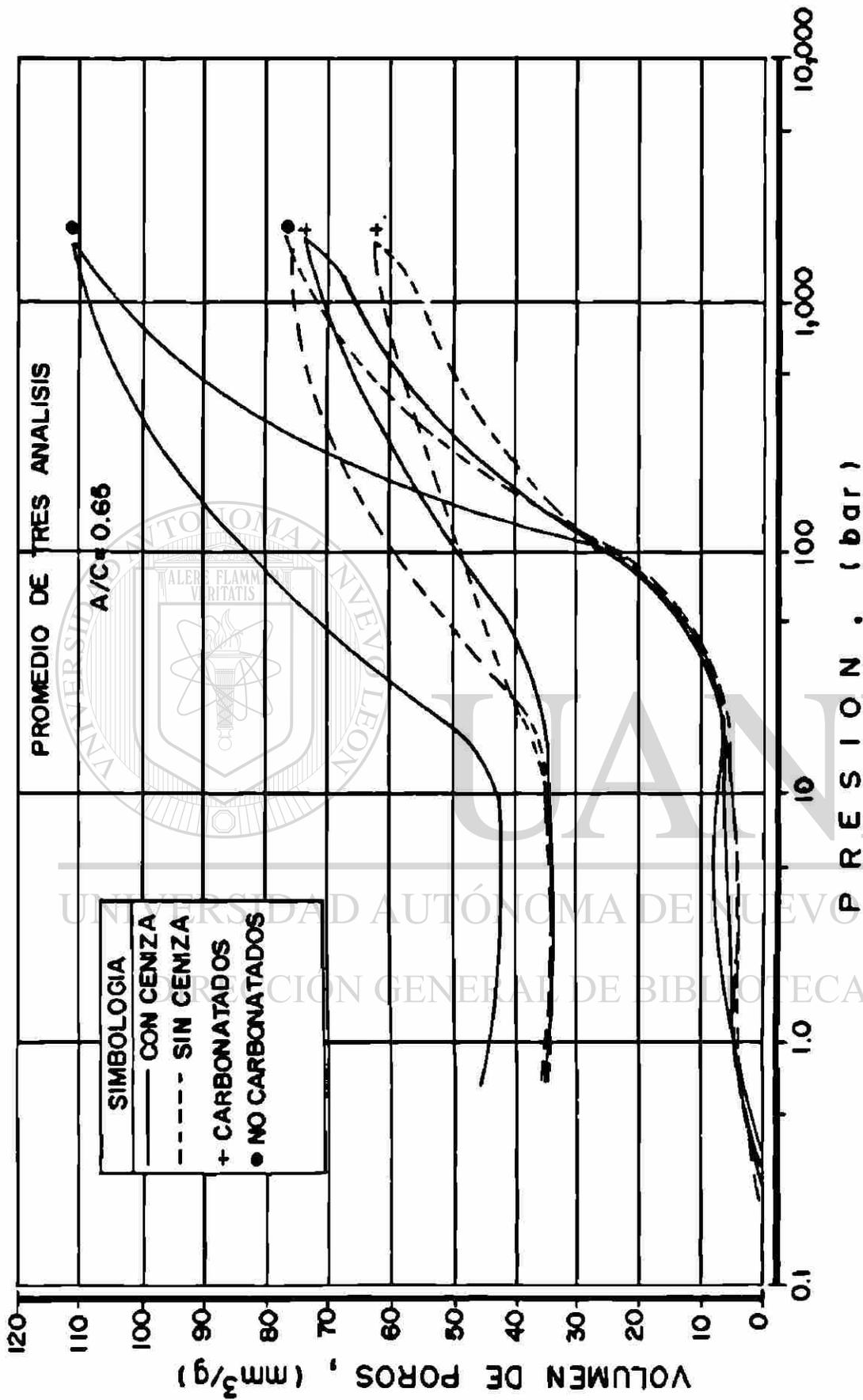


ANALISIS DE POROSIDAD
GRAFICA 9 - PROMEDIO DE PRESION Vs. VOLUMEN DE POROS
PARA MORTEROS NO CARBONATADOS (MNC)
Y CARBONATADOS (MC).

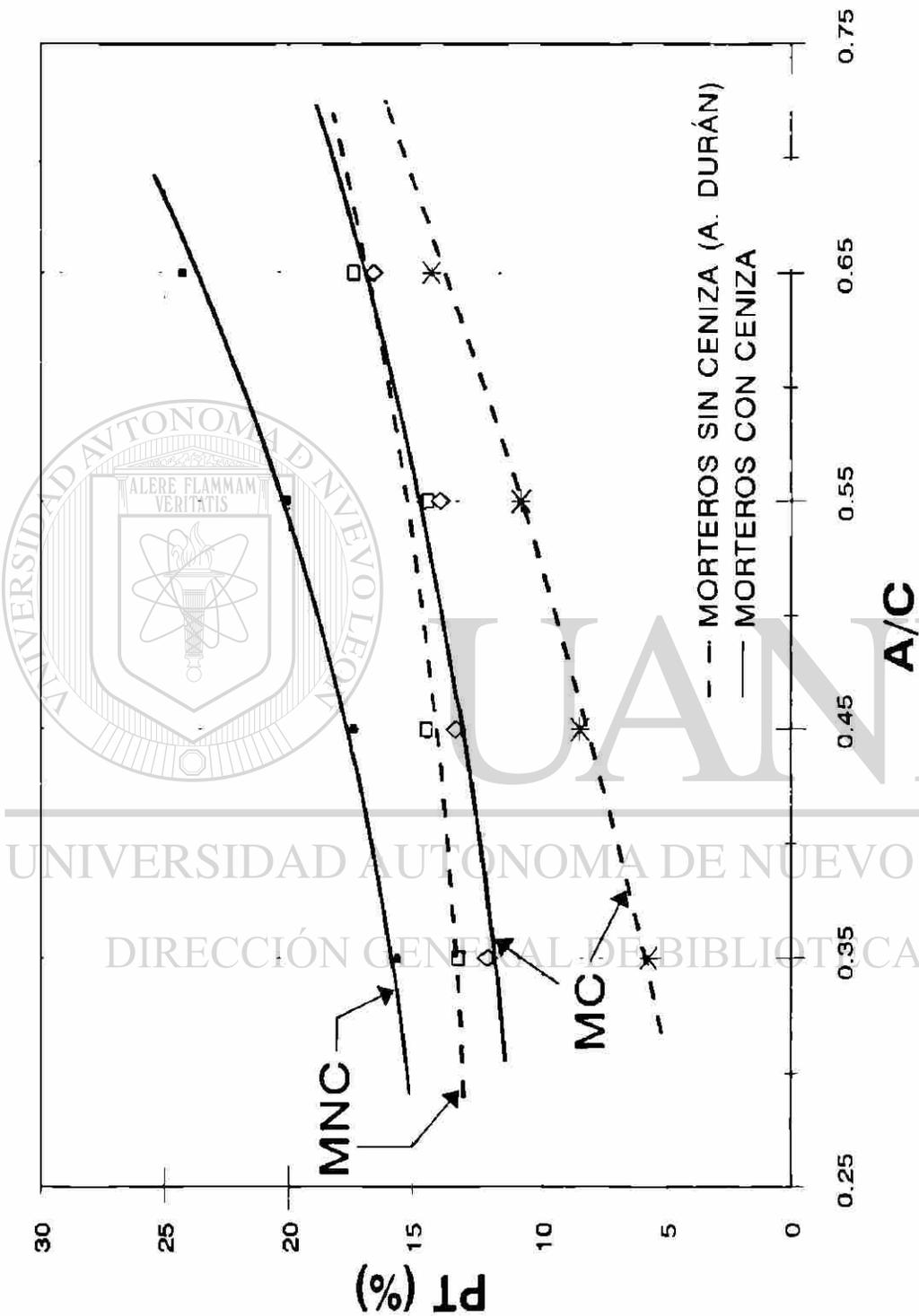


ANALISIS DE POROSIDAD

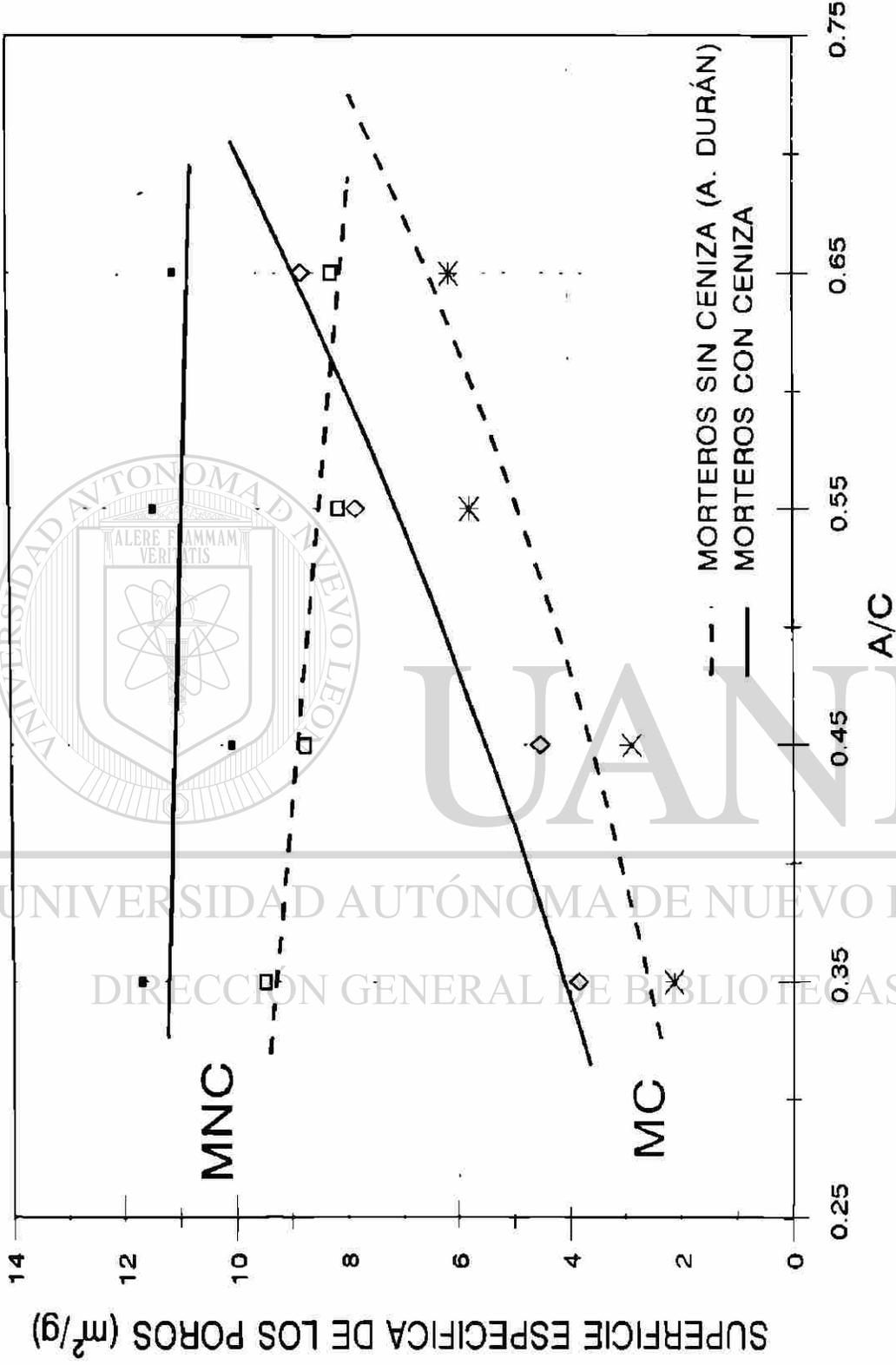
GRAFICA 10-PROMEDIO DE PRESION Vs. VOLUMEN DE POROS
PARA MORTEROS NO CARBONATADOS (MNC)
Y CARBONATADOS (MC).



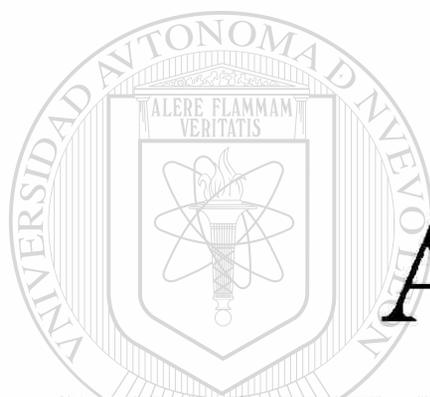
ANALISIS DE POROSIDAD
GRAFICA II - PROMEDIO DE PRESION Vs. VOLUMEN DE POROS
PARA MORTEROS NO CARBONATADOS (MNC)
Y CARBONATADOS (MC).



GRÁFICA 12.- RELACIÓN AGUA/CEMENTANTE (A/C) Vs POROSIDAD TOTAL (PT) DE MORTEROS NO CARBONATADOS(MNC) Y CARBONATADOS(MC)



GRÁFICA 13.- RELACIÓN AGUA/CEMENTANTE (A/C) Vs SUPERFICIE ESPECÍFICA DE LOS POROS DE MORTEROS NO CARBONATADOS (MNC) Y CARBONATADOS (MC)



ANEXO FOTOGRAFICO

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

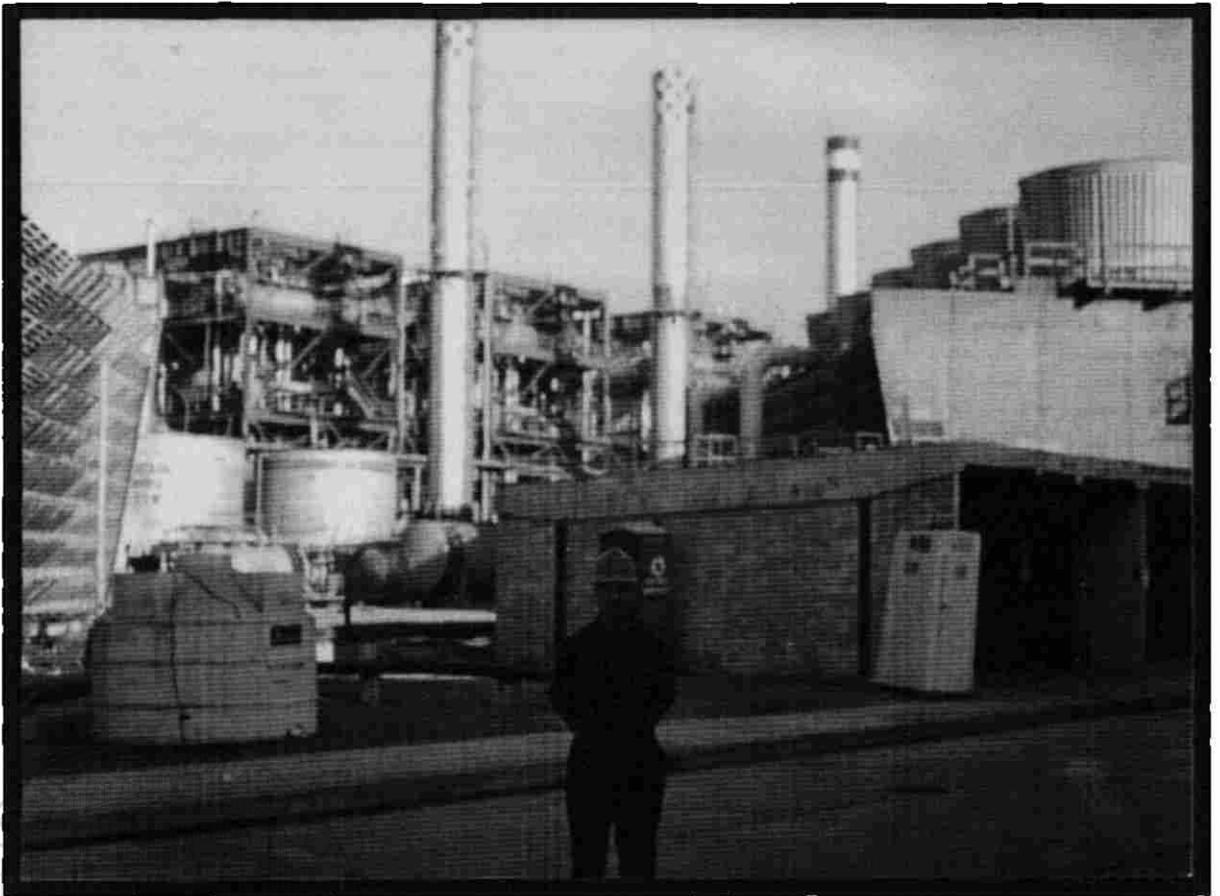


FOTO N°1. - La creciente industrialización mundial que utiliza combustibles fósiles genera enormes cantidades de gases entre ellos el CO_2 el cual interviene de manera directa en las condiciones ambientales, el ciclo de vida biológica y en el deterioro de las estructuras de concreto.

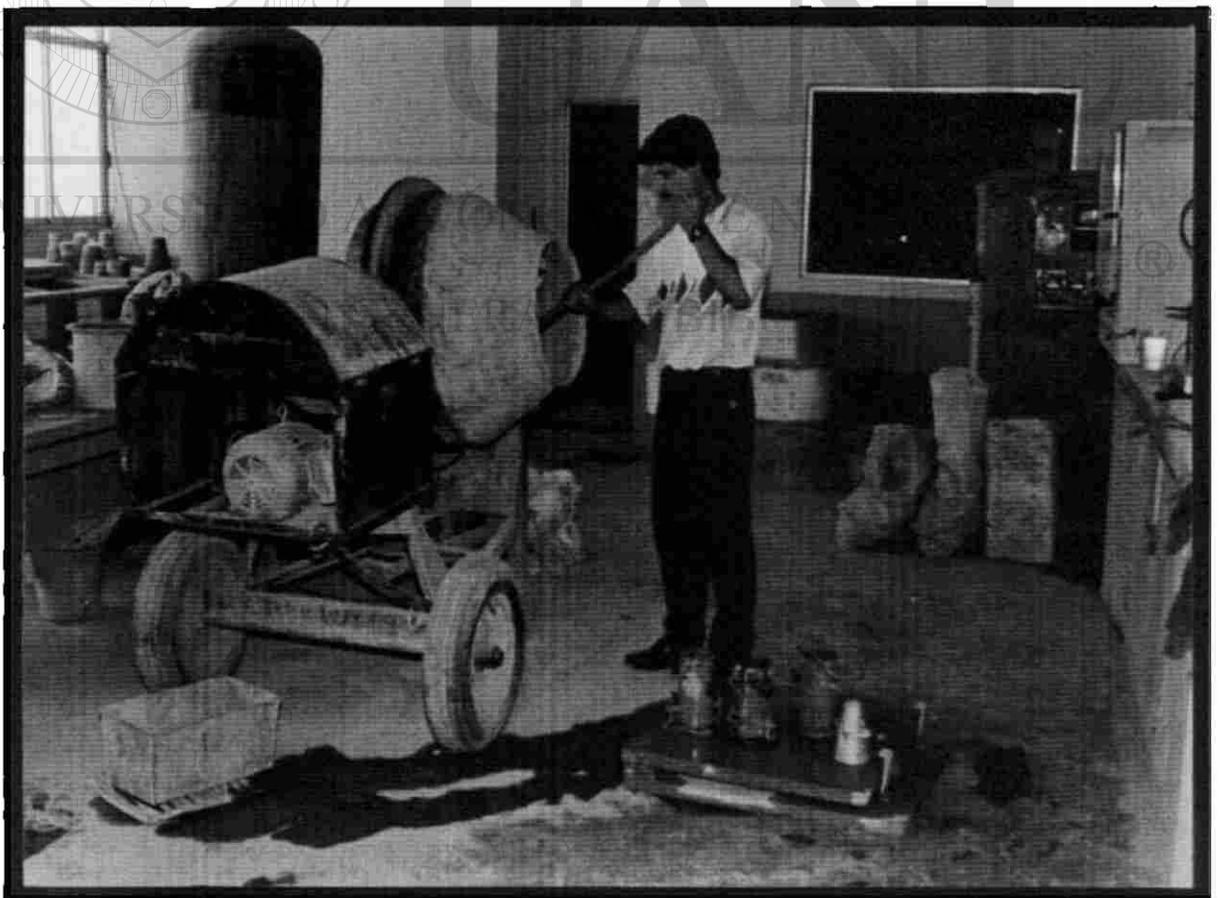


FOTO N°2. - Se utilizó una maquina revolcedora convencional con capacidad de 100 L. requerida para realizar las mezclas de morteros



FOTO N°3. - La imagen muestra la consistencia del mortero utilizado, medida por medio del cono de mini-revenimiento

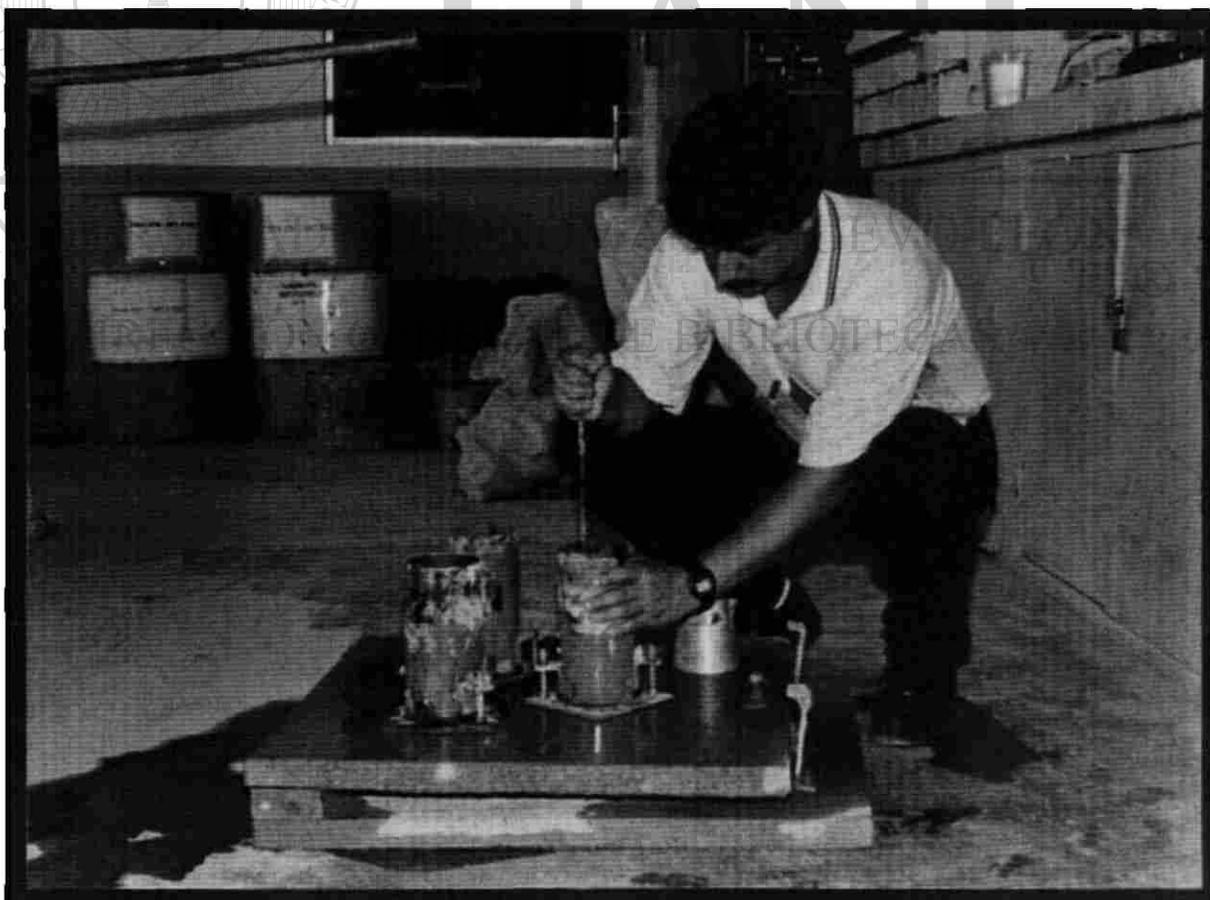
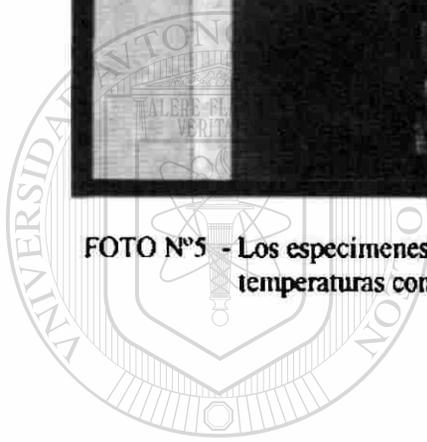


FOTO N°4 - Fabricación de especímenes cilíndricos de mortero con dimensiones de 10 cm. de base por 20 cm de altura



FOTO N°5 - Los especímenes fueron curados conforme a ASTM bajo condiciones de humedad y temperaturas controladas.

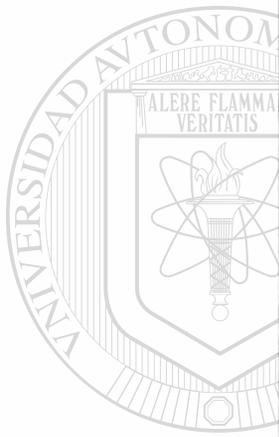


UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



UNIVERSIDAD

DIRECCIÓN



FOTO N°6. - Se utilizo una máquina universal Timus Olsen con capacidad de 200 toneladas para determinar la resistencia a la compresion de los morteros.

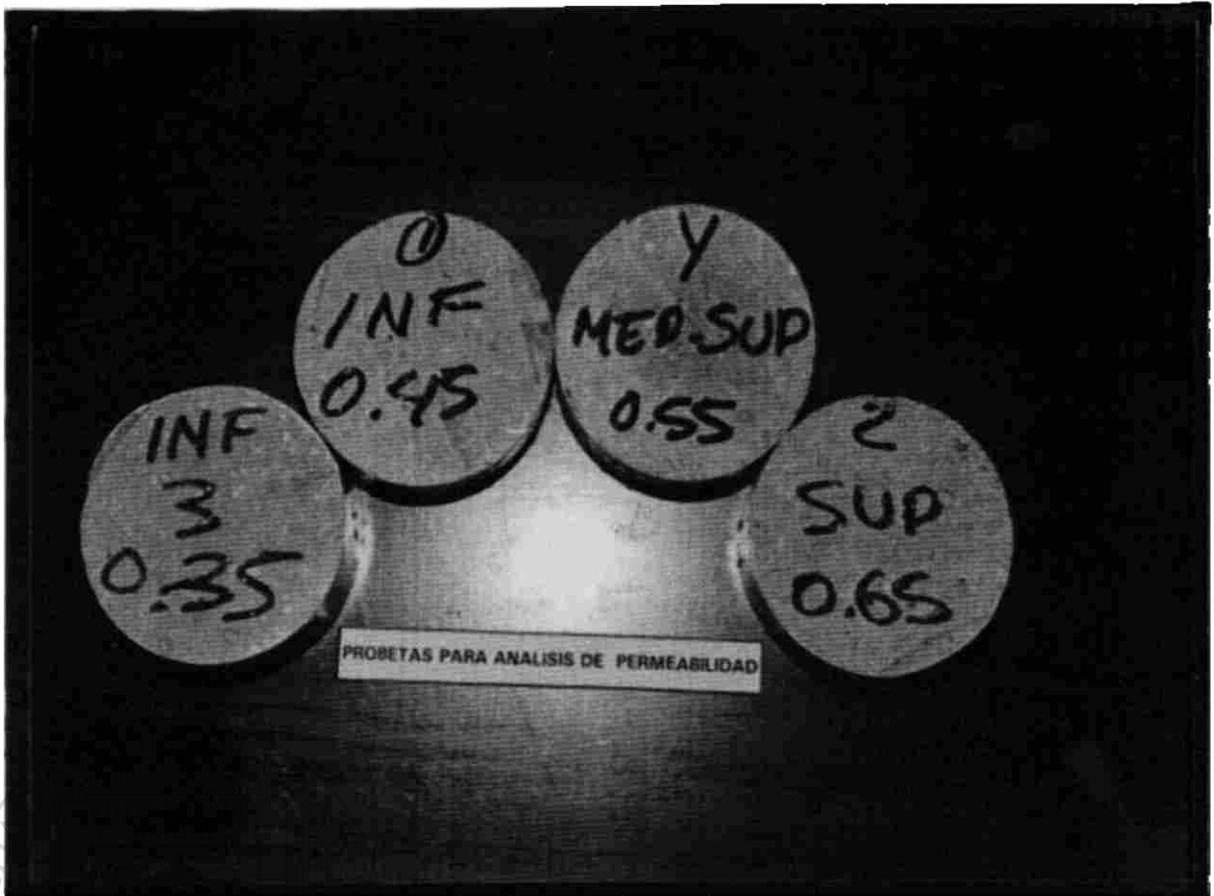


FOTO N°7.- Los cilindros fueron cortados en gajos para determinar los coeficientes de permeabilidad



FOTO N 8 - Equipo Matest de procedencia Italiana utilizado para determinar la permeabilidad al agua con capacidad de 30 bares de presión y con cuatro cámaras que pueden trabajar simultáneamente o individualmente

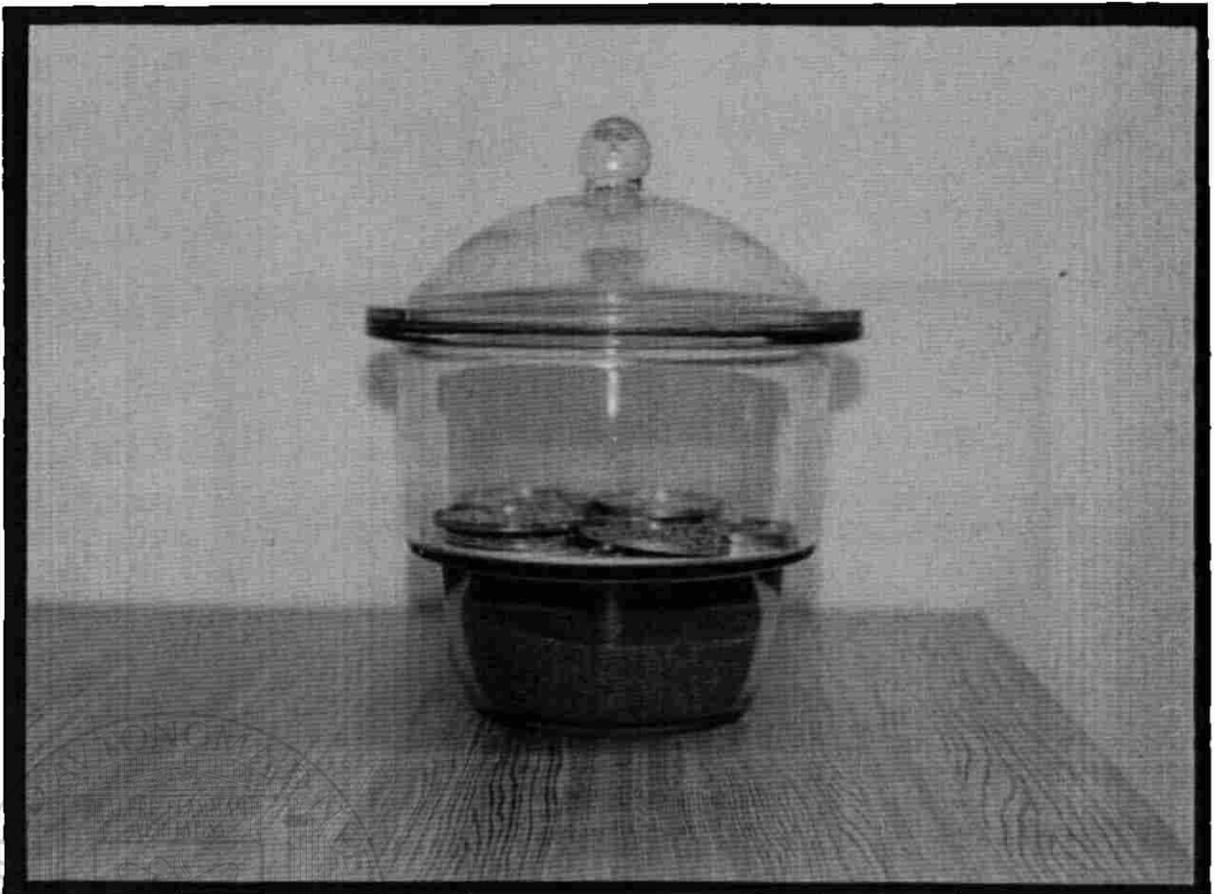


FOTO N°9 - Las muestras trituradas se colocaron en un desecador que contiene silica-gel hasta peso constante inmediatamente despues se realizaron los analisis de porosidad.



FOTO N 10 - Equipo utilizado para medir la porosidad marca CARLO ERBA, funciona a partir de la intrusión de mercurio, tiene una capacidad de 2000 bares de presión, puede determinar la porosidad hasta 37A

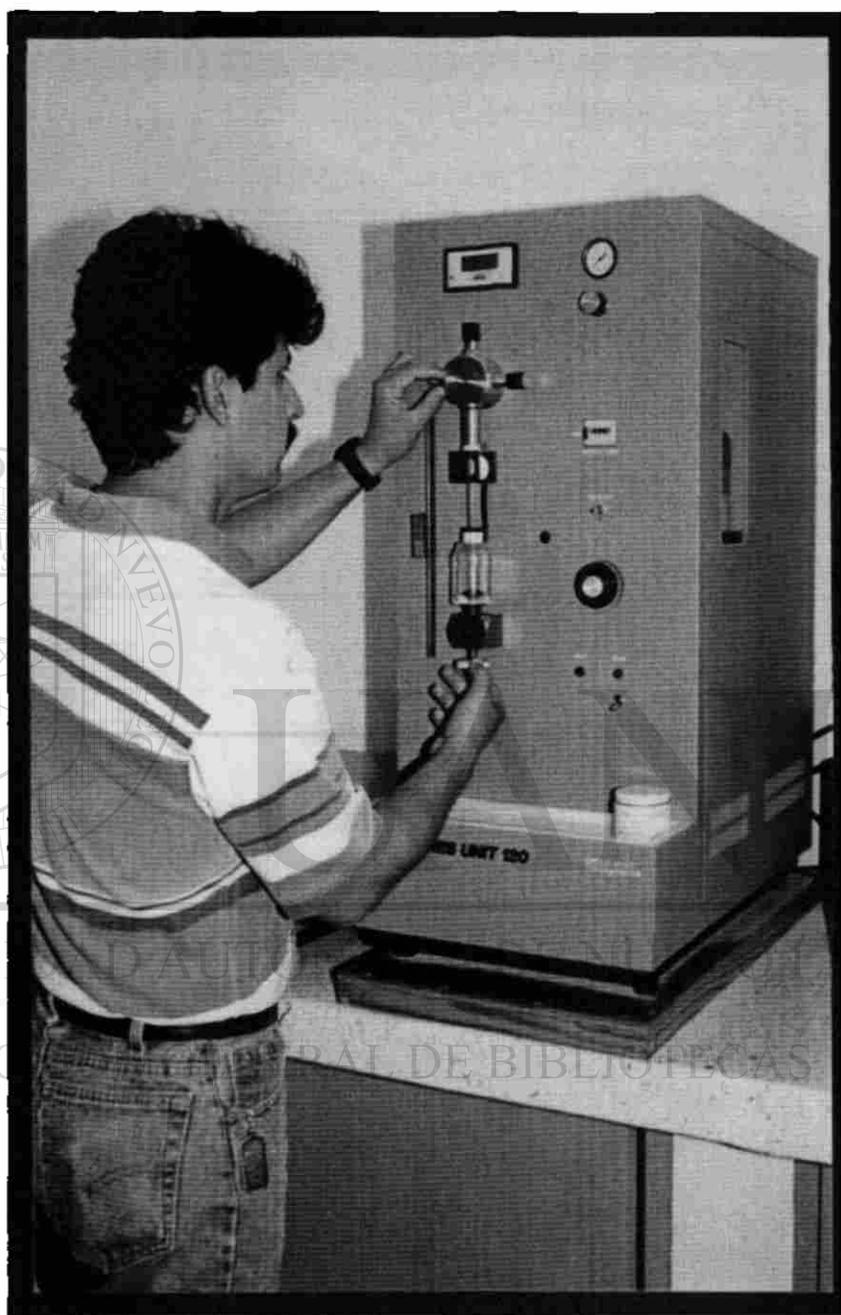


FOTO Nº11.- Unidad Macroporo 120 utilizada para el llenado de mercurio y determinación de poros con radios hasta 18,000 A

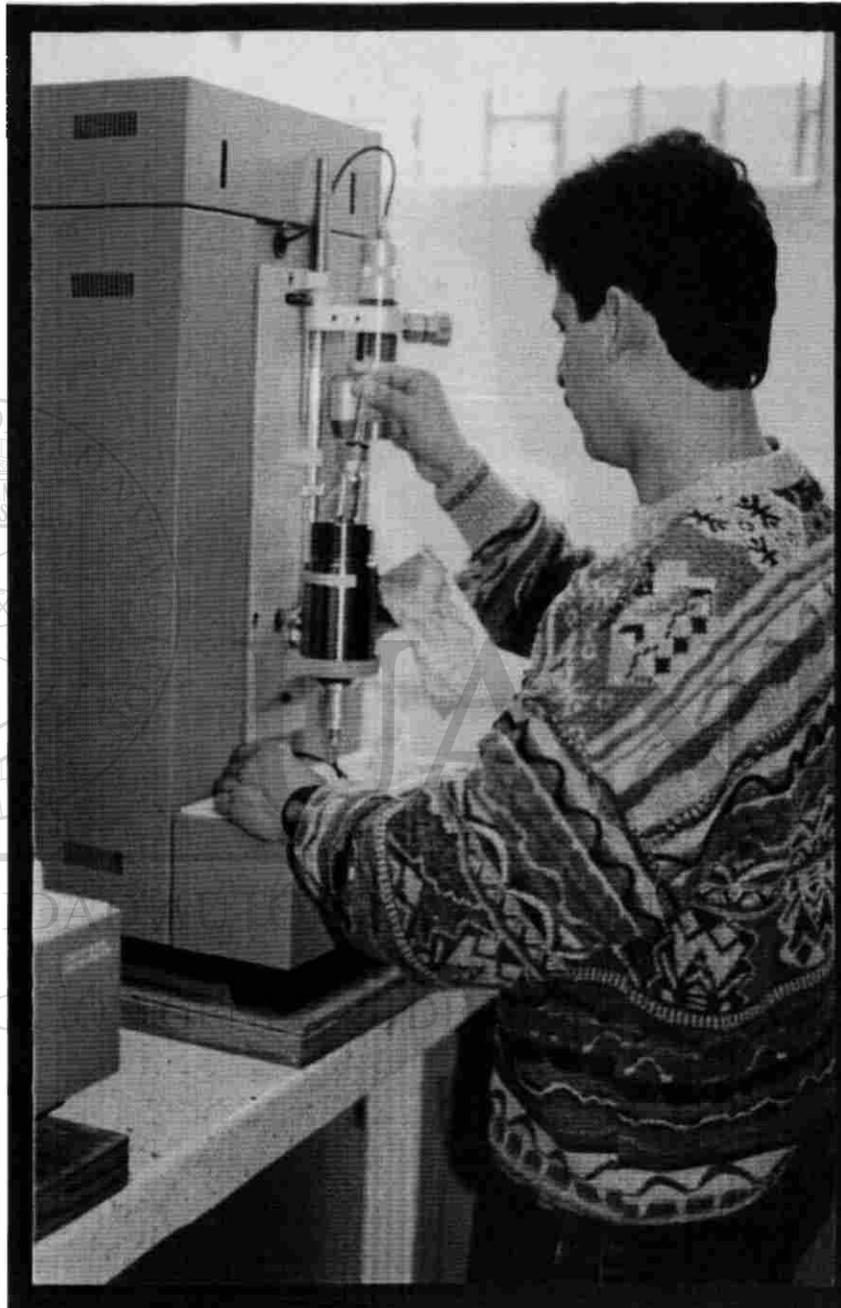


FOTO N°12.- Porosímetro 2000. Se muestra el acceso de la muestra al interior de la cámara donde se aplica la presión de 2000 bares, el equipo envía los datos a la unidad central para su tratamiento.

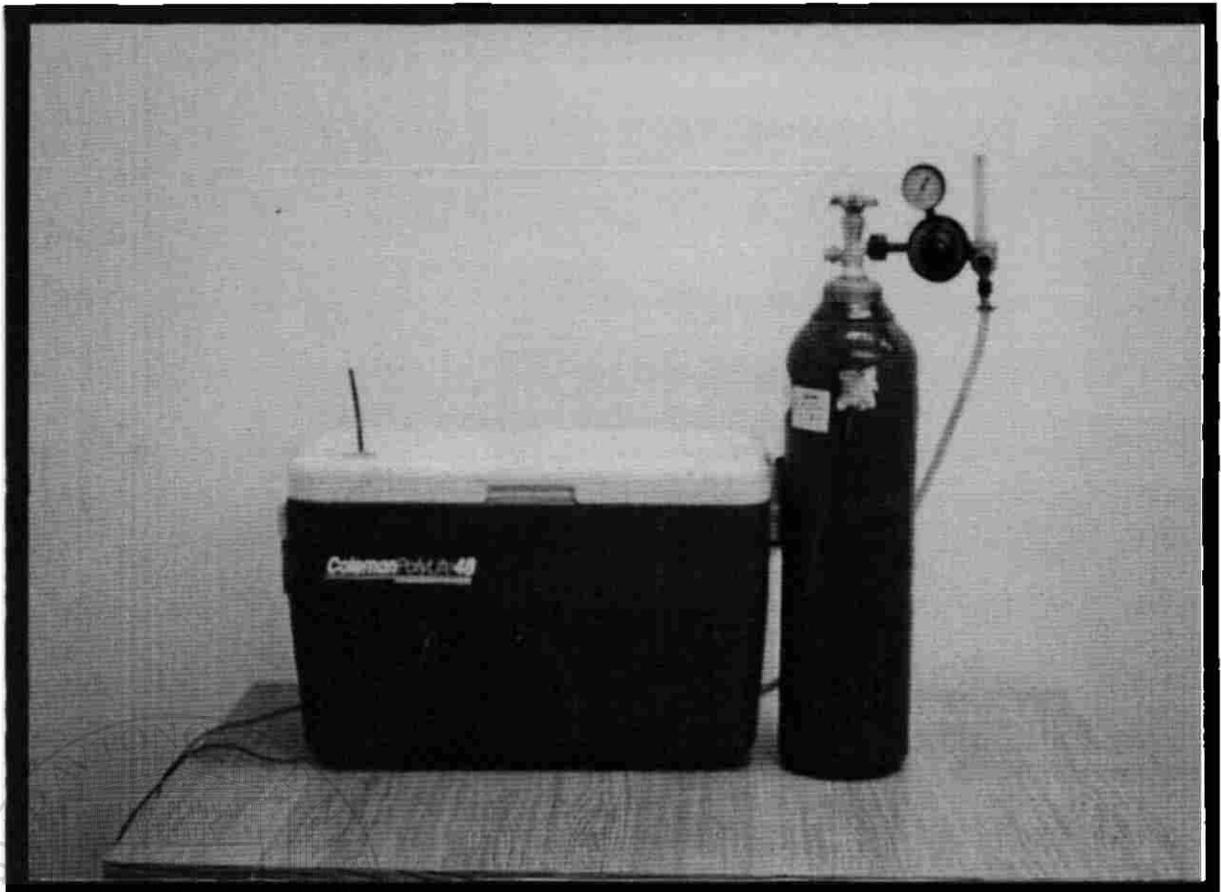


FOTO N°13.- Se fabricó una cámara de carbonatación acelerada con ventilador de recirculación en el interior. También se muestra el tanque de gas con una concentración de 5% de CO₂.



FOTO N°14 - Morteros carbonatados y no carbonatados, se utilizó una solución de 1% de fenolftaleína en alcohol isopropílico para determinar la condición de carbonatación. La coloración es debida a un alto pH o a la presencia de hidróxido de calcio.

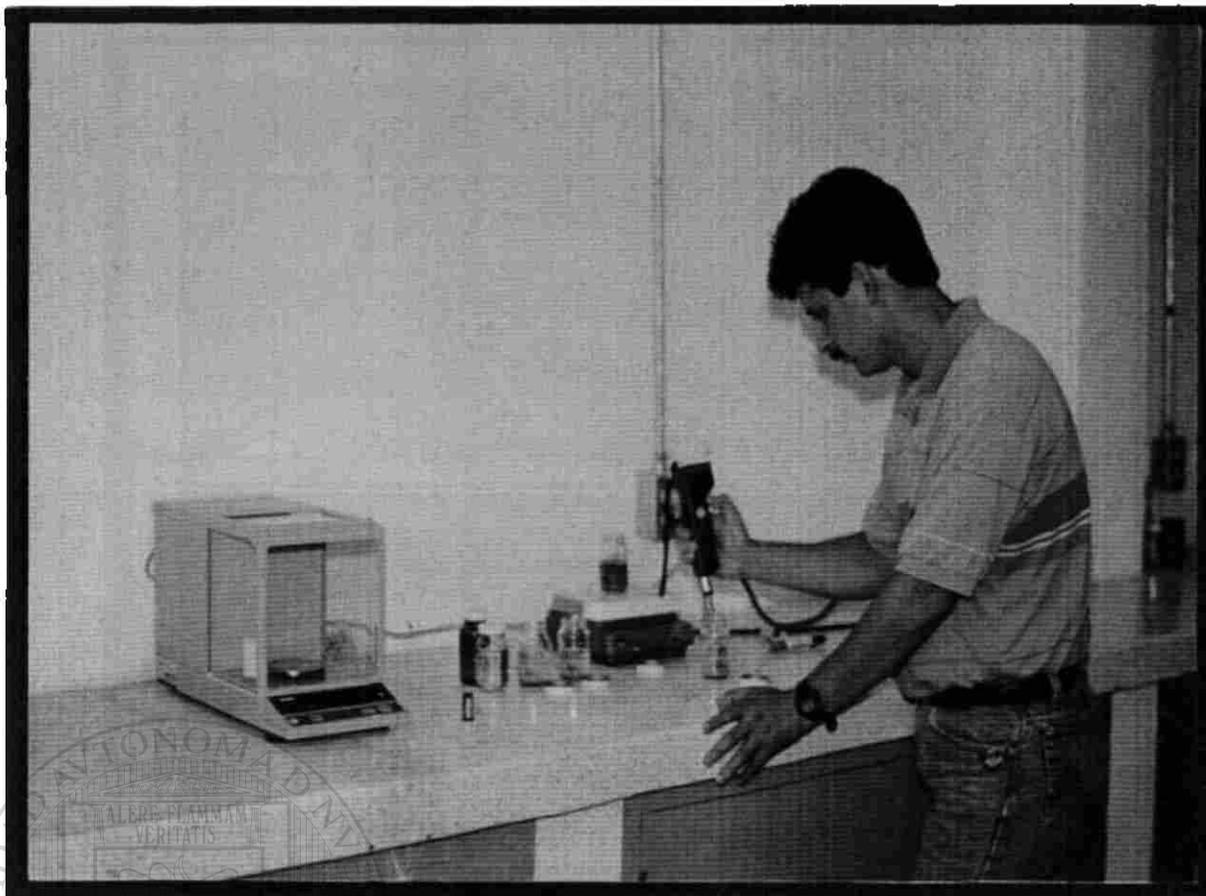


FOTO N°15 - Mediante el uso del potenciómetro digital se determinó el valor del pH de muestras pulverizadas carbonatadas y no carbonatadas.



FOTO N 16.- Vista del mortero carbonatado A/c = 0.65 magnificado 200 veces, tomada de un microscopio electrónico de barrido en el Centro Nacional de Metrología

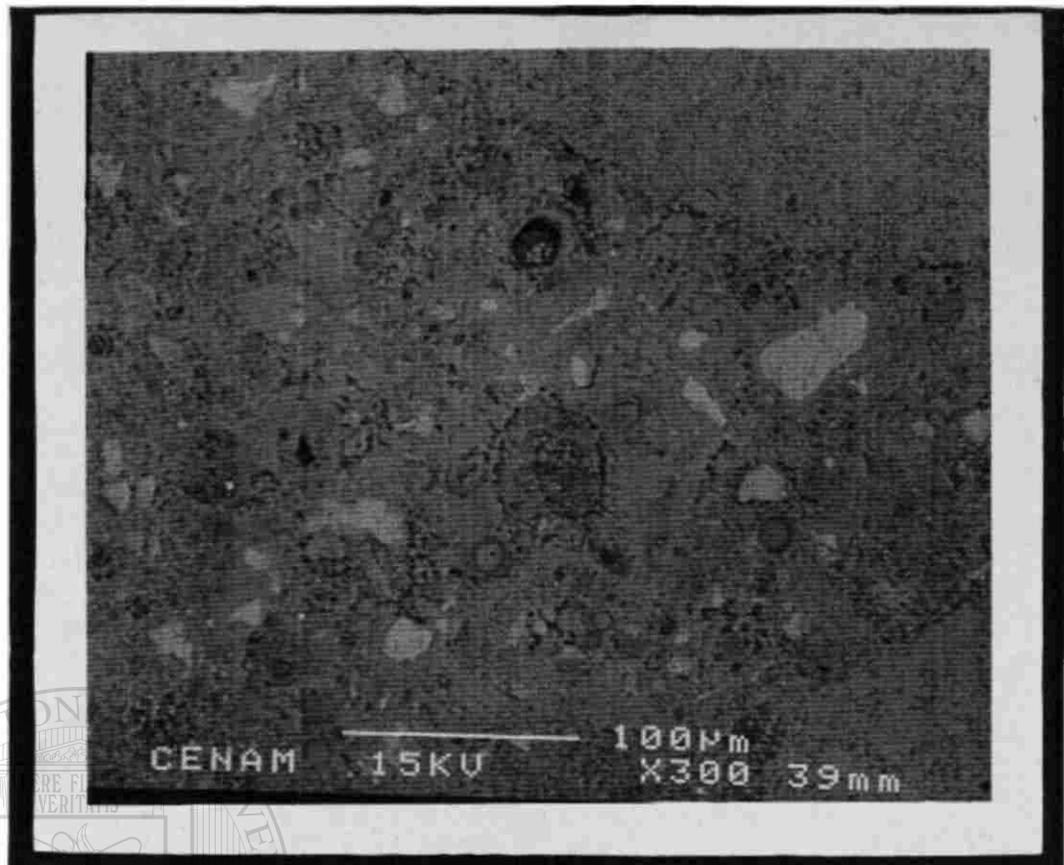


FOTO N°17.- Vista del mortero carbonatado $A/C = 0.35$ magnificado 300 de su tamaño real. Aquí podemos apreciar las esferas de ceniza volante en diversos puntos y además comparar la matriz cementante con la del mortero $A/C = 0.65$ de la foto 16 la cual resulta mucho mas densa.

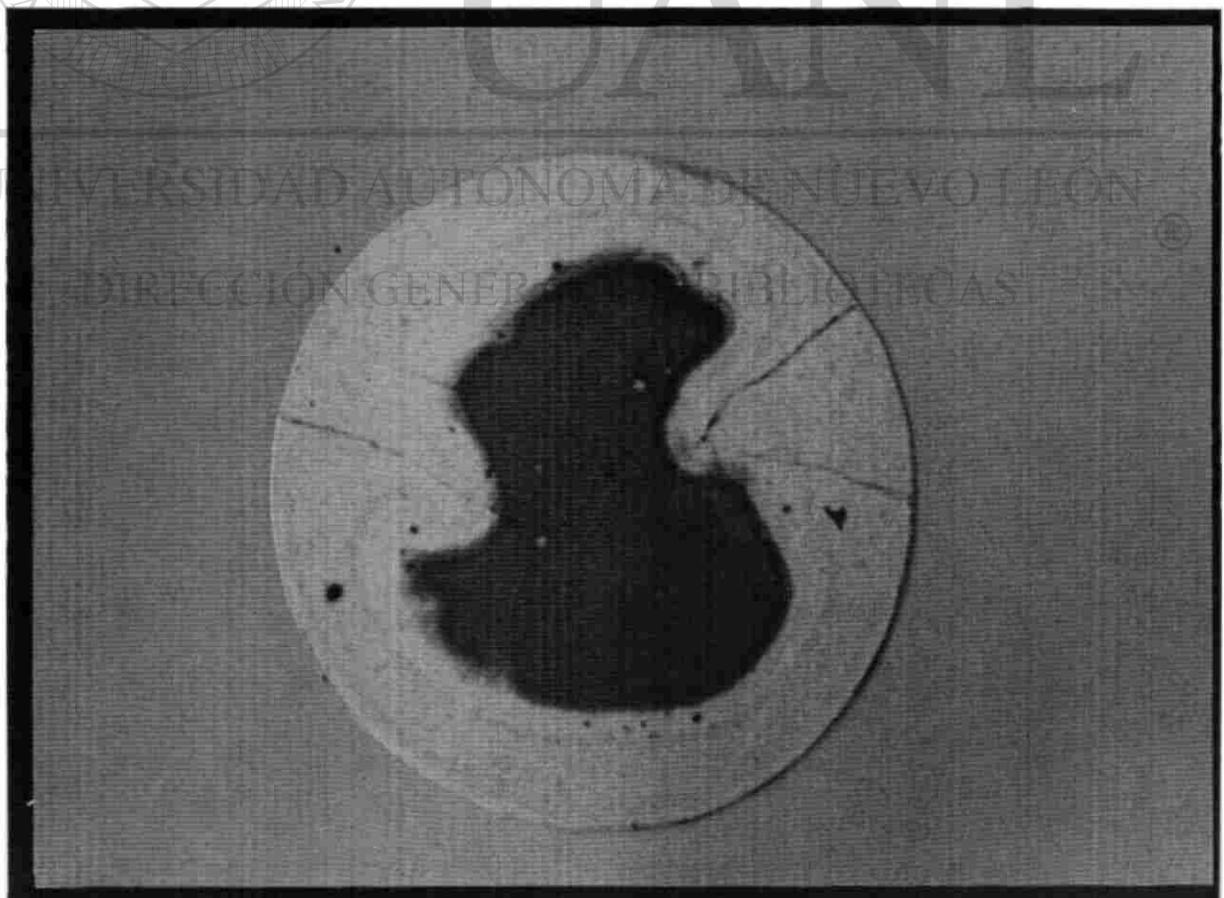


FOTO N 18 - El CO_2 penetra por los agrietamientos carbonatando mas rapido. En esta muestra de pasta de cemento hidraulico el indicador deberia tener una forma circular; sin embargo las grietas favorecen a la difusion del CO_2

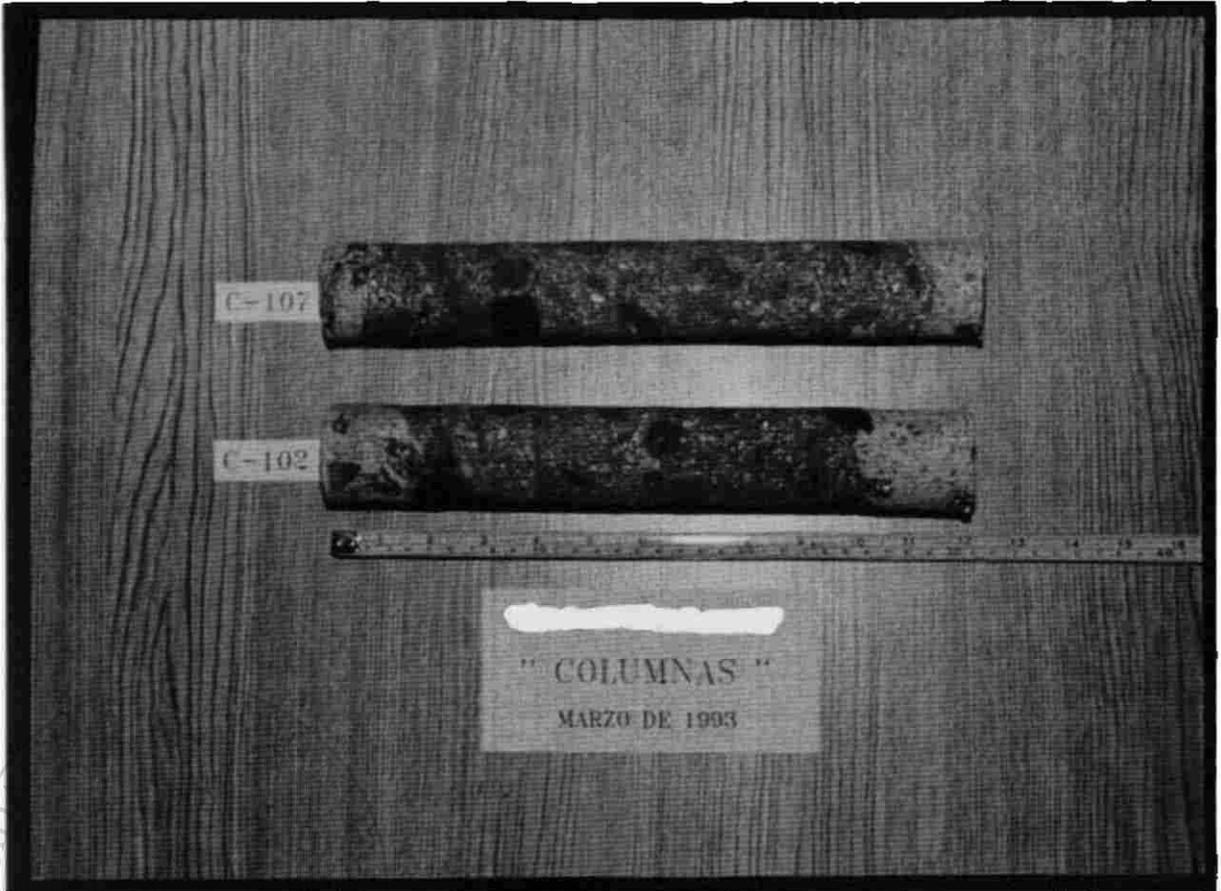


FOTO N°19.- Corazones extraídos en toda la sección de una columna. el avance de la carbonatación es de 40 mm según el cambio de coloración por la fenolftaleína. La columna se construyó hace 25 años. ($f'c = 250 \text{ kgf/cm}^2$)

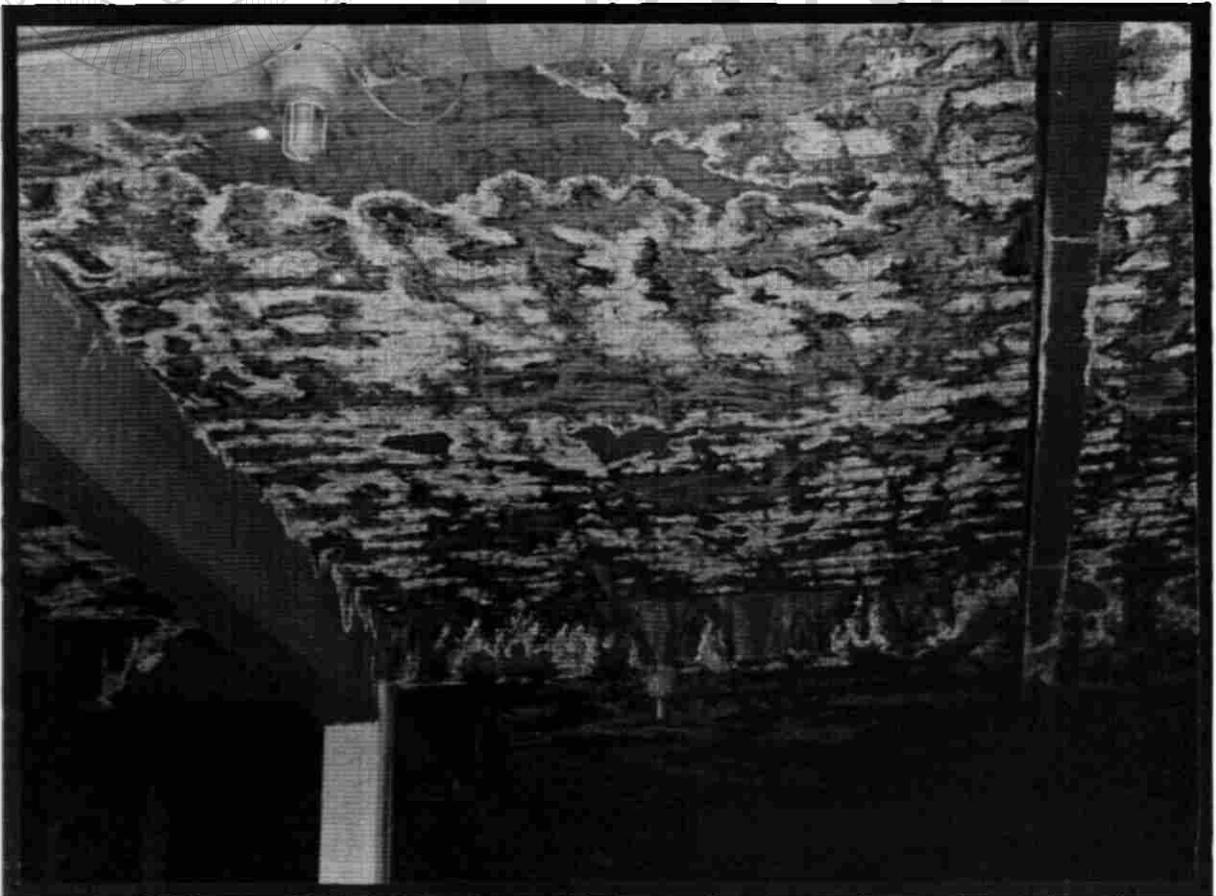
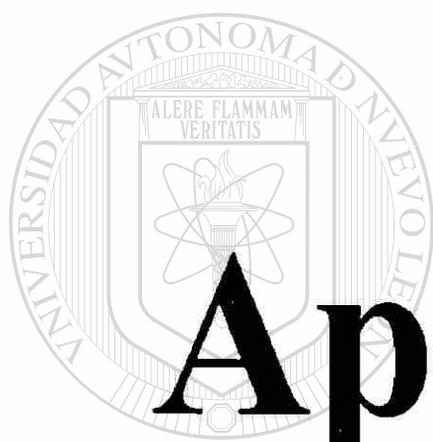


FOTO N 20 - Losa con problemas de lloviznas debido a su alta permeabilidad. Aquí se pueden apreciar las eflorescencias en gran parte de su área



Apéndice

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS





Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens¹

This standard is issued under the fixed designation C 39; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This test method has been approved for use by agencies of the Department of Defense. Consult the DoD Index of Specifications and Standards for the specific year of issue which has been adopted by the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This test method covers determination of compressive strength of cylindrical concrete specimens such as molded cylinders and drilled cores. It is limited to concrete having a unit weight in excess of 50 lb/ft³ (800 kg/m³).

1.2 The values stated in inch-pound units are to be regarded as the standard.

1.3 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.*

1.4 The text of this standard references notes which provide explanatory material. These notes shall not be considered as requirements of the standard.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

- C 31 Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field²
 - C 42 Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete²
 - C 192 Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory²
 - C 617 Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens²
 - C 670 Practice for Preparing Precision and Bias Statements for Test Methods for Construction Materials²
 - C 873 Test Method for Compressive Strength of Concrete Cylinders Cast in Place in Cylindrical Molds²
 - C 1077 Practice for Laboratories Testing Concrete and Concrete Aggregates for Use in Construction and Criteria for Laboratory Evaluation²
 - C 1231 Practice for Use of Unbonded Caps in Determination of Compressive Strength of Hardened Concrete Cylinders²
 - E 4 Practices for Force Verification of Testing Machines³
 - E 74 Practice for Calibration of Force-Measuring Instruments for Verifying the Load Indication of Testing Machines³
- Manual of Aggregate and Concrete Testing²

2.2 American Concrete Institute:

CP-16 Concrete Laboratory Testing Technician, Grade I.⁴

3. Summary of Test Method

3.1 This test method consists of applying a compressive axial load to molded cylinders or cores at a rate which is within a prescribed range until failure occurs. The compressive strength of the specimen is calculated by dividing the maximum load attained during the test by the cross-sectional area of the specimen.

4. Significance and Use

4.1 Care must be exercised in the interpretation of the significance of compressive strength determinations by this test method since strength is not a fundamental or intrinsic property of concrete made from given materials. Values obtained will depend on the size and shape of the specimen, batching, mixing procedures, the methods of sampling, molding, and fabrication and the age, temperature, and moisture conditions during curing.

4.2 This test method is used to determine compressive strength of cylindrical specimens prepared and cured in accordance with Practices C 31, C 192, C 617 and C 1231 and Test Methods C 42 and C 873.

4.3 The results of this test method are used as a basis for quality control of concrete proportioning, mixing, and placing operations; determination of compliance with specifications; control for evaluating effectiveness of admixtures and similar uses.

4.4 The individual who tests concrete cylinders for acceptance testing shall have demonstrated a knowledge and ability to perform the test procedure equivalent to the minimum guidelines for certification of Concrete Laboratory Technician, Level I, in accordance with ACI CP-16.

NOTE 1—The testing laboratory performing this test method should be evaluated in accordance with Practice C 1077.

5. Apparatus

5.1 *Testing Machine*—The testing machine shall be of a type having sufficient capacity and capable of providing the rates of loading prescribed in 7.5.

5.1.1 Verification of calibration of the testing machines in accordance with Practices E 4 is required under the following conditions:

5.1.1.1 After an elapsed interval since the previous verifi-

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee C-9 on Concrete and Concrete Aggregates and is the direct responsibility of Subcommittee C09.61 on Testing Concrete for Strength.

Current edition approved Aug. 10, 1996. Published October 1996. Originally published as C 39 - 21 T. Last previous edition C 39 - 94.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02.

³ Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01.

⁴ Available from American Concrete Institute, P.O. Box 19150, Detroit, MI, 48219-0150.

cation of 18 months maximum, but preferably after an interval of 12 months,

5.1.1.2 On original installation or relocation of the machine,

5.1.1.3 Immediately after making repairs or adjustments that affect the operation of the force applying system of the machine or the values displayed on the load indicating system, except for zero adjustments that compensate for the mass of bearing blocks, or specimen, or both, or

5.1.1.4 Whenever there is reason to doubt the accuracy of the results, without regard to the time interval since the last verification.

5.1.2 *Design*—The design of the machine must include the following features:

5.1.2.1 The machine must be power operated and must apply the load continuously rather than intermittently, and without shock. If it has only one loading rate (meeting the requirements of 7.5), it must be provided with a supplemental means for loading at a rate suitable for verification. This supplemental means of loading may be power or hand operated.

NOTE 2—High-strength concrete cylinders rupture more intensely than normal strength cylinders. As a safety precaution, it is recommended that the testing machines should be equipped with protective fragment guards.

5.1.2.2 The space provided for test specimens shall be large enough to accommodate, in a readable position, an elastic calibration device which is of sufficient capacity to cover the potential loading range of the testing machine and which complies with the requirements of Practice E 74.

NOTE 3—The types of elastic calibration devices most generally available and most commonly used for this purpose are the circular proving ring or load cell.

5.1.3 *Accuracy*—The accuracy of the testing machine shall be in accordance with the following provisions:

5.1.3.1 The percentage of error for the loads within the proposed range of use of the testing machine shall not exceed $\pm 1.0\%$ of the indicated load.

5.1.3.2 The accuracy of the testing machine shall be verified by applying five test loads in four approximately equal increments in ascending order. The difference between any two successive test loads shall not exceed one third of the difference between the maximum and minimum test loads.

5.1.3.3 The test load as indicated by the testing machine and the applied load computed from the readings of the verification device shall be recorded at each test point. Calculate the error, E , and the percentage of error, E_p , for each point from these data as follows:

$$E = A - B$$

$$E_p = 100(A - B)/B$$

where:

A = load, lbf (or N) indicated by the machine being verified, and

B = applied load, lbf (or N) as determined by the calibrating device.

5.1.3.4 The report on the verification of a testing machine shall state within what loading range it was found to conform to specification requirements rather than reporting a blanket acceptance or rejection. In no case shall the loading range be

stated as including loads below the value which is 100 times the smallest change of load estimable on the load-indicating mechanism of the testing machine or loads within that portion of the range below 10 % of the maximum range capacity.

5.1.3.5 In no case shall the loading range be stated as including loads outside the range of loads applied during the verification test.

5.1.3.6 The indicated load of a testing machine shall not be corrected either by calculation or by the use of a calibration diagram to obtain values within the required permissible variation.

5.2 The testing machine shall be equipped with two steel bearing blocks with hardened faces (Note 4), one of which is a spherically seated block that will bear on the upper surface of the specimen, and the other a solid block on which the specimen shall rest. Bearing faces of the blocks shall have a minimum dimension at least 3 % greater than the diameter of the specimen to be tested. Except for the concentric circles described below, the bearing faces shall not depart from a plane by more than 0.001 in. (0.025 mm) in any 6 in. (152 mm) of blocks 6 in. in diameter or larger, or by more than 0.001 in. in the diameter of any smaller block; and new blocks shall be manufactured within one half of this tolerance. When the diameter of the bearing face of the spherically seated block exceeds the diameter of the specimen by more than $\frac{1}{2}$ in. (13 mm), concentric circles not more than $\frac{1}{32}$ in. (0.8 mm) deep and not more than $\frac{3}{64}$ in. (1.2 mm) wide shall be inscribed to facilitate proper centering.

NOTE 4—It is desirable that the bearing faces of blocks used for compression testing of concrete have a Rockwell hardness of not less than 55 HRC.

5.2.1 Bottom bearing blocks shall conform to the following requirements:

5.2.1.1 The bottom bearing block is specified for the purpose of providing a readily machinable surface for maintenance of the specified surface conditions (Note 5). The top and bottom surfaces shall be parallel to each other. If the testing machine is so designed that the platen itself is readily maintained in the specified surface condition, a bottom block is not required. Its least horizontal dimension shall be at least 3 % greater than the diameter of the specimen to be tested. Concentric circles as described in 5.2 are optional on the bottom block.

NOTE 5—The block may be fastened to the platen of the testing machine.

5.2.1.2 Final centering must be made with reference to the upper spherical block. When the lower bearing block is used to assist in centering the specimen, the center of the concentric rings, when provided, or the center of the block itself must be directly below the center of the spherical head. Provision shall be made on the platen of the machine to assure such a position.

5.2.1.3 The bottom bearing block shall be at least 1 in. (25 mm) thick when new, and at least 0.9 in. (22.5 mm) thick after any resurfacing operations.

5.2.2 The spherically seated bearing block shall conform to the following requirements:

5.2.2.1 The maximum diameter of the bearing face of the

suspended spherically seated block shall not exceed the values given below:

Diameter of Test Specimens, in. (mm)	Maximum Diameter of Bearing Face, in. (mm)
2 (51)	4 (102)
3 (76)	5 (127)
4 (102)	6½ (165)
6 (152)	10 (254)
8 (203)	11 (279)

NOTE 6—Square bearing faces are permissible, provided the diameter of the largest possible inscribed circle does not exceed the above diameter.

5.2.2.2 The center of the sphere shall coincide with the surface of the bearing face within a tolerance of $\pm 5\%$ of the radius of the sphere. The diameter of the sphere shall be at least 75 % of the diameter of the specimen to be tested.

5.2.2.3 The ball and the socket must be so designed by the manufacturer that the steel in the contact area does not permanently deform under repeated use, with loads up to 12 000 psi (82.7 MPa) on the test specimen.

NOTE 7—The preferred contact area is in the form of a ring (described as preferred “bearing” area) as shown on Fig. 1.

5.2.2.4 The curved surfaces of the socket and of the spherical portion shall be kept clean and shall be lubricated with a petroleum-type oil such as conventional motor oil, not with a pressure type grease. After contacting the specimen and application of small initial load, further tilting of the spherically seated block is not intended and is undesirable.

5.2.2.5 If the radius of the sphere is smaller than the radius of the largest specimen to be tested, the portion of the bearing face extending beyond the sphere shall have a thickness not less than the difference between the radius of the sphere and radius of the specimen. The least dimension of the bearing face shall be at least as great as the diameter of the sphere (see Fig. 1).

5.2.2.6 The movable portion of the bearing block shall be held closely in the spherical seat, but the design shall be such

that the bearing face can be rotated freely and tilted at least 4° in any direction.

5.3 Load Indication:

5.3.1 If the load of a compression machine used in concrete testing is registered on a dial, the dial shall be provided with a graduated scale that is readable to at least the nearest 0.1 % of the full scale load (Note 8). The dial shall be readable within 1 % of the indicated load at any given load level within the loading range. In no case shall the loading range of a dial be considered to include loads below the value that is 100 times the smallest change of load that can be read on the scale. The scale shall be provided with a graduation line equal to zero and so numbered. The dial pointer shall be of sufficient length to reach the graduation marks; the width of the end of the pointer shall not exceed the clear distance between the smallest graduations. Each dial shall be equipped with a zero adjustment located outside the dialcase and easily accessible from the front of the machine while observing the zero mark and dial pointer. Each dial shall be equipped with a suitable device that at all times until reset will indicate to within 1 % accuracy the maximum load applied to the specimen.

NOTE 8—Readability is considered to be 1/50 in. (0.5 mm) along the arc described by the end of the pointer. Also, one half of a scale interval is readable with reasonable certainty when the spacing on the load indicating mechanism is between 1/25 in. (1 mm) and 1/16 in. (1.6 mm). When the spacing is between 1/16 in. and 1/8 in. (3.2 mm), one third of a scale interval is readable with reasonable certainty. When the spacing is 1/8 in. or more, one fourth of a scale interval is readable with reasonable certainty.

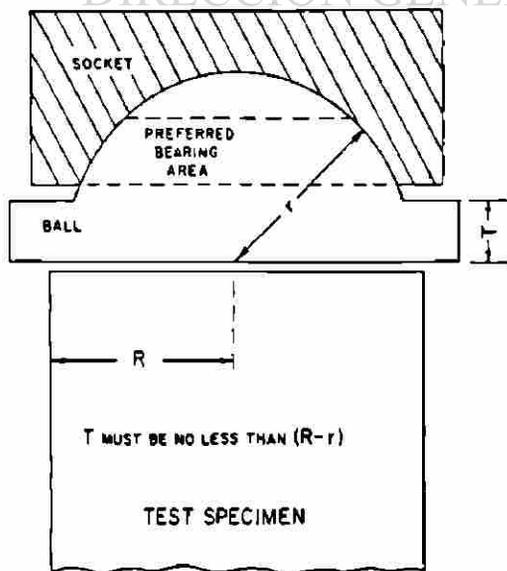
5.3.2 If the testing machine load is indicated in digital form, the numerical display must be large enough to be easily read. The numerical increment must be equal to or less than 0.10 % of the full scale load of a given loading range. In no case shall the verified loading range include loads less than the minimum numerical increment multiplied by 100. The accuracy of the indicated load must be within 1.0 % for any value displayed within the verified loading range. Provision must be made for adjusting to indicate true zero at zero load. There shall be provided a maximum load indicator that at all times until reset will indicate within 1 % system accuracy the maximum load applied to the specimen.

6. Specimens

6.1 Specimens shall not be tested if any individual diameter of a cylinder differs from any other diameter of the same cylinder by more than 2 %.

NOTE 9—This may occur when single use molds are damaged or deformed during shipment, when flexible single use molds are deformed during molding or when a core drill deflects or shifts during drilling.

6.2 Neither end of compressive test specimens when tested shall depart from perpendicularity to the axis by more than 0.5° (approximately equivalent to 1/8 in. in 12 in. (3 mm in 300 mm)). The ends of compression test specimens that are not plane within 0.002 in. (0.050 mm) shall be sawed or ground to meet that tolerance, or capped in accordance with either Practice C 617 or Practice C 1231. The diameter used for calculating the cross-sectional area of the test specimen shall be determined to the nearest 0.01 in. (0.25 mm) by averaging two diameters measured at right angles to each other at about midheight of the specimen.



NOTE—Provision shall be made for holding the ball in the socket and for holding the entire unit in the testing machine.

FIG. 1 Schematic Sketch of a Typical Spherical Bearing Block

6.3 The number of individual cylinders measured for determination of average diameter may be reduced to one for each ten specimens or three specimens per day, whichever is greater, if all cylinders are known to have been made from a single lot of reusable or single-use molds which consistently produce specimens with average diameters within a range of 0.02 in. (0.51 mm). When the average diameters do not fall within the range of 0.02 in. or when the cylinders are not made from a single lot of molds, each cylinder tested must be measured and the value used in calculation of the unit compressive strength of that specimen. When the diameters are measured at the reduced frequency, the cross-sectional areas of all cylinders tested on that day shall be computed from the average of the diameters of the three or more cylinders representing the group tested that day.

6.4 The length shall be measured to the nearest 0.05 *D* when the length to diameter ratio is less than 1.8, or more than 2.2, or when the volume of the cylinder is determined from measured dimensions.

7. Procedure

7.1 Compression tests of moist-cured specimens shall be made as soon as practicable after removal from moist storage.

7.2 Test specimens shall be kept moist by any convenient method during the period between removal from moist storage and testing. They shall be tested in the moist condition.

7.3 All test specimens for a given test age shall be broken within the permissible time tolerances prescribed as follows:

Test Age	Permissible Tolerance
24 h	± 0.5 h or 2.1 %
3 days	2 h or 2.8 %
7 days	6 h or 3.6 %
28 days	20 h or 3.0 %
90 days	2 days 2.2 %

7.4 *Placing the Specimen*—Place the plain (lower) bearing block, with its hardened face up, on the table or platen of the testing machine directly under the spherically seated (upper) bearing block. Wipe clean the bearing faces of the upper and lower bearing blocks and of the test specimen and place the test specimen on the lower bearing block. Carefully align the axis of the specimen with the center of thrust of the spherically seated block.

7.4.1 *Zero Verification and Block Seating*—Prior to testing the specimen, verify that the load indicator is set to zero. In cases where the indicator is not properly set to zero, adjust the indicator (Note 10). As the spherically seated block is brought to bear on the specimen, rotate its movable portion gently by hand so that uniform seating is obtained.

NOTE 10—The technique used to verify and adjust load indicator to zero will vary depending on the machine manufacturer. Consult your owner's manual or compression machine calibrator for the proper technique.

7.5 *Rate of Loading*—Apply the load continuously and without shock.

7.5.1 For testing machines of the screw type, the moving head shall travel at a rate of approximately 0.05 in. (1.3 mm)/min when the machine is running idle. For hydraulically operated machines, the load shall be applied at a rate of movement (platen to crosshead measurement) corresponding to a loading rate on the specimen within the range of 20 to 50 psi/s (0.14 to 0.34 MPa/s). The designated rate of movement shall be maintained at least during the latter half of the anticipated loading phase of the testing cycle.

7.5.2 During the application of the first half of the anticipated loading phase a higher rate of loading shall be permitted.

7.5.3 Make no adjustment in the rate of movement of the platen at any time while a specimen is yielding rapidly immediately before failure.

7.6 Apply the load until the specimen fails, and record the maximum load carried by the specimen during the test. Note the type of failure and the appearance of the concrete.

8. Calculation

8.1 Calculate the compressive strength of the specimen by dividing the maximum load carried by the specimen during the test by the average cross-sectional area determined as described in Section 6 and express the result to the nearest 10 psi (69 kPa).

8.2 If the specimen length to diameter ratio is less than 1.8, correct the result obtained in 8.1 by multiplying by the appropriate correction factor shown in the following table:

L/D:	1.75	1.50	1.25	1.00
Factor:	0.98	0.96	0.93	0.87 (Note 11)

NOTE 11—These correction factors apply to lightweight concrete weighing between 100 and 120 lb/ft³ (1600 and 1920 kg/m³) and to normal weight concrete. They are applicable to concrete dry or soaked at the time of loading. Values not given in the table shall be determined by interpolation. The correction factors are applicable for nominal concrete strengths from 2000 to 6000 psi (13.8 to 41.4 MPa).

9. Report

9.1 Report the following information:

9.1.1 Identification number,

9.1.2 Diameter (and length, if outside the range of 1.8*D* to 2.2*D*), in inches or millimetres,

9.1.3 Cross-sectional area, in square inches or square centimetres,

9.1.4 Maximum load, in pounds-force or newtons,

9.1.5 Compressive strength calculated to the nearest 10 psi or 69 kPa,

9.1.6 Type of fracture, if other than the usual cone (see Fig. 2),

9.1.7 Defects in either specimen or caps, and,

9.1.8 Age of specimen.

10. Precision and Bias

10.1 *Precision*—The single operator precision of tests of individual 6 by 12 in. (150 by 300 mm) cylinders made from a well-mixed sample of concrete is given for cylinders made in a laboratory environment and under normal field conditions (see 10.1.1).

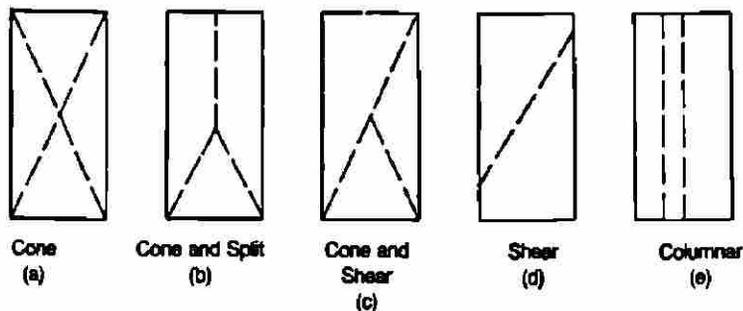


FIG. 2 Sketches of Types of Fracture

	Coefficient of Variation ⁴	Acceptable Range of ⁴	
		2 results	3 results
Single operator			
Laboratory conditions	2.37 %	6.6 %	7.8 %
Field conditions	2.87 %	8.0 %	9.5 %

⁴ These numbers represent respectively the (1s) and (d2s) limits as described in Practice C 670.

10.1.1 The values given are applicable to 6 by 12 in. (150 by 300 mm) cylinders with compressive strength between 2000 and 8000 psi (12 to 55 MPa). They are derived from CCRL concrete reference sample data for laboratory condi-

tions and a collection of 1265 test reports from 225 commercial testing laboratories in 1978.⁵

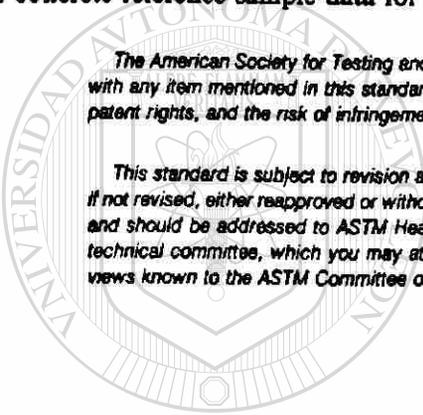
NOTE 12—Subcommittee C09.03.01 will re-examine recent CCRL Concrete Reference Sample Program data and field test data to see if these values are representative of current practice and if they can be extended to cover a wider range of strengths and specimen sizes.

10.2 Bias—Since there is no accepted reference material, no statement on bias is being made.

⁵ Research report RR:C09-1006 is on file at ASTM Headquarters.

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete¹

This standard is issued under the fixed designation C 618; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

This specification has been approved for use by agencies of the Department of Defense. Consult the DoD Index of Specifications and Standards for the specific year of issue which has been adopted by the Department of Defense.

1. Scope

1.1 This specification covers coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use as a mineral admixture in concrete where cementitious or pozzolanic action, or both, is desired, or where other properties normally attributed to finely divided mineral admixtures may be desired, or where both objectives are to be achieved.

NOTE 1—Finely divided materials may tend to reduce the entrained air content of concrete. Hence, if a mineral admixture is added to any concrete for which entrainment of air is specified, provision should be made to ensure that the specified air content is maintained by air content tests and by use of additional air-entraining admixture or use of an air-entraining admixture in combination with air-entraining hydraulic cement.

1.2 The values stated in SI units are to be regarded as the standard.

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:

C 311 Test Methods for Sampling and Testing Fly Ash or Natural Pozzolans for Use as a Mineral Admixture in Portland Cement Concrete²

3. Terminology

3.1 Definitions:

3.1.1 *fly ash*—finely divided residue that results from the combustion of ground or powdered coal.

NOTE 2—This definition of fly ash does not include, among other things, the residue resulting from: (1) the burning of municipal garbage or any other refuse with coal; (2) the injection of lime directly into the boiler for sulfur removal; or (3) the burning of industrial or municipal garbage in incinerators commonly known as “incinerator ash.”

3.1.2 *pozzolans*—siliceous or siliceous and aluminous materials which in themselves possess little or no cementitious value but will, in finely divided form and in the presence of moisture, chemically react with calcium hydroxide at ordinary temperatures to form compounds possessing cementitious properties.

¹ This specification is under the jurisdiction of ASTM Committee C-9 on Concrete and Concrete Aggregates and is the direct responsibility of Subcommittee C09.24 on Ground Slag and Pozzolonic Admixtures.

Current edition approved Jan. 10, 1997. Published March 1997. Originally published as C 618 - 68 T to replace C 350 and C 402. Last previous edition C 618 - 96a.

² Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.02.

4. Classification

4.1 *Class N*—Raw or calcined natural pozzolans that comply with the applicable requirements for the class as given herein, such as some diatomaceous earths; opaline cherts and shales; tuffs and volcanic ashes or pumicites, calcined or uncalcined; and various materials requiring calcination to induce satisfactory properties, such as some clays and shales.

4.2 *Class F*—Fly ash normally produced from burning anthracite or bituminous coal that meets the applicable requirements for this class as given herein. This class fly ash has pozzolanic properties.

4.3 *Class C*—Fly ash normally produced from lignite or subbituminous coal that meets the applicable requirements for this class as given herein. This class of fly ash, in addition to having pozzolanic properties, also has some cementitious properties.

NOTE 3—Some Class C fly ashes may contain lime contents higher than 10 %.

5. Ordering Information

5.1 The purchaser shall specify any supplementary optional chemical or physical requirements.

5.2 The purchaser shall indicate which procedure, A or B, shall be used when specifying requirements for effectiveness in contribution to sulfate resistance under Table 2A.

6. Chemical Composition

6.1 Fly ash and natural pozzolans shall conform to the requirements as to chemical composition prescribed in Table 1. Supplementary optional chemical requirements are shown in Table 1A.

7. Physical Properties

7.1 Fly ash and natural pozzolans shall conform to the physical requirements prescribed in Table 2. Supplementary optional physical requirements are shown in Table 2A.

8. Methods of Sampling and Testing

8.1 Sample and test the mineral admixture in accordance with the requirements of Test Methods C 311.

8.2 Use cement of the type proposed for use in the work and, if available, from the mill proposed as the source of the cement, in all tests requiring the use of hydraulic cement.

9. Storage and Inspection

9.1 The mineral admixture shall be stored in such a manner as to permit easy access for proper inspection and

TABLE 1 Chemical Requirements

	Mineral Admixture Class		
	N	F	C
Silicon dioxide (SiO ₂) plus aluminum oxide (Al ₂ O ₃) plus iron oxide (Fe ₂ O ₃), min, %	70.0	70.0	50.0
Sulfur trioxide (SO ₃), max, %	4.0	5.0	5.0
Moisture content, max, %	3.0	3.0	3.0
Loss on ignition, max, %	10.0	6.0 ^A	6.0

^A The use of Class F pozzolan containing up to 12.0 % loss on ignition may be approved by the user if either acceptable performance records or laboratory test results are made available.

TABLE 1A Supplementary Optional Chemical Requirement

NOTE—This optional requirement applies only when specifically requested.

	Mineral Admixture Class		
	N	F	C
Available alkalis, as equivalent, as Na ₂ O, max, % ^A	1.5	1.5	1.5

^A Applicable only when specifically required by the purchaser for mineral admixture to be used in concrete containing reactive aggregate and cement to meet a limitation on content of alkalis.

TABLE 2 Physical Requirements

	Mineral Admixture Class		
	N	F	C
Fineness:			
Amount retained when wet-sieved on 45 µm (No. 325) sieve, max, % ^A	34	34	34
Strength activity index:^B			
With portland cement, at 7 days, min, percent of control	75 ^D	75 ^D	75 ^D
With portland cement, at 28 days, min, percent of control	75 ^D	75 ^D	75 ^D
Water requirement, max, percent of control	115	105	105
Soundness:^C			
Autoclave expansion or contraction, max, %	0.8	0.8	0.8
Uniformity requirements:			
The density and fineness of individual samples shall not vary from the average established by the ten preceding tests, or by all preceding tests if the number is less than ten, by more than:			
Density, max variation from average, %	5	5	5
Percent retained on 45-µm (No. 325), max variation, percentage points from average	5	5	5

^A Care should be taken to avoid the retaining of agglomerations of extremely fine material.

^B The strength activity index with portland cement is not to be considered a measure of the compressive strength of concrete containing the mineral admixture. The mass of mineral admixture specified for the test to determine the strength activity index with portland cement is not considered to be the proportion recommended for the concrete to be used in the work. The optimum amount of mineral admixture for any specific project is determined by the required properties of the concrete and other constituents of the concrete and is to be established by testing. Strength activity index with portland cement is a measure of reactivity with a given cement and may vary as to the source of both the mineral admixture and the cement.

^C If the mineral admixture will constitute more than 20 % by weight of the cementitious material in the project mix design, the test specimens for autoclave expansion shall contain that anticipated percentage. Excessive autoclave expansion is highly significant in cases where water to mineral admixture and cement ratios are low, for example, in block or shotcrete mixes.

^D Meeting the 7 day or 28 day strength activity index will indicate specification compliance.

identification of each shipment.

9.2 Inspection of the material shall be made as agreed upon by the purchaser and the seller as part of the purchase contract.

10. Rejection

10.1 The purchaser has the right to reject material that fails to conform to the requirements of this specification. Rejection shall be reported to the producer or supplier promptly and in writing.

10.2 The purchaser has the right to reject packages varying more than 5 % from the stated weight. The purchaser also has the right to reject the entire shipment if the average weight of the packages in any shipment, as shown by weighing 50 packages taken at random, is less than that specified.

10.3 The purchaser has the right to require that mineral

admixture in storage prior to shipment for a period longer than 6 months after testing be retested. The purchaser has the right to reject such material if it fails to meet the fineness requirements.

11. Packaging and Package Marking

11.1 When the mineral admixture is delivered in packages, the class, name, and brand of the producer, and the weight of the material contained therein, shall be plainly marked on each package. Similar information shall be provided in the shipping invoices accompanying the shipment of packaged or bulk mineral admixture.

12. Keywords

12.1 fly ash; mineral admixtures; natural pozzolan; pozzolans

TABLE 2A Supplementary Optional Physical Requirements

Note—These optional requirements apply only when specifically requested.

	Mineral Admixture Class		
	N	F	C
Multiple factor, calculated as the product of loss on ignition and fineness, amount retained when wet-sieved on 45- μ m (No. 325) sieve, max, % ^a	255
Increase of drying shrinkage of mortar bars at 28 days, max, difference, in %, over control ^b	0.03	0.03	0.03
Uniformity Requirements: In addition, when air-entraining concrete is specified, the quantity of air-entraining agent required to produce an air content of 18.0 vol % of mortar shall not vary from the average established by the ten preceding tests or by all preceding tests if less than ten, by more than, %	20	20	20
Effectiveness in Controlling Alkali-Silica Reaction: ^c Expansion of test mixture as percentage of low-alkali cement control, at 14 days, max, %	100	100	100
Effectiveness in Contributing to Sulfate Resistance: ^d Procedure A: Expansion of test mixture: For moderate sulfate exposure after 6 months exposure, max, % For high sulfate exposure after 6 months exposure, max, %	0.10 0.05	0.10 0.05	0.10 0.05
Procedure B: Expansion of test mixture as a percentage of sulfate resistance cement control after at least 6 months exposure, max, %	100	100	100

^a Applicable only for Class F mineral admixtures since the loss on ignition limitations predominate for Class C.

^b Determination of compliance or noncompliance with the requirement relating to increase in drying shrinkage will be made only at the request of the purchaser.

^c Mineral admixtures meeting this requirement are considered as effective in controlling alkali aggregate reactions as the use of the low-alkali control cement used in the evaluation. However, the mineral admixture shall be considered effective only when the mineral admixture is used at percentages by mass of the total cementitious material equal to or exceeding that used in the tests and when the alkali content of the cement to be used with the mineral admixture does not exceed that used in the tests by more than 0.05 %. See Appendix XI, Test Methods C 311.

^d Fly ash or natural pozzolan shall be considered effective only when the fly ash or natural pozzolan is used at percentages, by mass, of the total cementitious material within 2 % of those that are successful in the test mixtures or between two percentages that are successful, and when the C₃A content of the project cement is less than, or equal to, that which was used in the test mixtures. See Appendix X2 of Test Method C 311.

The American Society for Testing and Materials takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN[®]
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

RESUMEN AUTOBIOGRAFICO

Pedro Leobardo Valdez Tamez

Candidato para el Grado de

Maestro en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Ambiental

Tesis: **EFFECTOS DEL DIÓXIDO DE CARBONO EN LOS MORTEROS DE CEMENTO HIDRÁULICO CON CENIZA VOLANTE.**

Campo de Estudio: **TECNOLOGÍA PARA LA INGENIERÍA**

Biografía:

Datos personales: Nacido en Monterrey, Nuevo León el 29 de junio de 1966, hijo de Leobardo Valdez Cano y Ma. Isidra Tamez de Valdez (†).

Educación: Egresado de la Universidad Autónoma de Nuevo León, con el grado de Ingeniero Civil, en 1992.

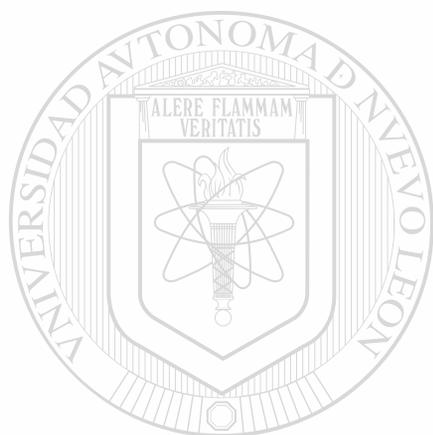
Experiencia Profesional: Asistente de investigación en el Departamento de Tecnología del Concreto del Instituto de Ingeniería Civil, UANL, desde 1991 hasta la fecha. En 1996 impartió el tema: “Agregados para Concreto”, dentro del Diplomado en Tecnología del Concreto, en la Facultad de Ingeniería Civil. Es Maestro Ordinario de la Facultad de Ingeniería Civil desde agosto de 1997.

Ha Participado en Investigaciones diversas, tales como: “Concreto Compactado con Rodillo Vibratorio”, “Porosimetría de Agregados, Propiedades de Diversos Materiales Cementantes”, “Durabilidad de diversas Estructuras de Concreto en Varios Estados del País”.

Ha Asistido a cursos: “Convención de Primavera del ACI” en Vancouver, Canadá en 1993; “Concreto 94” en Acapulco, Guerrero y “Concreto 95” en Mexico, D.F.; “Curso Teorico-Práctico de Petrografía y Reactividad Alkali-Agregado”, en Monterrey, N. L., en 1994; “Convención de Otoño del ACI” en

Montreal, Canadá, en 1995; “Técnicas de Análisis para la Caracterización de Materiales en Polvos por Difracción de Rayos X (DRX), Microscopía de Barrido de Electrones (MBE) y Petrografía (MO), CENAM, Querétaro, Qro, en 1995. “Convención de Primavera del ACI” en Houston, Texas, USA, en 1998.

Ha sido Ponente las Conferencias: “La Porosimetría en el Concreto”, Semana de la Investigación, CONACYT, Facultad de Ingeniería Civil, en 1993; “Durabilidad del Concreto y la Porosimetría – Curso de Control y Verificación de la Calidad del Cemento Hidráulico”, Facultad de Ingeniería Civil, en 1993; “Reacción Alkali-Agregado - Efecto en la Durabilidad”, VIII Semana de la Investigación Científica, en la Facultad de Ingeniería Civil, en 1997; “Concurso de Alta Resistencia entre Alumnos que Cursan la Materia de Tecnología del Concreto y Laboratorio” en el 5° Simposio Nacional sobre la Enseñanza del Concreto, en “Concreto 97” de Guadalajara, Jalisco.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

