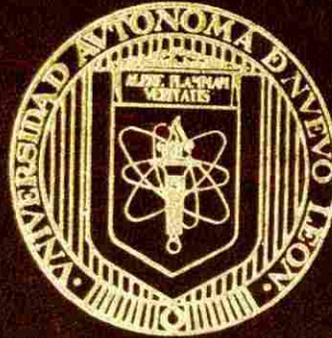


UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL



**LA DURABILIDAD DEL CONCRETO AFECTADA
POR LA CONTAMINACION AMBIENTAL**

POR:
ALEJANDRO DURAN HERRERA

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

JUNIO DE 1998

1998

TESIS

98

TM

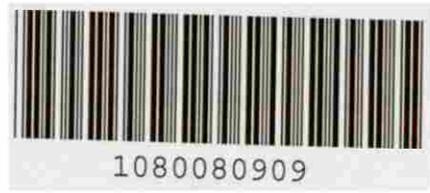
TA445

D8

C.1

LA DURABILIDAD DEL CONCRETO AFECTADA

POR LA CONTAMINACION AMBIENTAL



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



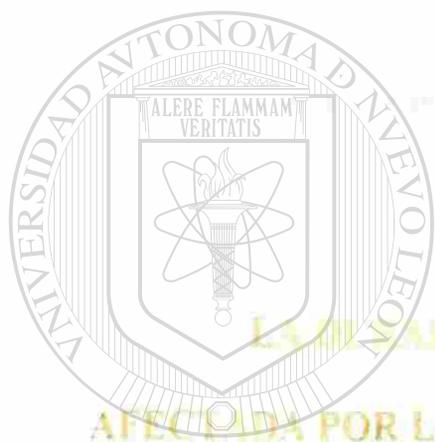
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

INSTITUTO DE INGENIERÍA CIVIL

INSTITUTO DE INVESTIGACIONES CIENTÍFICAS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



UANL

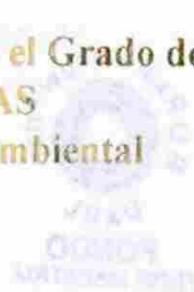
LA DURABILIDAD DEL CONCRETO
AFECTADA POR LA CONTAMINACION AMBIENTAL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

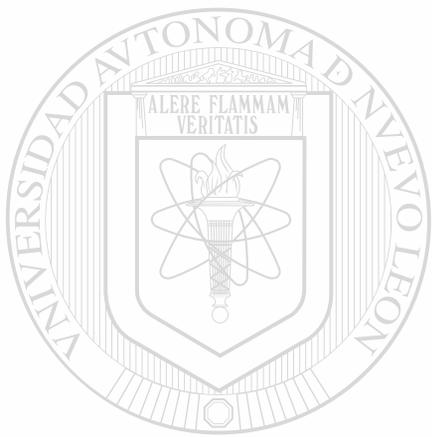
ALEJANDRO DURAN HERRERA

Como requisito parcial para obtener el Grado de
MAESTRIA EN CIENCIAS
con Especialidad en Ingeniería Ambiental



Junio de 1998

TM
TAA45
DB



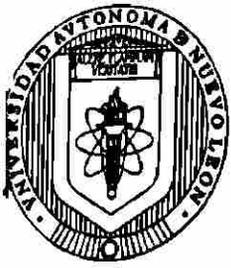
UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

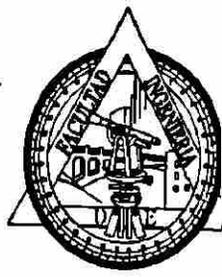
®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS





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



LA DURABILIDAD DEL CONCRETO
AFECTADA POR LA CONTAMINACIÓN AMBIENTAL

Aprobación de la Tesis:

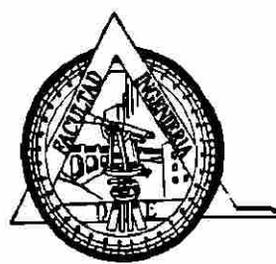
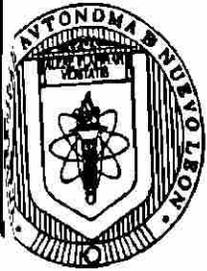
Asesor de la Tesis

Dr. Ing. Raymundo Rivera Villarreal

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Secretario de Estudios de Posgrado
Dr. Ricardo González Alcorta



COMPROBANTE DE CORRECCION

Tesista: DURAN HERRERA ALEJANDRO

Tema de la tesis: LA DURABILIDAD DEL CONCRETO AFEC-
TADA POR LA CONTAMINACION AMBIENTAL

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 Longoria
 Arq. Ramón Longoria Ramírez

El Secretario de Postgrado:

Ricardo
 Dr. Ricardo González Alcorta

Ciudad Universitaria, a 26 de junio de 1998.

DR. RICARDO GONZÁLEZ ALCORTA
SECRETARIO DE ESTUDIOS DE POSGRADO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
P r e s e n t e . -

24 de junio de 1998

Estimado Dr. González:

Habiendo concluido el pasado MES de junio mi trabajo de tesis titulado "La durabilidad del concreto Afectada por la Contaminación Ambiental", que elaboré como requisito para obtener el grado de Maestro en Ciencias con especialidad en Ingeniería Ambiental y habiendo sido aprobado en el aspecto técnico por mi asesor el Dr. Raymundo Rivera Villarreal y en los aspectos ortográfico, metodológico y estilístico por el Arq. Ramón Longoria Ramírez; por medio de la presente, solicito de la manera más atenta se sirva efectuar los trámites correspondientes para sustentar mi examen de grado.

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

Atentamente,



ING. ALEJANDRO DURÁN HERRERA



**INSTITUTO DE INGENIERIA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL U.A.N.L.
DEPARTAMENTO DE TECNOLOGIA DEL CONCRETO**

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

Estimado Dr. González:

Por este conducto me permito comunicar a usted que el Ing. Alejandro Durán Herrera, pasante de la Maestría en Ciencias con especialidad en Ingeniería Ambiental, ha concluido con su tesis titulada “La Durabilidad del Concreto Afectada por la Contaminación Ambiental”, por lo que de mi parte no hay ningún inconveniente para atender a su solicitud de Examen de Grado, con los requisitos que exige el Reglamento de Exámenes Profesionales de nuestra institución. He de agradecerle se continúe con los trámites correspondientes para la programación del examen del Ing. Durán.

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

**Atentamente,
“Alere Flammam Veritatis”
Ciudad Universitaria, a 24 de junio de 1998**

**DR. ING. RAYMUNDO RIVERA VILLARREAL
Asesor de Tesis**

ÍNDICE GENERAL

Resumen	1
Introducción	2
Objetivos	7
Factores que Influyen en el Fenómeno de la Carbonatación	8
El Fenómeno de la Corrosión del Acero Embebido	18
Justificación de la Investigación	19
Métodos	21
Comentarios	23
Conclusiones	25
Tablas de Resultados	26
Gráficas	40
Bibliografía Consultada	61
Anexo Fotográfico	62
Apéndice A	77
Curriculum Resumido Ing. Alejandro Durán Herrera	82

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

ÍNDICE DE TABLAS

1. **Cemento**
2. **Análisis Químico del Cemento**
3. **Agregado**
4. **Proporcionamientos de los Morteros**
5. **Propiedades del Mortero**
6. **Coefficientes de Permeabilidad**
7. **Potencial de Hidrógeno (pH)**
8. **Porosimetría Morteros No Carbonatados**
9. **Porosimetría Morteros Carbonatados**
10. **Promedios Porosimetría Morteros No Carbonatados y Carbonatados**
11. **Reducción de la Porosidad por Efecto de la Carbonatación Acelerada**
12. **Distribución del Radio del Poro para Morteros No Carbonatados**
13. **Distribución del Radio del Poro para Morteros Carbonatados**
14. **Promedios de la Distribución del Radio del Poro para Morteros No Carbonatados y Carbonatados**

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

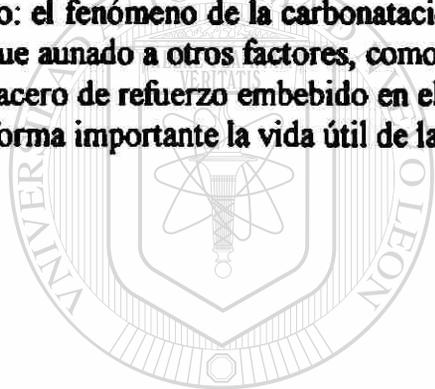
ÍNDICE DE GRÁFICAS

1. Granulometría del agregado empleado
2. Relación Agua/Cemento vs Resistencia a la Compresión a los 28 días
3. Relación Agua/Cemento vs Porcentaje de Absorción
4. Relación Agua/Cemento vs Peso Saturado Superficialmente Seco y Peso Volumétrico Seco a los 28 días
5. Consumo de Cemento vs Resistencia a la Compresión a los 28 días
6. Relación Agua/Cemento vs Coeficiente de Permeabilidad
7. Relación Agua/Cemento vs pH de Morteros No Carbonatados y Carbonatados
8. Presión vs Volumen de Poros para Morteros No Carbonatados y Carbonatados (A/C = 0.35)
9. Presión vs Volumen de Poros para Morteros No Carbonatados y Carbonatados (A/C = 0.45)
10. Presión vs Volumen de Poros para Morteros No Carbonatados y Carbonatados (A/C = 0.55)
11. Presión vs Volumen de Poros para Morteros No Carbonatados y Carbonatados (A/C = 0.65)
12. Promedio de Presión vs Volumen de Poros para Morteros No Carbonatados y Carbonatados
13. Radio del Poro vs Volumen Acumulado de Poros para Morteros No Carbonatados y Carbonatados (A/C = 0.35)
14. Radio del Poro vs Volumen Acumulado de Poros para Morteros No Carbonatados y Carbonatados (A/C = 0.45)
15. Radio del Poro vs Volumen Acumulado de Poros para Morteros No Carbonatados y Carbonatados (A/C = 0.55)
16. Radio del Poro vs Volumen Acumulado de Poros para Morteros No Carbonatados y Carbonatados (A/C = 0.65)
17. Promedio del Radio del Poro vs Volumen Acumulado de Poros para Morteros No Carbonatados y Carbonatados
18. Relación A/C vs Porosidad Total de Morteros No Carbonatados y Carbonatados
19. Relación Agua/Cemento vs Superficie Específica de Morteros No Carbonatados y Carbonatados
20. Relación Agua/Cemento vs Radio Promedio del Poro de Morteros No Carbonatados y Carbonatados
21. Relación Agua/Cemento vs Reducción en la Porosidad por efecto de la Carbonatación Acelerada

RESUMEN

El aire ambiente está compuesto por una mezcla de compuestos vitales para la supervivencia de toda clase de vida en nuestro planeta, el dióxido de carbono o anhídrido carbónico (CO₂) es uno de ellos y aunque es de vital importancia para la subsistencia de la vida por su participación en los ciclos de vida tanto vegetales como animales; desde hace muchos años, se sabe que este compuesto está participando de manera importante en el decremento de la calidad de vida de nuestro planeta. El concreto hidráulico es el material de construcción más empleado a nivel mundial y, al igual que todo tipo de vida en nuestro planeta, resulta sensible a la presencia de este gas, su sensibilidad se ha visto incrementada debido al aumento del CO₂ por las crecientes emisiones de éste a la atmósfera como resultado del incremento en la actividad industrial y vehicular.

La orientación de este estudio está basada en antecedentes poco investigados, se enfocó a estudiar la influencia de este compuesto en propiedades como el pH, la porosidad y la durabilidad de concretos reforzados, para lo cual se diseñaron morteros para cuatro relaciones Agua/Cemento (0.35, 0.45, 0.55 y 0.65). Los resultados encontrados muestran un panorama más claro: el fenómeno de la carbonatación del concreto modifica el pH del concreto y su porosidad, lo que aunado a otros factores, como la humedad y el oxígeno del ambiente, origina la corrosión del acero de refuerzo embebido en el concreto y, por consiguiente, su durabilidad, disminuyendo en forma importante la vida útil de las estructuras de concreto reforzado.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

LA DURABILIDAD DEL CONCRETO AFECTADA POR LA CONTAMINACION AMBIENTAL

INTRODUCCIÓN

El aire es una mezcla de gases que rodean la Tierra en una capa relativamente delgada. El volumen de gases en el aire limpio y seco en el nivel del mar contiene 78% de nitrógeno, 21% de oxígeno, 0.39% de argón y 0.03% de dióxido de carbono (CO₂ o anhídrido carbónico). Además de estos componentes básicos, existen otros en muy baja concentración⁽¹⁾. A pesar de la baja concentración del CO₂ en la atmósfera, sin el dióxido de carbono no existiría la vida, dada su participación en los procesos celulares.

El dióxido de carbono (CO₂) a temperatura normal es un gas incoloro e inodoro que puede tener dos orígenes, las fuentes antropogénicas (emisiones realizadas por el hombre) y fuentes naturales. Las emisiones de CO₂ en las fuentes antropogénicas están dadas por la combustión de energéticos fósiles y en las fuentes naturales por la descompensación biológica de todo lo que tuvo vida y por la liberación desde océanos. El uso de los combustibles fósiles es la mayor fuente del CO₂ atmosférico⁽²⁾.

A mediados del siglo XVIII, el científico británico Joseph Priestly y el químico francés Antoine Lavoisier averiguaron que todos los animales exhalan un “vapor sagrado”, el cual inhalan a su vez todos los vegetales en un armonioso ciclo vital. En el año 1822, el matemático francés Jean Fourier estableció un nuevo hito al comparar el aire de la atmósfera terrestre con el del interior de un invernadero, él reportaba que la concentración de CO₂ en el aire era inferior a 270 ppm y a principios de los 90's, el Dr. Charles David Keelling, certificaba que la concentración de este gas supera las 360 ppm. Este importante incremento con el paso de los años, debido principalmente al consumo de combustibles fósiles por los vehículos y el avance de la industrialización ha incrementado el efecto invernadero que origina serias modificaciones meteorológicas. La unidad más adecuada para medir acumulaciones gaseosas en grandes espacios es parte por millón (ppm).

A principios de este siglo, el científico sueco Svante Arrhenius, premio Nobel de Química en 1903, fue el primero en dar la voz de alarma al afirmar: “Estamos evaporando en el aire nuestras minas de carbón”.

Gracias al concienzudo estudio de Keelling, se cuenta con algunas cifras fidedignas: “Durante la Segunda Guerra Mundial, la atmósfera contenía 1,500 millones de toneladas de CO₂. Luego, a partir de 1973, esta cantidad se incrementó a un ritmo de un 2% anual”. No hay duda de que este brioso aumento concuerda directamente con la actividad humana y no con la de la naturaleza⁽³⁾.

En resumen, los párrafos anteriores nos presentan un amplio panorama de la importancia que tiene el Dióxido de Carbono en la vida de nuestro planeta; sin embargo, debemos considerar los efectos perjudiciales al aumentar su concentración por el efecto de invernadero y el daño que puede propiciar en las estructuras de concreto reforzado.

La temperatura media de la tierra es de unos 15 °C. Esta temperatura está influenciada por un delicado equilibrio que se mantiene entre la energía que absorbe procedente del sol y la energía remitida por la tierra al espacio.

Cualquier cambio en la cantidad de energía absorbida o emitida por la tierra puede perturbar este equilibrio y afectar al clima. En relación con esto, debemos considerar lo que sucede con la radiación infrarroja emitida por la tierra. Parte de ella es absorbida por la atmósfera antes de salir al espacio exterior. Dos de los gases del aire, H₂O y CO₂, absorben radiación infrarroja y actúan como una envoltura aislante para prevenir la pérdida de calor. A este efecto se le conoce como efecto invernadero. Si no fuera por este efecto, la temperatura media de la tierra podría ser de -25 °C en lugar de 15 °C. De estos dos gases, el vapor de agua absorbe más radiación infrarroja que el dióxido de carbono porque está en mayor concentración. Esta propiedad del vapor de agua hace que la temperatura descienda menos por las noches cuando el cielo está cubierto de nubes. En las regiones desérticas, donde hay muy poco vapor de agua, hay grandes diferencias de temperatura entre el día y la noche.

Como ya se mencionó anteriormente, la concentración de CO₂ en la atmósfera es pequeña, pero se sabe que está aumentando. El aumento del consumo de combustibles minerales es el principal responsable y la deforestación, que reduce la cantidad de CO₂ consumido por la fotosíntesis, es otro importante factor.

En los últimos 100 años, el aumento en la concentración de CO₂ en la atmósfera, ha originado que la temperatura media del globo aumente 4 °C, un incremento como éste afectaría al clima mundial en forma importante. Los casquetes polares se fundirán parcialmente, aumentando el nivel de los océanos inundando 1200 islas y muchas zonas costeras, incluyendo la mitad del estado norteamericano de la Florida⁽⁴⁾.

EFFECTO DEL CO₂ EN EL CONCRETO REFORZADO

Cuando un concreto o mortero se encuentra expuesto al Dióxido de Carbono, se presenta una reacción con los hidróxidos que produce carbonatación.

Prácticamente, todos los hidróxidos del cemento Portland hidratado, son susceptibles de carbonatarse. El resultado de este fenómeno puede ser benéfico o dañino, dependiendo del tiempo, la concentración y el grado de carbonatación. La carbonatación intencional, durante la producción, puede ser benéfica al mejorar la resistencia, la dureza, y la estabilidad dimensional de los productos de concreto. Sin embargo, la carbonatación es

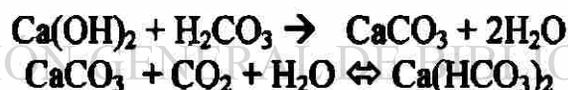
dañina al disminuir el pH de la pasta de cemento, lo cual propicia la corrosión del acero de refuerzo embebido en el concreto ⁽⁹⁾, inhibiendo la película protectora de óxido de fierro y dejándolo expuesto a la corrosión al permearse humedad y oxígeno a través del concreto, lo cual, además, origina retracción.

CARBONATACIÓN POR EL CO₂ PRESENTE EN EL AGUA

El dióxido de carbono absorbido por el agua de lluvia forma ácido carbónico; el cual, al infiltrarse en el subsuelo, se mezcla con el agua friática. Por otro lado, las plantas en descomposición producen una cantidad adicional de ácido carbónico, así como de ácido húmico, el cual también se disuelve con el agua de lluvia produciendo altas concentraciones de CO₂ libre. Mientras estas aguas usualmente son ácidas, la agresividad no puede ser determinada sólo con el pH. La reacción con los carbonatos presentes en el suelo produce un equilibrio con el bicarbonato de calcio, lo cual puede resultar en soluciones con un pH neutro, pero que contiene cantidades importantes de CO₂ agresivo ⁽¹¹⁾.

El avance de la carbonatación por el CO₂ disuelto en agua depende de la calidad del concreto y de la concentración del CO₂ agresivo. Hasta el momento, es imposible establecer un valor límite a causa de la gran variedad en las condiciones de las construcciones subterráneas. Sin embargo, se ha concluido en algunos estudios, que el agua que contiene más de 20 partes por millón (ppm) de CO₂ agresivo puede producir una rápida carbonatación de la pasta de cemento hidratada. Por otro lado, las aguas con movimiento libre con una concentración de CO₂ agresivo de 10 ppm o menor, pueden producir una carbonatación significativa ^(12, 13).

Las reacciones típicas debidas al intercambio de cationes entre el ácido carbónico y el hidróxido de calcio presente en la pasta de cemento hidratado se dan de la siguiente manera ⁽¹⁴⁾:



Después de la precipitación del carbonato de calcio insoluble, la primera reacción se detendrá hasta que exista algo de CO₂ libre en el agua. La presencia del CO₂ libre ayuda a la hidrólisis del hidróxido de calcio, al transformarse el carbonato de calcio en bicarbonato soluble, de acuerdo con la segunda reacción. Por ser irreversible la segunda reacción, una cierta cantidad de CO₂ libre, también llamado CO₂ de equilibrio, será agresivo al conducir la segunda reacción a la derecha acelerará el proceso de transformación del hidróxido de calcio presente en la pasta hidratada en bicarbonato de calcio soluble. El contenido de CO₂ de equilibrio en el agua depende de su dureza (por ejemplo, la cantidad de calcio y magnesio presente en la solución) ⁽¹³⁾.

CONCENTRACIÓN: El agua subterránea normal contiene de 15 a 40 mg/litro de CO₂; sin embargo, no es extraño encontrar concentraciones del orden de 150 mg/litro. El agua

de mar contiene de 35 a 60 mg/litro de CO_2 . Cuando el pH del agua subterránea o del agua de mar es igual o mayor que 8, la concentración de CO_2 libre es generalmente despreciable; por otro lado, cuando el pH es menor que 7, las concentraciones de CO_2 pueden ser agresivas⁽¹³⁾.

CARBONATACIÓN ATMOSFÉRICA

Es la reacción del dióxido de carbono presente en el aire con la pasta de cemento Portland hidratado, generalmente es un proceso lento. Este fenómeno depende mucho de la humedad relativa presente en el ambiente, la temperatura, la permeabilidad del concreto y la concentración del CO_2 .

HUMEDAD RELATIVA: Un mayor avance de la carbonatación ocurre cuando la humedad relativa se mantiene entre el 50 y el 75 por ciento. Cuando la humedad relativa es inferior al 25 por ciento, el avance de la carbonatación se considera insignificante. Cuando la humedad relativa es superior al 75 por ciento, la humedad presente en los poros restringe la penetración del CO_2 .

TEMPERATURA: La reacción química de la carbonatación, como cualquier reacción química, se acelera con el incremento de la temperatura ambiente. En México, por localizarse el país en una zona tropical, el avance de la carbonatación es significativo, en comparación con el avance que se da en los países localizados en zonas templadas o frías⁽⁶⁾.

PERMEABILIDAD: La palabra permeabilidad se entiende como la habilidad de pasar a través. Un material poroso bien puede ser hermético al ingreso de aire o de agua, basta que los poros del material no estén interconectados (Fig. 1). La permeabilidad de un material depende de la porosimetría y del mecanismo de movimiento de fluidos.

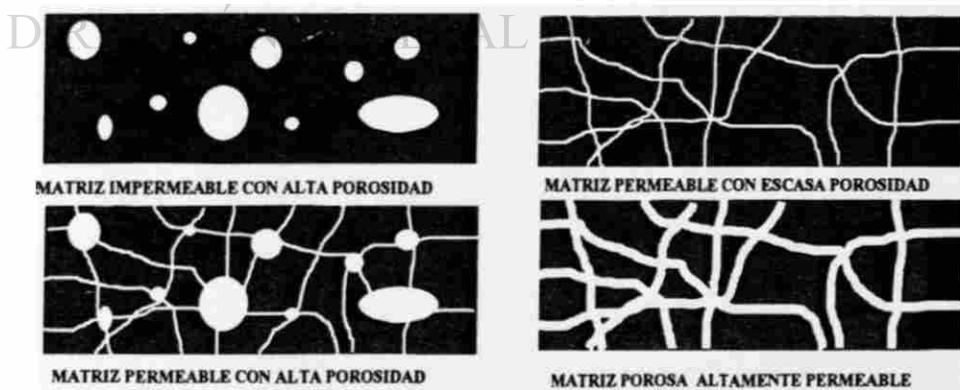
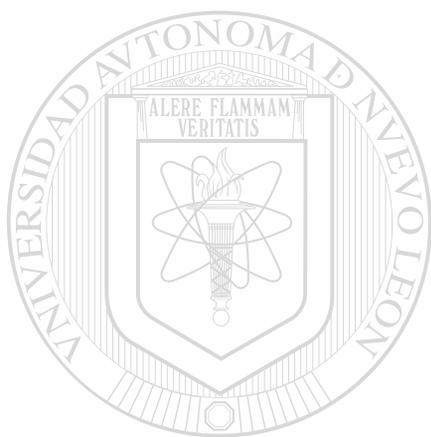


Fig. 1 Ilustración esquemática de la porosidad y permeabilidad. Un material bien puede ser poroso sin ser impermeable, pero no puede ser permeable sin ser al mismo tiempo poroso.

CONCENTRACIÓN DE CO₂: Aún cuando la concentración de CO₂ en el aire ambiente es baja, como en el caso de áreas rurales, donde la concentración es de alrededor del 0.03% en volumen, se da la reacción. En un laboratorio sin ventilación, la concentración puede ser del orden del 0.1%; en las grandes ciudades, el promedio es del 0.3% y, excepcionalmente, en zonas industriales hasta del 1%. El avance de la carbonatación se incrementa conforme se incrementa la concentración de CO₂, como en el caso de túneles y sótanos para estacionamiento de vehículos automotores a gasolina⁽¹⁰⁾.

En concreto que se encuentra en áreas industriales en donde las concentraciones de CO₂ en el aire son mayores, la carbonatación avanza mas rápidamente⁽⁸⁾.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

OBJETIVOS

Como ya se explicó en la introducción de esta investigación, el fenómeno de la carbonatación propicia la corrosión del acero de refuerzo embebido en elementos de concreto reforzado al permearse en el concreto humedad y oxígeno, formándose óxidos e hidróxidos de hierro expansivos, originando a un deterioro severo del elemento de concreto por descascaramiento del concreto y disminución de la sección del acero de refuerzo y de la adherencia (Ver fotografías 19 y 20).

La presente investigación está enfocada a estudiar el efecto de la carbonatación en las propiedades del concreto, tales como: el avance de la carbonatación, la variación del pH, la permeabilidad, la cantidad de poros, el tipo de poros, la distribución del tamaño del poro, el radio promedio del poro, la superficie específica, etc., para distintas relaciones Agua/Cemento (A/C) en morteros fabricados con agregado triturado calizo con tamaño máximo de 4.75 mm, de la zona de Monterrey.

Este trabajo constituye una etapa de una investigación más amplia; cuyo alcance, en otras etapas, estará enfocado a estudiar la efectividad de emplear cementantes complementarios como puzolanas naturales y subproductos industriales (escoria de alto horno, cenizas, etc.), para minimizar el avance de la carbonatación en el concreto. Se ha demostrado que estos cementantes complementarios mejoran algunas propiedades del concreto, dándole un uso de provecho y disminuyen el consumo de cemento Portland en el concreto. Por otro lado, viéndolo desde un enfoque ecológico, al utilizar estos complementos cementantes en la producción de concreto disminuirá la demanda de clinker, lo que repercutirá en una disminución en las emisiones de CO₂ que la industria cementera hace a la atmósfera, lo cual redundará en una disminución del efecto de invernadero, ya que en el proceso de clinkerización, por cada tonelada de cemento Portland producido, se emite a la atmósfera una tonelada de CO₂. ®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

FACTORES QUE INFLUYEN EN LA CARBONATACIÓN

ESTRUCTURA DEL CONCRETO: El tipo, la cantidad, el tamaño y la forma de distribución de las fases presentes en un sólido constituyen su estructura. Los defectos gruesos en la estructura de un material pueden ser fácilmente vistos, mientras que los defectos finos no pueden ser vistos sino mediante el uso de un microscopio. El término **macroestructura** se emplea generalmente para identificar en la estructura los defectos gruesos que son visibles por el ojo humano. El límite de apreciación de un ojo humano sano es aproximadamente de un quinto de milímetro ($200 \mu\text{m}$), el término **microestructura** define la porción de la macroestructura que requiere ser magnificada a través de un microscopio para ser observada por el ojo humano⁽¹⁴⁾.

La carbonatación del concreto no es un simple proceso químico sino la interacción de los siguientes procesos diferentes:

DIFUSIÓN: El concreto es poroso, permeable e higroscópico. Cuando el concreto se seca, después del período de curado durante el cual se mantuvo húmedo, los poros capilares que inicialmente se encontraban llenos se secan parcialmente, es entonces cuando se presenta un rompimiento de la cohesión en la solución del poro dentro de los poros capilares. Esto normalmente ocurre para un contenido de humedad en el concreto de aproximadamente el 80%. De cualquier manera, siempre quedará una película de solución del poro que permanecerá dentro, sobre las paredes del poro.

Es en los poros más grandes donde este rompimiento ocurre primero, lo que posteriormente deja ingresar al aire atmosférico que contiene CO_2 y el vapor de agua que penetra hacia el interior del concreto por difusión.

DISOLUCIÓN: El CO_2 que penetra al concreto de la manera anteriormente descrita se disolverá en la solución del poro (la película de agua adherida a las paredes del poro). Esta disolución se dará cuando exista un equilibrio entre el contenido de CO_2 presente en el aire dentro del poro y el presente en la solución del poro.

NEUTRALIZACIÓN: Originalmente, la solución del poro es alcalina con un valor de pH entre 12 y 13. Durante la hidratación del cemento Portland, además de otros compuestos, se forma hidróxido de calcio [$\text{Ca}(\text{OH})_2$] así como hidróxidos alcalinos (NaOH y KOH).

Cuando el CO_2 es absorbido hacia el interior de la solución del poro, se presenta una reacción química por medio de la cual el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ disuelto en la solución del poro se precipita como calcita (CaCO_3). El que el $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sea removido de la solución del poro significa que los cristales de $\text{Ca}(\text{OH})_2$ presentes en la matriz cementante se disuelven en la solución del poro.

Cuando todo el Ca(OH)_2 haya sido removido de la matriz cementante, el valor del pH en la solución del poro decaerá, con lo cual la solución del poro tenderá a valores de pH neutros. Entonces el concreto carbonatado no representa una protección contra la corrosión del acero embebido, ya que para protegerlo se requiere de un pH mínimo de 9.

LIXIVIACIÓN: Durante el proceso de carbonatación el Ca(OH)_2 presente en la matriz cementante es reemplazado por CaCO_3 en la superficie expuesta del elemento de concreto. Si esta superficie se expone a lluvia ácida (ácidos debidos al SO_2 , SO_3 , NO_x y CO_2) entonces se disolverá el CaCO_3 lixiviándose.

La permeabilidad del concreto es un concepto muy amplio: se debe de hacer una distinción entre los diferentes mecanismos de movimiento de fluidos en el concreto. Estos mecanismos se enlistan a continuación:

SUCCIÓN CAPILAR: El agua puede ser succionada hacia el interior del concreto como resultado de la acción capilar de los poros capilares. La succión puede sólo atraer el agua hacia el interior del concreto y no fuera de él. Cuando un poro capilar ha sido llenado, el movimiento del agua se detiene. La fuerza que ocasiona el fenómeno es debida a la diferencia de humedades entre el concreto y el ambiente en que se encuentra.

Cuando una muestra de concreto se sumerge en agua, los poros capilares finos actúan succionando el agua. El aire escapa a través de los poros capilares más grandes, dentro de los cuales al agua no le es posible penetrar en un principio, debido a que la tensión superficial del agua es muy pequeña comparada con la presión excesiva del aire desalojado.

— Cuando un concreto seco se sumerge en agua parcialmente, el área de concreto que está en contacto con ella, succionará el agua, entonces los poros capilares se llenarán y un “frente de líquido” se moverá hacia el interior del concreto.

El agua presente en este frente de líquido se evaporará. Cuando exista un balance entre la adición de agua por succión capilar y la emisión de ésta por evaporación (humedecimiento y secado), la ubicación del frente de líquido se tornará estable, este frente no necesariamente es plano. La evaporación será más fuerte en las esquinas y bordes de un elemento estructural, debido a que la relación entre la superficie de evaporación y la adición de agua es mayor.

La humedad relativa del aire ambiente que rodea al elemento así como la velocidad del viento influyen considerablemente en la evaporación de humedad en el concreto.

DIFUSIÓN: El transporte de fluidos y de iones por difusión se debe a la diferencia que existe en las concentraciones de éstos en diferentes puntos fuera o dentro del concreto. Los iones siempre se mueven hacia los puntos con menor concentración (Movimiento

Browniano). En el agua de mar hay materiales agresivos para el concreto como son el dióxido de carbono (CO_2) y los iones sulfato (SO_4^-) y Magnesio (Mg^{++}).

PERMEACIÓN: El flujo de agua pasa a través de los poros capilares y los defectos hacia el interior del concreto, y la cantidad de agua permeada puede ser calculada a partir de la Ley de Darcy's, que enuncia que la cantidad de agua permeada por unidad de área por unidad de tiempo es proporcional al gradiente de presión. Pruebas de laboratorio indican que la cantidad de iones cloro que se permean con el agua de mar puede ser ignorada, en comparación con el ingreso y los iones cloro que pueden ingresar por difusión.

MIGRACIÓN: Cuando existen diferencias en el potencial eléctrico entre diferentes áreas de una estructura de concreto, los iones (por ejemplo los cloro) se moverán hacia el campo eléctrico.

POROSIMETRÍA: Los poros capilares de la pasta de cemento forman una red, lo cual significa que el concreto, aparte de ser poroso, es también permeable (Fig. 1). La permeabilidad del concreto se incrementa por el continuo agrietamiento y por los defectos originados en el proceso de fabricación⁽⁷⁾.

La pasta de cemento hidratada del concreto tiene una determinada porosidad.

La relación entre el volumen de masa sólida (R_0) de un material y el volumen bruto (R) se conoce como la masa sólida en la muestra.

$$T = R_0/R$$

La relación entre el volumen de poros ($V = R - R_0$) y del volumen bruto del material (R) se le conoce como porosidad del material.

$$P = V/R = R - R_0/R = 1 - R_0/R = 1 - T$$

La suma de la fase sólida del material y de su porosidad es 1 (o 100% si se desea expresar en porcentaje).

$$T + P = T + (1 - T) = 1$$

La porosidad de un material no es el único parámetro que tiene influencia sobre la permeabilidad de los materiales.

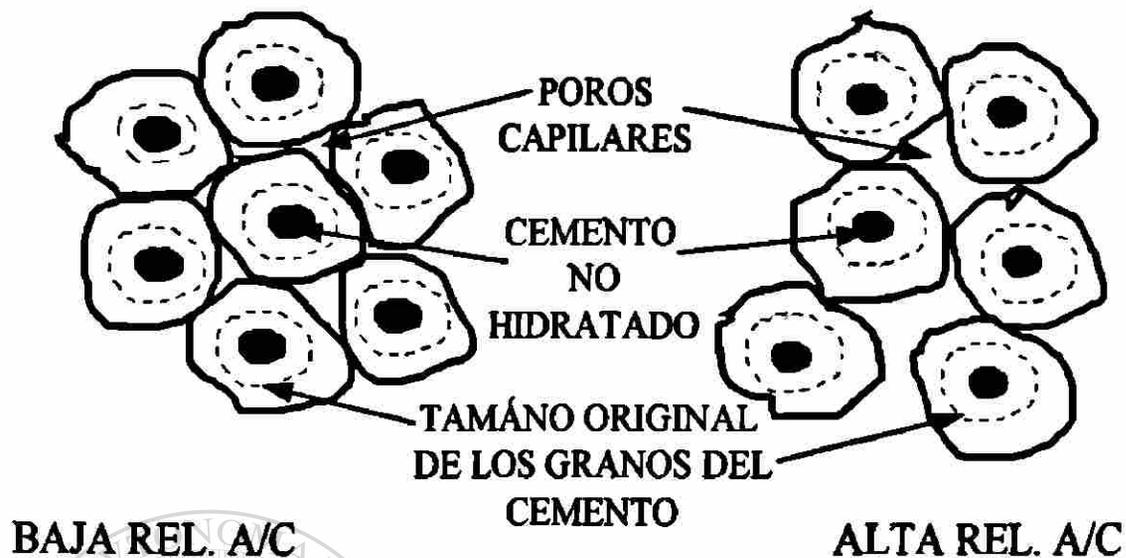


Fig. 1 Aumento en Porosidad Debido a una Alta Relación A/C

A continuación se enlistan algunos de los tipos de poros que forman la matriz cementante en el concreto:

- La porosidad en el gel de la pasta de cemento.
- La porosidad capilar de la pasta de cemento.
- Microgrietas en la pasta de cemento.
- Grietas de adherencia en la interface entre la pasta y la superficie de las partículas de agregado.
- Macrogrietas.
- Otros como:
 - * La porosidad del agregado.
 - * El aire atrapado.
 - * El aire incluido.
 - * Defectos o macrogrietas producidas por flujo o por sobrecarga mecánica.

POROS EN EL GEL: Las dimensiones de los poros en el gel son del orden de 2 a 20 Å. Para comparar, un ion cloro tiene una dimensión de 2 Å y una molécula de agua una dimensión de 3 Å. Por lo que son poros muy pequeños llenos de líquido, en los cuales el líquido está fuertemente adherido a la superficie de éstos. Esto significa que este líquido no participa en el proceso de hidratación del cemento o que no puede servir como medio de difusión para moléculas y iones. Estos poros representan alrededor del 15% del volumen de la pasta de cemento.

POROS CAPILARES: El tamaño de los poros capilares es del orden de 20 a 50,000 Å. Los poros capilares se forman antes y durante el proceso de hidratación del cemento. Los poros capilares grandes se forman debido al agua en exceso que se emplea en la bachada, que por no reaccionar con el cemento tiende a sangrar.

En el concreto endurecido, los poros capilares llenos de líquido, representan un medio para la difusión de iones (como el cloro) y cuando están vacíos son un medio para la difusión de los gases (como el CO₂ y el oxígeno). Al mismo tiempo, provocan succión capilar (acción capilar).

DEFECTOS: La formación de los defectos en la matriz cementante puede ser originada como resultado de un deficiente procedimiento de construcción. Estos defectos se pueden disminuir; sin embargo, no se pueden eliminar por completo.

GRIETAS EN LA INTERFACE: Cuando el concreto está en estado fresco, el agua en exceso tiende a separarse de la pasta cementante, y existe una tendencia del agua a acumularse a lo largo de la superficie de las partículas de agregado y del refuerzo, hasta por el microsangrado (Figs. 2 y 3).

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

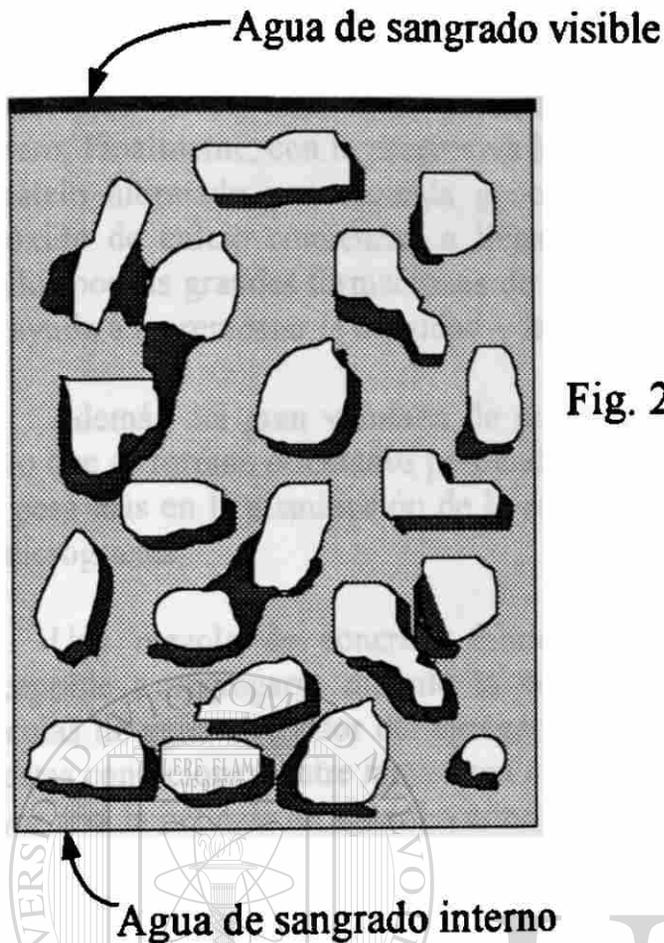


Fig. 2 Representación esquemática del sangrado en el concreto fresco compactado.

Debido a la retracción por secado, se pueden originar grietas por adherencia en la zona de transición entre el agregado y la parte masiva de la pasta. Estos defectos pueden ser considerados también como grietas en la pasta.

Las fuerzas de atracción de Van de Waals son los que producen la adherencia entre los productos de hidratación y las partículas de agregado; por esto, la resistencia en cualquier punto de la zona de transición depende del volumen y del tamaño de los poros o vacíos presentes hasta para un concreto con baja relación A/C, el volumen y el tamaño de los poros en la zona de transición a edades tempranas será mayor que en el resto de la matriz cementante⁽¹⁴⁾.

Aunque la estructura y las propiedades de la zona de transición difieren de la estructura y de las propiedades de la parte masiva de la pasta de cemento hidratada, ambas están formados por los mismos compuestos⁽¹⁴⁾. En el concreto fresco ya compactado, aparecen películas de agua alrededor de las partículas de agregado grueso. Esto conducirá a un incremento en la relación A/C de la pasta que está cerca del agregado en comparación a la que tiene el resto de la matriz cementante, seguido por el desarrollo de compuestos de sulfato y de aluminato de calcio que se combinan para formar etringita

e hidróxido de calcio como en la matriz cementante. Debido a la alta relación A/C que circunda al agregado grueso, estos productos cristalinos de cristales relativamente grandes para formar una red de poros mayor que en la matriz cementante o matriz del mortero. Finalmente, con la progresiva hidratación la formación de cristales de hidróxido de calcio hidratado una segunda generación de cristales pequeños de etringita y de hidróxido de calcio comienzan a llenar los espacios que existen entre los conductos creados por las grandes formaciones de etringita y los cristales de hidróxido de calcio, lo que ayuda a incrementar la densidad y la resistencia de la zona de transición⁽¹⁴⁾.

Además del gran volumen de poros capilares y de los cristales de hidróxido de calcio que se forman orientados perpendicularmente a la superficie del agregado, el factor que pesa más en la disminución de la resistencia en la zona de transición es la presencia de microgrietas.

Una mezcla de concreto fabricada con un agregado mal graduado es más susceptible a segregarse durante la compactación. Debido a ello, se pueden formar películas de agua alrededor del agregado grueso, especialmente detrás de las partículas. En estas condiciones, entre mayor sea el tamaño máximo del agregado de mayor espesor, mayor será la película de agua. La zona de transición que se forma bajo estas condiciones estará susceptible a agrietarse cuando se someta a esfuerzos de tensión inducidos por movimientos diferenciales entre el agregado y la pasta de cemento hidratado. En otras palabras, en el concreto se presentan microgrietas en la zona de transición aún y cuando una estructura no haya sido cargada. Obviamente, las cargas de impacto que se presenten a edades tempranas, la retracción por secado y las cargas permanentes que ocasionan grandes deformaciones incrementarán el tamaño y número de microgrietas.

GRIETAS EN LA PASTA: Durante la hidratación del cemento, se desarrolla una diferencia entre el volumen original de la pasta y el volumen de los productos de hidratación (gel del cemento). A esto se le conoce como retracción por efecto de la hidratación o retracción química.

Cuando la relación Agua/Cemento es baja, se presenta una autodesecación del concreto, esto contribuye a reducir el volumen original de la pasta. Esta reducción no puede ocurrir libremente, debido a que las partículas de agregado en la matriz cementante representan una restricción, que produce esfuerzos de tensión en la pasta. En caso de que se exceda la capacidad última de deformación de los productos de reacción, las grietas se presentarán en el gel del cemento o en la interface con las partículas de agregado. A este sistema de microgrietas presente en la pasta de cemento se le conoce como grietas en la pasta y grietas en la interface. Su presencia debe ser limitada; sin embargo, debemos de estar conscientes de que no pueden ser completamente eliminadas.

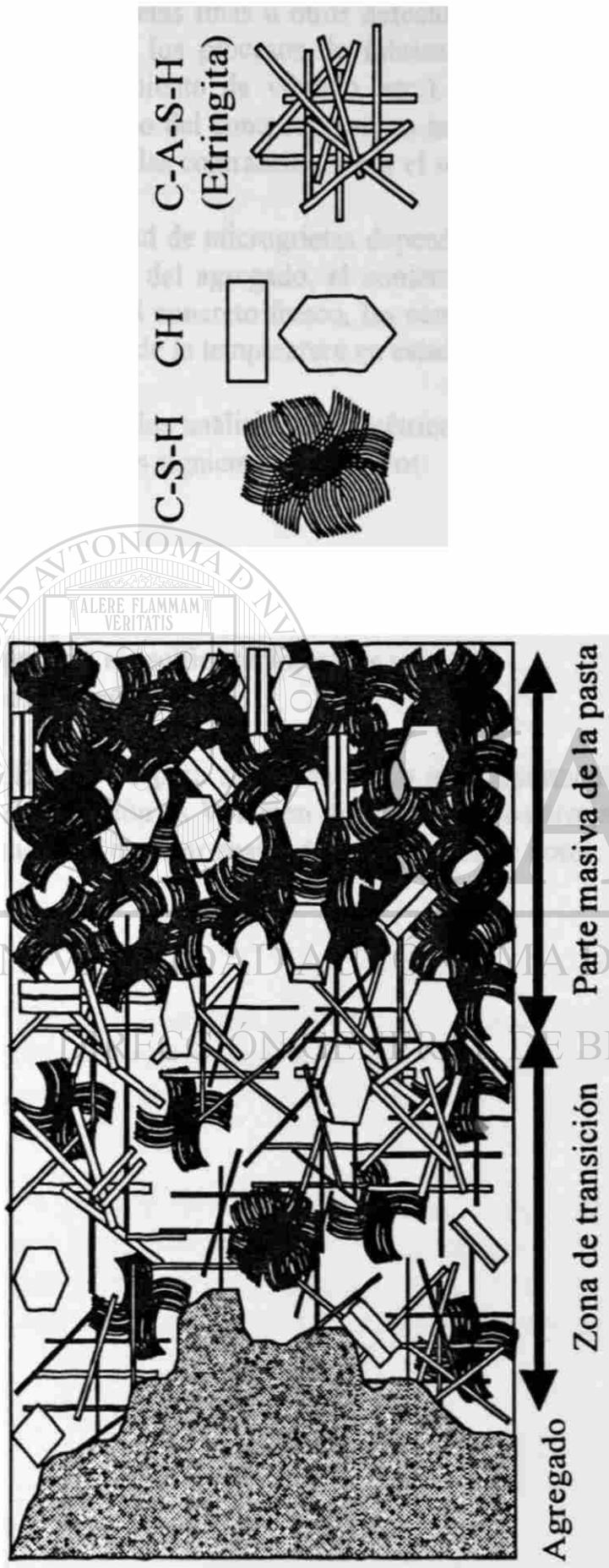


Fig. 3 - Representación esquemática de la zona de transición y de la parte masiva de la pasta.

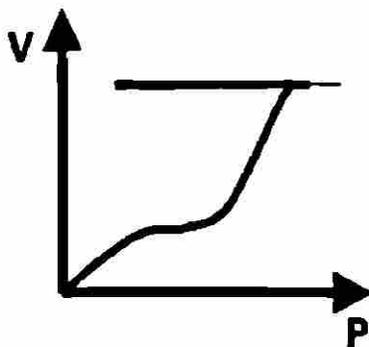
MACROGRIETAS: Si en un análisis microestructural se observa que el concreto tiene macrogrietas, grietas finas u otros defectos severos, algo anduvo o anda mal con uno o más defectos de los procesos de fabricación (diseño de la mezcla, procedimiento de colado, procedimiento de vibrado, etc.). Es común que la falla halla ocurrido en el proceso de curado del concreto (grietas por retracción en estado plástico, termogrietas o grietas debidas a las contracciones por el secado exterior).

La cantidad de microgrietas depende de numerosos parámetros como el tamaño y la granulometría del agregado, el contenido de cemento, la relación A/C, el grado de consolidación del concreto fresco, las condiciones de curado, la humedad ambiente y el comportamiento de la temperatura en estado fresco.

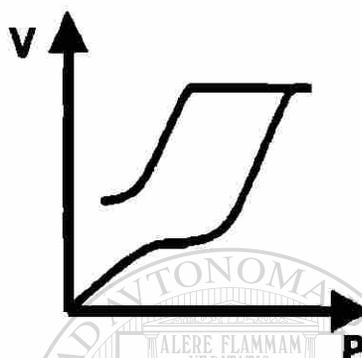
Mediante los análisis porosimétricos que se realizan vía intrusión de mercurio se pueden definir los siguientes parámetros:

- Tipo de poro
- Volumen total de poros
- Radio promedio del poro
- Superficie específica de los poros y
- Densidad aparente

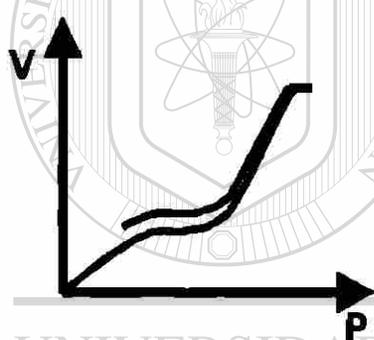
El tipo de poro se define según el comportamiento del tramo de descarga en la gráfica de Presión vs Volumen de poros que nos arroja un análisis de porosidad, lo cual nos conduce a detectar cuatro diferentes tipos de poros.



Curva P vs Hg para el poro tipo “cuello de botella”
(El Hg permanece en el poro)



Curva P vs Hg para el poro tipo “cilíndrico”
(La mayor parte del Hg sale del poro)



Curva P vs Hg para el poro tipo “cónico”
(El Hg sale del poro)

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

El otro tipo de poro es el “plano”: éste se presenta principalmente en materiales cuya estructura es laminada o en forma de estratos. Durante la histerisis, el mercurio permanece en el poro y no sale; por este motivo, la curva P vs VHg es similar al modelo cuello de botella.

En base a la curva P vs VHg, seleccionamos el tipo de poro con el cual el software del equipo podrá calcular la superficie específica de los poros. En el caso de los morteros estudiados en esta investigación, los poros fueron de tipo cilíndrico y para este tipo de poro el software realiza el cálculo de la superficie específica con la siguiente ecuación:

$$S_E = 2 \frac{V_P}{R_P}$$

EL FENÓMENO DE LA CORROSIÓN DEL ACERO EMBEBIDO

La carbonatación propicia la corrosión del acero de refuerzo embebido en el concreto⁽⁵⁾.

Las condiciones que conducen a la corrosión del acero de refuerzo y presfuerzo son de gran importancia. Es necesario evitar estas condiciones para asegurar que el concreto cumplirá con la vida útil estimada en el diseño.

La corrosión del acero en el concreto es usualmente un proceso electroquímico que requiere del desarrollo de un ánodo donde la corrosión tiene lugar y de un cátodo donde la reducción tiene lugar. En el ánodo, al ser liberados los electrones se forman los iones de hierro ($\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{++} + 2\text{e}^-$); y en el cátodo se liberan los iones hidróxilo ($\text{H}_2 + 1/2\text{O}_2 + 2\text{e}^- \rightarrow 2(\text{OH}^-)$). Los iones ferrosos subsecuentemente se van a combinar con el oxígeno o con los iones hidróxilo para producir varias formas de óxidos e hidróxidos.

El alto pH del concreto resulta principalmente de la presencia del hidróxido de calcio liberado al hidratarse el cemento Portland, el cual constituye aproximadamente de un 15 a un 25 por ciento de la pasta de cemento Portland.

El acero en el concreto normalmente se encuentra protegido contra la corrosión debido al alto valor de pH, mayor que 12.0, propio de la pasta de cemento Portland que lo circunda, con lo que el acero no se corroerá para este valor de pH. Si el pH se ve disminuido (e.g., 10 o menor) se puede presentar corrosión al desinhibirse la acción anticorrosión de la película pasivadora del óxido simple que cubre el acero. La carbonatación de la pasta de cemento Portland puede disminuir el pH a valores de 8 a 9, lo cual propicia que el acero se pueda corroer.

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

Desde siempre, el ser humano a lo largo de su existencia ha requerido de un lugar dónde habitar y dónde desarrollar sus actividades, sin que los cambios meteorológicos interfirieran en su quehacer diario. En la actualidad, se dice que el hombre vive entre montañas construidas por él mismo, refiriéndose comúnmente con este término a las grandes edificaciones de concreto reforzado que actualmente se construyen con mayor frecuencia y que permanentemente están en contacto con el aire contaminado por la actividad industrial y el tráfico de vehículos automotores que producen grandes cantidades de CO₂, que pueden conducir a una baja durabilidad de las edificaciones.

Se dice que el concreto era un material muy noble ya que muy a menudo, al estar trabajando, se le exigía soportar esfuerzos o ataques que por desconocimiento no fueron contemplados en la etapa de diseño; entre éstos, la corrosión del acero de refuerzo propiciada por la carbonatación del concreto por el ataque del CO₂.

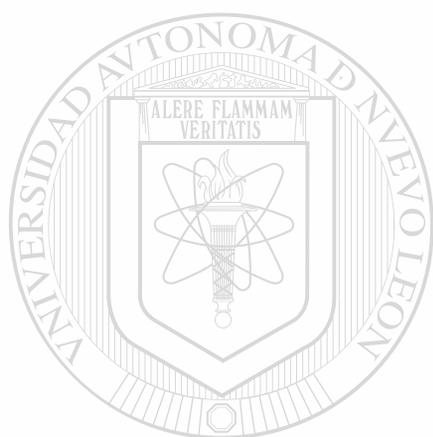
En el caso de “concreto reforzado”, desde hace aproximadamente dos décadas, en los países del primer mundo, se le ha dado gran importancia al aspecto de durabilidad por corrosión del acero de refuerzo. En México, aunque es del conocimiento de “algunos” diseñadores y constructores, la importancia de contemplar este concepto en las etapas de diseño y construcción, comúnmente se pasa por alto debido a diversos factores como pueden ser:

- La inercia existente entre la mayoría de los diseñadores a seguir diseñando con criterios anticuados, basados principalmente en la resistencia del concreto a la compresión.
- La creencia errónea, por parte del constructor, de que al contemplar el aspecto de la durabilidad por corrosión del acero, los costos se pueden incrementar.
- Aunque este aspecto se haya contemplado en la etapa de proyecto, la incompetencia del personal encargado de la supervisión de la obra durante la etapa de construcción, quien por desconocimiento de los problemas de durabilidad, no siguen al pie de la letra las especificaciones de construcción.
- Las obras comúnmente resultan mal construidas y poco durables, por el desconocimiento de la importancia de los factores involucrados.
- Otros.

Al norte de los Estados Unidos de Norte América y en Canadá, donde se sufre de largos períodos de bajas temperaturas, el gran problema de durabilidad que se presenta en el concreto, es el deterioro que éste sufre por la corrosión del acero de refuerzo embebido al concentrarse en el concreto los cloruros que se infiltran al mezclarse las sales deshielantes con el agua de deshielo al usarse en los puentes carreteros con el fin de evitar accidentes por derrapamiento y hacer más seguro el tráfico de vehículos.

Sin embargo, la baja durabilidad por corrosión del acero se propicia además por un fenómeno conocido como carbonatación del concreto. Este fenómeno cada día se vuelve

más común en México debido a la alta permeabilidad de los concretos fluidos, los cuales, en su mayoría, fueron fabricados con relaciones A/C muy superiores a 0.45, se ve acelerado por las altas temperaturas prevalecientes. En Estados Unidos, este problema no es crítico como en México, ya que al emplear relaciones A/C inferiores a 0.45 para minimizar el deterioro del concreto y el efecto cíclico de congelamiento y descongelamiento, implícitamente se protegen contra el problema de la carbonatación al producir concretos más impermeables.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

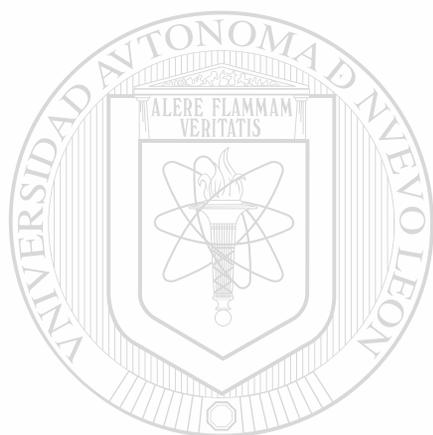


DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

MÉTODOS

- I. Se diseñaron mezclas de mortero con agregado calizo de Monterrey con tamaño máximo de 4.75 mm para cuatro relaciones A/C (0.35, 0.45 0.55 y 0.65) y para un minirevenimiento de $5 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$.**
- II. El mezclado se efectuó en un cuarto con temperatura controlada, empleando una revolvedora convencional de laboratorio de 100 litros de capacidad (Ver Fotografía 1).**
- III. El minirevenimiento se ajustó para que quedara dentro del intervalo de diseño, y para medirlo se empleó 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 (Ver Fotografía 2).**
- IV. Para cada una de las relaciones A/C se fabricaron especímenes cilíndricos de 10 cm de diámetro y una relación de esbeltez $l/d = 2$, los cuales 24 horas después de fabricados se desmoldearon para ser colocados en un cuarto de curado por un período de 28 días, en condiciones de humedad no menores del 95% y temperatura $23 \pm 1.7 \text{ }^\circ\text{C}$ (Ver Fotografía 16).**
- V. Después del período de curado de 28 días se ensayaron a la compresión tres cilindros húmedos de 10 cm de diámetro para cada una de las relaciones A/C, de acuerdo con el método ASTM C 39-96 (Ver Fotografía 5).**
- VI. A la edad de 28 días, a dos de los especímenes de cada relación A/C se les efectuaron cortes perpendiculares a su eje, empleando una sierra diamantada, para obtener cuatro gajos de aproximadamente 4.5 cm de altura cada uno, y con ellos hacer los análisis de permeabilidad al agua en un permeámetro de cuatro celdas, de origen italiano marca MATEST (Ver Fotografías 6, 7, 8 y 9).**
- VII. Para el análisis de porosidad se seleccionaron cilindros y se cortaron en varios gajos, siguiendo el procedimiento descrito en el paso anterior.**
- VIII. Para obtener la porosidad en el mortero no carbonatado, se trituraron las muestras para seleccionar aquellos tamaños que pasaran la malla #4 y se retuvieran en la #8, posteriormente se colocaron en un desecador hasta peso constante, para luego proceder con los análisis de porosidad empleando un porosímetro a base de intrusión de mercurio de origen italiano, marca CARLO ERBA (Ver Fotografías 10, 11, 12, 13 y 14).**
- IX. Para determinar la porosidad en el mortero carbonatado y para determinar el avance de la carbonatación se procedió a obtener las muestras según lo descrito en el paso VI y posteriormente se trituraron para obtener tamaños entre la malla #4 y #8 para cada una de las relaciones A/C, tanto para muestras no carbonatadas como para las muestras que se someterían a carbonatación. Los morteros a carbonatarse se colocaron en una cámara de carbonatación acelerada, en la cual se estaba inyectando gas con una concentración de CO_2 de 5% (Ver Fotografía 3).**
- X. Para determinar cuándo la muestra estaba carbonatada se empleó una solución con fenolftaleína; y, en función de la coloración observada, se definió si la muestra estaba o no carbonatada, ya que cuando lo está el indicador no muestra coloración alguna y cuando aún la muestra no está carbonatada, la superficie rociada con este indicador se torna de color violeta (Ver Fotografía 4).**

- XI. Se sometieron los especímenes durante cinco meses a carbonatación, tanto la pedacería como los gajos.
- XII. Para el análisis de porosimetría se siguió el procedimiento descrito en el paso VIII.
- XIII. Se determinó la absorción para las cuatro relaciones A/C a la edad de 28 días de acuerdo con el método ASTM C 642-97.
- XIV. Se determinó el potencial de hidrógeno (pH) en la pedacería pulverizada para las cuatro relaciones A/C, tanto a las muestras sin carbonatar a los 28 días como a las muestras carbonatadas después del procedimiento para carbonatarlas, descrito en el punto IX. Para este análisis se pulverizaron cada una de las muestras y el material pulverizado que pasó la malla #50 se mezcló con agua para, posteriormente, determinar su pH empleando un peachímetro digital (Ver Fotografía 15).



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

COMENTARIOS

La carbonatación se da en la pasta de cemento hidratada y no en el agregado, en la pasta de un concreto o mortero es donde se dan las mayores retracciones en estado fresco. Dado que por el secado y por la misma carbonatación que origina micro y macroagrietamientos, en este estudio no se puede trabajar con especímenes de pasta de cemento. Debemos considerar que, en el concreto, aproximadamente el 70% de su volumen absoluto lo ocupa el agregado, para minimizar los agrietamientos. Por lo anterior y con el fin de que predominara la pasta, en la presente investigación nos inclinamos por fabricar morteros.

De acuerdo con las condiciones establecidas por la misma concentración del CO_2 , la humedad e igual tiempo de exposición, son válidos los siguientes comentarios.

Para una relación $A/C = 0.35$ el pH se mantiene alto en comparación con los morteros que tienen relaciones A/C mayores a causa de la presencia de mayores cantidades de hidróxidos disponibles en la matriz cementante. Conforme aumenta la relación A/C , el consumo de cemento disminuye para la misma consistencia, y los hidróxidos disponibles se carbonatarán más rápidamente, por ser más permeable la matriz; con lo que el pH del mortero carbonatado disminuye drásticamente, en relación con el no carbonatado.

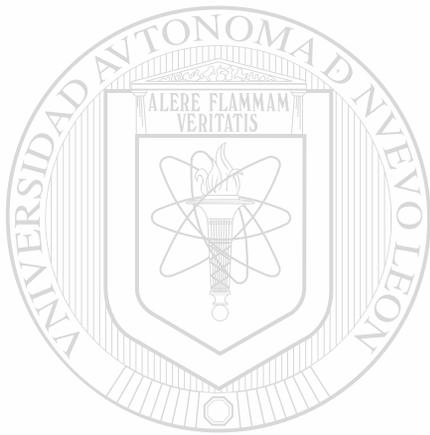
Los análisis de porosidad vía intrusión de mercurio, efectuados tanto para muestras no carbonatadas como para muestras carbonatadas, reflejan claramente, en ambos casos, la disminución en la porosidad, la cual es mayor conforme disminuye la relación A/C (Tablas 8-11 y Gráficas 8-12); por otro lado, la distribución del radio de los poros refleja una disminución en el por ciento de los mezoporos, por efecto de la carbonatación, con relación a los morteros no carbonatados, lo que repercute en un incremento en las regiones de los macroporos y de los ultramacroporos (Tablas 12-14 y Gráficas 13-17).

De los morteros investigados, el mortero sin carbonatar con mayor relación $A/C = 0.65$, presenta la más alta porosidad (gráfica 18), el mayor tamaño del poro (gráfica 20) y la más alta permeabilidad (gráfica 6); por lo tanto, en estos morteros, el CO_2 puede penetrar más fácilmente y acelerar el avance de la carbonatación. Al carbonatarse este mortero, la porosidad se redujo solamente en un 22% (Tabla 14), debido al más bajo consumo de cemento (menos hidróxidos disponibles); sin embargo, el porcentaje de hidróxidos carbonatados es alto al inicio del proceso y disminuye en forma importante la alcalinidad de 12.1 a 8.1. En cambio, para una relación A/C tan baja como 0.35, en donde la cantidad de productos de hidratación del cemento es mayor y, por lo tanto, con más hidróxidos disponibles, es mayor la cantidad de hidróxidos carbonatados para el mismo tiempo de exposición, pero quedando un remanente importante $\text{pH} = 11.3$ (gráfica 7); sin embargo, con mayores tiempos de exposición a la acción del CO_2 , la progresiva carbonatación hará disminuir el pH a valores significativos. La carbonatación en las

relaciones A/C menores que 0.65 fue mayor, detectada mediante la disminución de la porosidad (Gráficas 18).

Para el mortero no carbonatado observamos que la porosidad total aumenta al aumentar la relación A/C de 0.35 a 0.65 (gráfica 18). El diámetro promedio del poro también aumenta (gráfica 20) y este comportamiento es congruente con la gráfica correspondiente, al disminuir la superficie específica de los poros, conforme aumenta la relación A/C.

Para relaciones A/C altas, la reacción de carbonatación es menos intensa en el frente de ataque, al existir menos hidróxidos disponibles y mayor permeabilidad y porosidad (Gráficas 6 y 20), pero el avance es rápido. No alcanza a disminuir en forma importante el radio promedio del poro (gráfica 20) y por lo tanto la superficie específica (gráfica 19) disminuye al aumentar la relación A/C para el mismo tiempo y similares condiciones de carbonatación.



UANL

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

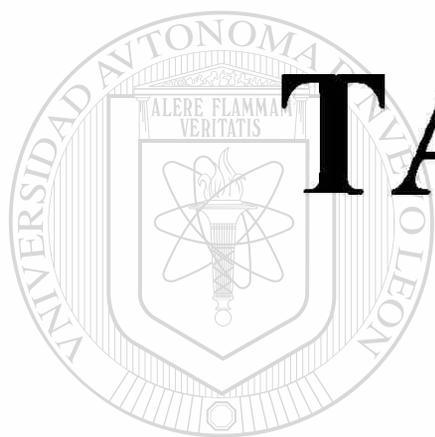
CONCLUSIONES

Se retarda el avance de la carbonatación al disminuir la permeabilidad, y ésta disminuye al bajar la relación A/C; por lo cual disminuirá el tiempo en que pueda iniciarse la corrosión del acero embebido en el concreto.

Para cualquier relación A/C, si se disminuye la porosidad y el radio del poro se aumenta la superficie específica, a mayor tiempo que el concreto está en contacto con el CO₂, mayor será el avance del fenómeno de carbonatación en el concreto.

El espesor del recubrimiento de concreto juega un papel muy importante en retardar que el ambiente del acero se carbonate y despacivice la película protectora.

No obstante que al carbonatarse el concreto disminuye la porosidad, la acción permanente del CO₂, aunada a los ciclos de humedad y alta temperatura, mantiene el avance lenta y progresivamente. Para maximizar el tiempo al que se iniciará la corrosión del acero de refuerzo, habrá necesidad de utilizar en el concreto relaciones A/C bajas, con lo cual disminuiría la trabajabilidad de la mezcla; sin embargo, este problema puede solucionarse utilizando un aditivo superfluidificante; además, para retrasar el efecto de la carbonatación, se requiere de un buen colado, que no deje macrogrietas y que no permita que aparezcan microgrietas por retracción plástica, complementando esto con un curado eficiente.



TABLAS

DE

RESULTADOS®

DIRECCION GENERAL DE BIBLIOTECAS

TABLA No. 1

CEMENTO		
Marca		Monterrey
Tipo		Portland I
Densidad		3.09
Blaine m²/kg		3630
Tiempos de Fraguado Vicat	Inicial, min.	96
	Final, min.	171
Resistencia a la Compresión	1 día, MPa (kgf/cm²)	6.5 (67)
	3 días, MPa (kgf/cm²)	19.6 (200)
	7 días, MPa (kgf/cm²)	20.8 (212)
	28 días, MPa (kgf/cm²)	28.4 (289)
	56 días, MPa (kgf/cm²)	35.9 (367)

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

TABLA No. 2

ANALISIS QUIMICO DEL CEMENTO			
ÓXIDOS	FÓRMULA QUÍMICA	%	ESPECIFICACION ASTM C 150
Dióxido de Silicio	SiO ₂	20.5	
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	
Pentóxido de Fósforo	P ₂ O ₅	0.09	
Oxido de Manganeso	Mn ₂ O ₃	0.04	
Perdida por Ignición		2.40	MAX. 3.0 %
SUMA		100	
Cal Libre	CaO Libre	0.70	
Residuo Insoluble		0.33	
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	
Solución Sólida	S.S.(C ₂ F + C ₄ AF)	NO HAY	

* Requerimiento Químico Opcional

TABLA No. 3

AGREGADO	
Clasificación Petrográfica	Caliza Triturada
Origen	Cerro de Las Mitras, Monterrey.
Densidad Seca	2.64
Absorción, %	0.9
GRANULOMETRIA	
TAMIZ O MALLA	POR CIENTO QUE PASA
3/8"	100.0
#4	97.5
# 8	90.0
#16	67.5
#30	42.5
#50	20.0
#100	6.0

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

ÍNDICE GENERAL

Resumen	1
Introducción	2
Objetivos	7
Factores que Influyen en el Fenómeno de la Carbonatación	8
El Fenómeno de la Corrosión del Acero Embebido	18
Justificación de la Investigación	19
Métodos	21
Comentarios	23
Conclusiones	25
Tablas de Resultados	26
Gráficas	40
Bibliografía Consultada	61
Anexo Fotográfico	62
Apéndice A	77
Curriculum Resumido Ing. Alejandro Durán Herrera	82

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

TABLA No. 3

AGREGADO	
Clasificación Petrográfica	Caliza Triturada
Origen	Cerro de Las Mitras, Monterrey.
Densidad Seca	2.64
Absorción, %	0.9
GRANULOMETRIA	
TAMIZ O MALLA	POR CIENTO QUE PASA
3/8"	100.0
#4	97.5
#8	90.0
#16	67.5
#30	42.5
#50	20.0
#100	6.0

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

TABLA No. 4

**CANTIDADES EMPLEADAS EN kg PARA PRODUCIR UN m³ DE MORTERO,
CON SUS RESPECTIVOS VOLUMENES ABSOLUTOS EN LITROS PARA LAS CUATRO
RELACIONES AGUA/CEMENTO EMPLEADAS**

INGREDIENTE	RELACION AGUA / CEMENTO							
	0.35		0.45		0.55		0.65	
	kg/m ³	L	kg/m ³	L	kg/m ³	L	kg/m ³	L
AGUA DE REACCIÓN	280	280	247	247	244	244	234	234
AGUA DE ABSORCIÓN	10.2		12.3		13.2		14.3	
CEMENTO	800	259	549	178	444	144	360	117
AGREGADO	1138	431	1370	519	1468	556	1592	603
AIRE	3.0 %	30	5.6 %	56	5.6 %	56	4.6 %	46
% DE PASTA	48.7	55.6	36.7	48.1	31.9	44.4	27.2	39.7

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 4.5 cm.

TABLA No. 5

PROPIEDADES DEL MORTERO EN ESTADO FRESCO				
PROPIEDAD	RELACION AGUA/CEMENTO			
	0.35	0.45	0.55	0.65
MiniRevenimiento	4.5	4.5	4.5	4.5
Aire Atrapado %	3.0	5.6	5.6	4.6
PROPIEDADES DEL MORTERO ENDURECIDO				
PROPIEDAD	RELACION AGUA/CEMENTO			
	0.35	0.45	0.55	0.65
Absorción, %	8.2	8.3	8.6	9.6
Peso Volumétrico Saturado Superficialmente Seco, kg/m ³	2301	2286	2249	2234
Peso volumétrico Seco al Ambiente, kg/m ³	2127	2111	2071	2038
Resistencia a la Compresión a los 28 días de edad, MPa (kgf/cm ²)*	62.9 (642)	45.4 (463)	39.4 (402)	29.7 (303)

* En cilindros de 10 cm de diámetro

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

TABLA No. 6

**COEFICIENTES DE PERMEABILIDAD (K)
PARA MORTEROS NO CARBONATADOS**

RELACION A/C	GAJO	K (cm/s)	
		INDIVIDUAL	PROMEDIO
0.35	---	---	7.00E-12*
	---	---	7.50E-11*
0.45	SUP	2.23E-10	1.31E-10
	MED-SUP	1.47E-10	
0.55	MED-INF	2.56E-11	1.01E-09
	INF	1.28E-10	
	SUP	1.40E-09	
	MED-SUP	1.58E-09	
0.65	MED-INF	7.13E-10	1.01E-09
	INF	3.34E-10	

* Estos valores no pudieron ser determinados en nuestro laboratorio dada la capacidad del permeámetro empleado en la ejecución de la prueba, por lo que se adoptaron de la referencia 16.

TABLA No. 7

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

RELACION A / C	pH *	
	MORTERO NO CARBONATADO	MORTERO CARBONATADO Δ
0.35	12.6	11.3
0.45	12.5	9.0
0.55	12.4	8.5
0.65	12.1	8.1

* Promedios de dos análisis.

Δ Mismo tiempo de carbonatación bajo las mismas condiciones.

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

TABLA No. 8

RESULTADOS DE LOS ANALISIS POROSIMÉTRICOS DE MUESTRAS 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	62.59	14.02	9.99	2.60	420	220	26
	2	57.45	12.75	9.25	2.54	390	210	28
	3	58.86	12.77	9.16	2.49	520	210	26
	PROMEDIO	59.63	13.18	9.47	2.54	440	210	27
0.45	1	64.81	14.42	8.67	2.55	4900	280	20
	2	66.24	14.37	8.63	2.53	4700	280	20
	3	65.63	14.56	8.92	2.60	3200	280	20
	PROMEDIO	65.56	14.47	8.74	2.57	4300	280	20
0.55	1	68.76	14.38	7.96	2.60	2700	280	19
	2	67.42	14.96	8.43	2.61	3600	280	21
	3	69.83	13.88	7.97	2.57	4300	280	22
	PROMEDIO	64.92	14.41	8.12	2.59	3500	280	21
0.65	1	81.34	17.65	8.63	2.63	3000	370	18
	2	75.91	17.23	8.00	2.77	3000	370	17
	3	79.28	17.36	8.03	2.65	2800	370	17
	PROMEDIO	78.84	17.41	8.22	2.67	2900	370	17

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

TABLA No. 9

RESULTADOS DE LOS ANALISIS POROSIMÉTRICOS DE MUESTRAS CARBONATADAS

A/C	ANALISIS	PT		SE m ² /g	DENSIDAD g/cm ³	RCU Å	RPP	
		mm ³ /g	%				Å	%
0.35	1	23.80	5.66	2.09	2.52	3400	70	20
	2	24.76	5.86	2.17	2.52	3300	50	23
	3	24.41	5.85	2.16	2.55	3500	50	21
	PROMEDIO	24.32	5.79	2.14	2.53	3400	60	21
0.45	1	33.40	7.82	2.71	2.54	3100	50	16
	2	36.67	8.72	2.97	2.61	3200	70	19
	3	35.63	8.97	2.93	2.77	3100	70	20
	PROMEDIO	35.24	8.50	2.87	2.64	3100	60	18
0.55	1	45.87	10.54	5.57	2.57	3400	70	14
	2	48.45	11.14	5.95	2.59	3000	70	14
	3	47.75	12.11	5.85	2.54	3200	70	14
	PROMEDIO	47.16	10.84	5.76	2.58	3200	70	14
0.65	1	62.00	14.01	6.18	2.63	4300	930	14
	2	62.03	15.01	6.07	2.85	3400	850	14
	3	61.42	13.75	6.08	2.59	4200	860	15
	PROMEDIO	61.82	14.26	6.11	2.69	4000	880	14

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

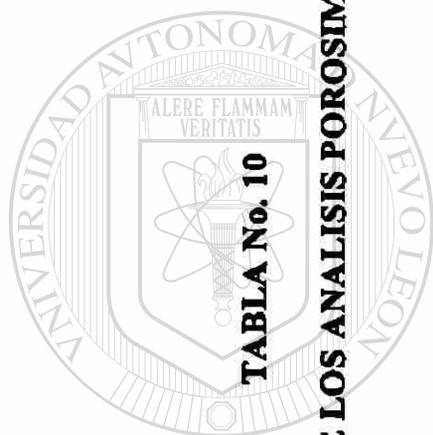


TABLA No. 10

PROMEDIOS DE LOS ANALISIS POROSIMÉTRICOS

MORTERO	A/C	P T		SE m ² /g	DENSIDAD g/cm ³	RCU Å	RPP	
		mm ³ /g	%				Å	%
NO CARBONATADO	0.35	59.63	13.18	9.47	2.54	440	210	27
	0.45	65.56	14.47	8.74	2.57	4300	280	20
	0.55	64.92	14.41	8.12	2.59	3500	280	21
	0.65	78.84	17.41	8.22	2.67	2900	370	17
CARBONATADO	0.35	24.32	5.79	2.14	2.53	3400	60	21
	0.45	35.24	8.50	2.87	2.64	3100	60	18
	0.55	47.16	10.84	5.76	2.58	3200	70	14
	0.65	61.82	14.26	6.11	2.69	4000	880	14

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



TABLA No. 11

REDUCCION EN LA POROSIDAD TOTAL POR EFECTO DE LA CARBONATACIÓN ACELERADA

A/C	POROSIDAD TOTAL				REDUCCION	
	MORTERO NO CARBONATADO		MORTERO CARBONATADO		mm ³ / g	%
	mm ³ / g	%	mm ³ / g	%		
0.35	59.6	13.2	24.3	5.8	35.3 (59%)*	7.4
0.45	65.6	14.5	35.2	8.5	30.4 (46%)	6.0
0.55	68.7	14.4	47.4	11.3	21.3 (31%)	3.6
0.65	78.8	17.4	61.8	14.3	17.0 (22%)	3.1

* Por ciento de poros que se reduce por efecto de la carbonatación acelerada en función del volumen total de mercurio que penetra en la muestra analizada por el peso de la muestra.

TABLA No. 12

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

A/C	ANALISIS	VOLUMEN TOTAL PENETRADO (mm ³ / g)	DISTRIBUCION 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	62.59	4	18	78
	2	57.45	3	17	80
	3	58.86	4	19	77
PROMEDIO		59.63	4	18	78
0.45	1	64.81	3	34	63
	2	66.24	3	37	60
	3	65.63	3	33	64
PROMEDIO		65.56	3	35	62
0.55	1	68.76	4	43	54
	2	67.42	3	41	56
	3	69.83	4	39	57
PROMEDIO		64.92	4	41	56
0.65	1	81.34	3	52	45
	2	75.91	3	52	45
	3	79.28	4	53	43
PROMEDIO		78.84	3	52	45

TABLA No. 13

**DISTRIBUCION DEL RADIO DEL PORO POR RANGOS
EN MORTEROS CARBONATADOS**

A/C	ANALISIS	VOLUMEN TOTAL PENETRADO (mm ³ / g)	DISTRIBUCION 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	23.80	8	31	61
	2	24.76	8	27	65
	3	24.41	6	31	63
	PROMEDIO	24.32	7	30	63
0.45	1	33.43	8	41	51
	2	36.67	7	37	56
	3	35.63	7	35	58
	PROMEDIO	35.24	7	38	55
0.55	1	45.87	10	41	49
	2	48.45	7	43	50
	3	47.75	9 DESCARTADO	42	49
	PROMEDIO	47.36	9	42	49
0.65	1	62.00	5	57	38
	2	62.03	6	56	38
	3	61.42	5	57	38
	PROMEDIO	61.82	5	57	38

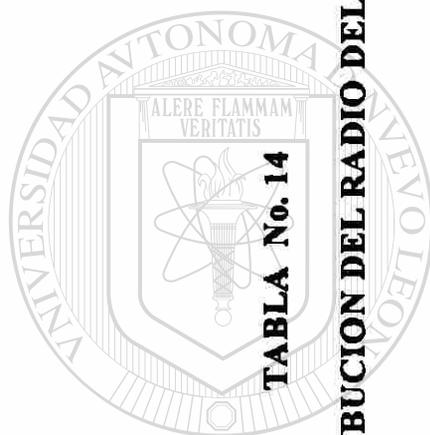
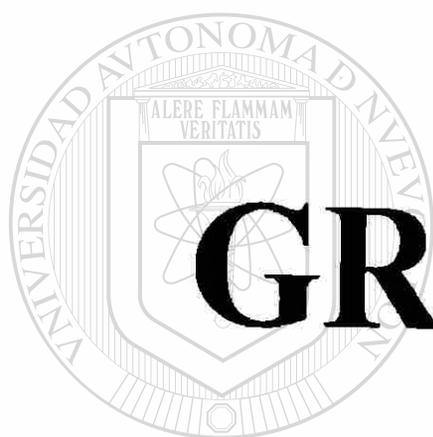


TABLA No. 14

PROMEDIOS DE LA DISTRIBUCION DEL RADIO DEL PORO POR RANGOS

MORTEROS	A/C	VOLUMEN TOTAL PENETRADO (mm ³ / g)	D (%)	DISTRIBUCION 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	59.63	-----	4	18	78
	0.45	65.56	10	3	35	62
	0.55	64.92	9	4	41	56
	0.65	78.84	32	3	52	45
CARBONATADO	0.35	24.32	-----	7	30	63
	0.45	35.24	45	7	38	55
	0.55	47.36	95	9	42	49
	0.65	61.82	154	5	57	38

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



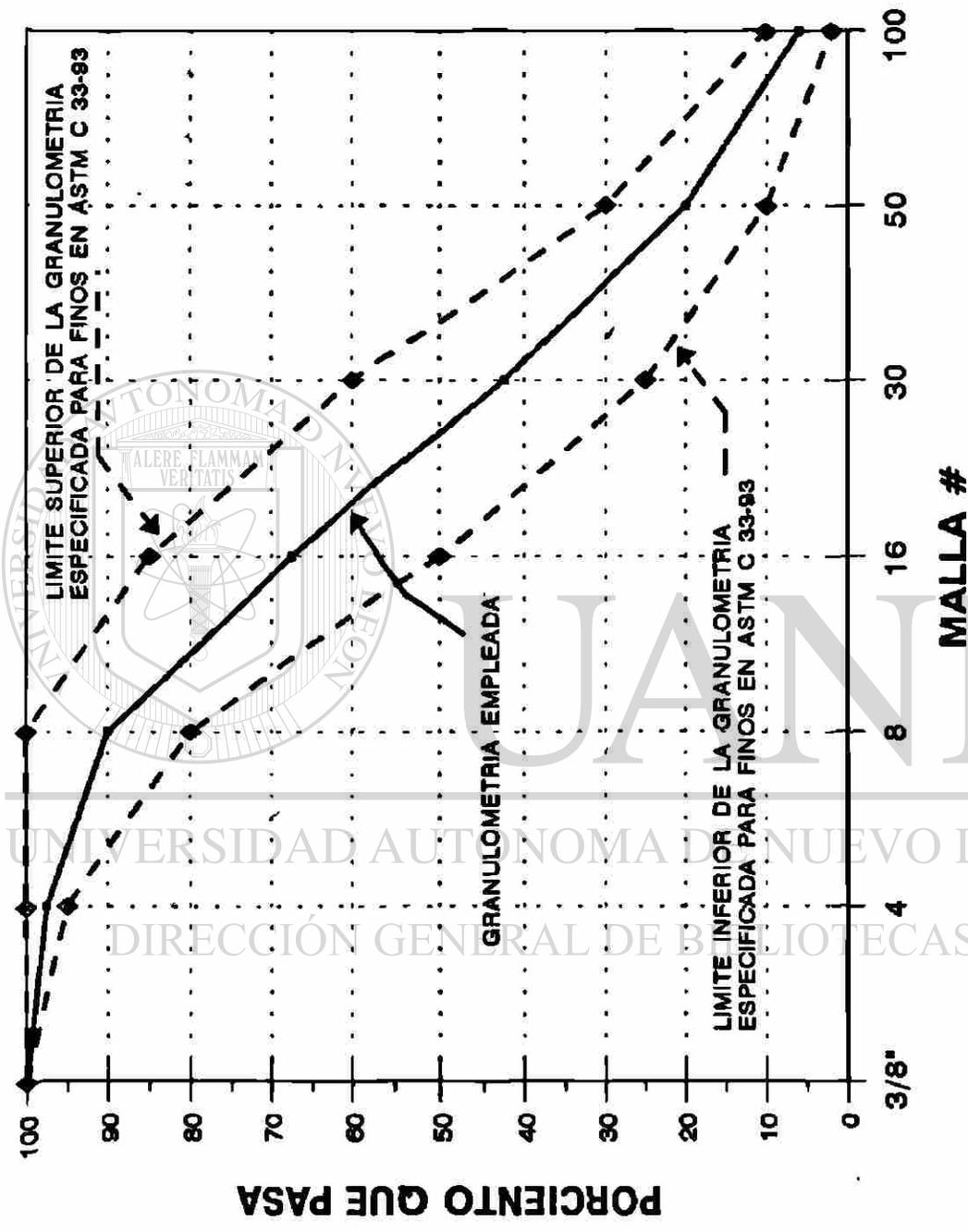
GRÁFICAS

UANL

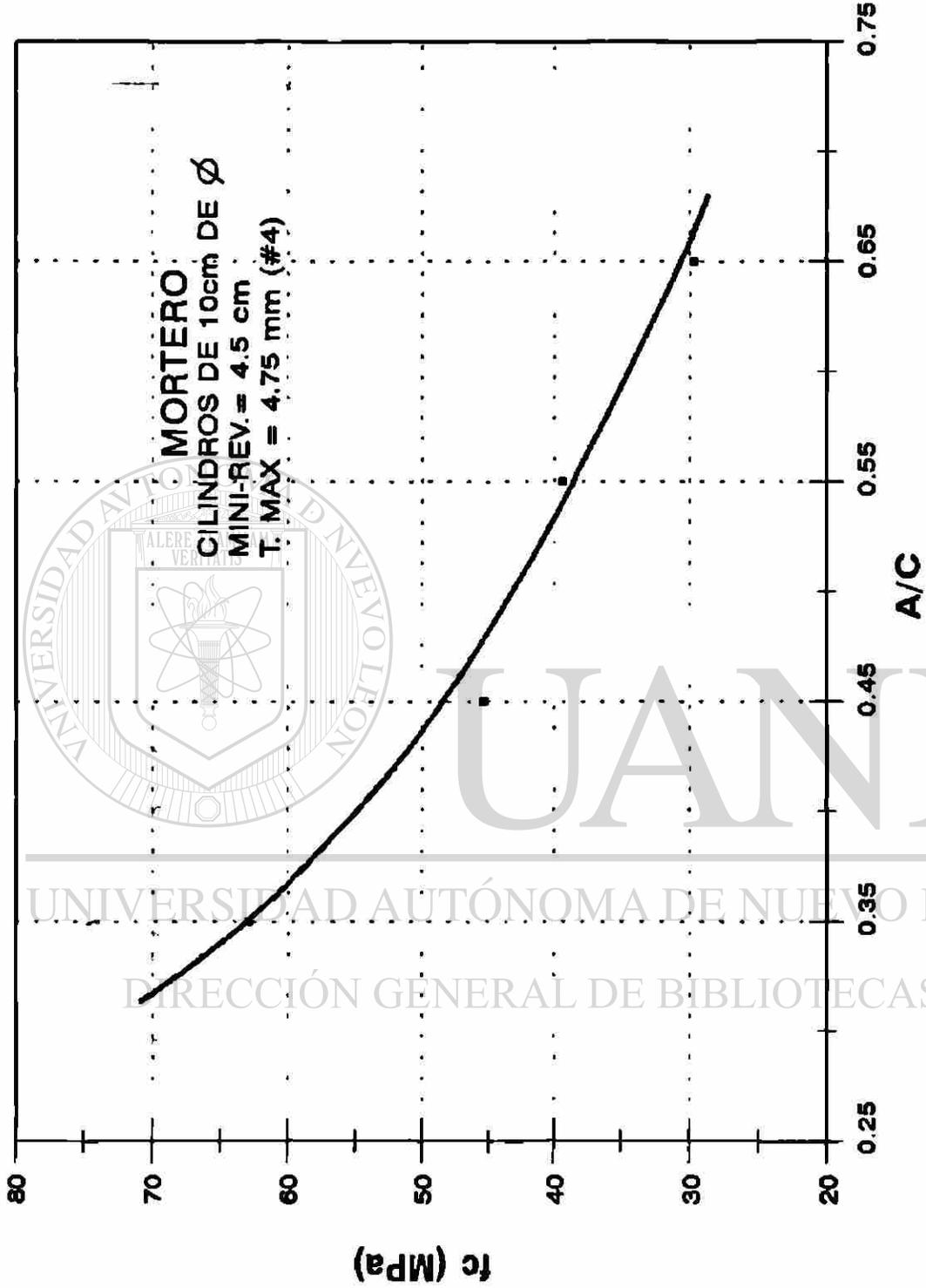
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

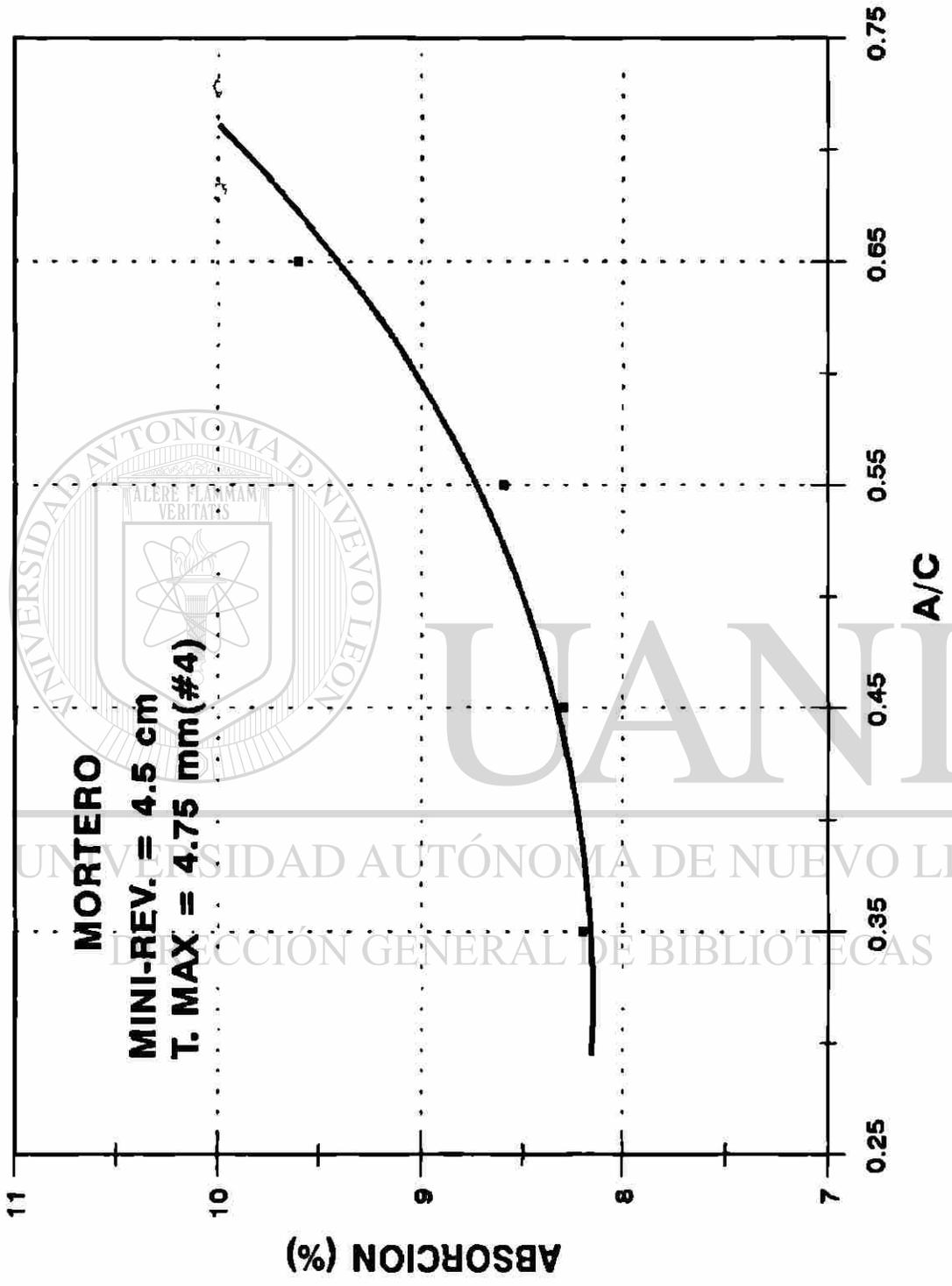
DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



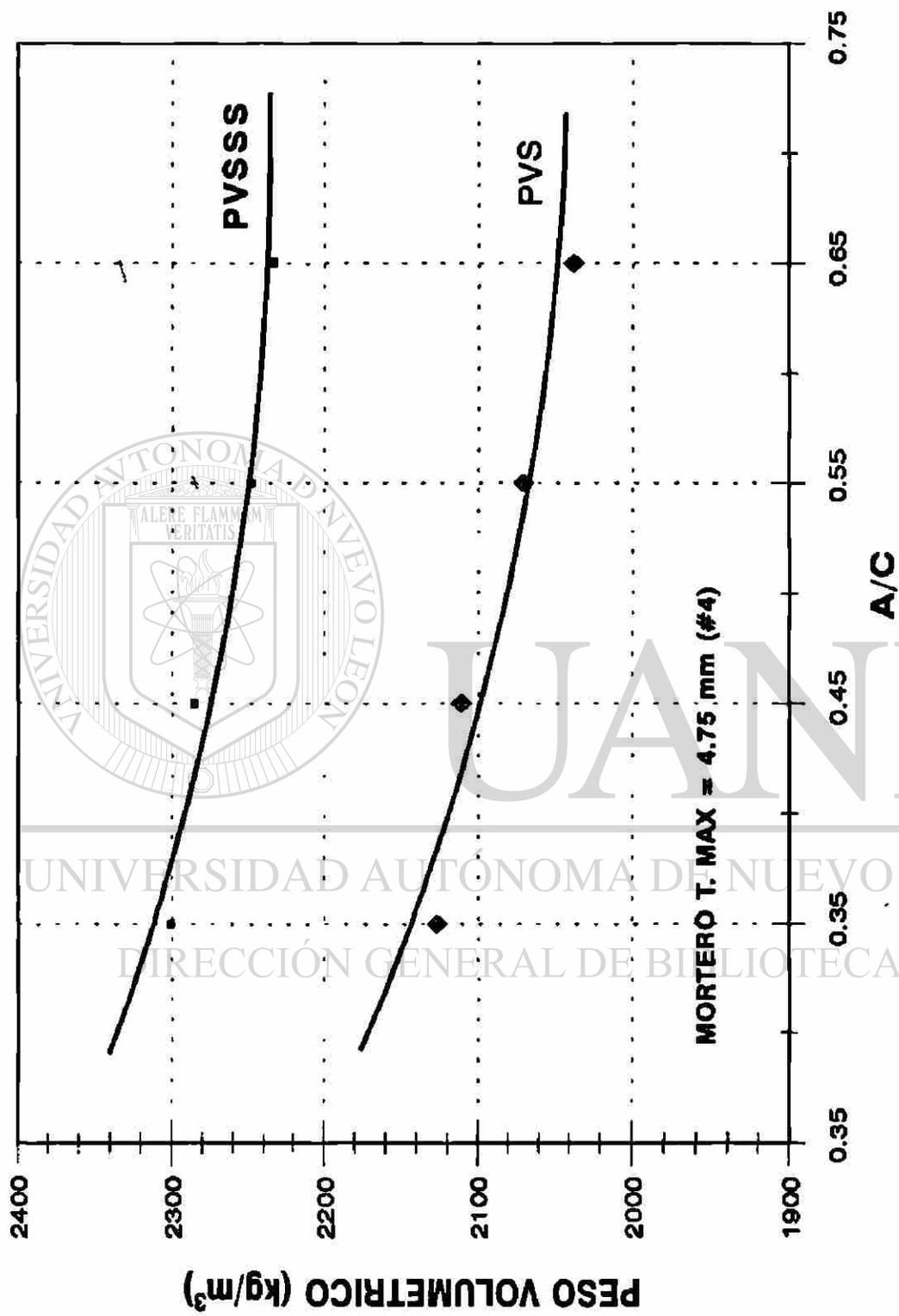
GRAF. N°1.- GRANULOMETRIA DEL AGREGADO EMPLEADO DETERMINADA DE ACUERDO A ASTM C 136-95a



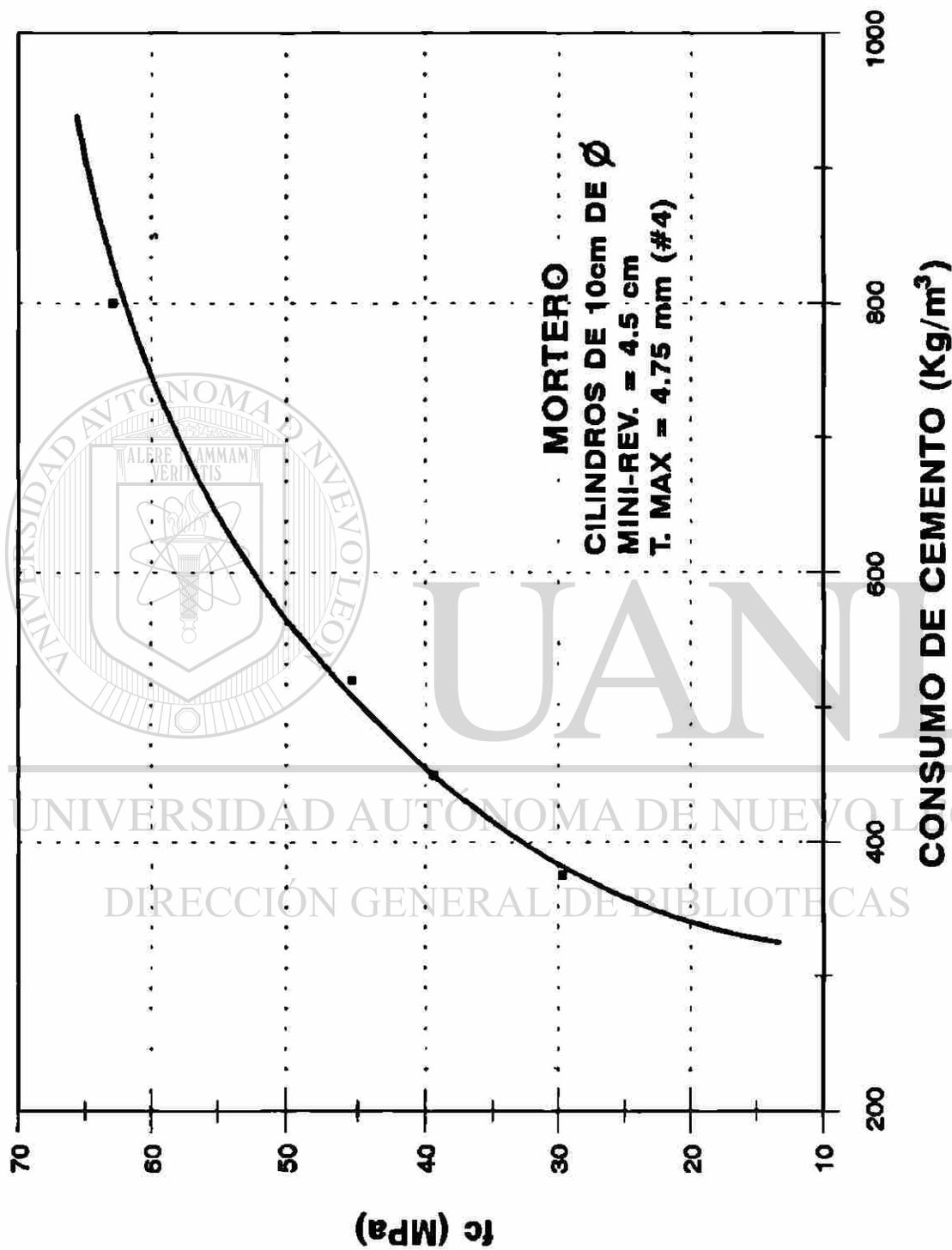
**GRAF. N°2.- GRAFICA DE RELACION AGUA/CEMENTO (A/C)
 Vs RESISTENCIA A LA COMPRESION A LOS 28 DIAS (fc)**



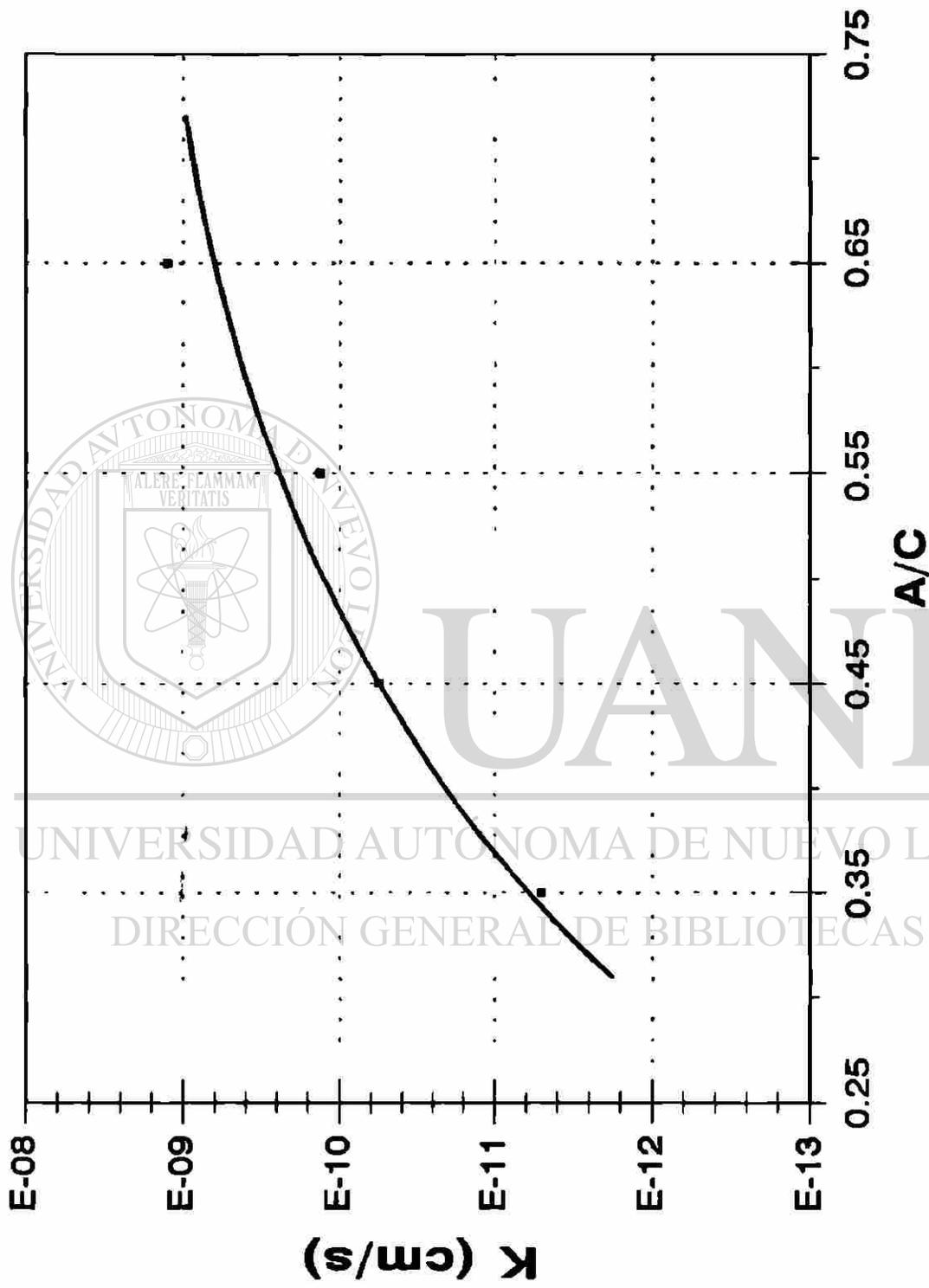
**GRAF. N°3.- GRAFICA DE RELACION AGUA/CEMENTO(A/C)
 Vs % DE ABSORCION(ASTM C 642-90)**



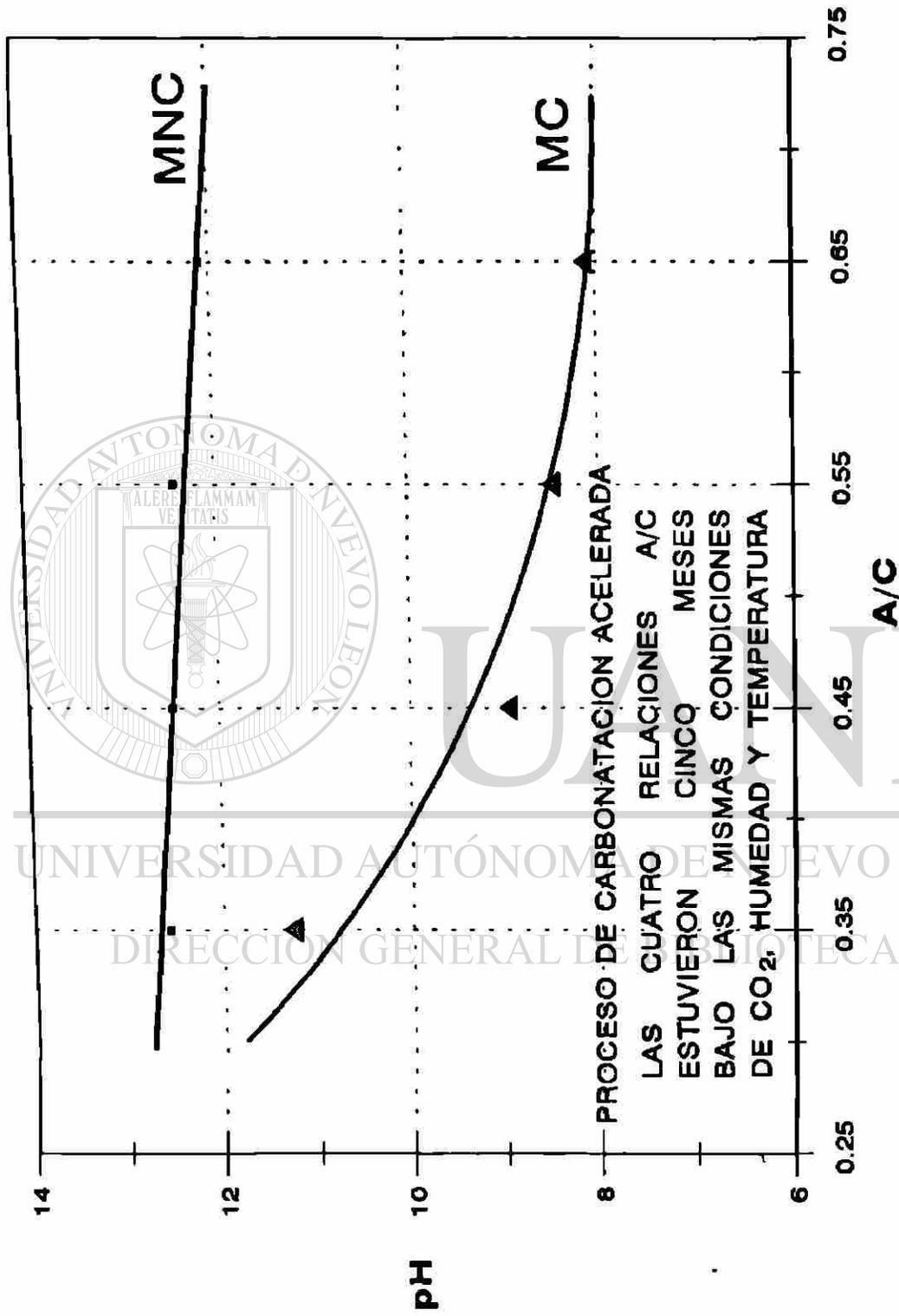
**GRAF. N° 4.- GRAFICA DE RELACION AGUA/CEMENTO(A/C)
Vs PESO VOLUMETRICO SATURADO SUPERFICIALMENTE
SECO(PVSSS) Y PESO VOLUMETRICO SECO(PVS)
A LOS 28 DIAS**



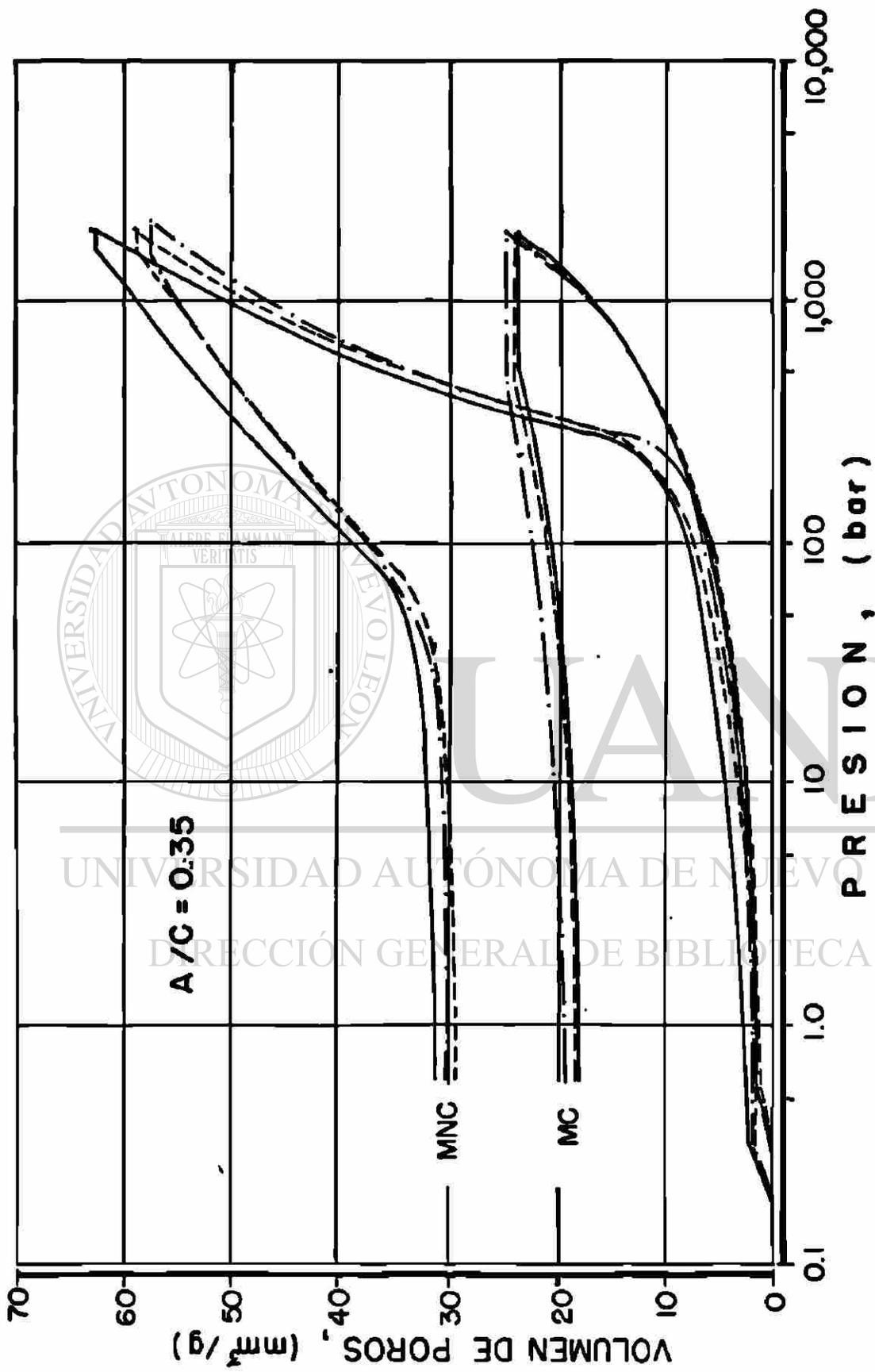
GRAF. N°5.- GRAFICA DE CONSUMO DE CEMENTO Vs RESISTENCIA A LA COMPRESION(f_c) A LOS 28 DIAS DE EDAD



**GRAF. N°6.- GRAFICA DE RELACION AGUA/CEMENTO (A/C)
Vs COEFICIENTE DE PERMEABILIDAD (K)
PARA MORTEROS NO CARBONATADOS**

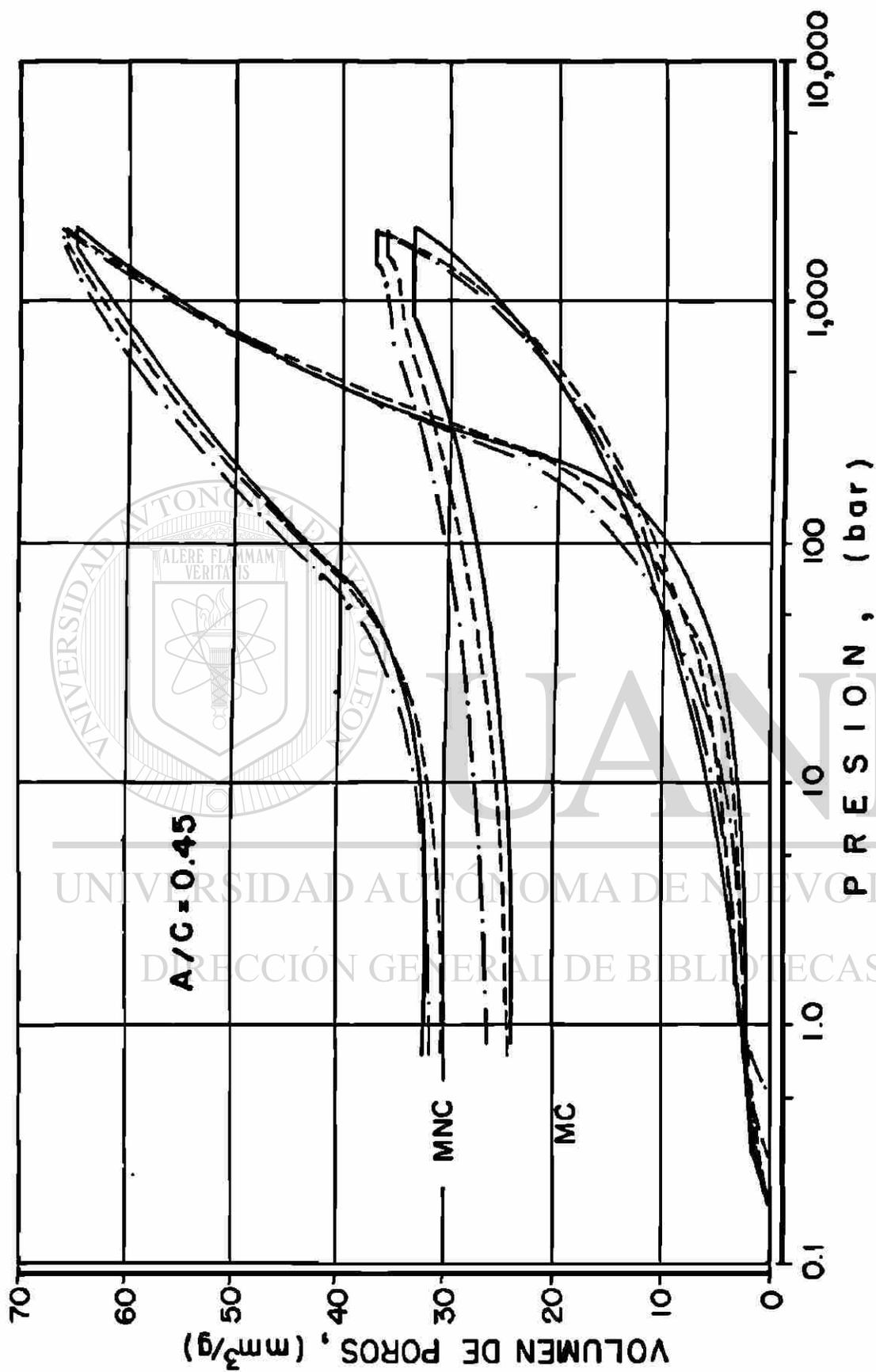


GRAF. N°7.- GRAFICA DE RELACION AGUA/CEMENTO(A/C) Vs pH Vs pH DE MORTEROS NO CARBONATADOS(MNC) Y CARBONATADOS(MC)



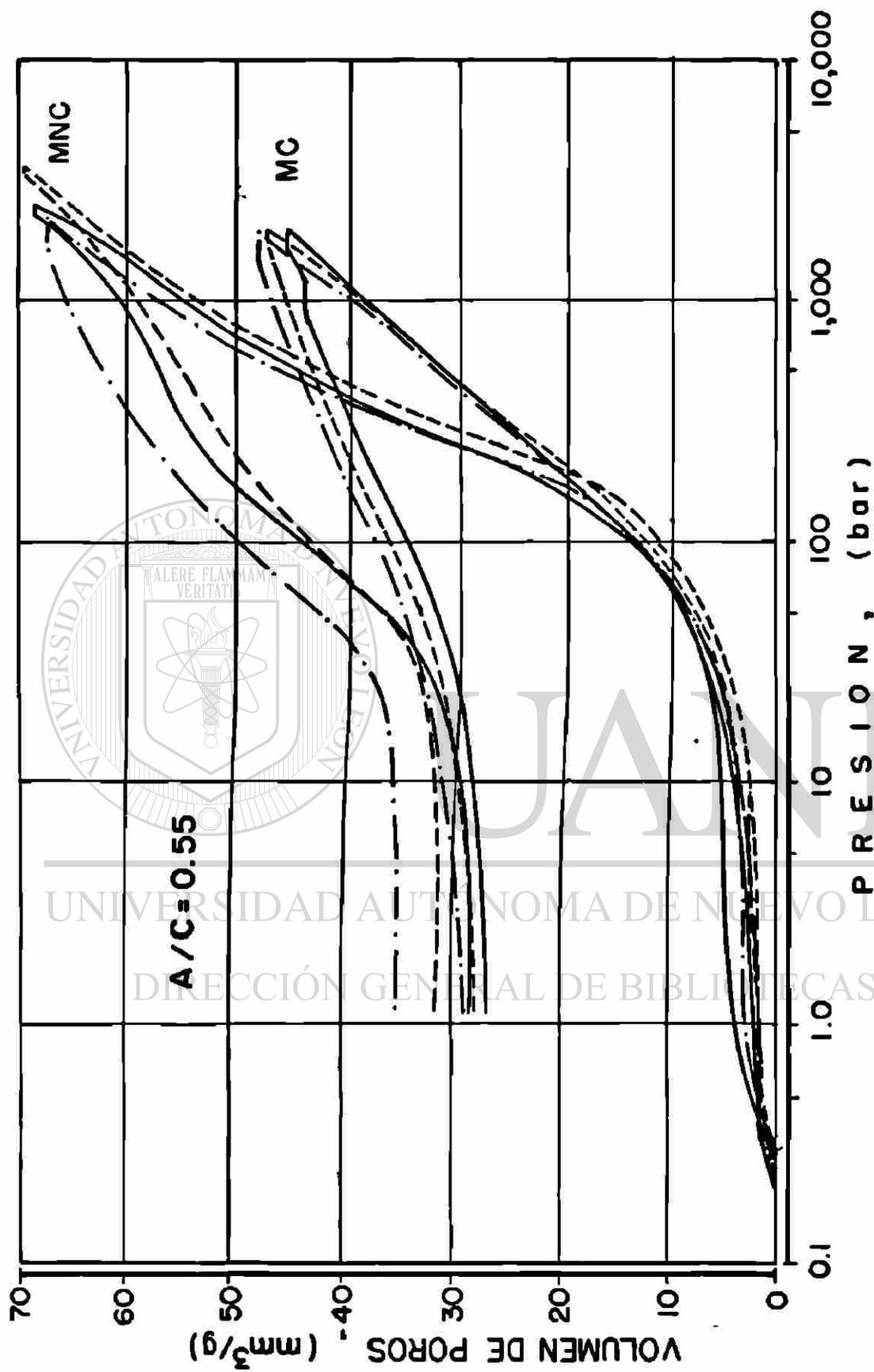
ANALISIS DE POROSIDAD

**GRAF. N°8 .- PRESION Vs. VOLUMEN DE POROS
PARA MORTEROS NO CARBONATADOS (MNC)
Y CARBONATADOS (MC).**



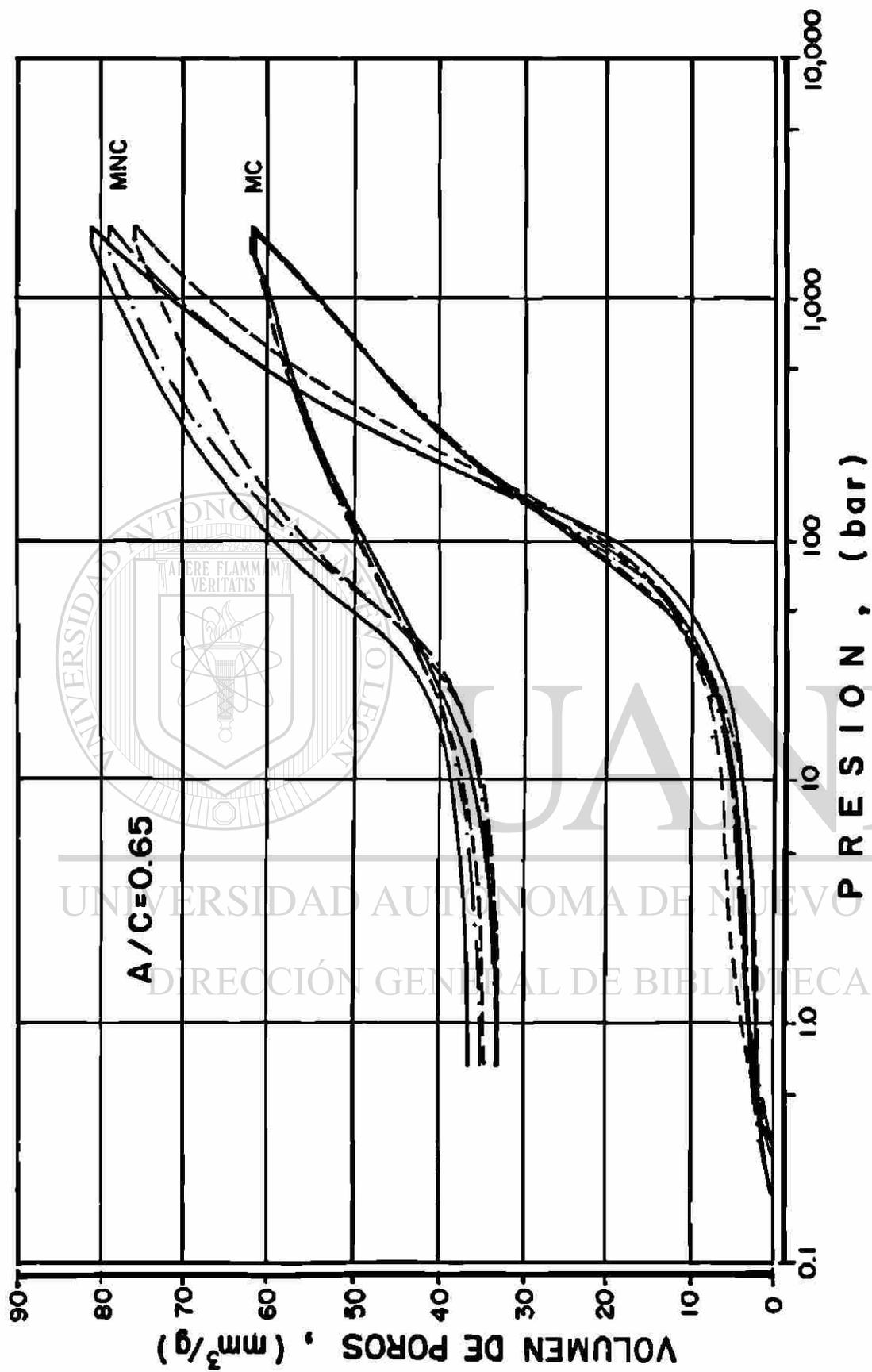
ANALISIS DE POROSIDAD

**GRAF. N°9 :-PRESION Vs.: VOLUMEN DE POROS
PARA MORTEROS NO CARBONATADOS (MNC)
Y CARBONATADOS (MC).**



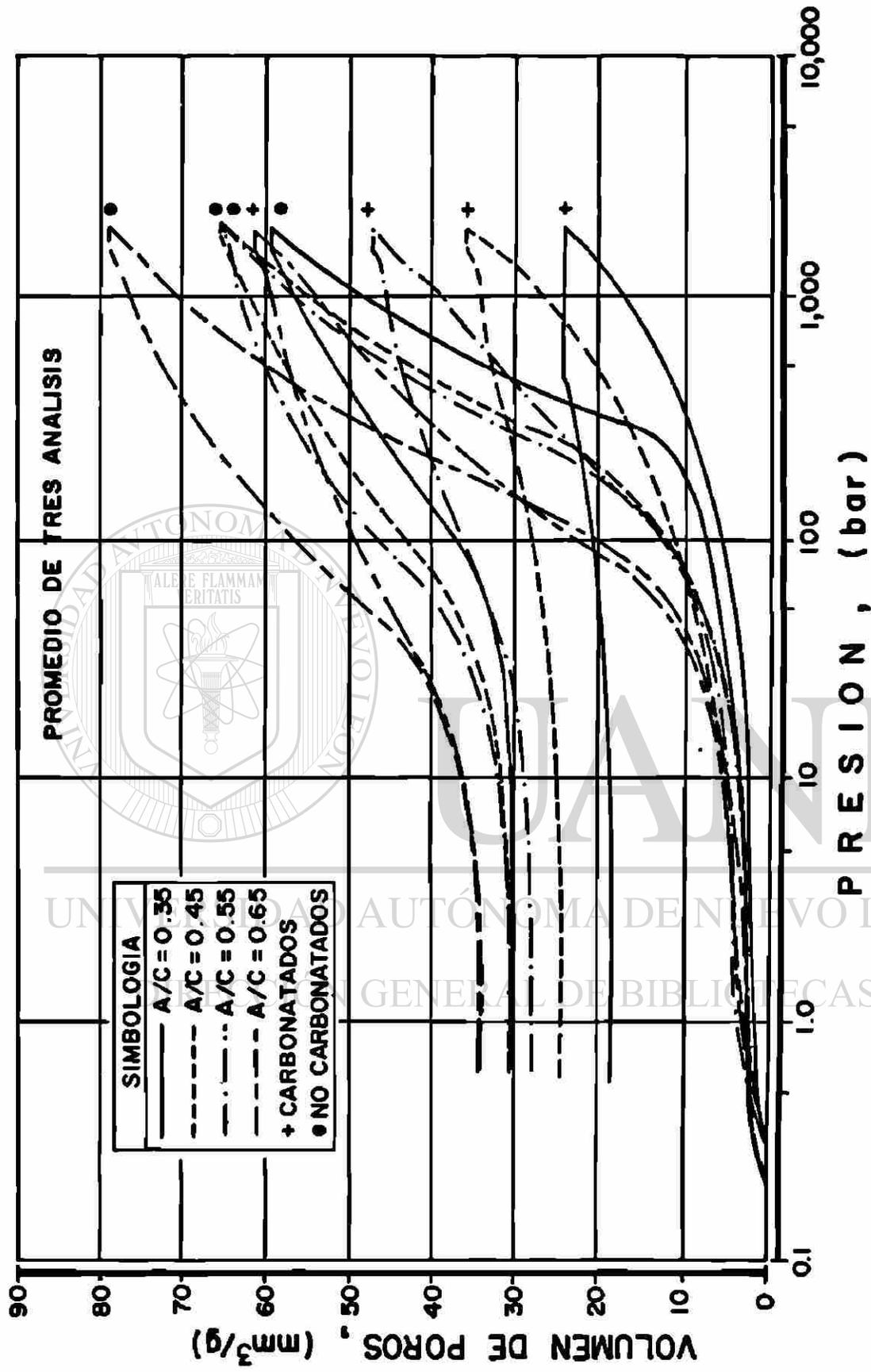
ANALISIS DE POROSIDAD

**GRAF. N°10.- PRESION Vs. VOLUMEN DE POROS
PARA MORTEROS NO CARBONATADOS (MNC)
Y CARBONATADOS (MC).**



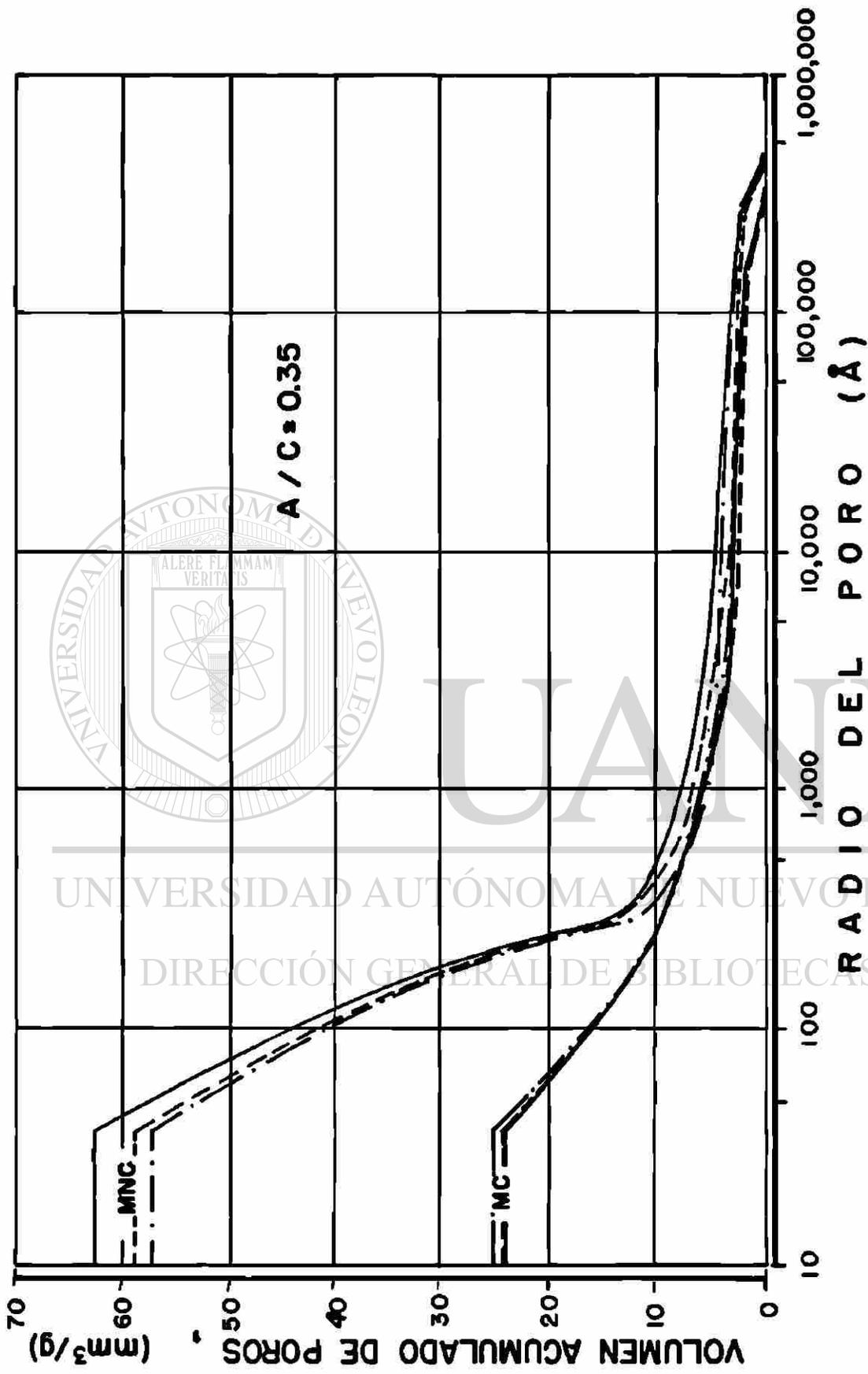
ANALISIS DE POROSIDAD

GRAF. N°11.-PRESION Vs. VOLUMEN DE POROS PARA MORTEROS NO CARBONATADOS (MNC) Y CARBONATADOS (MC).



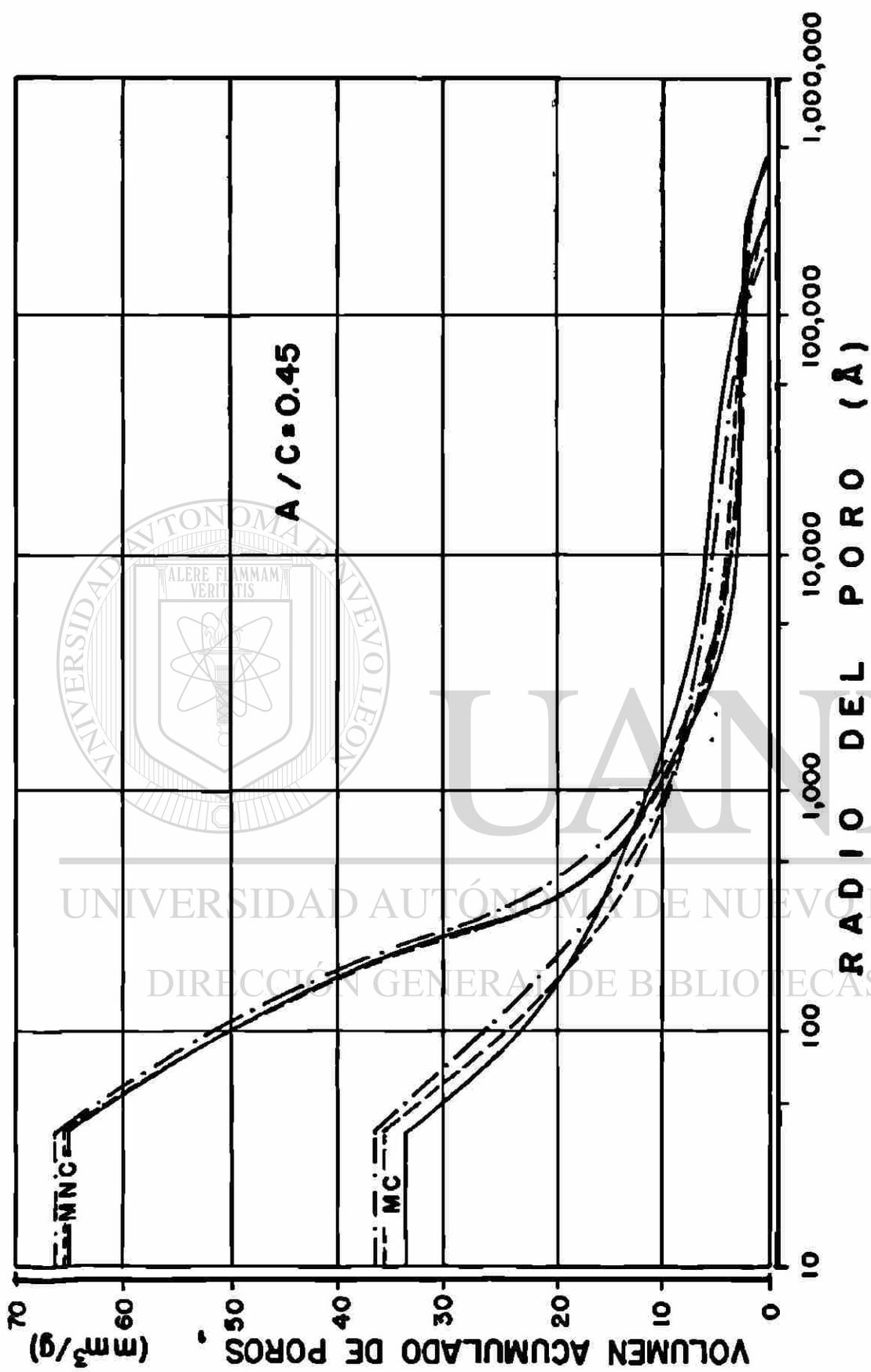
ANALISIS DE POROSIDAD

**GRAF. N°12-PROMEDIO DE PRESION Vs. VOLUMEN DE POROS
PARA MORTEROS NO CARBONATADOS (MNC)
Y CARBONATADOS (MC).**

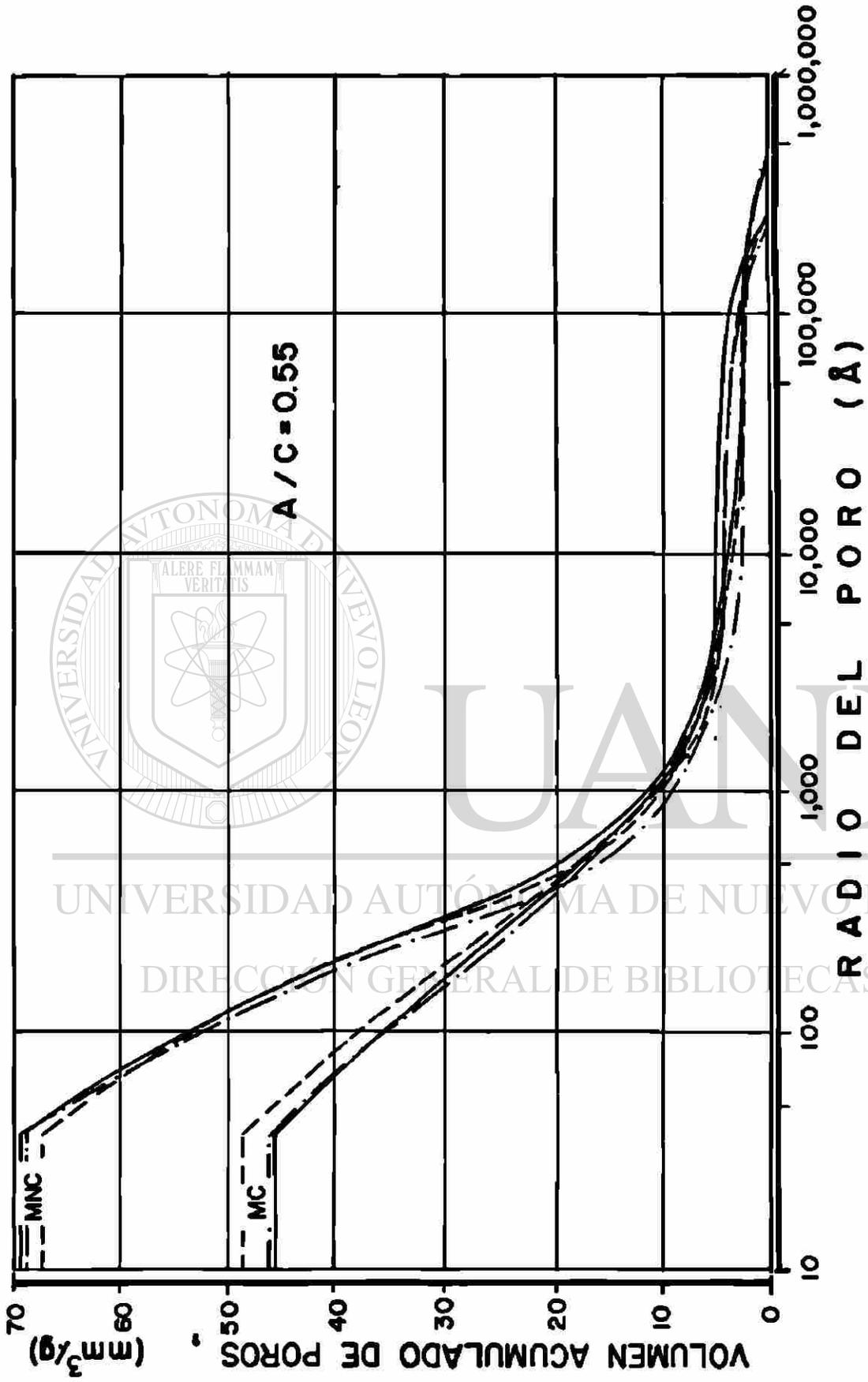


**ANÁLISIS DE POROSIDAD
DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DEL PORO**

GRAF. N° 13 .- RADIO DEL PORO Vs. VOLUMEN ACUMULADO DE POROS PARA MORTEROS NO CARBONATADOS (MNC) Y CARBONATADOS (MC).

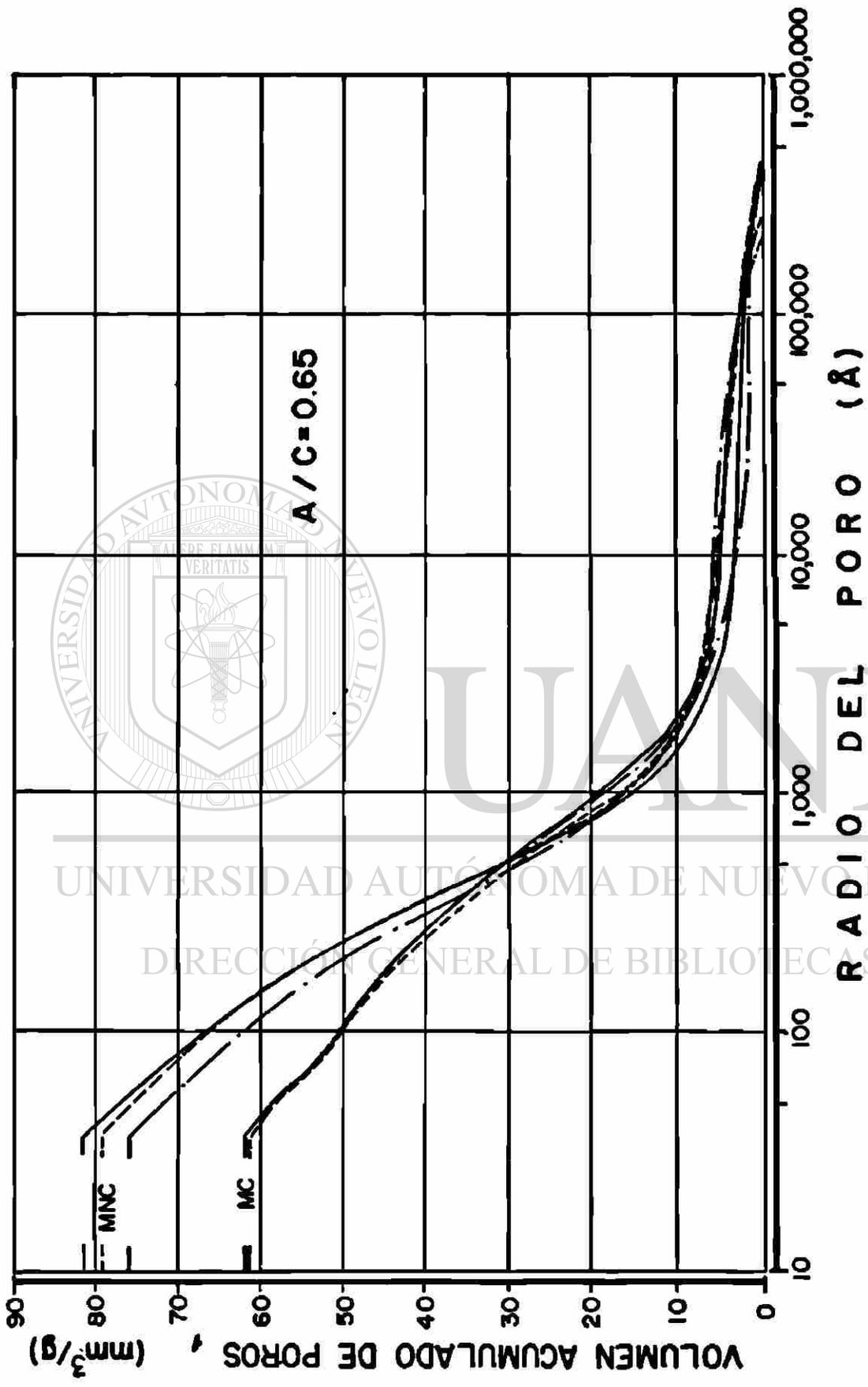


GRAF N° 14 .-RADIO DEL PORO VS. VOLUMEN ACUMULADO DE POROS PARA MORTEROS NO CARBONATADOS (MNC) Y CARBONATADOS (MC).



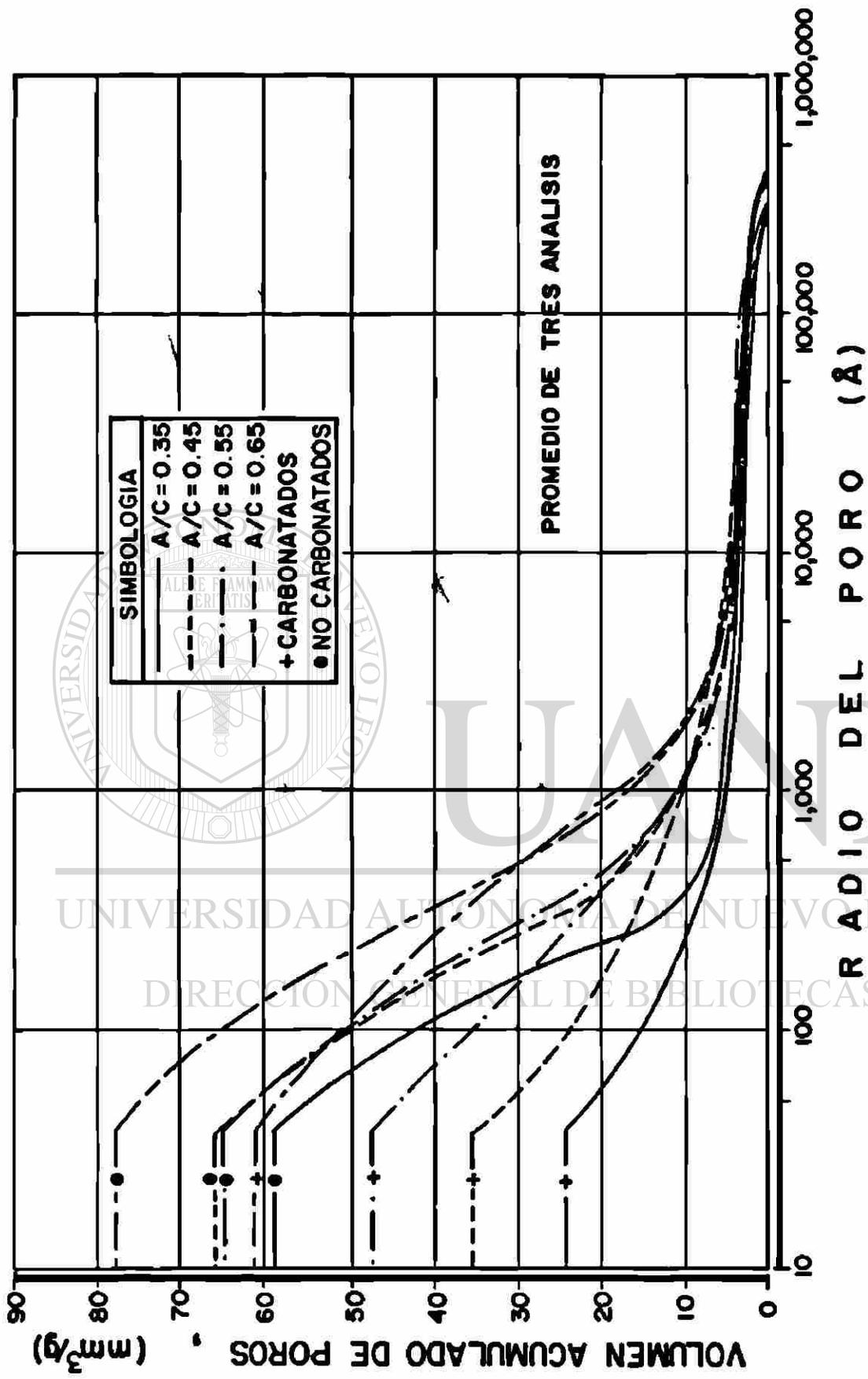
**ANÁLISIS DE POROSIDAD
DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DEL PORO**

**GRAF. N° 15 .- RADIO DEL PORO VS. VOLUMEN ACUMULADO
DE POROS PARA MORTEROS NO CARBONATADOS
(MNC) Y CARBONATADOS (MC).**

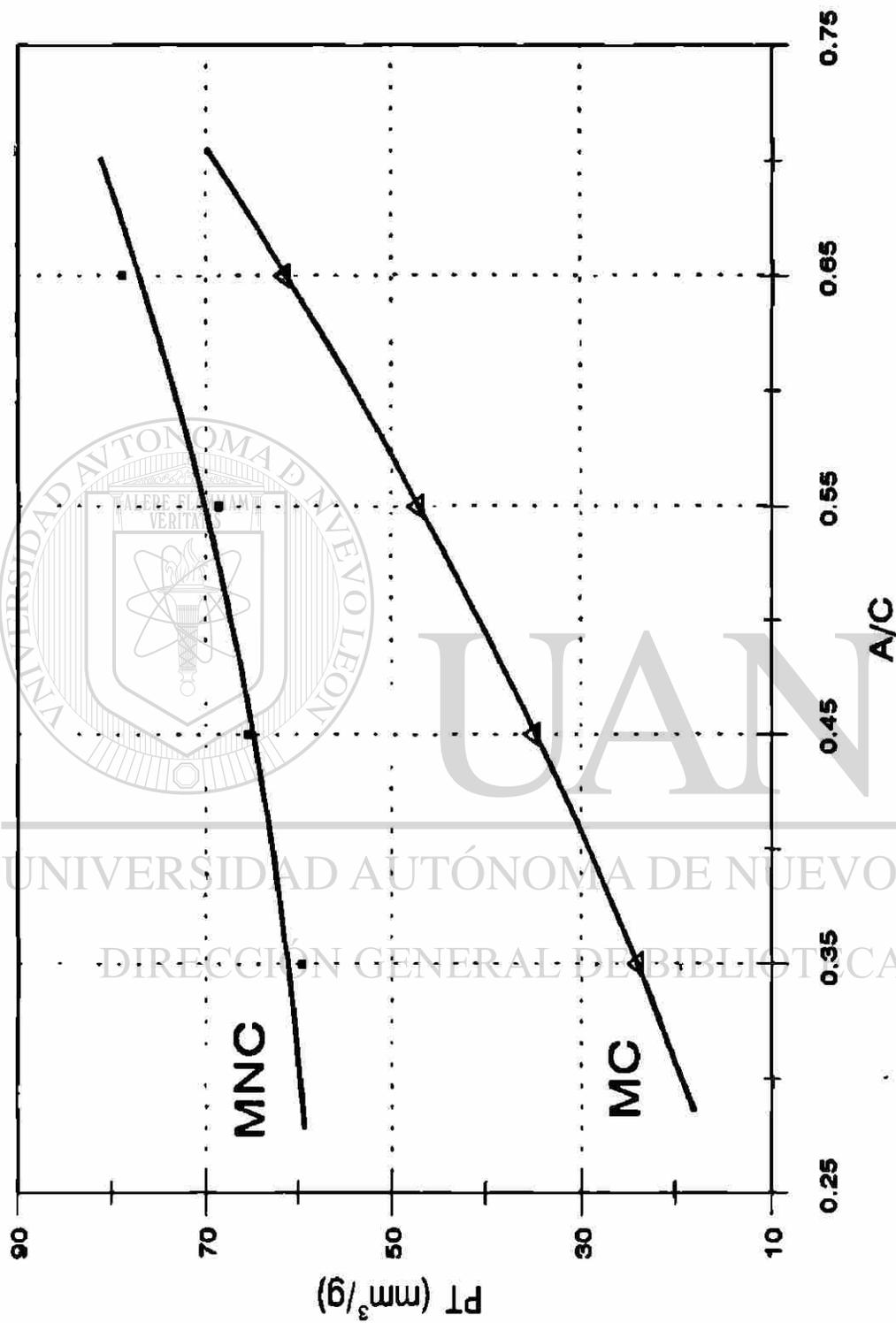


**ANÁLISIS DE POROSIDAD
DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DEL PORO**

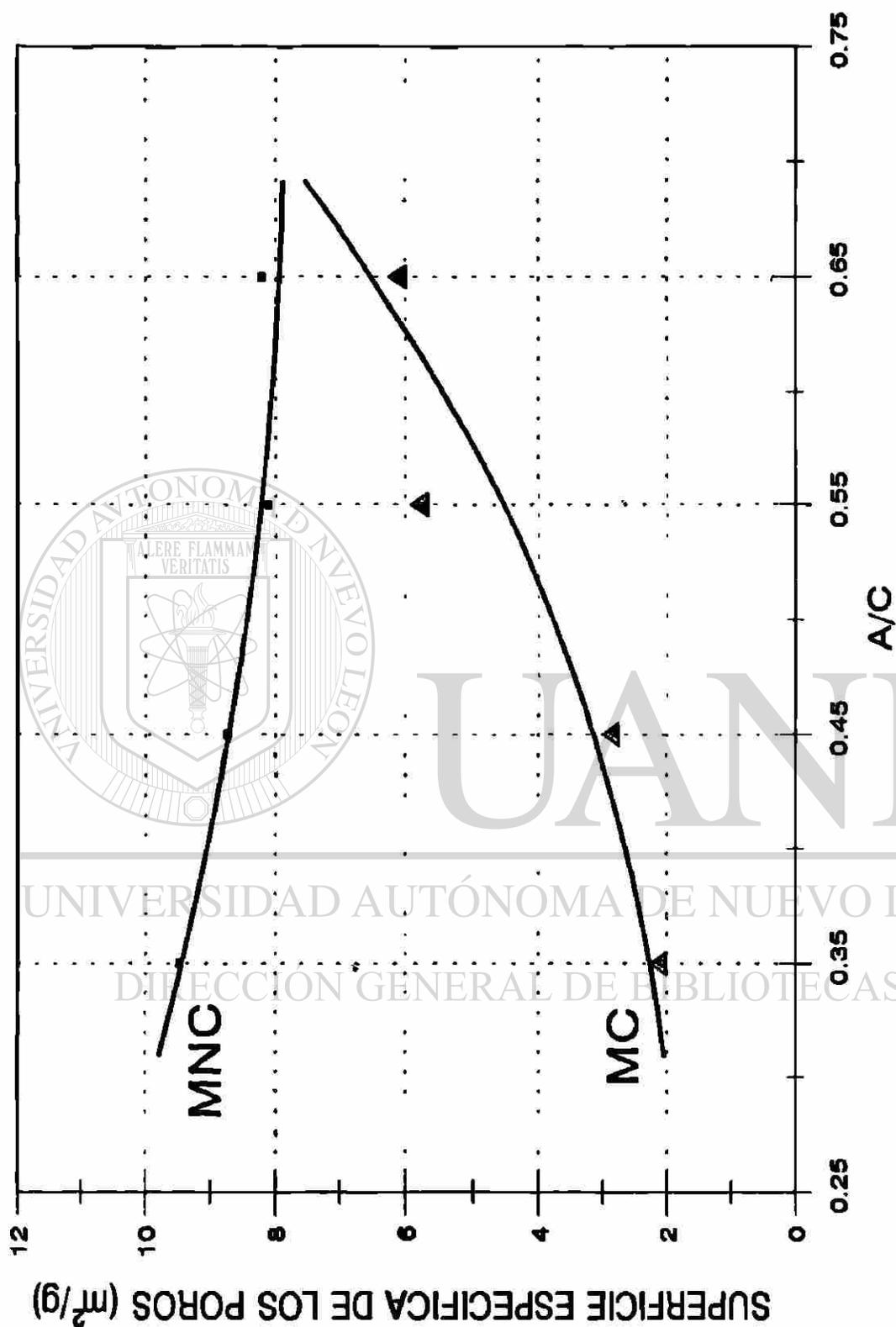
**GRAF. N° 16 .- RADIO DEL PORO Vs. VOLUMEN ACUMULADO
DE POROS PARA MORTEROS NO CARBONATADOS
(MNC) Y CARBONATADOS (MC).**



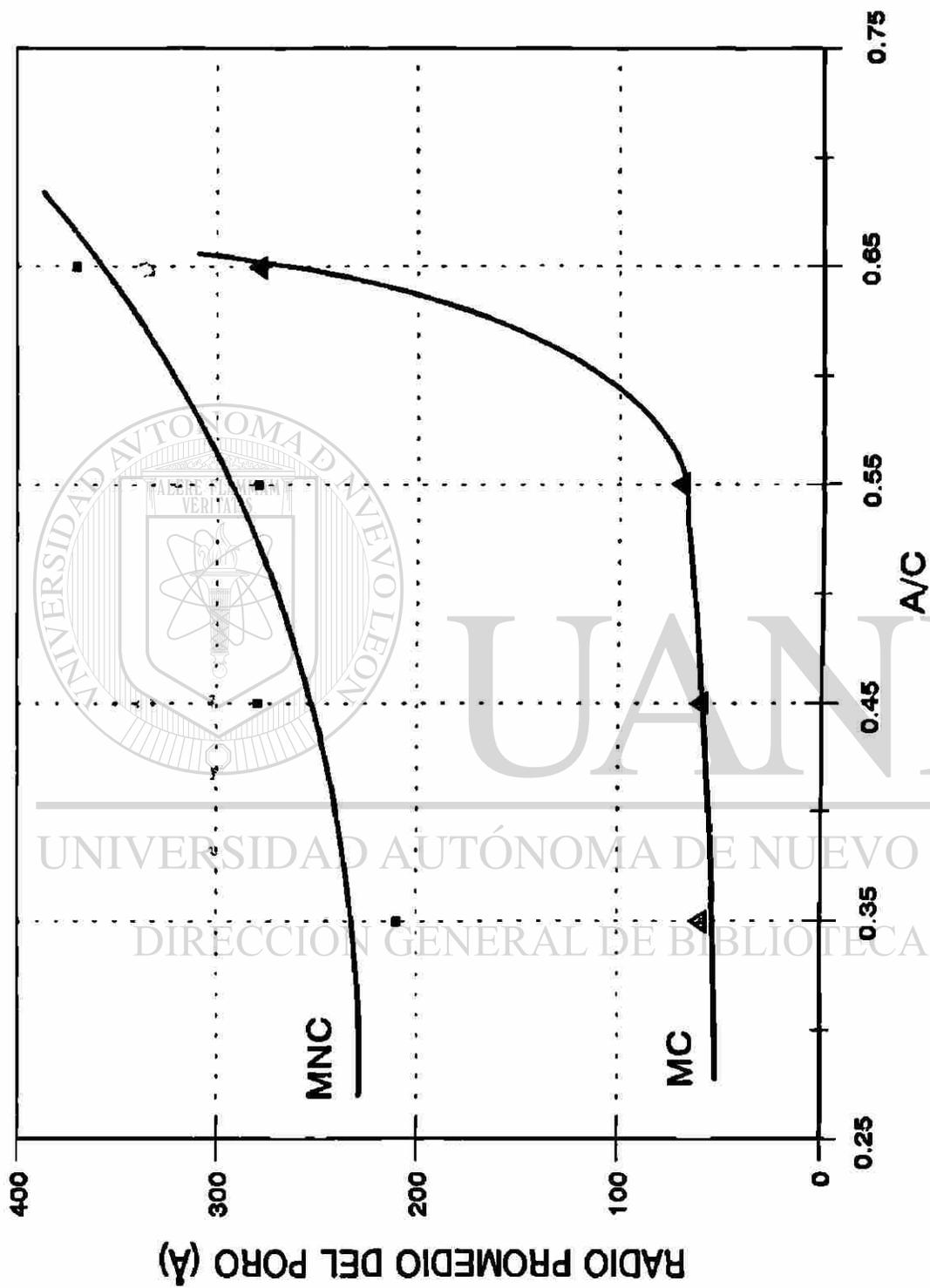
GRAF. N°17 .- PROMEDIO DE RADIO DEL PORO Vs. VOLUMEN ACUMULADO DE POROS PARA MORTEROS NO CARBONATADOS (MNC) Y CARBONATADOS (MC).



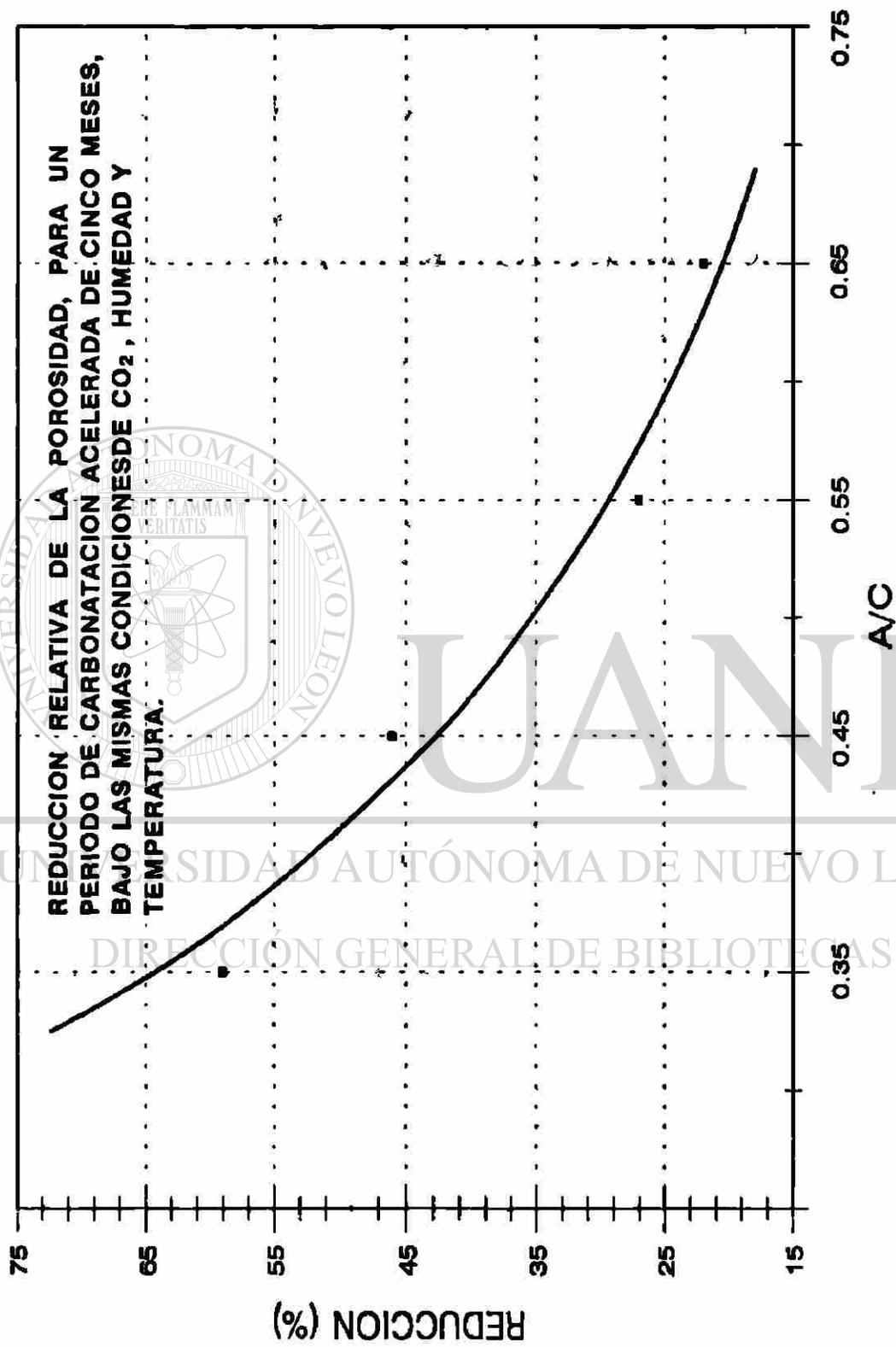
**GRAF. N°18.- GRAFICA DE RELACION AGUA/CEMENTO(A/C)
Vs POROSIDAD TOTAL(PT) DE MORTEROS
NO CARBONATADOS(MNC) Y CARBONATADOS(MC)**



GRAF. N°19.- GRAFICA DE RELACION AGUA/CEMENTO(REL. A/C) Vs SUPERFICIE ESPECIFICA DE LOS POROS DE MORTEROS NO CARBONATADOS(MNC) Y CARBONATADOS(MC)



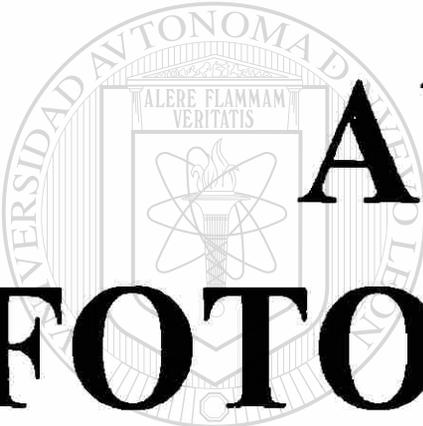
GRAF.N° 20.- GRAFICA DE RELACION AGUA/CEMENTO(A/C) NO CARBONATADOS(MNC) Y CARBONATADOS(MC) Vs RADIO PROMEDIO DEL PORO(RPP) DE MORTEROS



GRAF. N°21.- GRAFICA DE RELACION AGUA/CEMENTO(A/C) Vs REDUCCION EN LA POROSIDAD POR EFECTO DE LA CARBONATACION ACELERADA

BIBLIOGRAFÍA CONSULTADA

1. Strauss W. and Mainwaring S.J. *Contaminación del aire, causas, efectos y soluciones*. Primera edición, Editorial Trillas, pp. 9-19.
2. Perkins Henry C. 1974. "Air Pollution". International Student Edition, pp. 20-30.
3. "Los cazadores del dióxido de carbono (La tierra tiene mal aliento)". Revista Muy Interesante. Año XII, No. 3, pp. 68-75.
4. Masterton, Slowinski y Stanitski. 1989. *Química General Superior*. Sexta Edición, McGraw Hill, pp. 486-487.
5. ACI Manual of Concrete Practice 1997. ACI 201.2R-92. "Guide to Durable Concrete", pp. 11-16.
6. *Durability of Cement Mortars and Concretes*. 1980. ASTM, STP-691, Philadelphia, pp. 269-281.
7. Verbeck George J. 1958. *Carbonation of Hydrated Portland Cement*. ASTM, STP-205, Philadelphia, pp. 17-36.
8. Poulsen Ervin. 1994. *Background for Requirements to Concrete and Reinforced Concrete*. First Edition, Dansk Betoninstitut A/S and A/S Storebaeltsforbindelsen, , pp. 46-129.
9. Schubert P. and R. Wesche. 1974. "Einfluss der Karbonatisierung auf die Eigenschaften von Zementmörteln". Report No. F16. Institut für Bauforschung BWTH Aachen.
10. Neville, A.M. 1995. *Properties of Concrete*. Fourth Edition, Logman Group Limited, pp. 498.
11. Lea, F.M. 1971. *The Chemistry of Cement and Concrete*. First American Edition, Chemical Publishing Company, New York, , pp. 727.
12. Terzaghi, Ruth D. "Concrete Deterioration in a Shipway". ACI Journal, Proceedings. Vol. 44, No. 10, pp. 977-1005.
13. Terzaghi, Ruth D. "Concrete Deterioration Due to Carbonic Acid". Boston Society of Civil Engineers, 1949, Vol. 36.
14. Mehta, P. Kumar, Monteiro Paulo J.M. 1993. *Concrete Structure, Properties, and Materials*. Second Edition, Prentice-Hall, , pp. 17, 36-39, 144-145.
15. Maso J.C. 1980. *Proceedings of the Seventh International Congress on the Chemistry of Cements*. Seventh Edition, Vol. 1, Paris.
16. Perraton D. and P.C. Aitcin. 1994. *High Performance Concrete/From Material To Structure*. Yves Malier/Chapman and Hall, pp. 266.

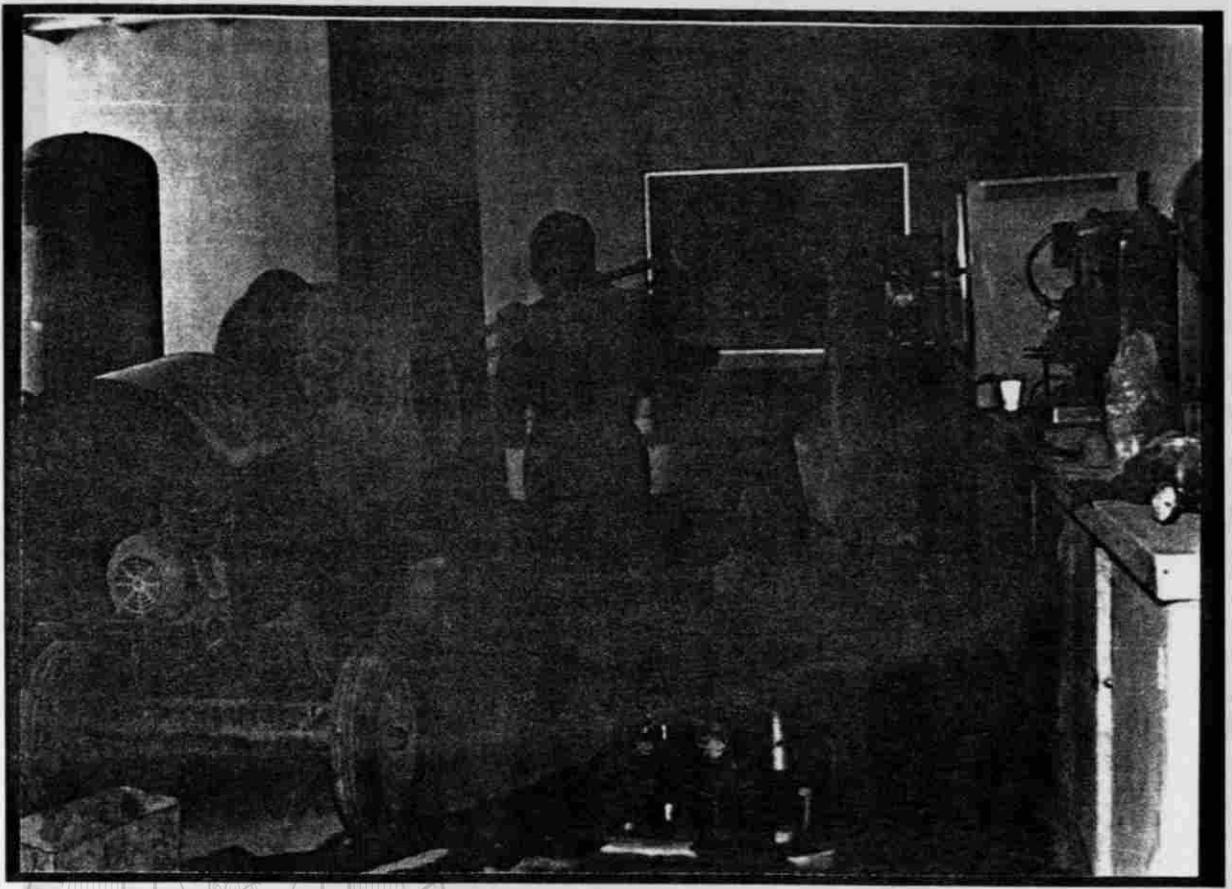


ANEXO FOTOGRAFICO

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

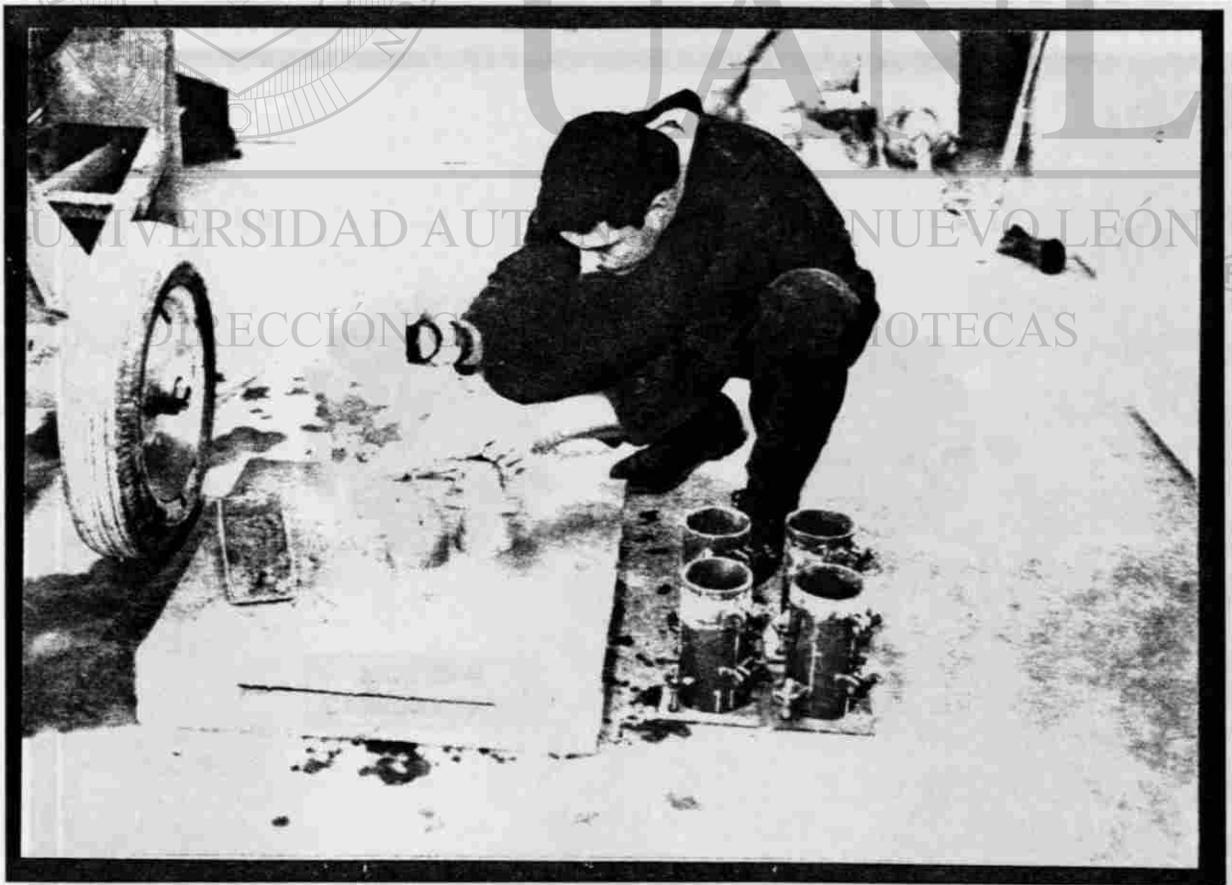


DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS



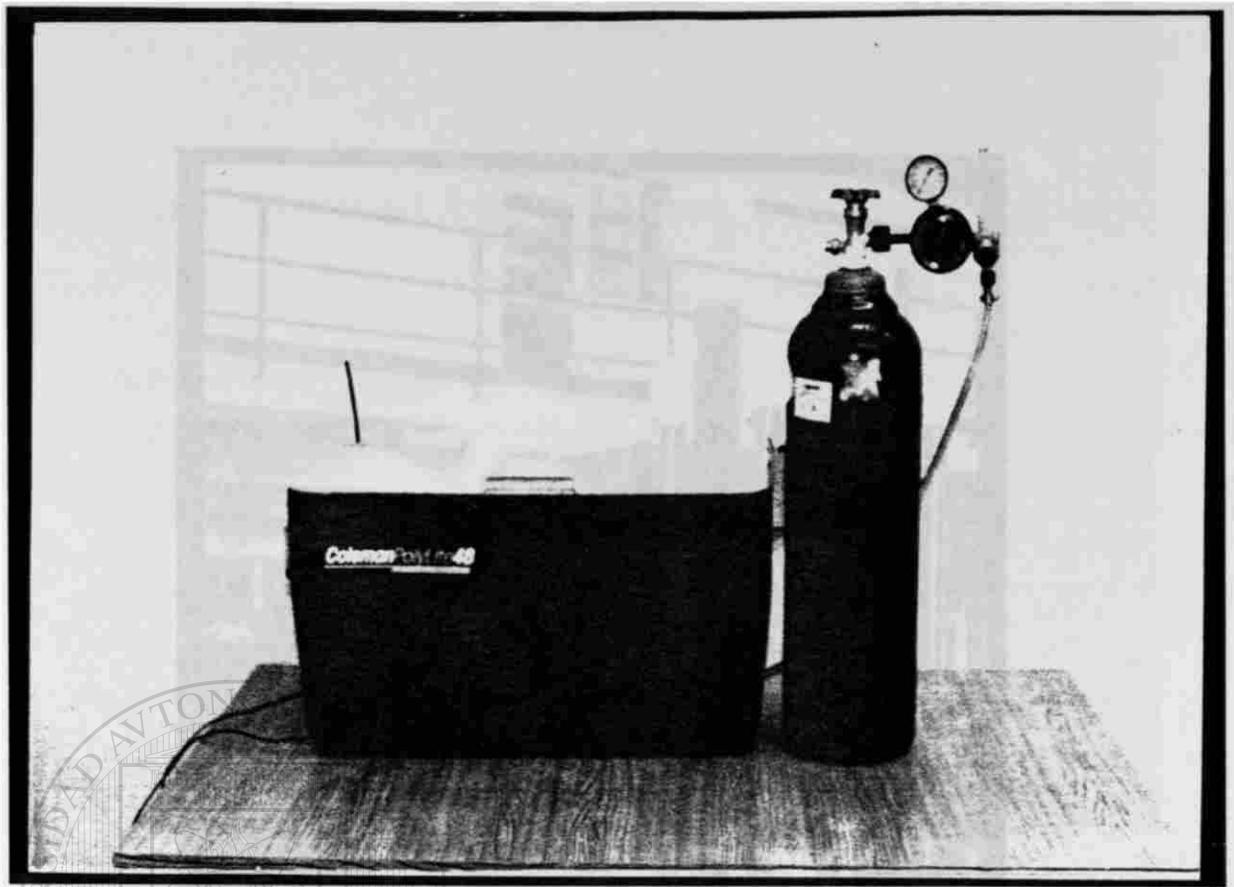
Fotografía 1

Mezclado del mortero en revolvedora convencional con capacidad para mezclar hasta 100 litros de concreto.

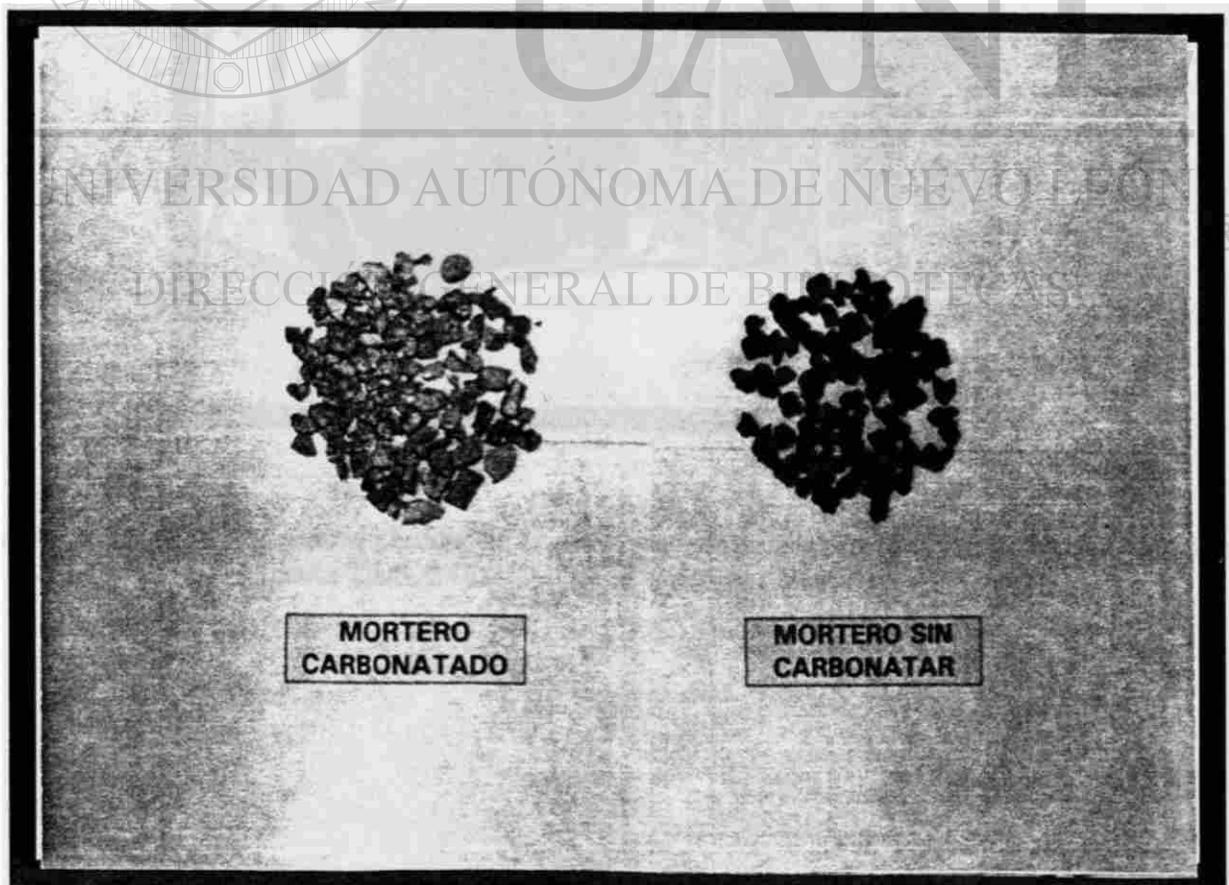


Fotografía 2

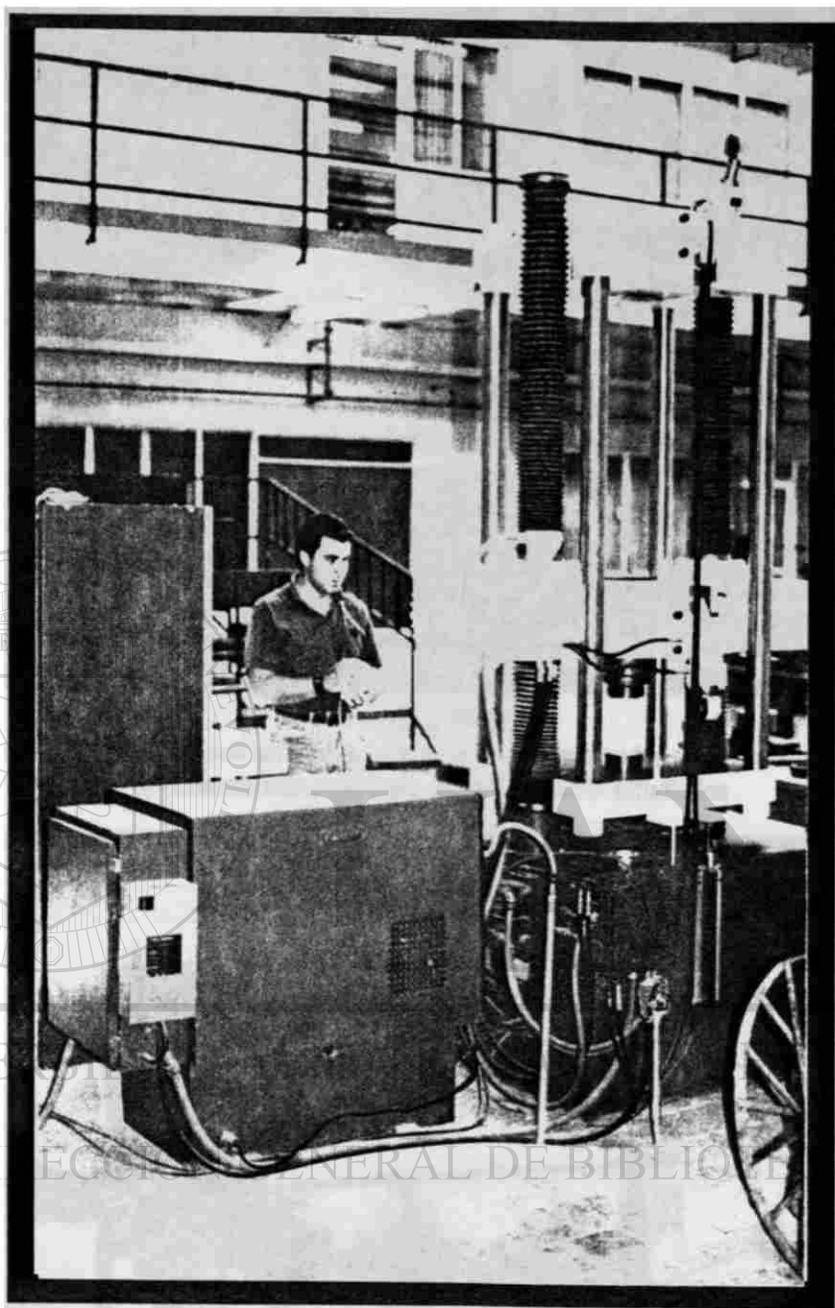
Medición de la consistencia empleando el cono de minirevenimiento. A la derecha aparecen los moldes empleados para la fabricación de los especímenes de mortero.



Fotografía 3
Cámara de carbonatación acelerada. A la derecha tanque de gas con una concentración de 5% de CO_2 .

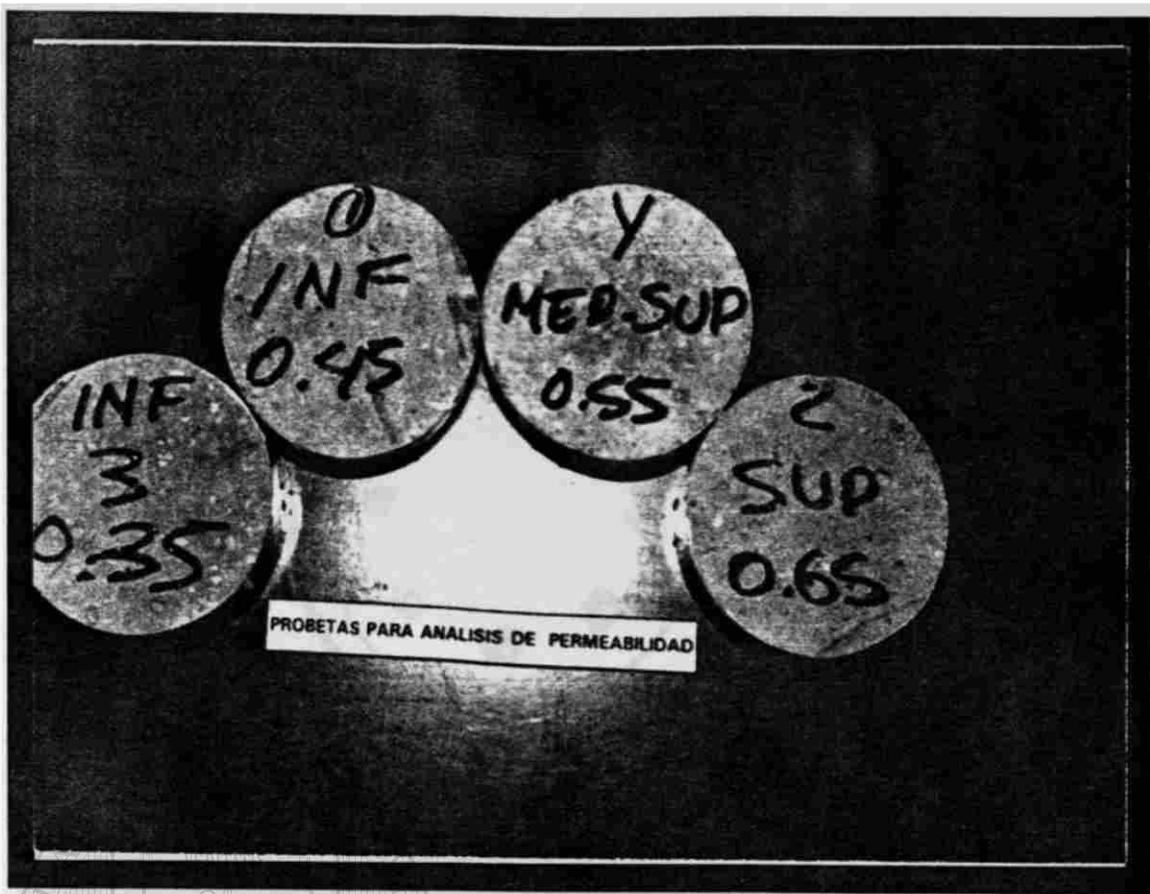


Fotografía 4
Muestras de mortero carbonatado y sin carbonatar, la coloración de los pedazos del mortero sin carbonatar es debida a la solución de fenolftaleina que se utilizó para deifinir cuándo el concreto se había carbonatado.

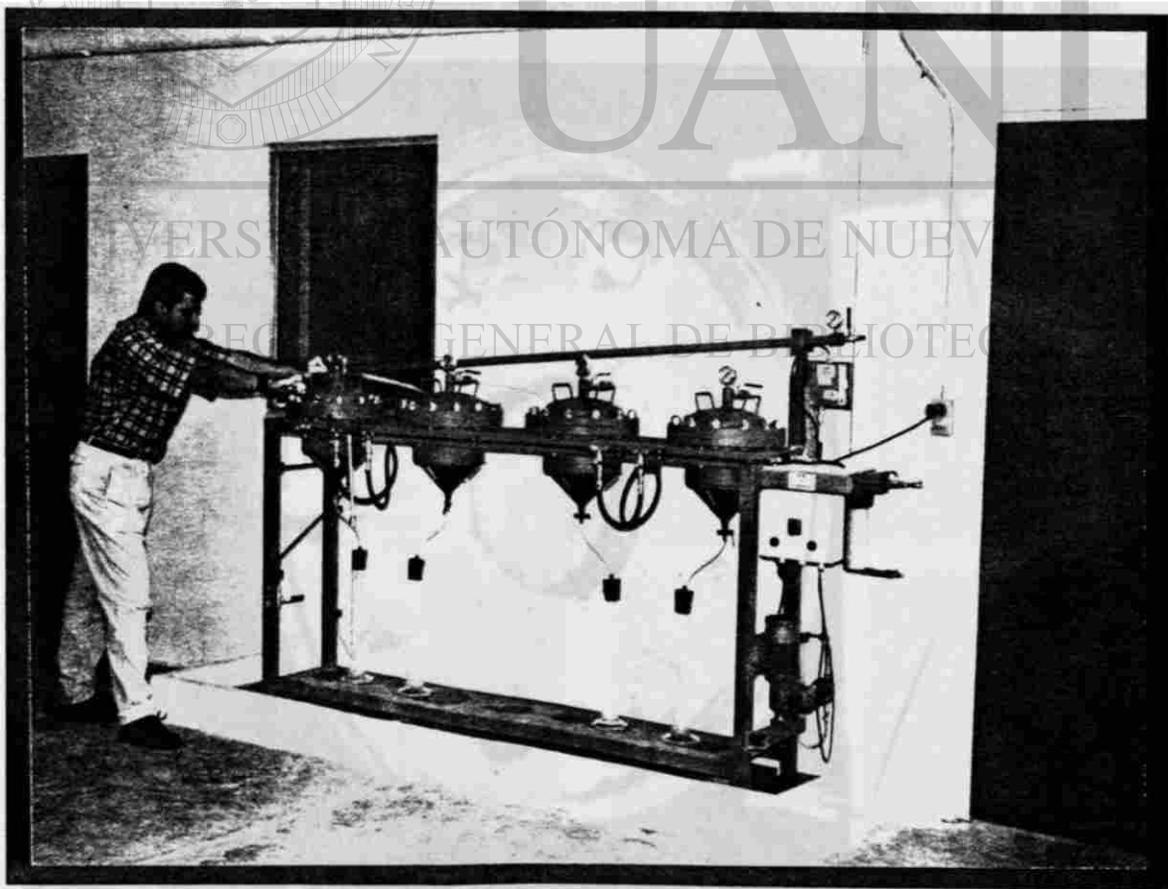


Fotografía 5

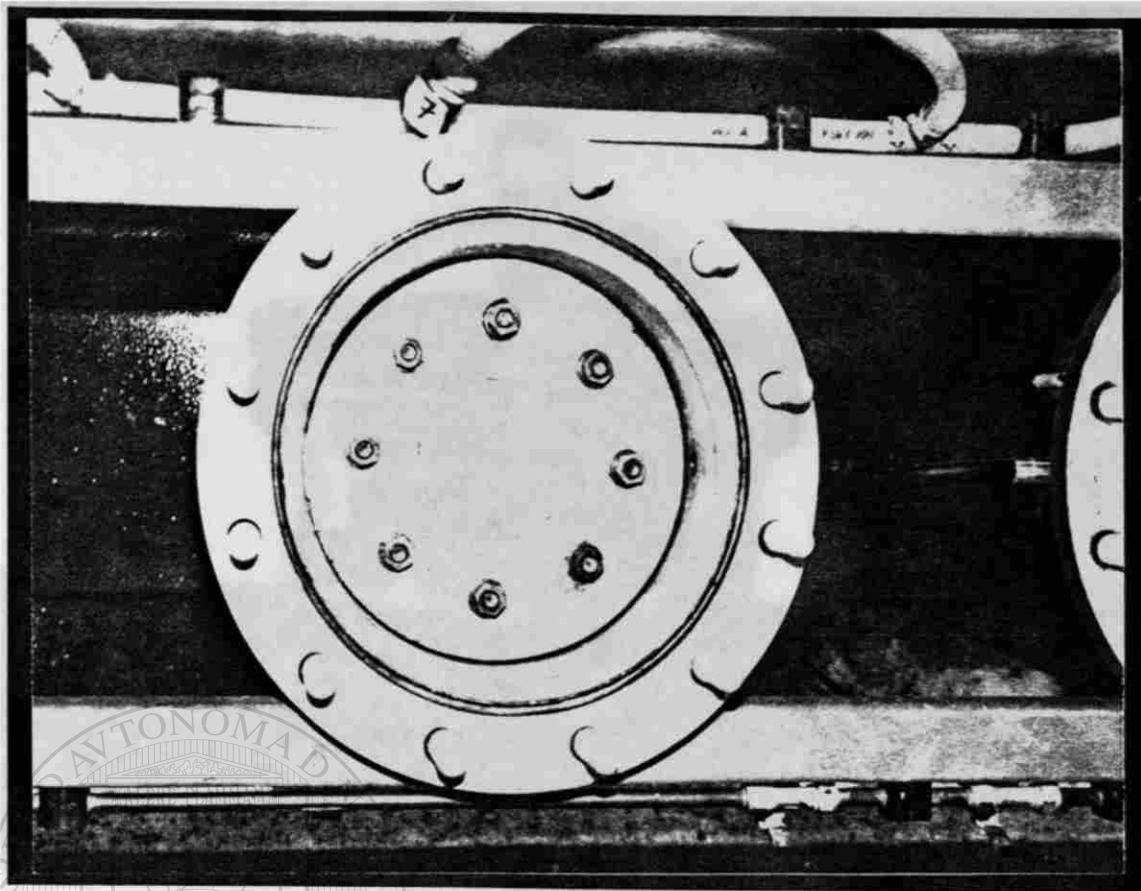
Ensayo de especímenes a compresión a la edad de 28 días empleando máquina universal con controles electrónicos, marca TINIUS OLSEN, con capacidad de 200 toneladas.



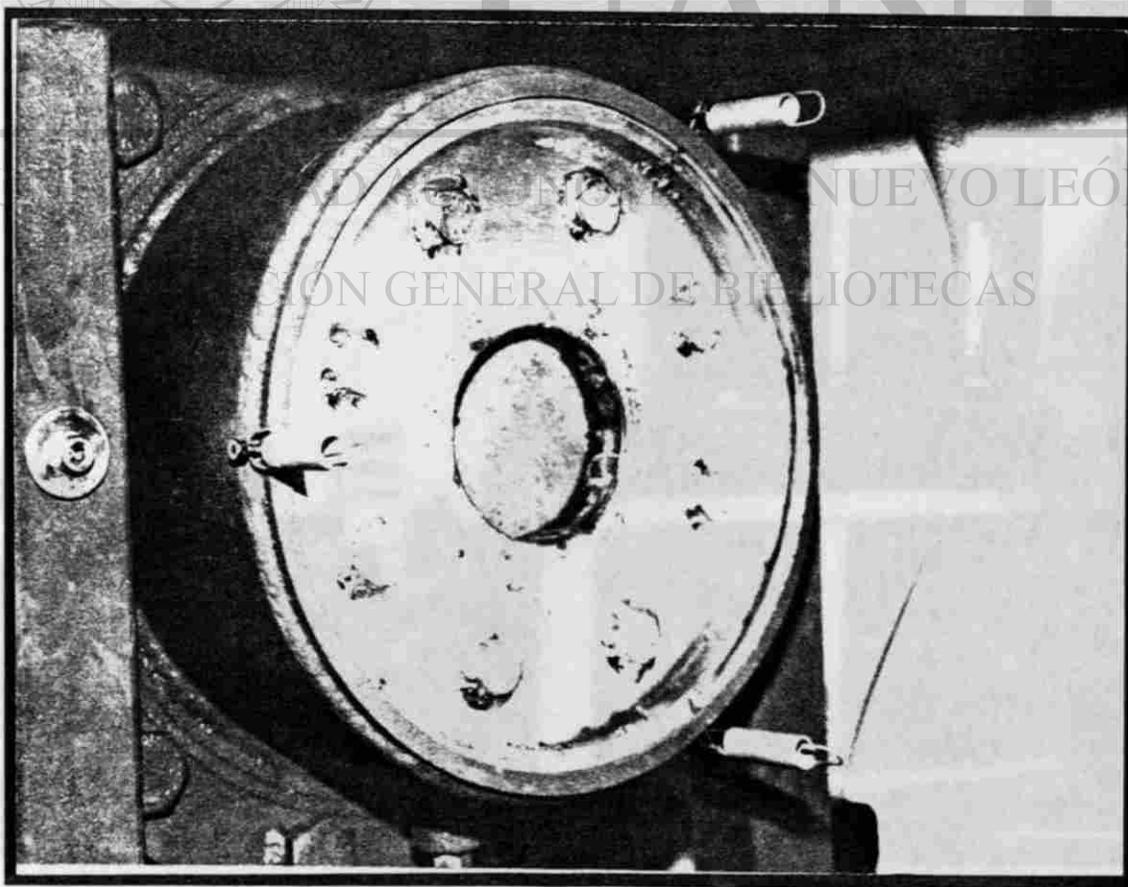
Fotografía 6
 Gajos de especímenes para las cuatro relaciones A/C empleados en la determinación de la permeabilidad del agua en los morteros estudiados.



Fotografía 7
 Permeámetro de fabricación italiana, marca MATEST, con capacidad para analizar hasta cuatro muestras simultáneamente y presión máxima de 30 bars.



Fotografía 8
Vista superior de una de las cámaras del permeámetro conteniendo una muestra por analizar.



Fotografía 9
Vista inferior de una de las cámaras del permeámetro conteniendo una muestra por analizar.



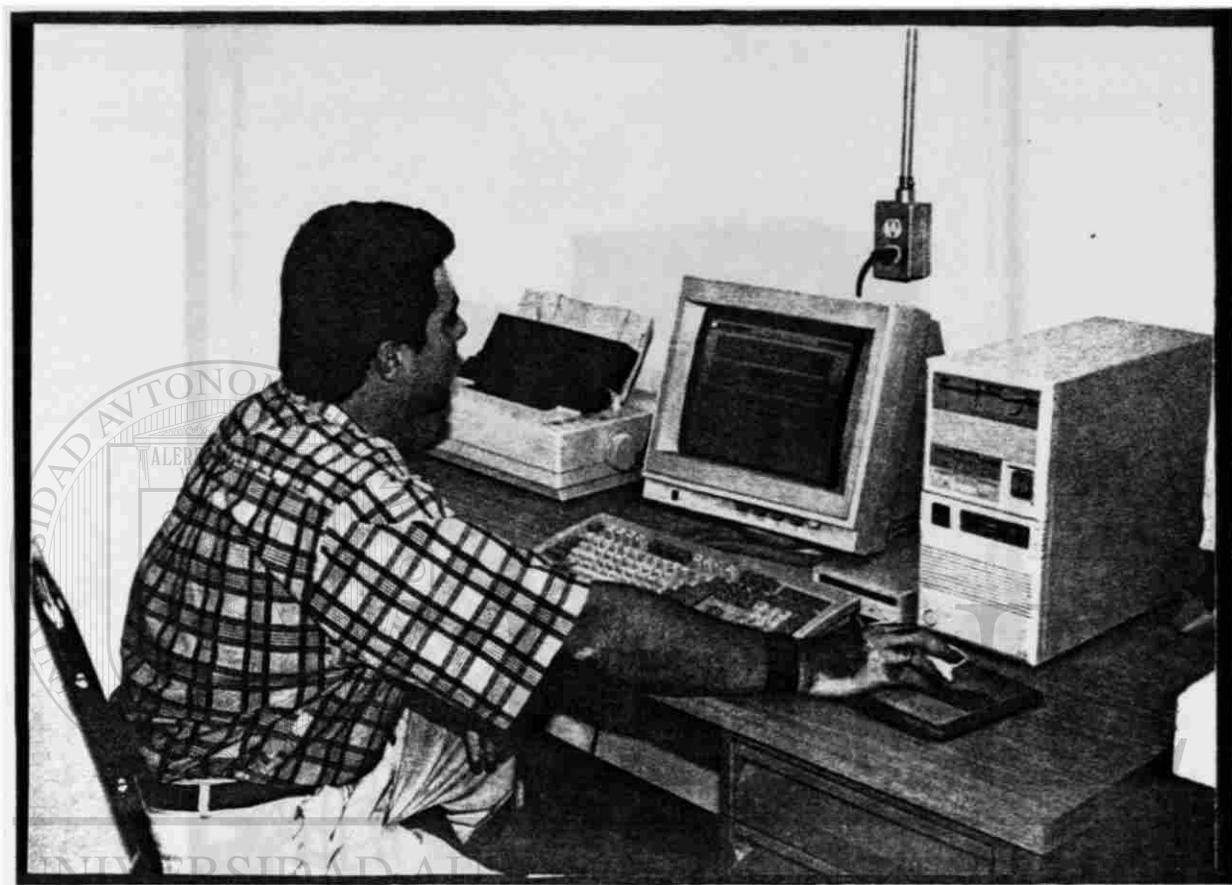
Fotografía 10

Muestras para los análisis de porosidad en la etapa de secado dentro de un desecador conteniendo silica-gel donde permanecieron hasta alcanzar peso constante.



Fotografía 11

Vista de todas las unidades que conforman al porosímetro 2000. Equipo de fabricación italiana marca CARLO ERBA, con capacidad de medir radios de poros hasta de 37 Å por medio de intrusión de mercurio.



®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

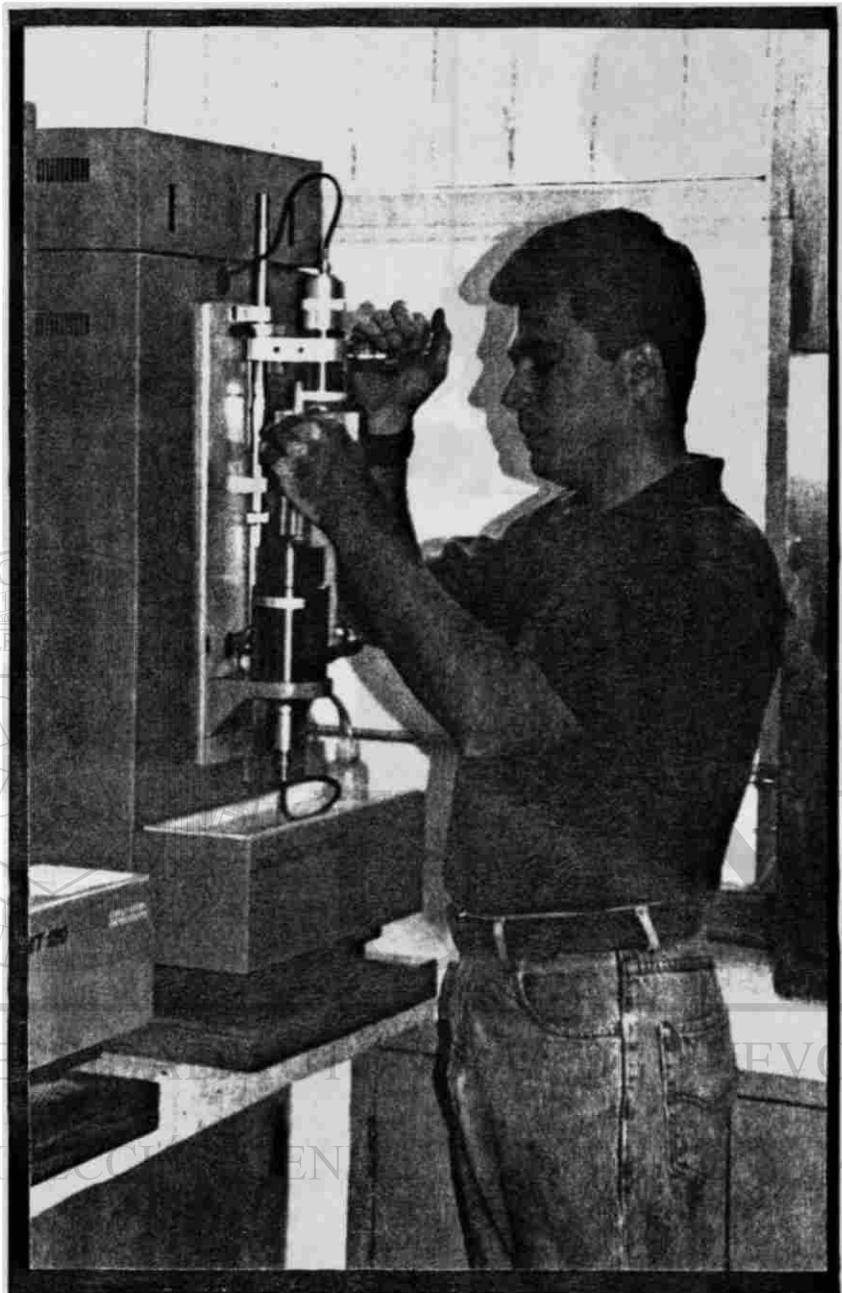
Fotografía 12

Computadora con interface para monitorear y almacenar los incrementos de presión y volumen durante los análisis, y con software para darle tratamiento a la información producto de cada análisis.



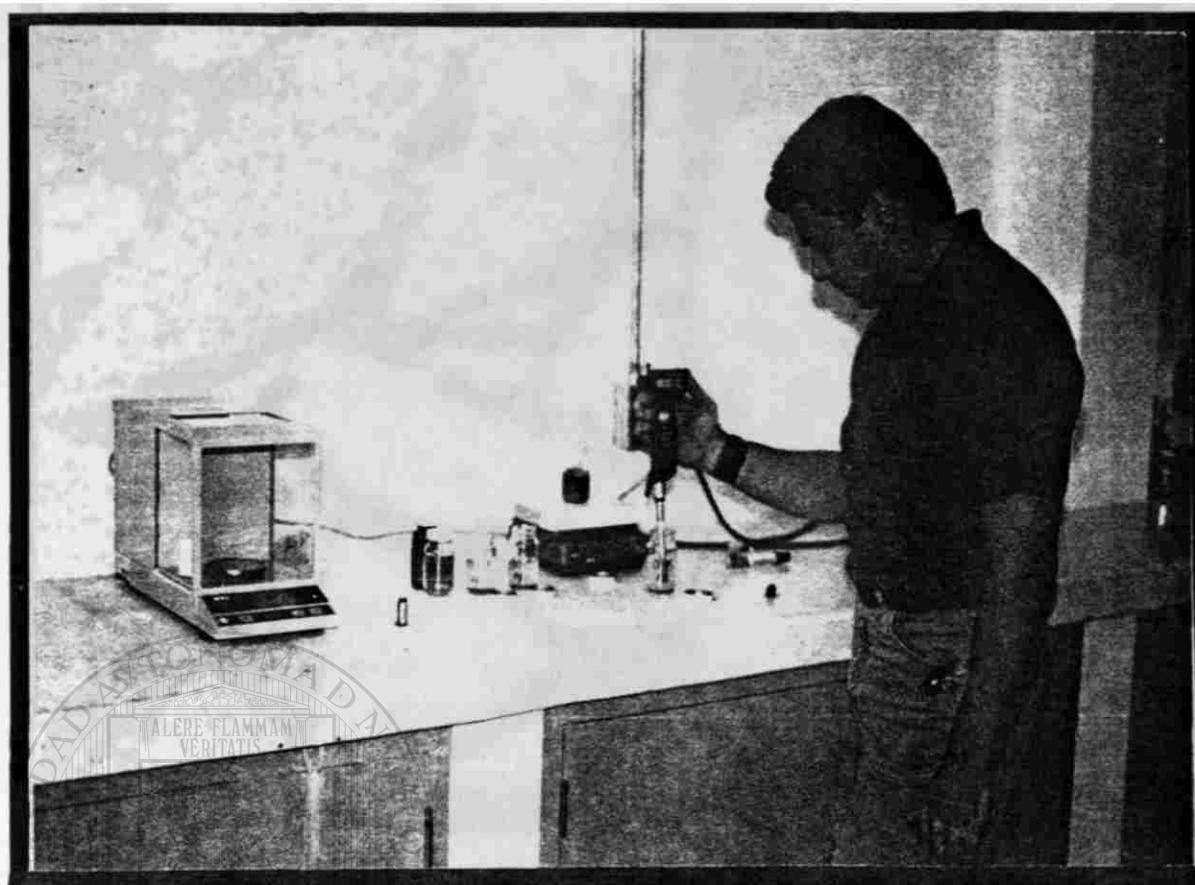
Fotografía 13

Unidad Macroporo empleada para medir el volumen de poros con radios hasta de 18,000 Å a presión atmosférica.

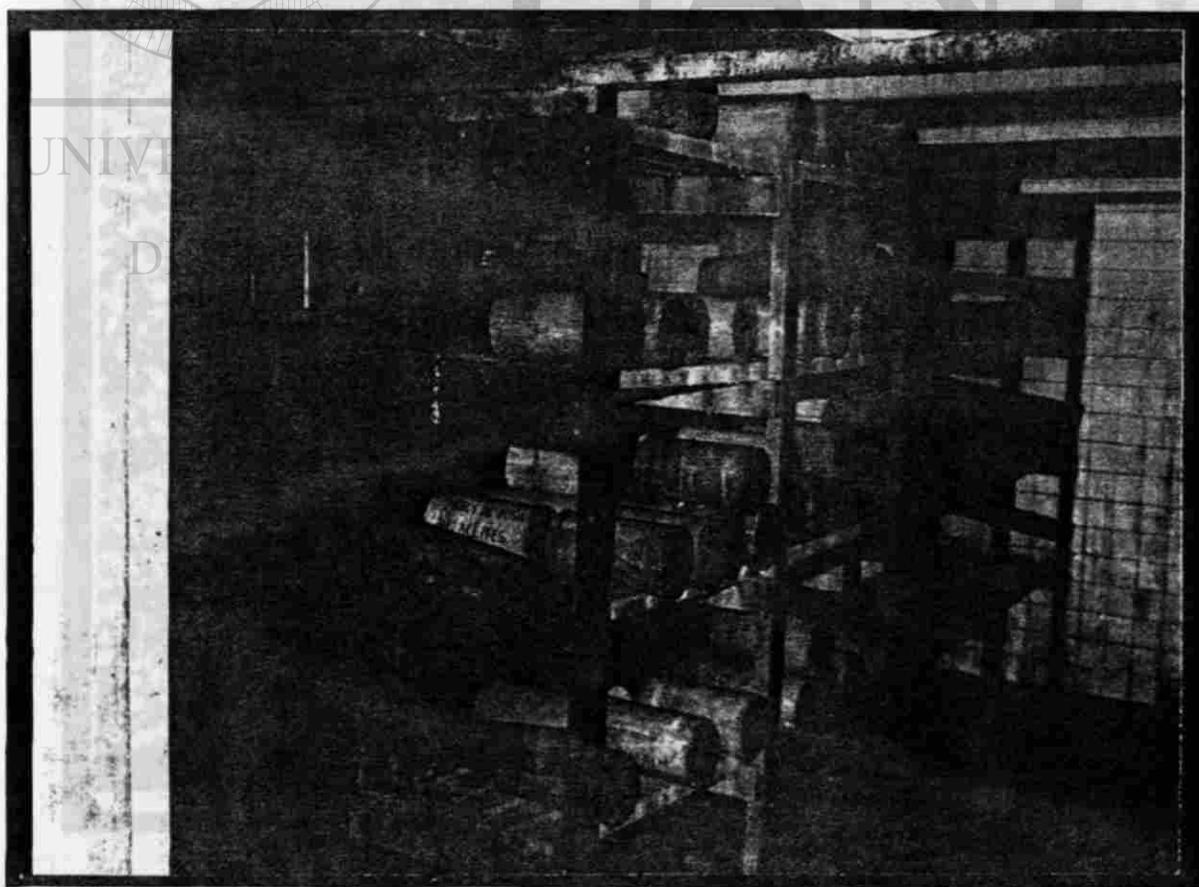


Fotografía 14

Unidad porosímetro 2000 que funciona por intrusión de mercurio para medir el volumen de poros con radios hasta de 37 Å. Esta unidad tiene capacidad de aplicar hasta 2,000 bares de presión



Fotografía 15
Determinación de pH a muestras pulverizadas empleando un peachímetro digital.

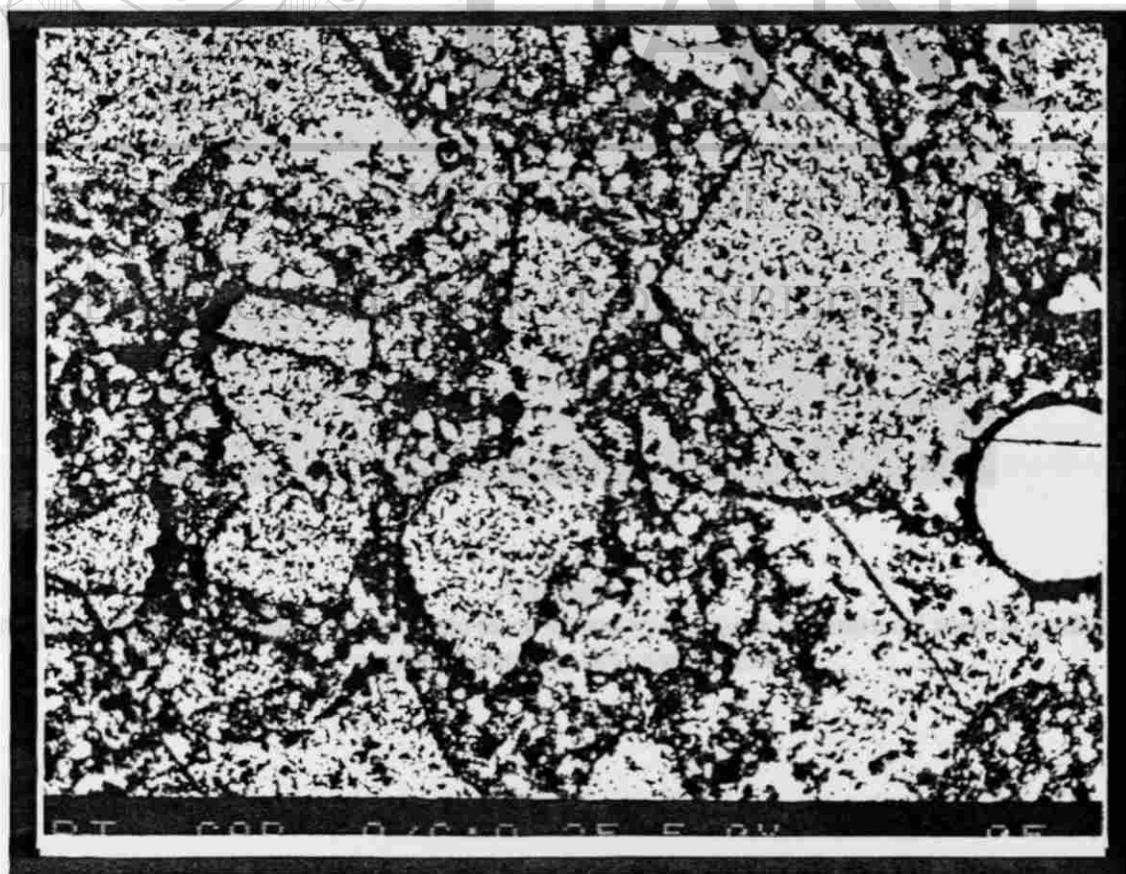


Fotografía 16
Cuarto de curado con temperatura de 23 ± 1.7 °C y humedad mínima del 95%.



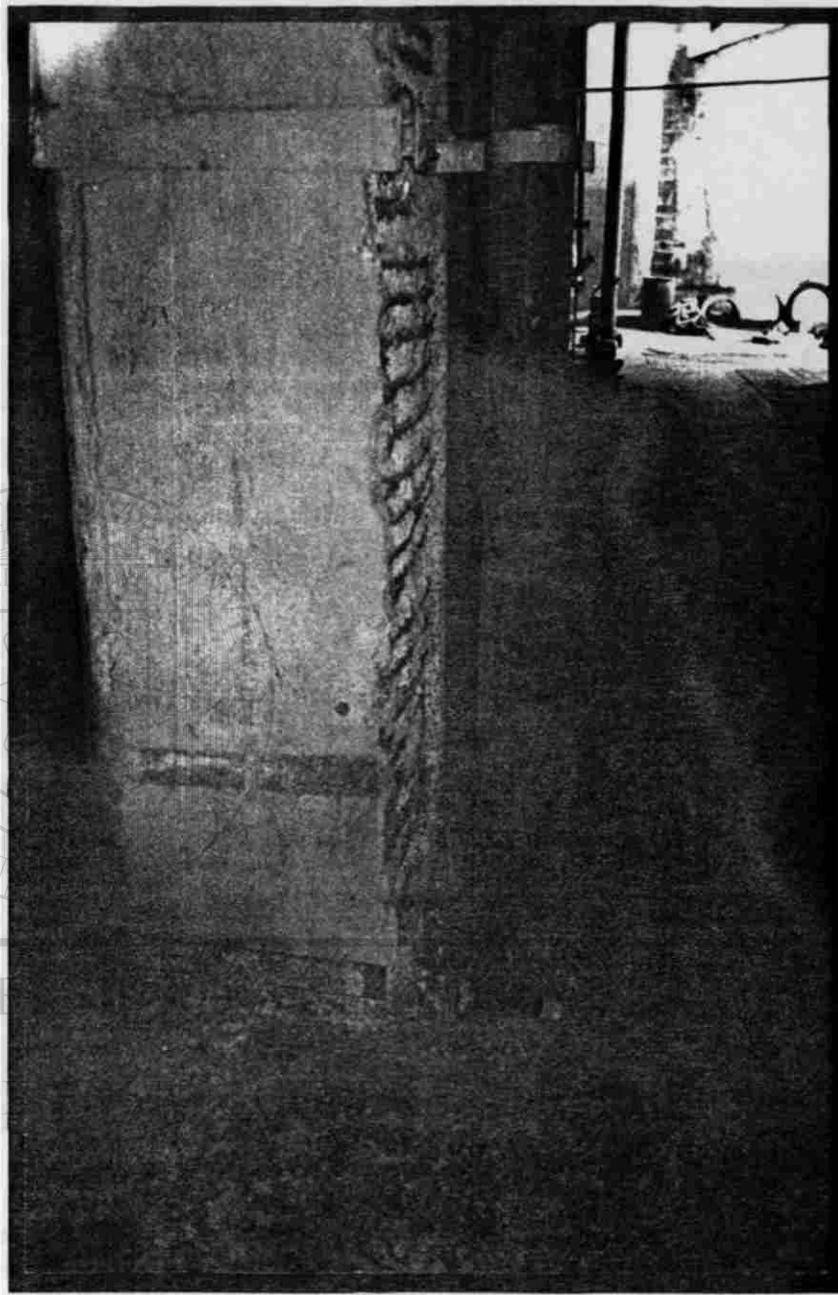
Fotografía 17

Fotografía tomada con un microscopio petrográfico a una muestra de mortero carbonatado para la relación $A/C = 0.65$ magnificado 5 veces en relación a su tamaño real.



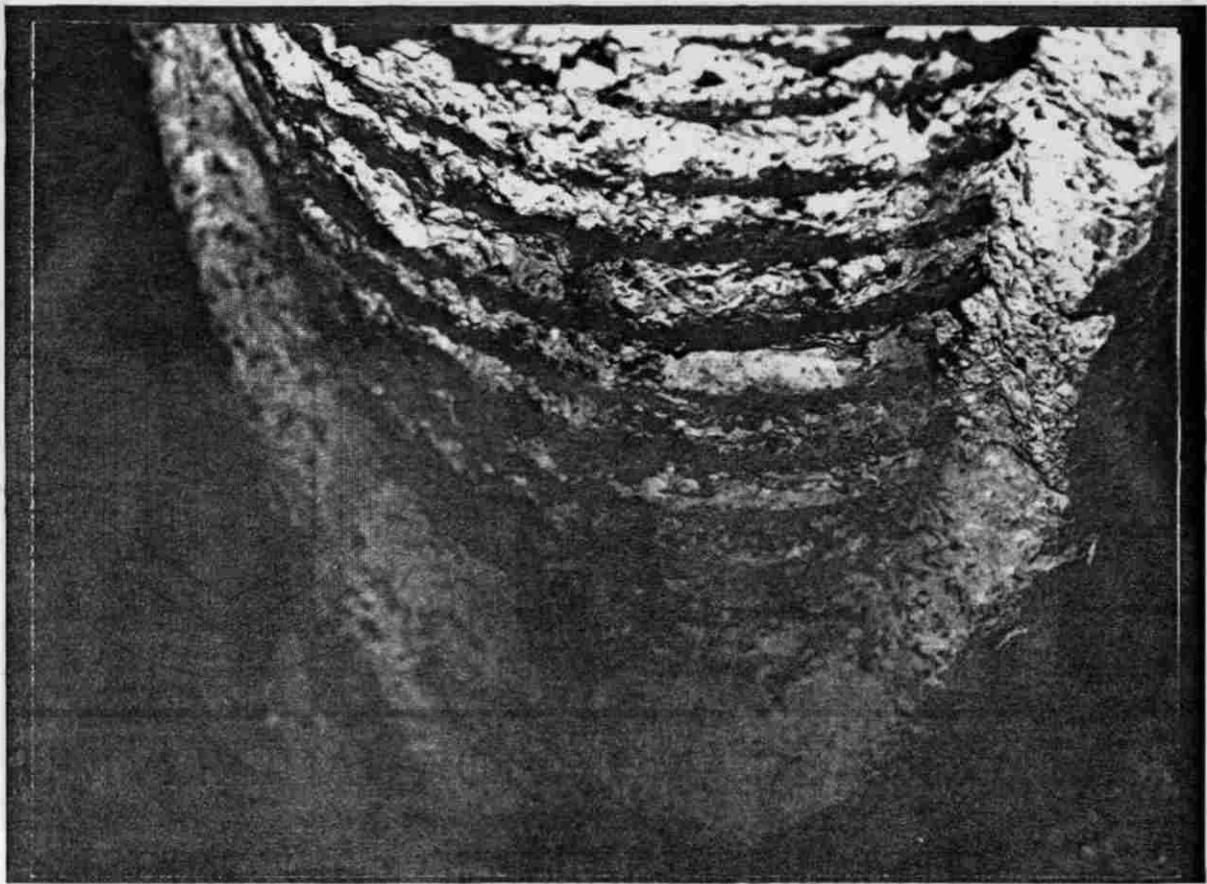
Fotografía 18

Fotografía tomada con un microscopio petrográfico a una muestra de mortero carbonatado con relación $A/C = 0.35$ magnificado 5 veces en relación a su tamaño real. Obsérvese al comparar las fotografías 17 y 18, la diferencia en la densidad de la matriz cementante debida a la diferencia en las relaciones A/C .



Fotografía 19

Columna de concreto reforzado, cuyo concreto se carbonató y se inició la corrosión del acero al grado de que se produjo la botadura del recubrimiento.



Fotografía 20

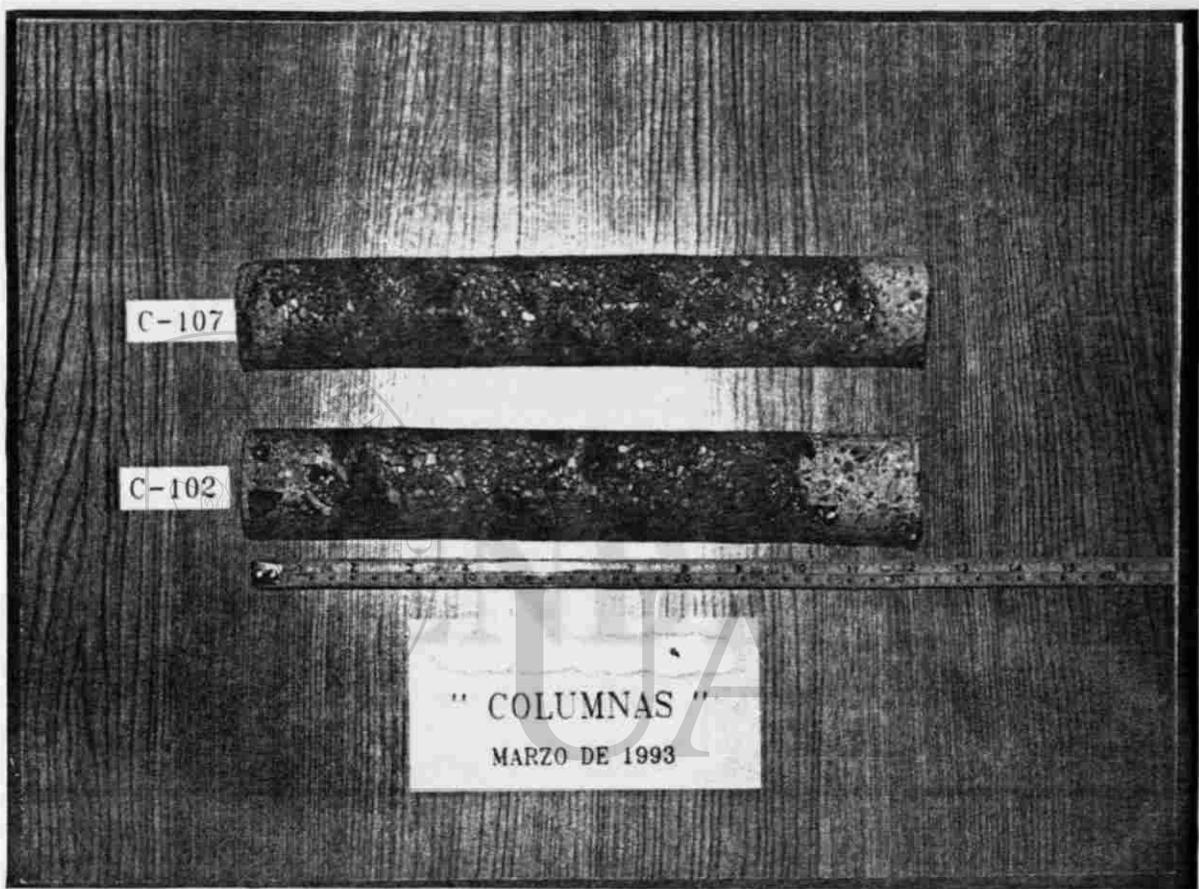
Columna de concreto reforzado, cuyo concreto se carbonató y la corrosión ha botado el recubrimiento. En ésta, observe el grado de corrosión que en este caso se presentó en el acero a pesar del recubrimiento de 65 mm.



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Fotografía 21

Corazones de concreto de 5 cm de diámetro extraídos a todo lo ancho de la sección transversal de una columna construida hace 25 años, cuya resistencia a la compresión a la edad de 28 días fue de 25.4 MPa (250 kgf/cm²). El área perimetral coloreada define al concreto no carbonatado y la restante al concreto carbonatado. Obsérvese que el espesor varía de aproximadamente 2 cm a aproximadamente 5 cm, esto debido a diferencias en el colado, la compactación, el acabado en el concreto y otros.



DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

Fotografía 22

Corazones de 5 cm de diámetro por 10 cm de altura ensayados a compresión y con un espesor carbonatado promedio de alrededor de 4 cm . Obsérvese que en todos los casos la falla del concreto se presentó en la zona del concreto no carbonatado, definida por la coloración violeta que da la solución de fenolftaleína, comportamiento que confirma el incremento de resistencia en el concreto por efecto de la carbonatación que disminuye la porosidad.



APÉNDICE A

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 veri-

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.

ation 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 ±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 1/2 in. (13 mm), concentric circles not more than 1/32 in. (0.8 mm) deep and not more than 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 1/16 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 1/2 in. (1 mm) and 1/4 in. (1.6 mm). When the spacing is between 1/4 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.

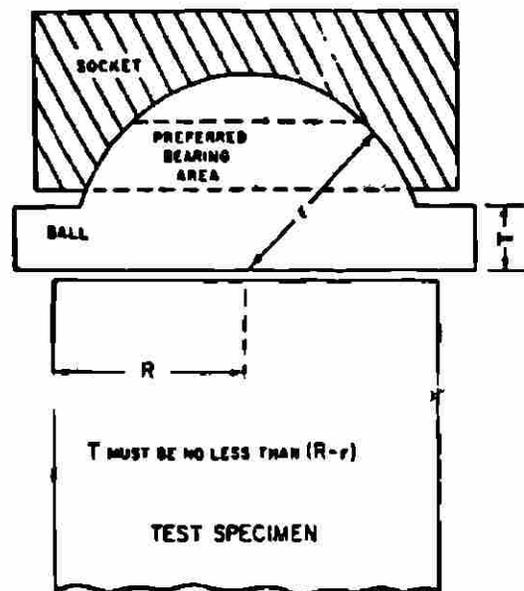
5.3.2 If the testing machine load is indicated in digital form, the numerical display must be large enough to be easily read. The numerical increment must be equal to or less than 0.10 % of the full scale load of a given loading range. In no case shall the verified loading range include loads less than 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 1/16 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).

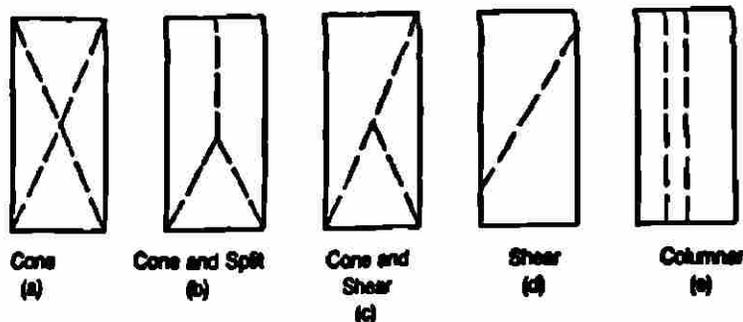


FIG. 2 Sketches of Types of Fracture

	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 %

Single operator
Laboratory conditions
Field conditions

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

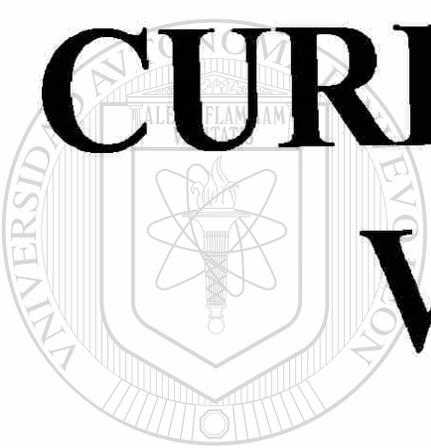
NOTE 12—Subcommittee C09.03.01 will re-examine recent CCRL Concrete Reference Sample Program data and field test data to see if these values are representative of current practice and if they can be extended to cover a wider range of strengths and specimen sizes.

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.



CURRICULUM VITAE

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

®

DIRECCIÓN GENERAL DE BIBLIOTECAS

ING. ALEJANDRO DURÁN HERRERA

CURRICULUM RESUMIDO

Alejandro Durán Herrera

**Candidato para el grado de Maestro en Ciencias
Con especialidad en Ingeniería Ambiental**

TESIS:

“La Durabilidad del Concreto Afectada por la Contaminación Ambiental”

BIOGRAFÍA:

Nacido en Monterrey, N.L. el 26 de septiembre de 1965, hijo de Alejandro Durán Herrera y María de Lourdes Herrera Simental.

EDUCACIÓN:

Egresado de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León; donde obtuvo la Licenciatura en Ingeniería Civil en 1993.

EXPERIENCIA PROFESIONAL:

- **Asesorías en aspectos académicos y prácticos en el área de Tecnología del Concreto a alumnos de séptimo semestre de la FIC-UANL.**
- **Diseño de mezclas de concreto para ser fabricados por los alumnos en el laboratorio de Tecnología del Concreto de la FIC-UANL.**
- **Investigación de algunas de las propiedades en estado endurecido a concretos de peso normal, de peso ligero, de alta resistencia y de alto comportamiento.**
- **Investigación sobre la compatibilidad de aditivos con cemento Portland, mediante el cono Marsh.**
- **Investigación del efecto de la ceniza volante de la planta carboeléctrica de Río Escondido en la resistencia a la compresión de concretos convencionales, de alta resistencia y de alto comportamiento.**
- **Empleo de métodos destructivos y no destructivos para determinar la resistencia a la compresión del concreto en el lugar.**
- **Evaluación del deterioro en estructuras de concreto reforzado atacadas por agentes presentes en el ambiente o en procesos industriales para, con ello, establecer alternativas de reparación.**

