

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 (CO_2) 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 CO_2 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.

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 metereológicas. 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⁾.

EFEECTO 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

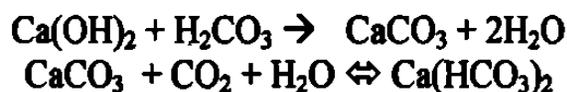
dañina al disminuir el pH de la pasta de cemento, lo cual propicia la corrosión del acero de refuerzo embebido en el concreto ⁽⁹⁾, inhibiendo la película protectora de óxido de fierro y dejándolo expuesto a la corrosión al permearse humedad y oxígeno a través del concreto, lo cual, además, origina retracción.

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⁽⁸⁾.

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.

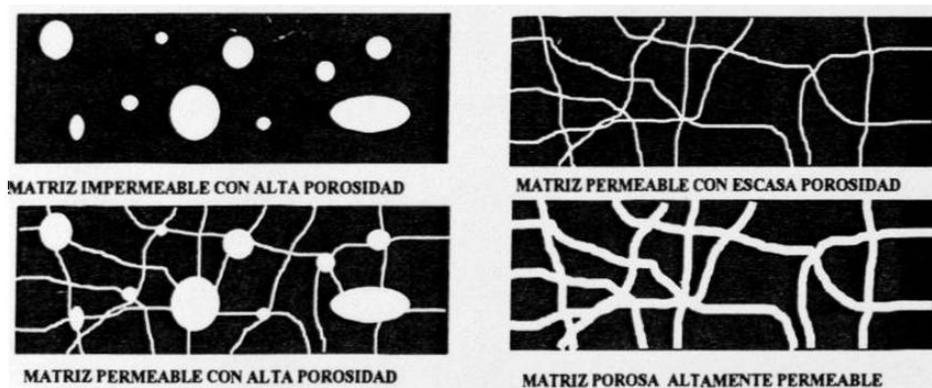


Fig. 1 Ilustración esquemática de la porosidad y permeabilidad. Un material bien puede ser poroso sin ser impermeable, pero no puede ser permeable sin ser al mismo tiempo poroso.

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⁾.

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 CO_2 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 CO_2 .

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 μm), 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.

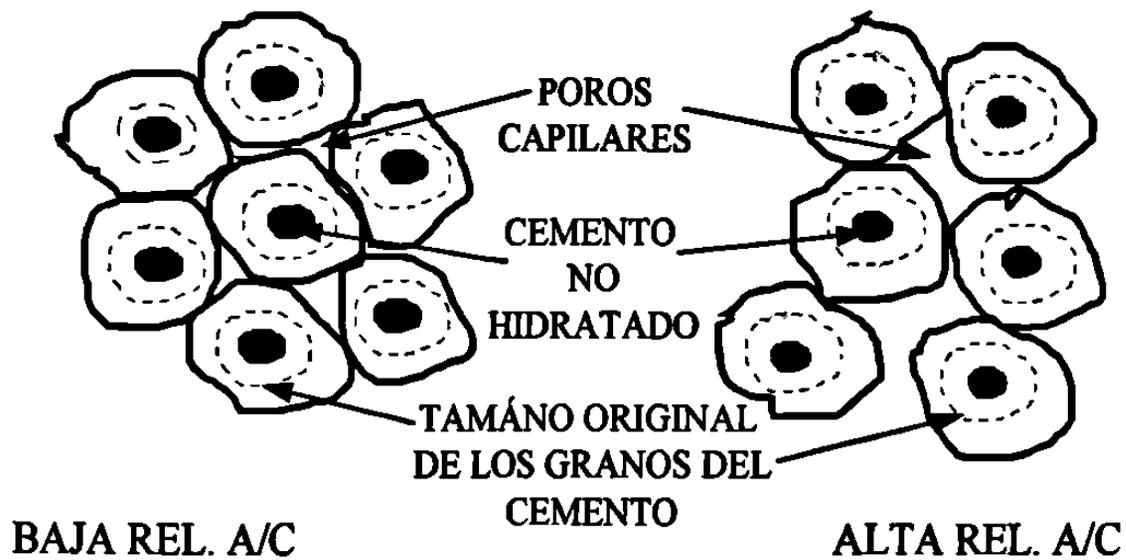


Fig. 1 Aumento en Porosidad Debido a una Alta Relación A/C

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).

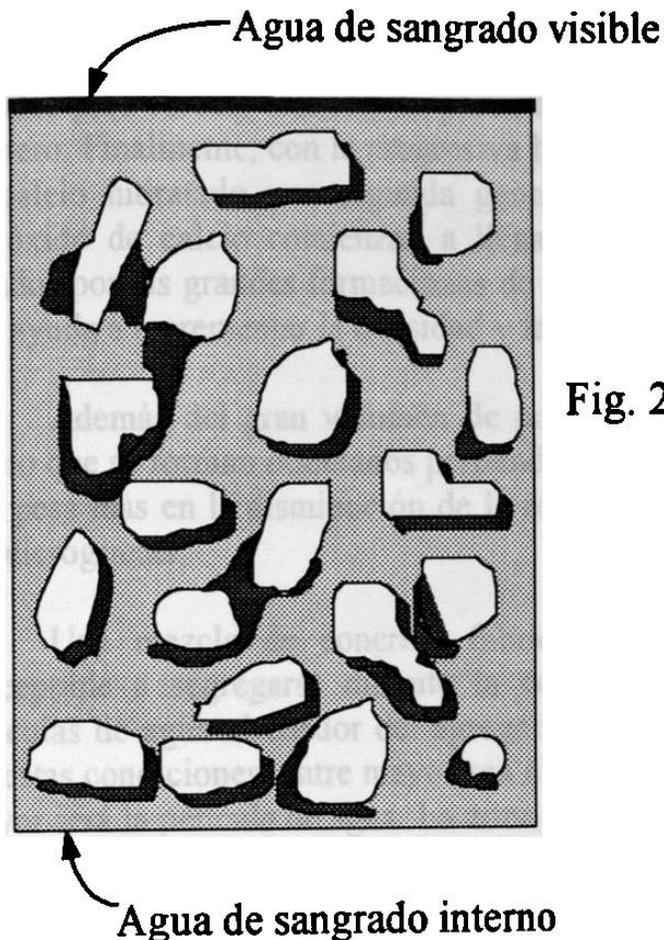


Fig. 2 Representación esquemática del sangrado en el concreto fresco compactado.

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.

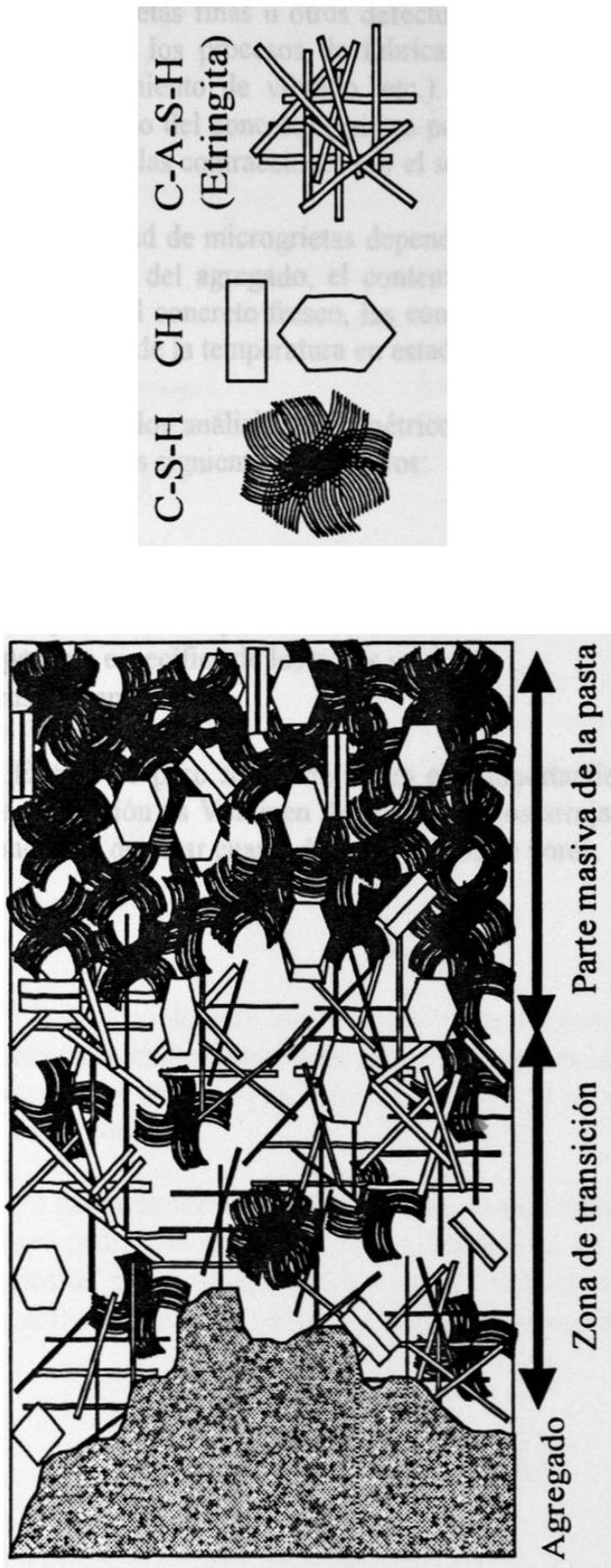


Fig. 3 - Representación esquemática de la zona de transición y de la parte masiva de la pasta.

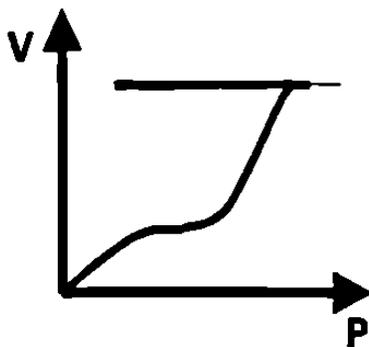
MACROGRIETAS: Si en un análisis microestructural se observa que el concreto tiene macrogrietas, grietas finas u otros defectos severos, algo anduvo o anda mal con uno o más defectos de los procesos de fabricación (diseño de la mezcla, procedimiento de colado, procedimiento de vibrado, etc.). Es común 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.

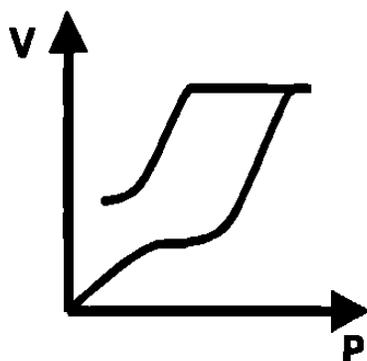
Mediante los análisis porosimétricos que se realizan vía intrusión de mercurio se pueden definir los siguientes parámetros:

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

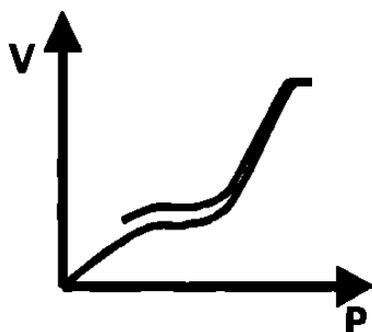
El tipo de poro se define según el comportamiento del tramo de descarga en la gráfica de Presión vs Volumen de poros que nos arroja un análisis de porosidad, lo cual nos conduce a detectar cuatro diferentes tipos de poros.



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)

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.

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 interfieran 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.

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).**

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.

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**

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) |

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 % |
| Anhídrido Sulfúrico | SO ₃ | 3.10 | MAX. 3.0 % |
| Oxido de Sodio | Na ₂ O | 0.17 | |
| Oxido de Potasio | K ₂ O | 0.77 | |
| Oxido de Titanio | TiO ₂ | 0.19 | |
| Pantóxido de Fósforo | P ₂ O ₅ | 0.09 | |
| Oxido de 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 |

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 |

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 |

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

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 | |
| 0.65 | SUP | 1.40E-09 | 1.01E-09 |
| | MED-SUP | 1.58E-09 | |
| | MED-INF | 7.13E-10 | |
| | 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.

TABLA No. 8

RESULTADOS DE LOS ANALISIS POROSIMÉTRICOS DE MUESTRAS NO CARBONATADAS

| A/C | ANÁLISIS | PT | | 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 = SUPERFICIE 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 = SUPTIFICIDAD ESPECIFICA
RCU = RADIO CRÍTICO 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 | | | | | |
|------|------------------------|------|---------------------|------|---------------------|-----|
| | MORTERO NO CARBONATADO | | MORTERO CARBONATADO | | REDUCCION | |
| | 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 |

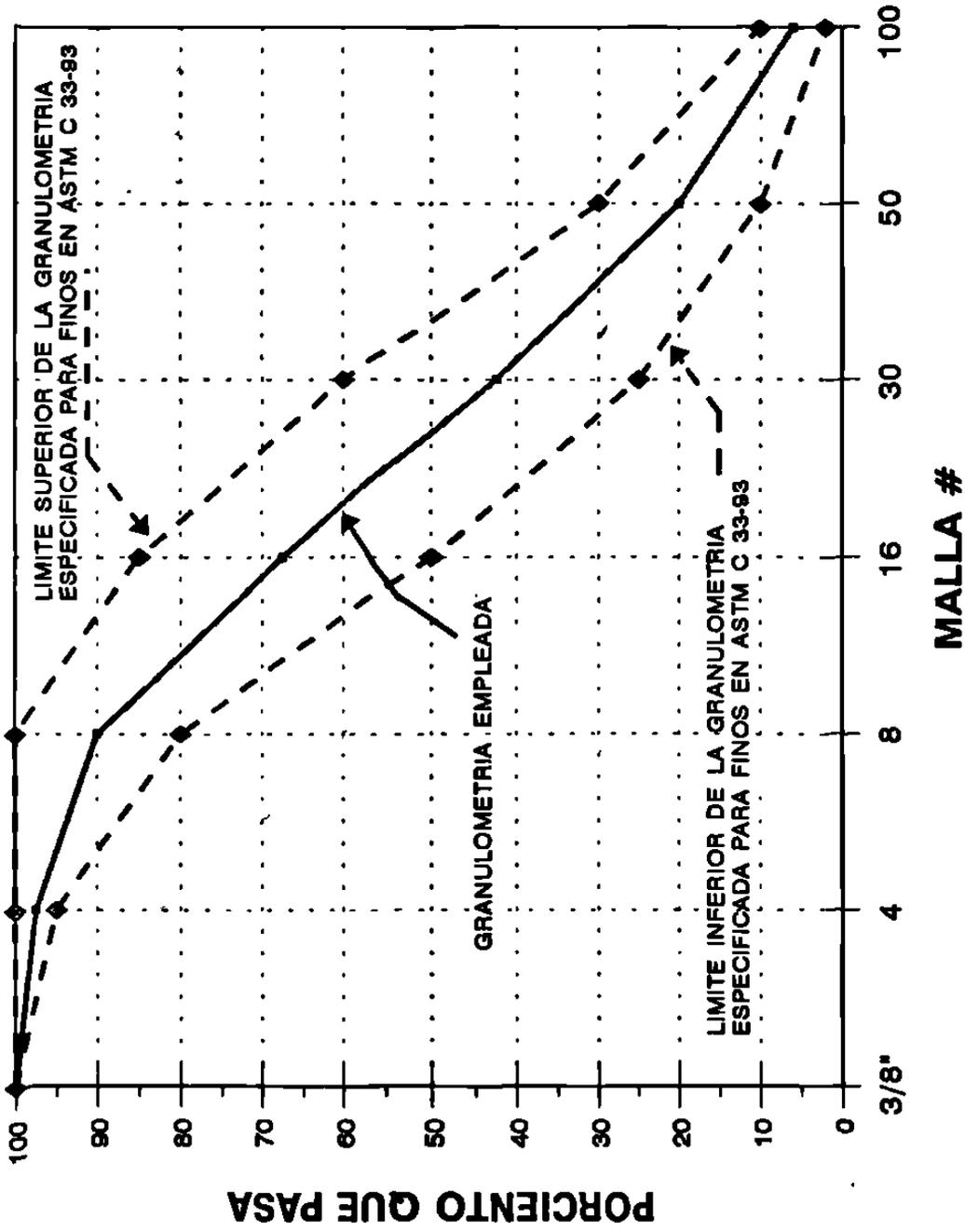
TABLA No. 14

PROMEDIOS DE LA DISTRIBUCION DEL RADIO DEL PORO POR RANGOS

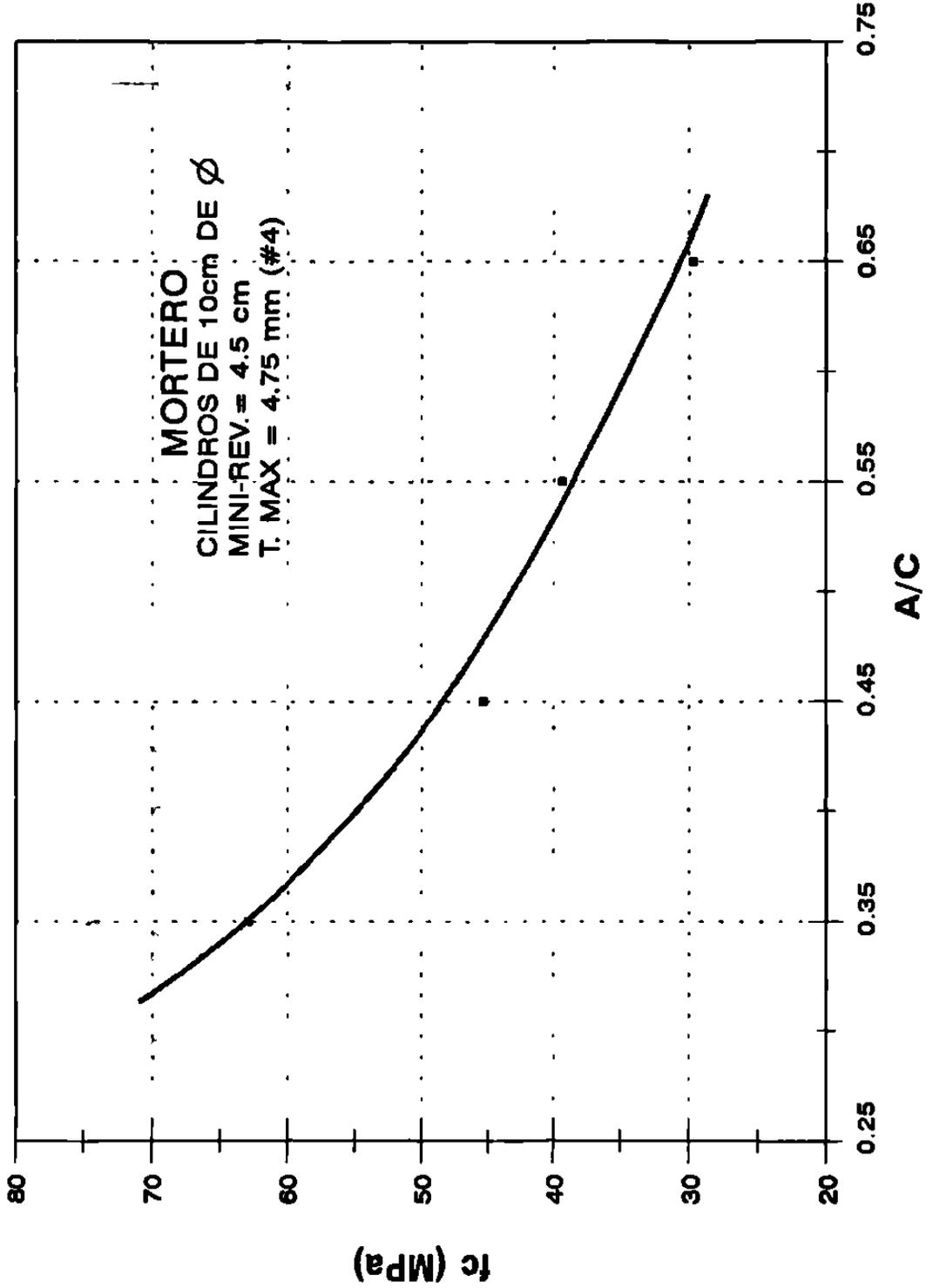
| MORTEROS | A/C | VOLUMEN TOTAL PENETRADO (mm ³ / g) | D (%) | DISTRIBUCION DEL RADIO DEL PORO POR RANGOS % | | |
|-------------------|------|---|----------|--|----------------------------------|-----------------------------|
| | | | | ULTRAMACROPOROS r > 75,000 Å | MACROPOROS 300 ≤ r ≤ 75,000 Å | MESOPOROS 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.

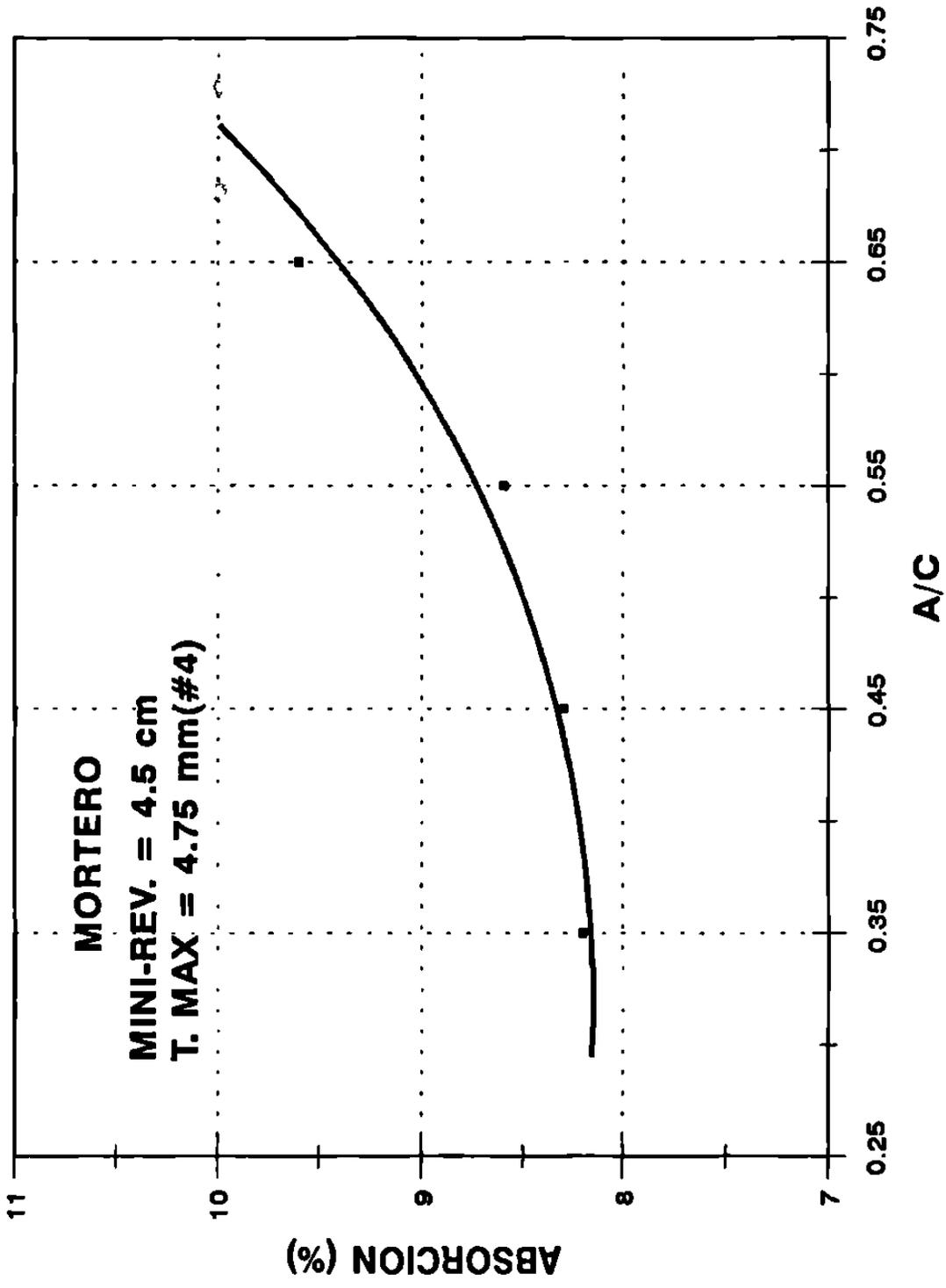
GRÁFICAS



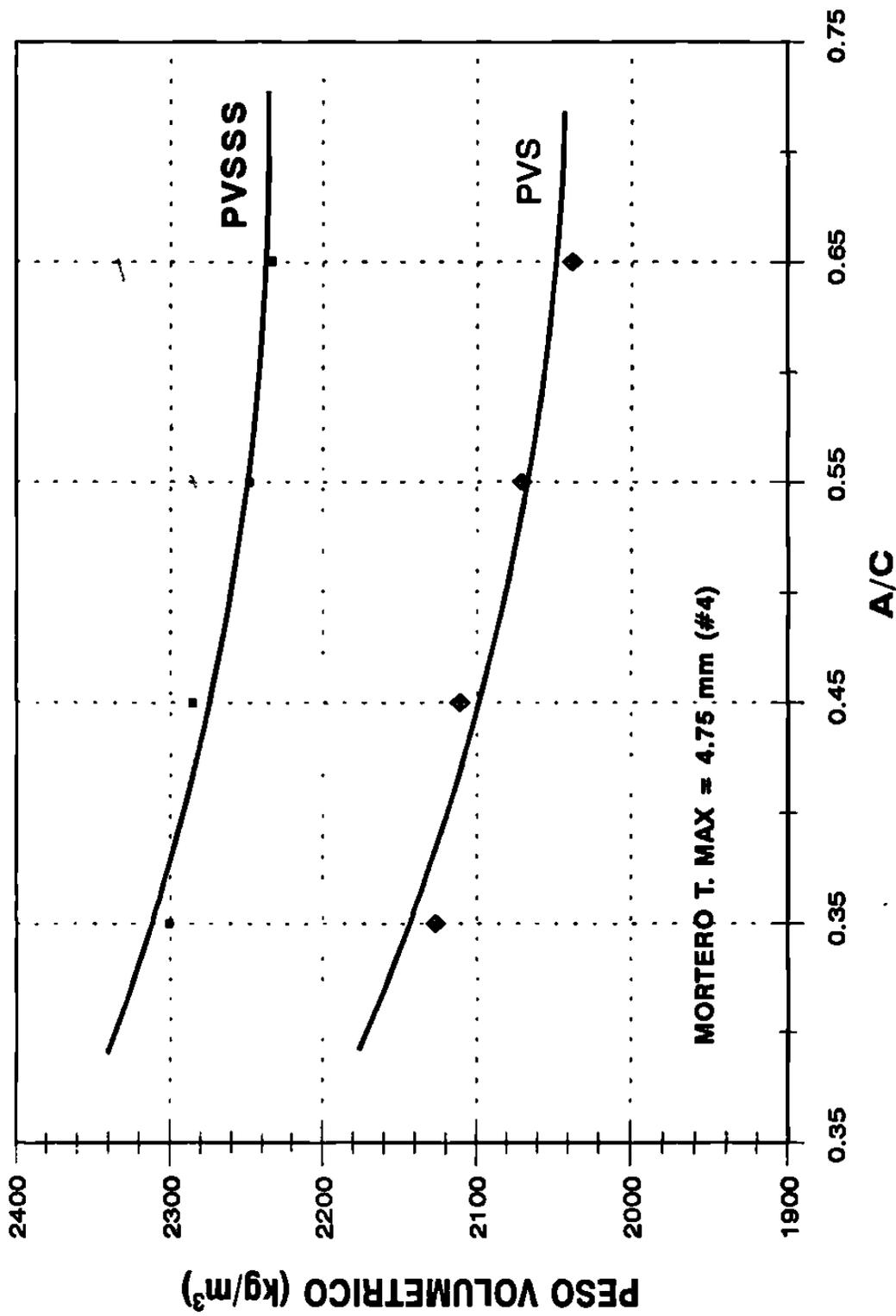
GRAF. N°1.- GRANULOMETRIA DEL AGREGADO EMPLEADO DETERMINADA DE ACUERDO A ASTM C 136-95a



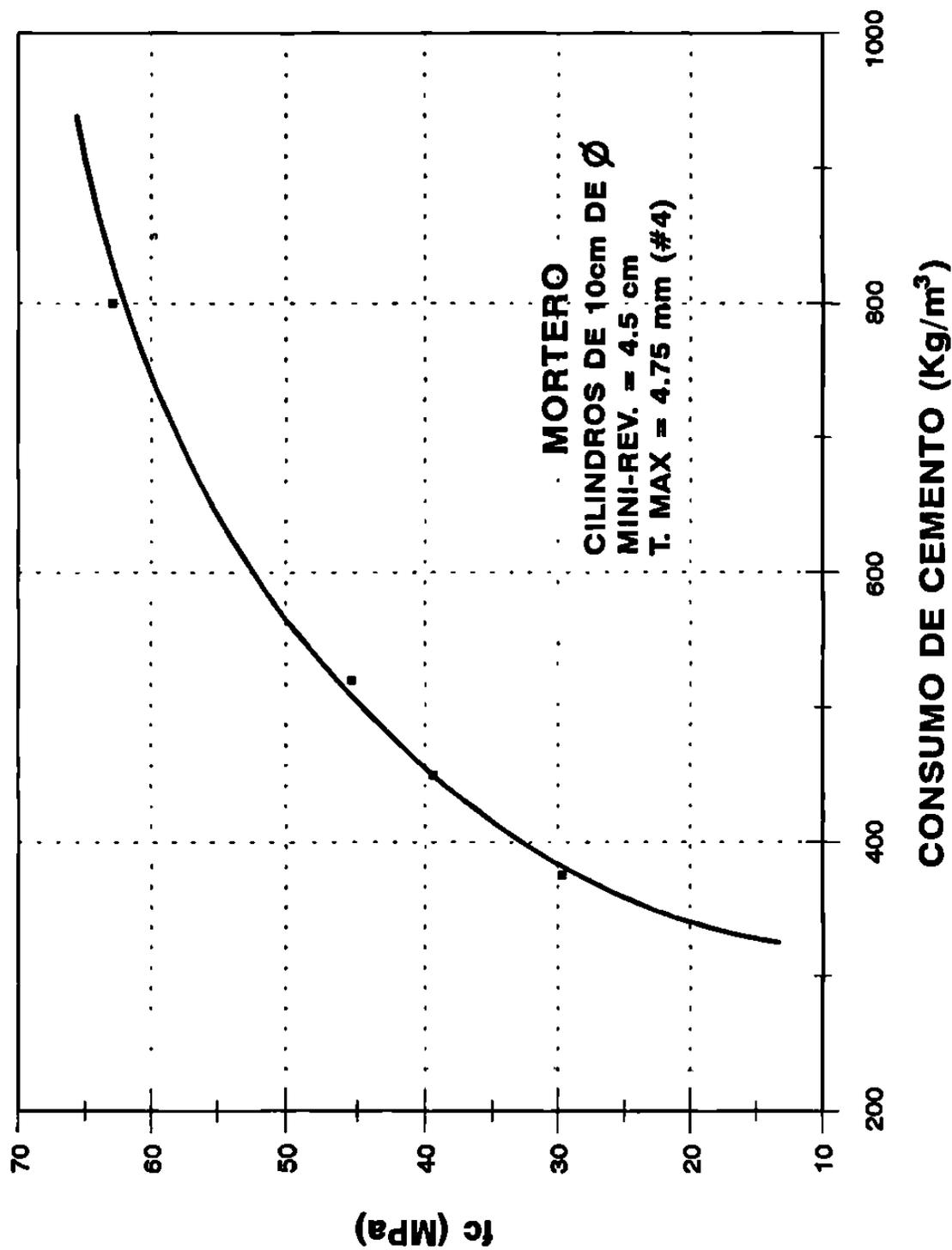
**GRAF. N°2.- GRAFICA DE RELACION AGUA/CEMENTO (A/C)
 Vs RESISTENCIA A LA COMPRESION A LOS 28 DIAS (fc)**



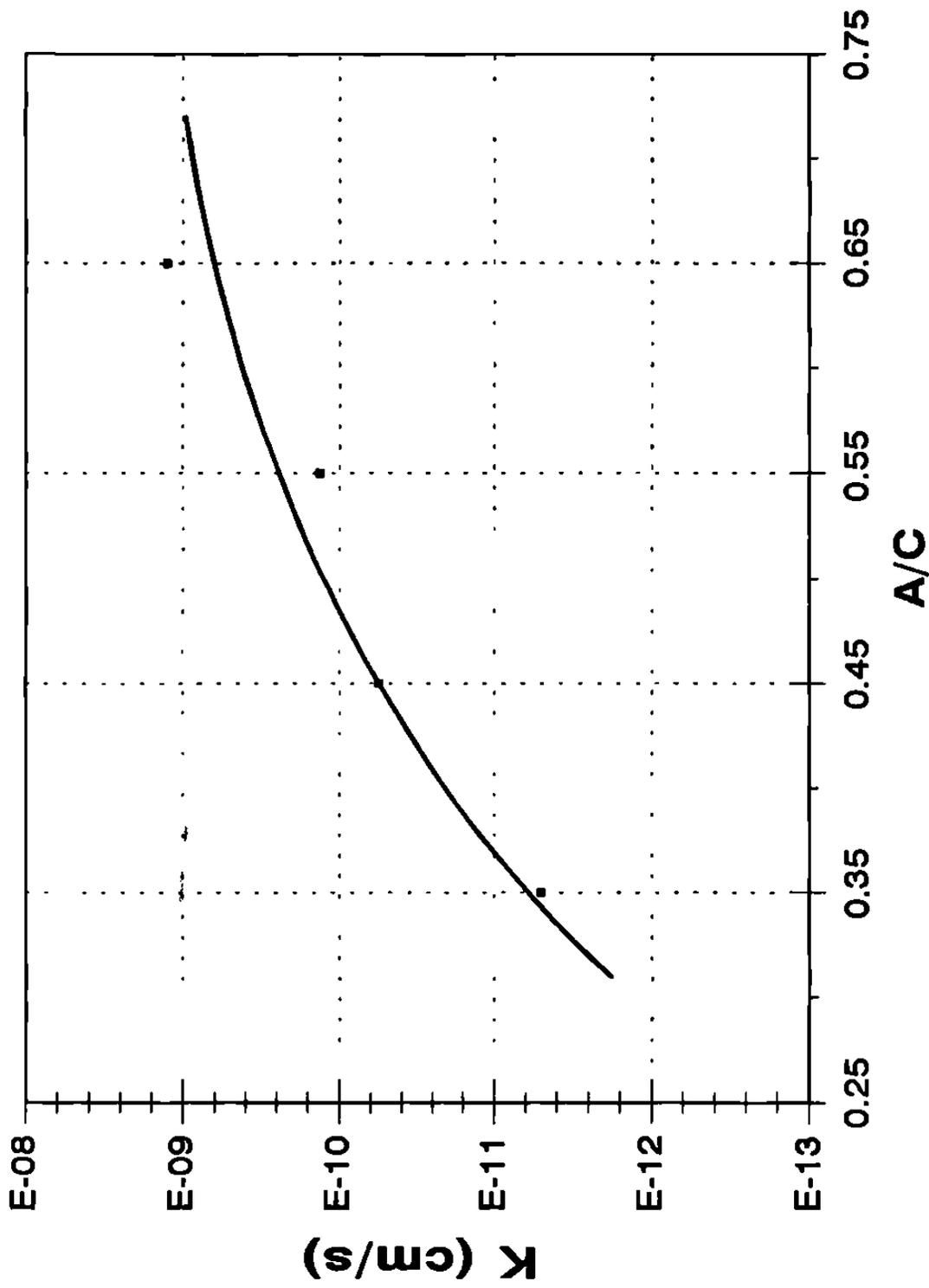
**GRAF. N°3.- GRAFICA DE RELACION AGUA/CEMENTO(A/C)
 Vs % DE ABSORCION(ASTM C 642-90)**



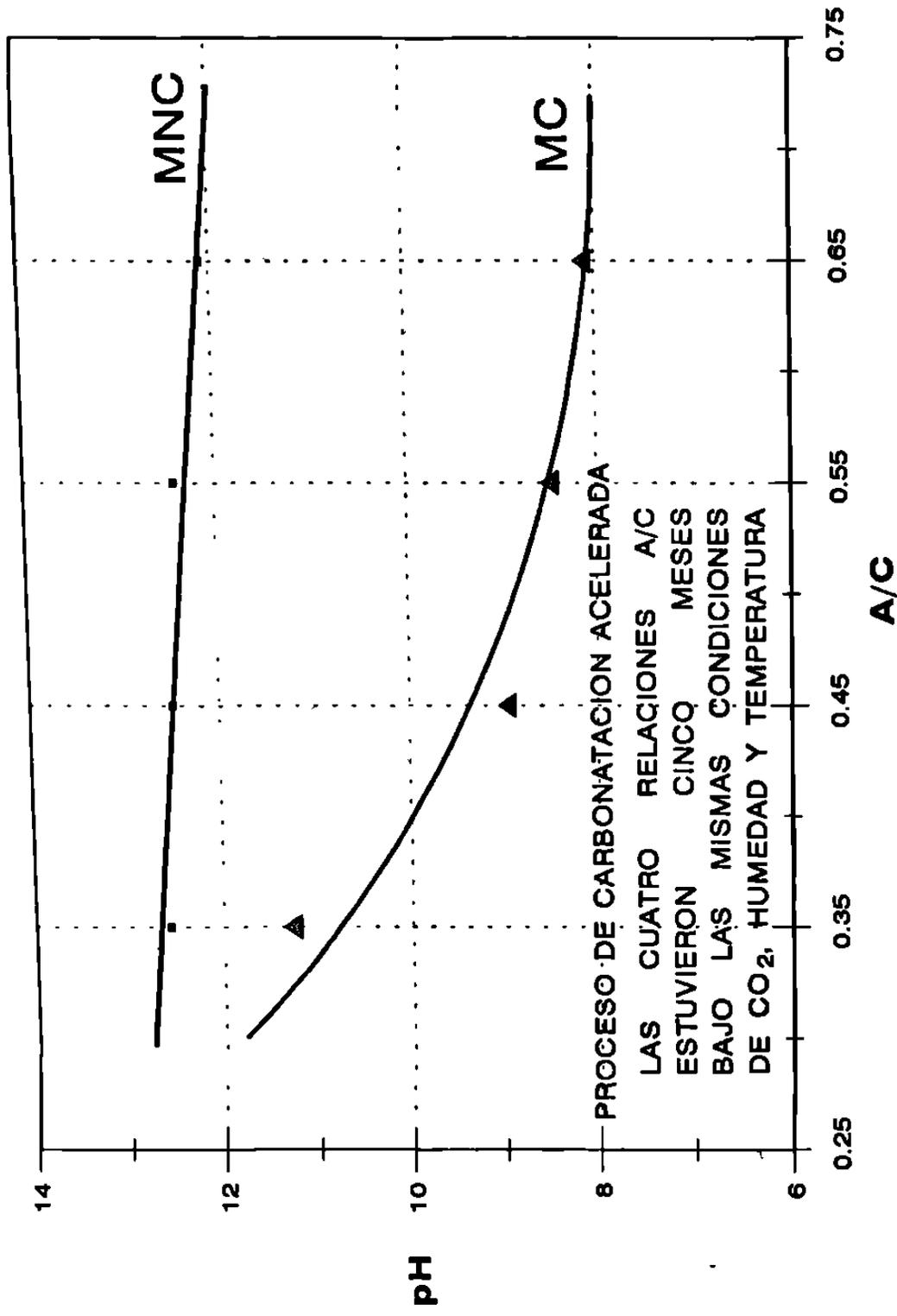
**GRAF. N°4.- GRAFICA DE RELACION AGUA/CEMENTO(A/C)
Vs PESO VOLUMETRICO SATURADO SUPERFICIALMENTE
SECO(PVSSS) Y PESO VOLUMETRICO SECO(PVS)
A LOS 28 DIAS**



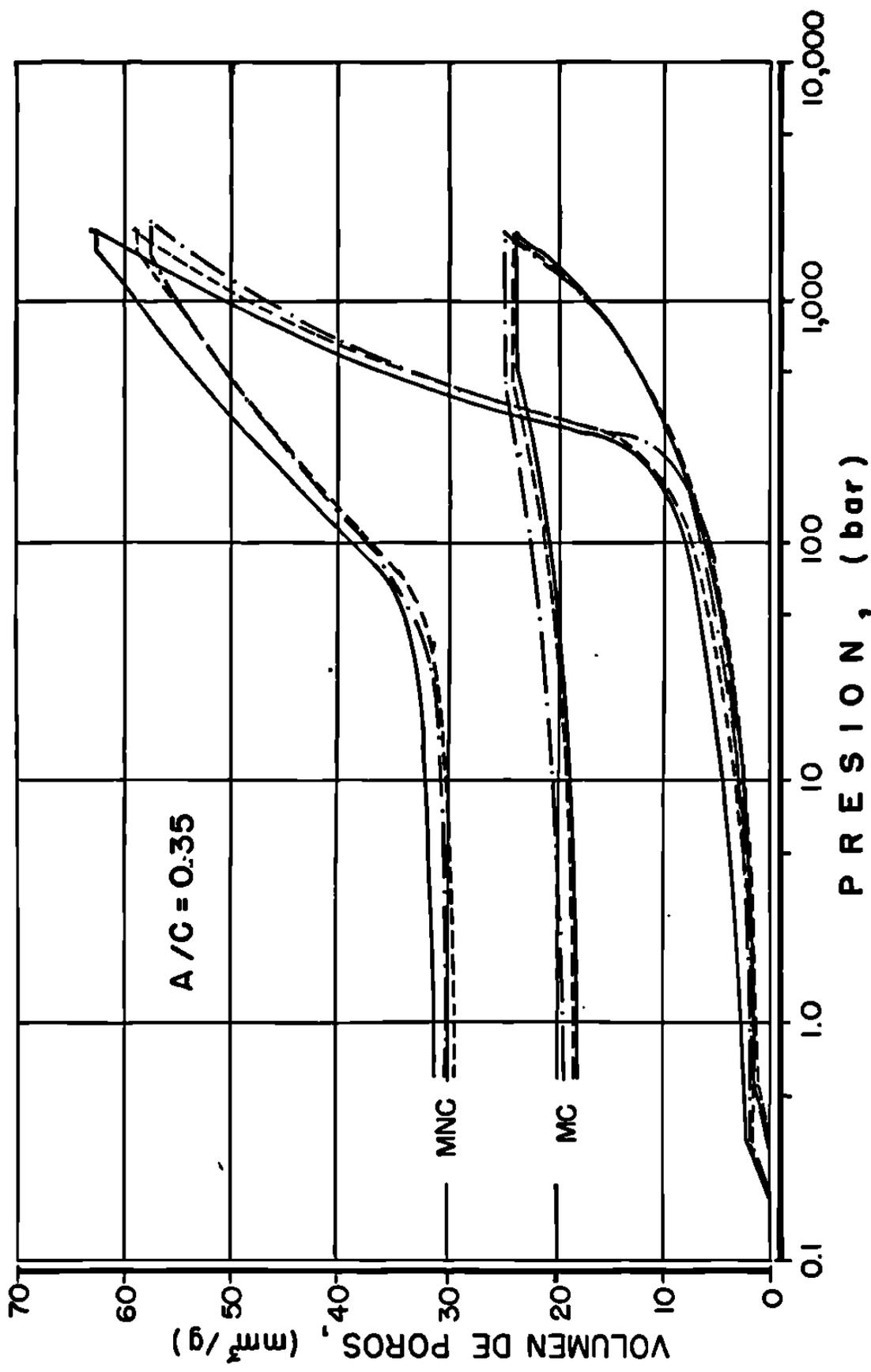
GRAF. N°5.- GRAFICA DE CONSUMO DE CEMENTO Vs RESISTENCIA A LA COMPRESION(f_c) A LOS 28 DIAS DE EDAD



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

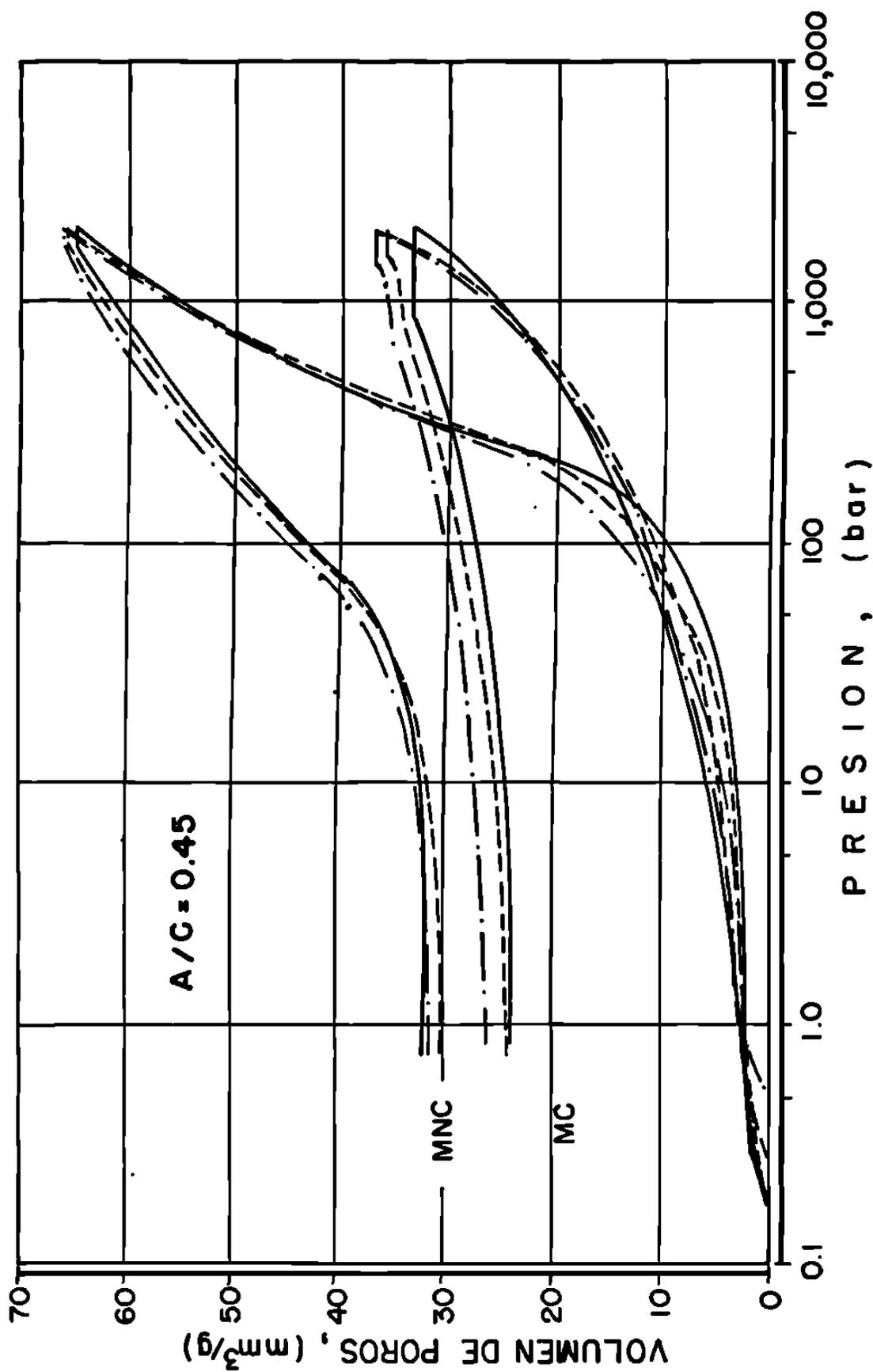


GRAF. N°7.- GRAFICA DE RELACION AGUA/CEMENTO(A/C) Vs pH Vs pH DE MORTEROS NO CARBONATADOS(MNC) Y CARBONATADOS(MC)



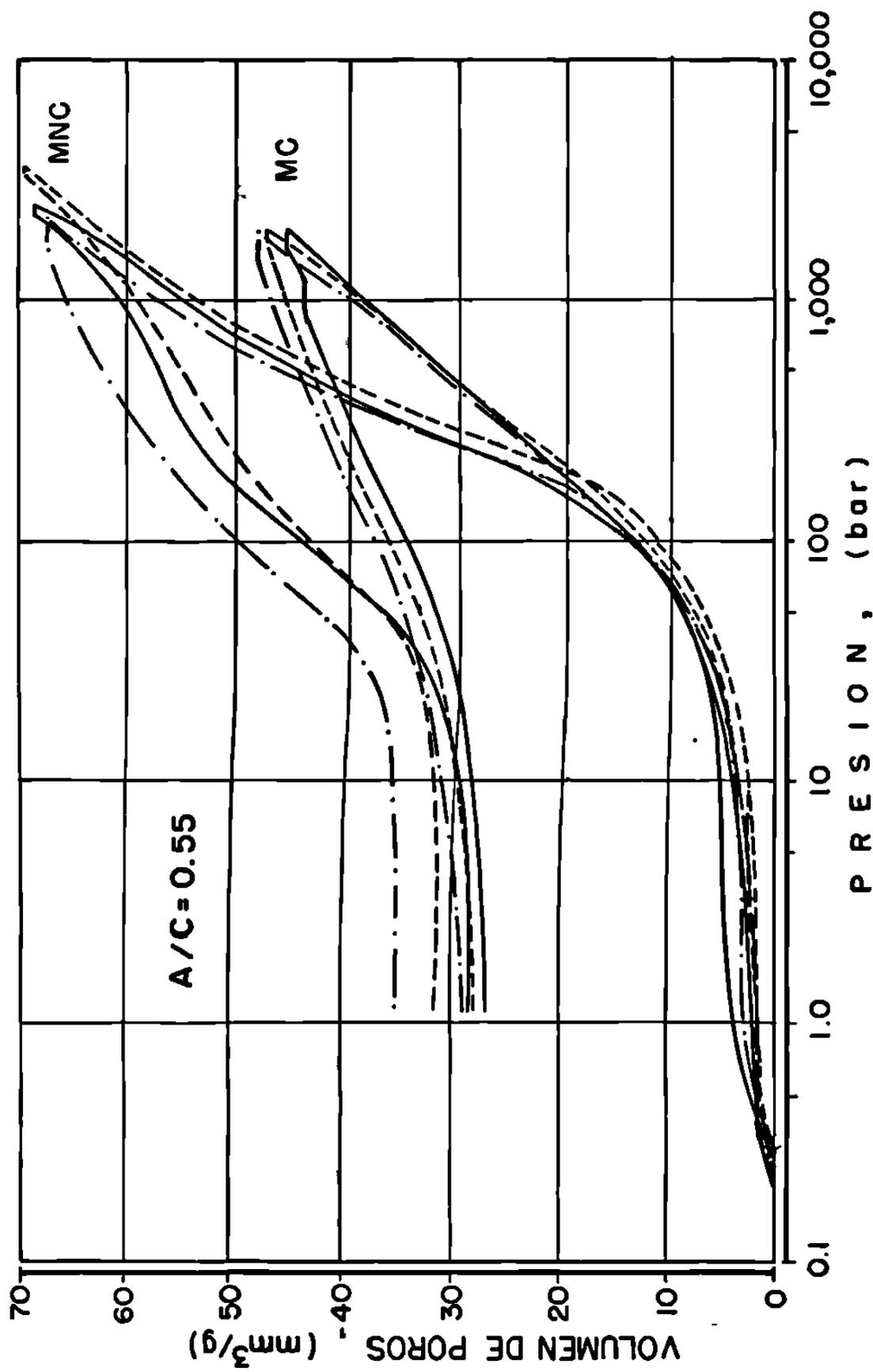
ANALISIS DE POROSIDAD

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



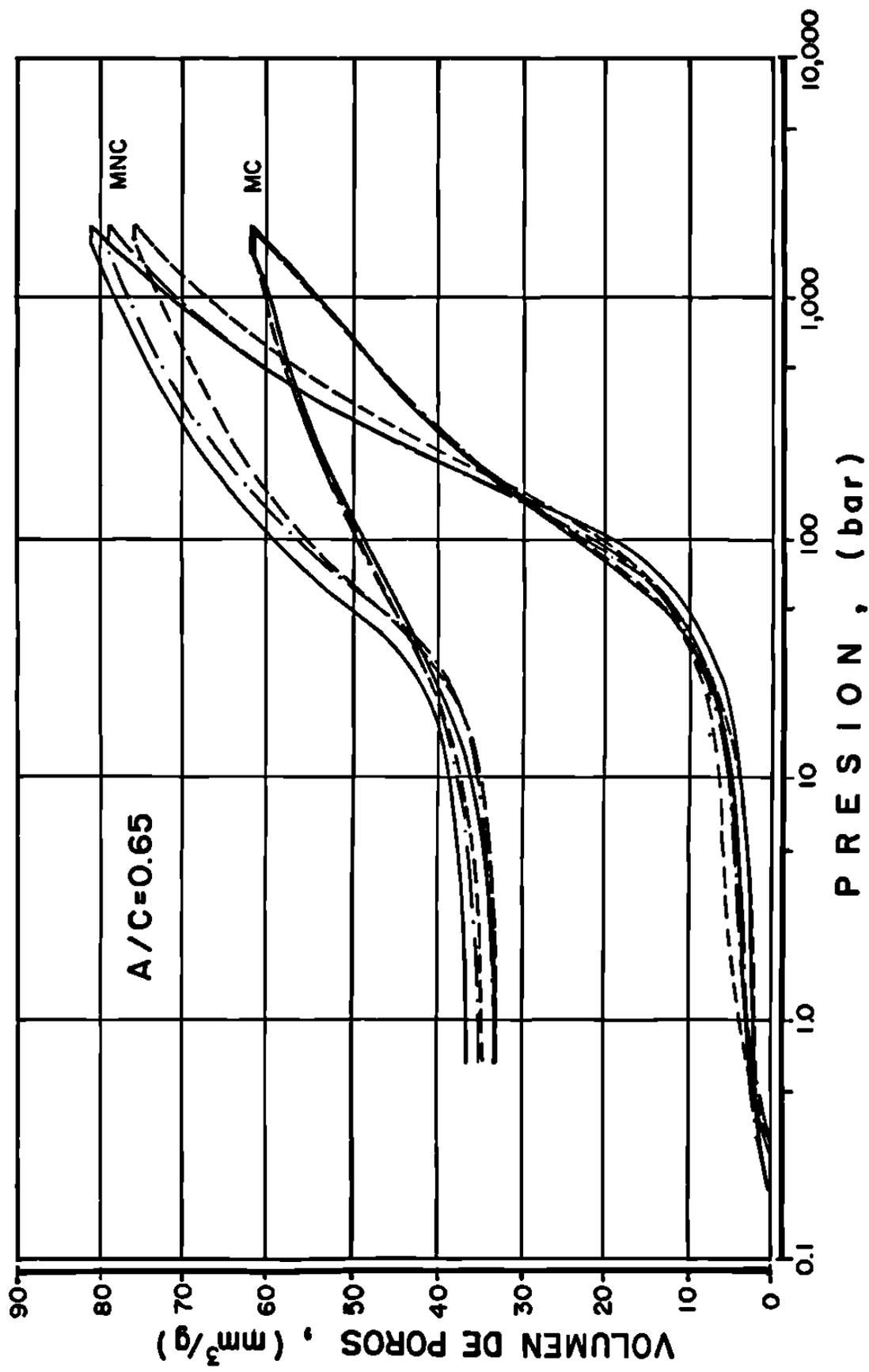
ANALISIS DE POROSIDAD

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



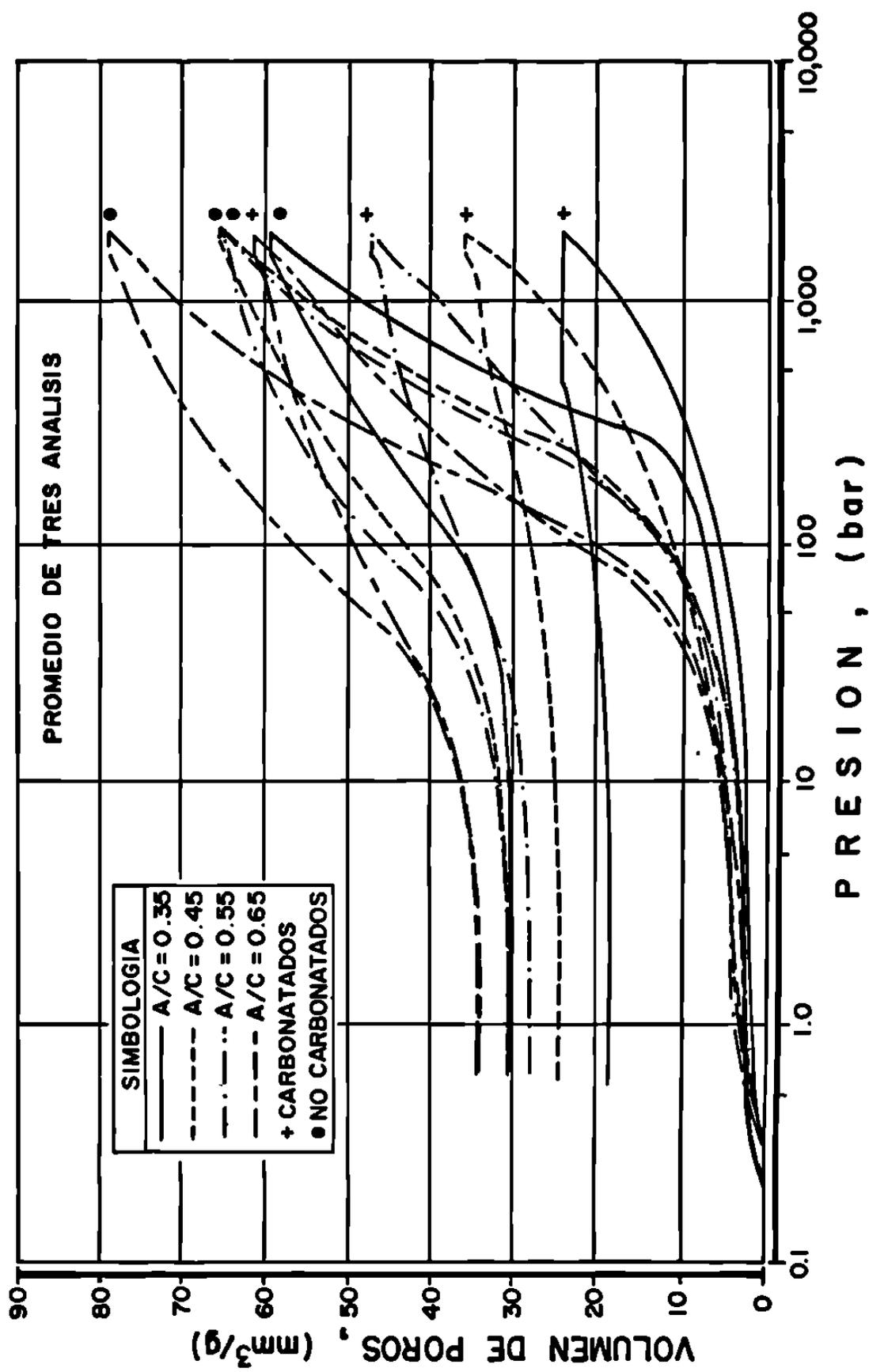
ANALISIS DE POROSIDAD

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

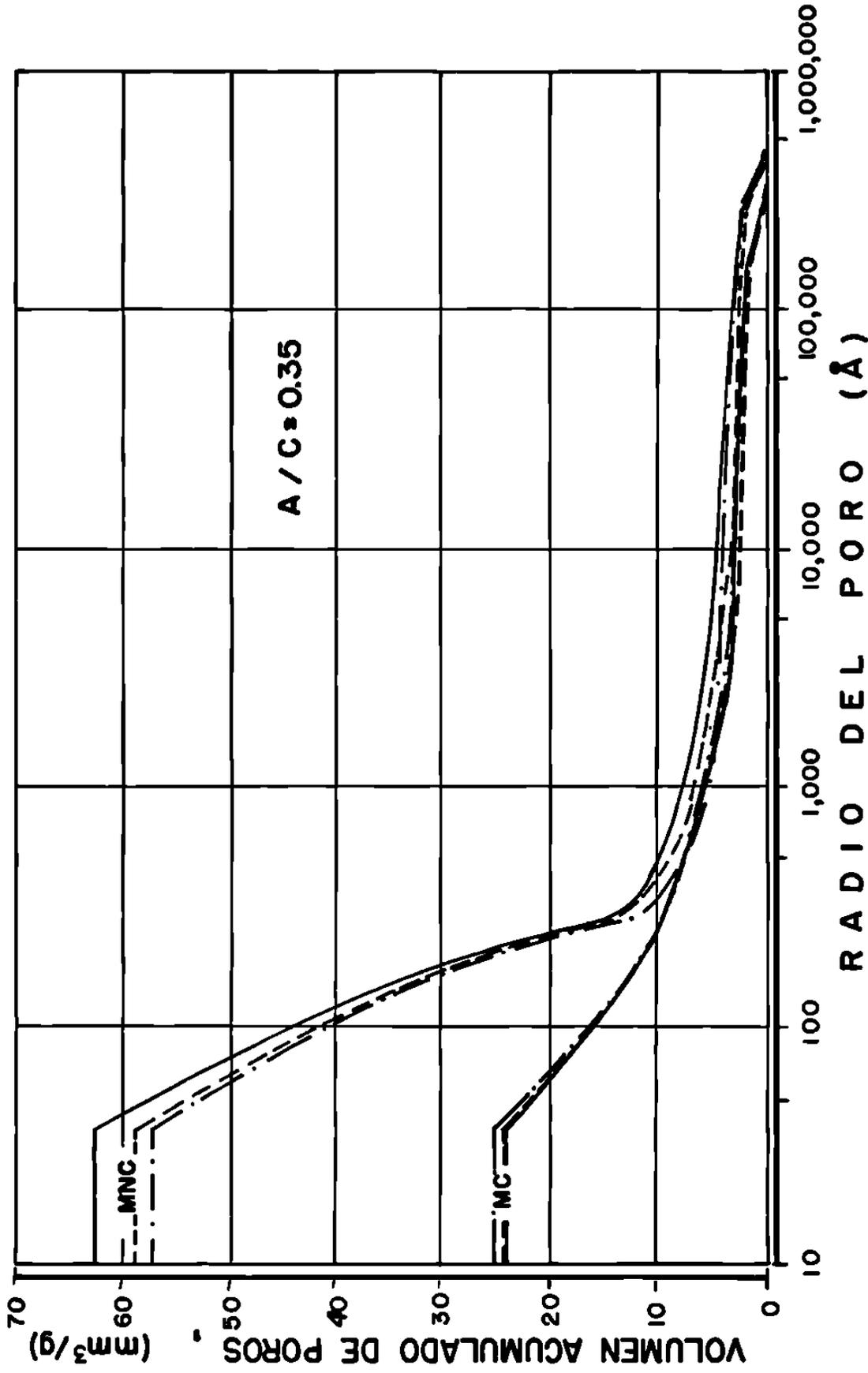


ANALISIS DE POROSIDAD

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

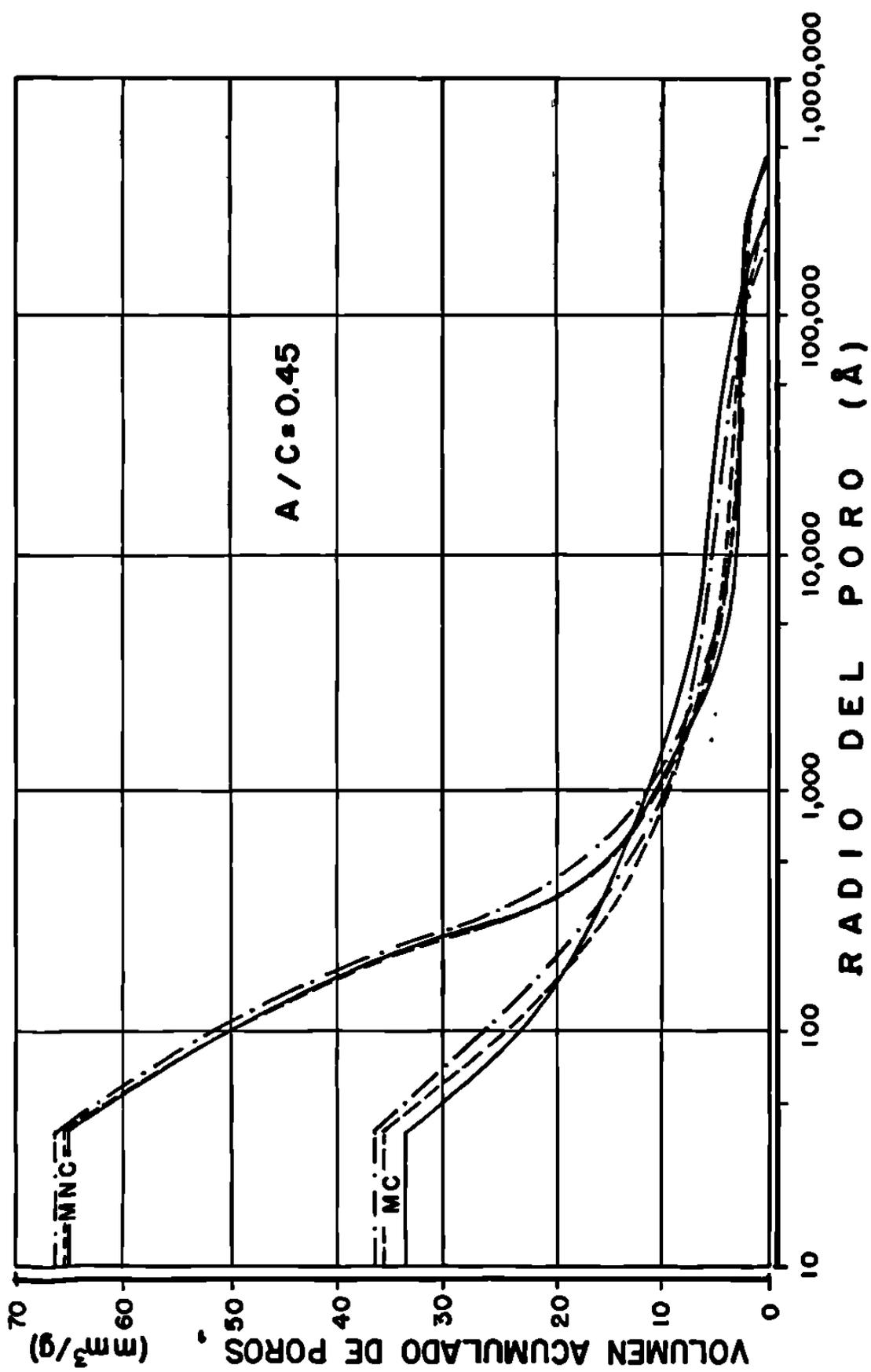


ANALISIS DE POROSIDAD
GRAF. N°12-PROMEDIO DE PRESION Vs. VOLUMEN DE POROS
PARA MORTEROS NO CARBONATADOS (MNC)
Y CARBONATADOS (MC).

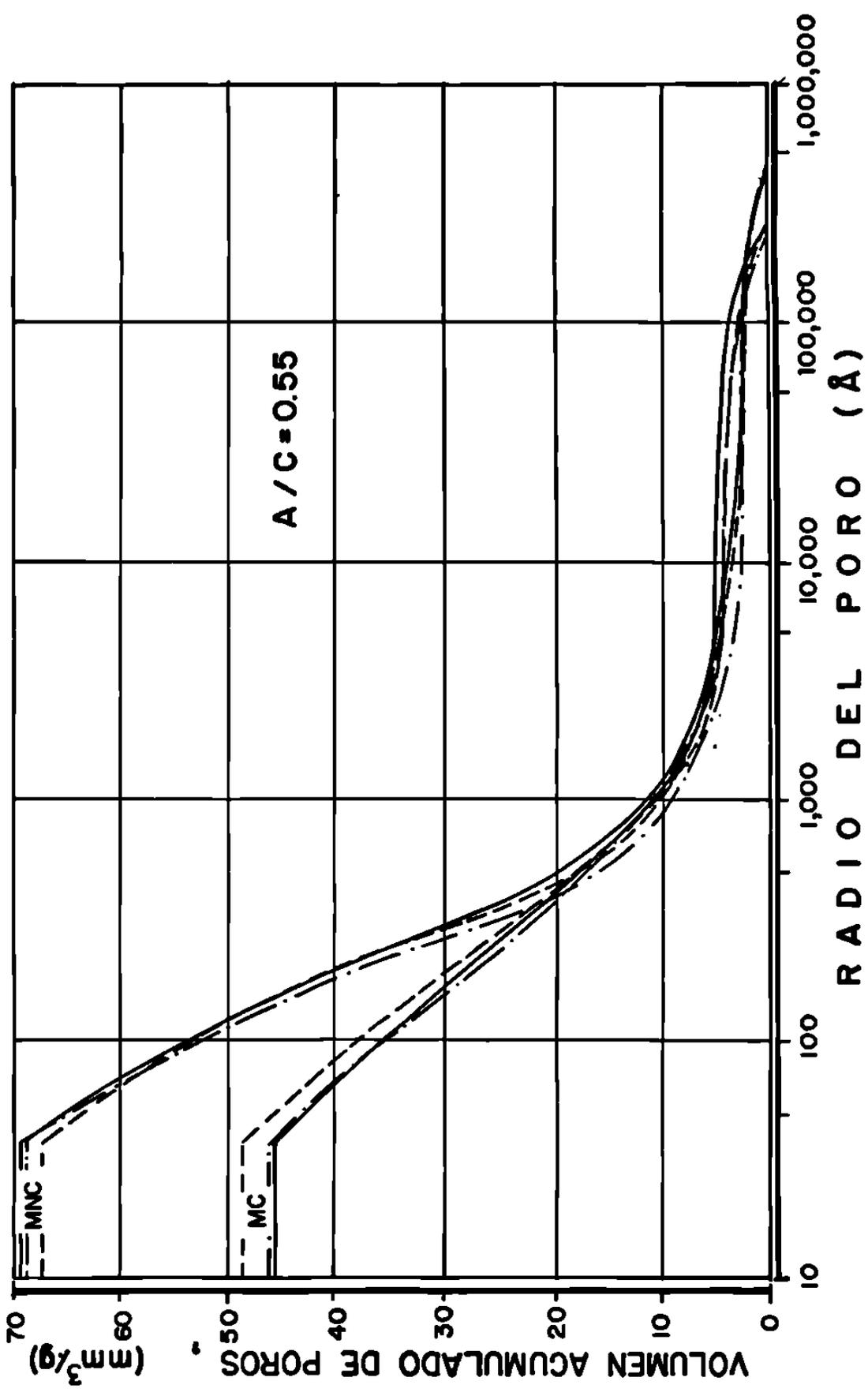


**ANÁLISIS DE POROSIDAD
DISTRIBUCIÓN DEL TAMAÑO DEL PORO**

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

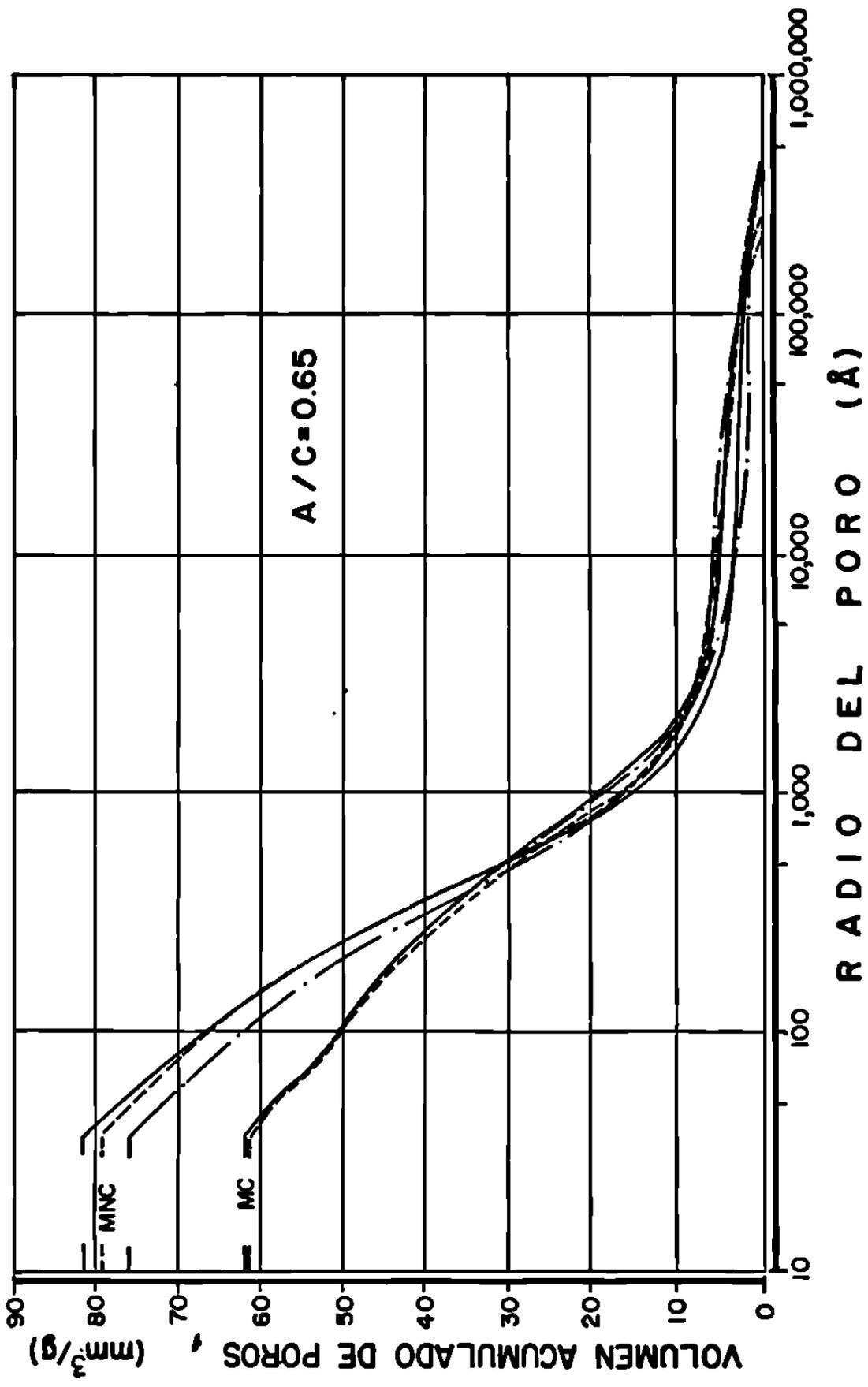


**GRAF. N° 14 .-RADIO DEL PORO VS. VOLUMEN ACUMULADO
 ANALISIS DE POROSIDAD
 DISTRIBUCION DEL TAMAÑO DEL PORO
 DE POROS PARA MORTEROS NO CARBONATADOS
 (MNC) Y CARBONATADOS (MC).**

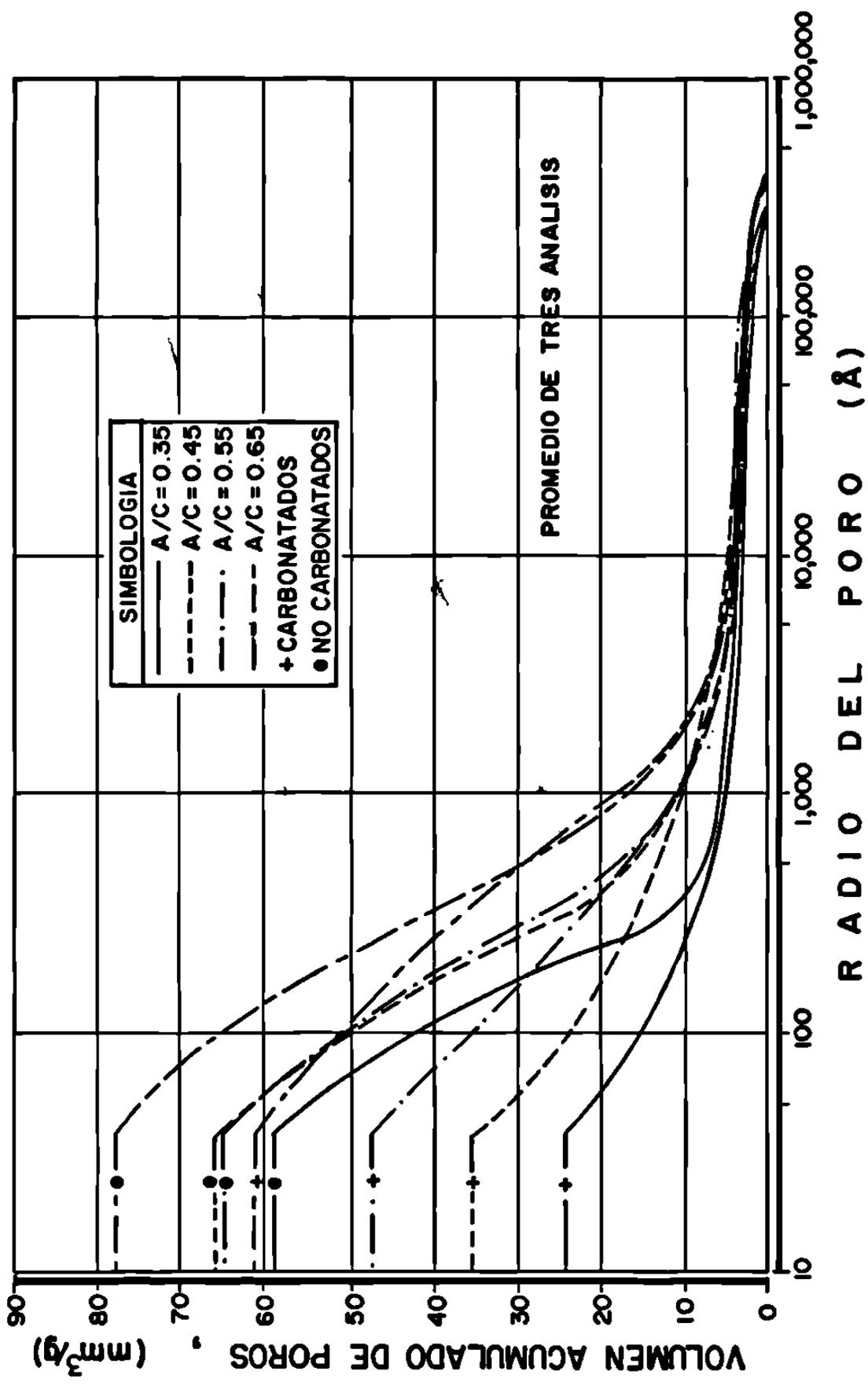


ANALISIS DE POROSIDAD
 DISTRIBUCION DEL TAMAÑO DEL PORO

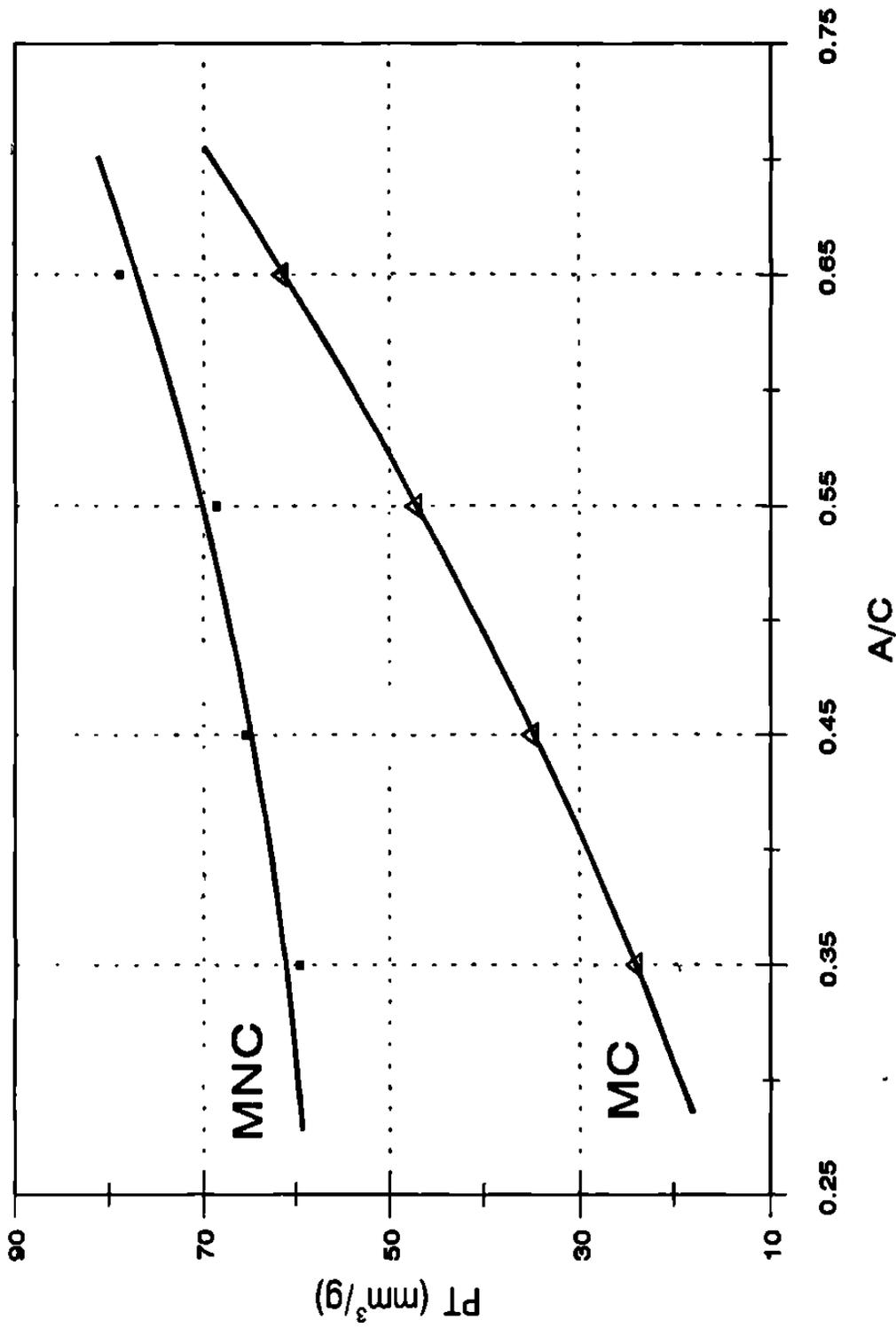
GRAF. N° 15 .- RADIO DEL PORO Vs. VOLUMEN ACUMULADO DE POROS PARA MORTEROS NO CARBONATADOS (MNC) Y CARBONATADOS (MC).



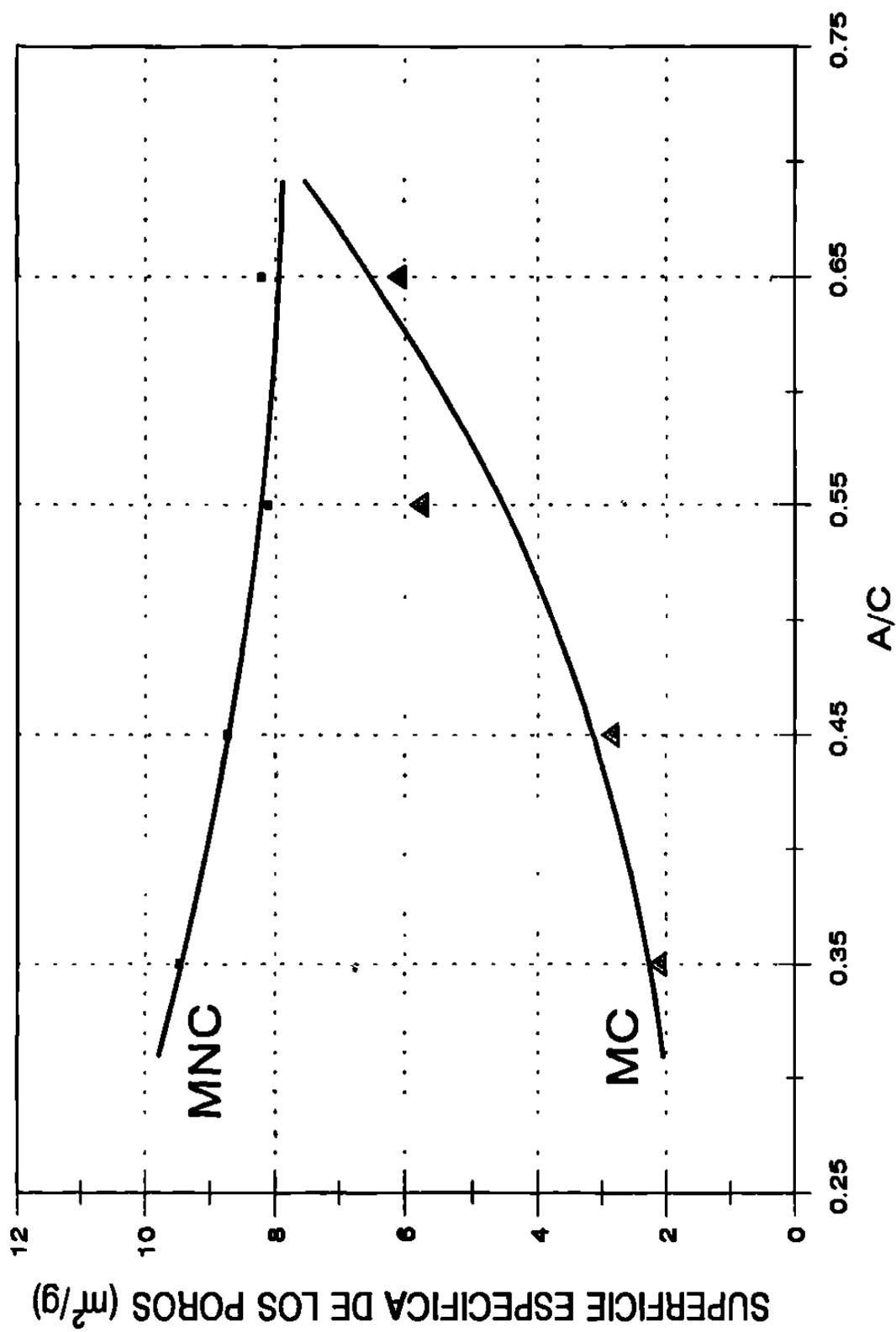
RADIO DEL PORO (Å)
ANALISIS DE POROSIDAD
DISTRIBUCION DEL TAMAÑO DEL PORO
GRAF. N° 16 .- RADIO DEL PORO Vs. VOLUMEN ACUMULADO
DE POROS PARA MORTEROS NO CARBONATADOS
(MNC) Y CARBONATADOS (MC).



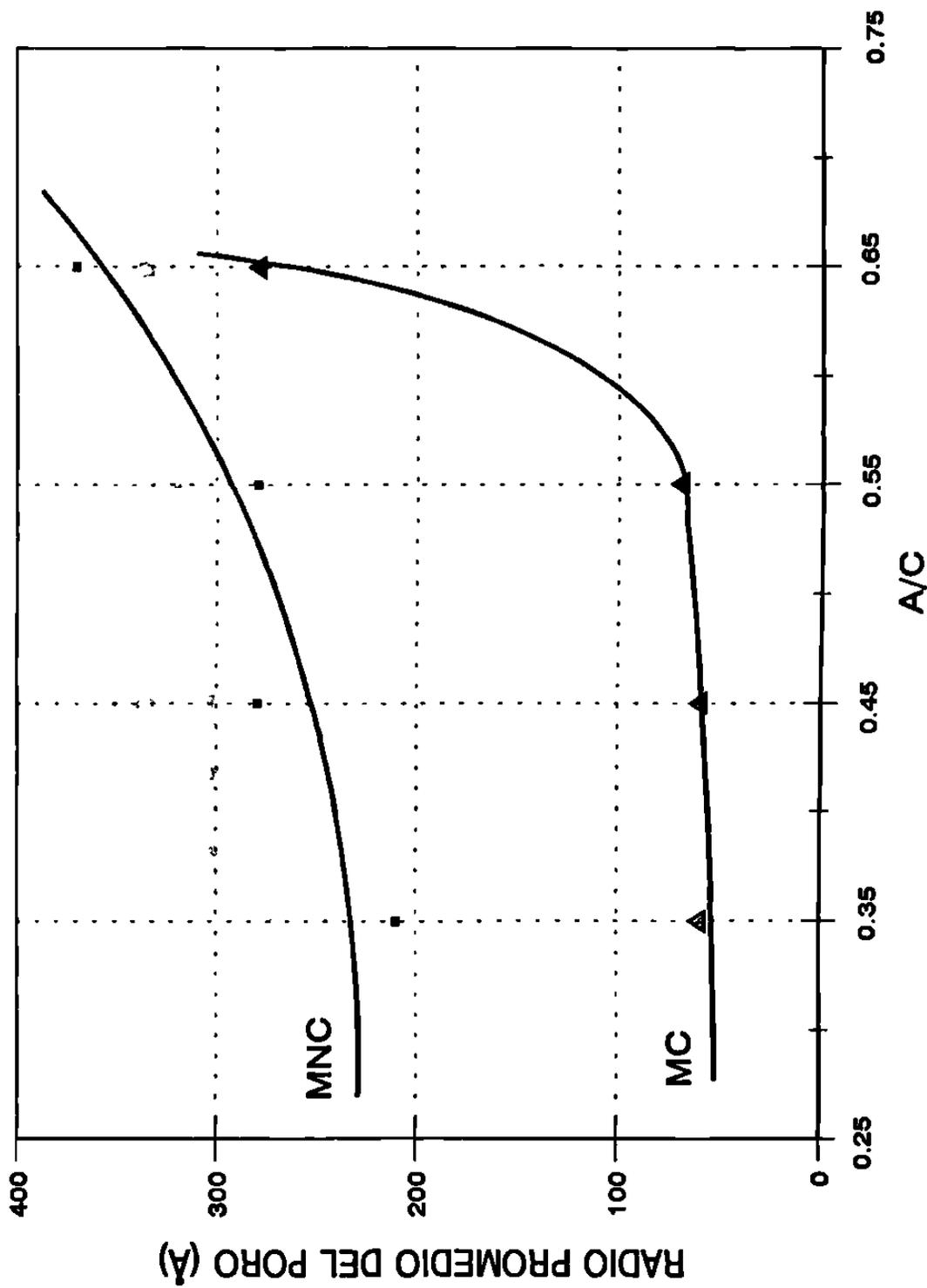
GRAF. N°17 .- PROMEDIO DE RADIO DEL PORO VS. VOLUMEN ACUMULADO DE POROS PARA MORTEROS NO CARBONATADOS (MNC) Y CARBONATADOS (MC).



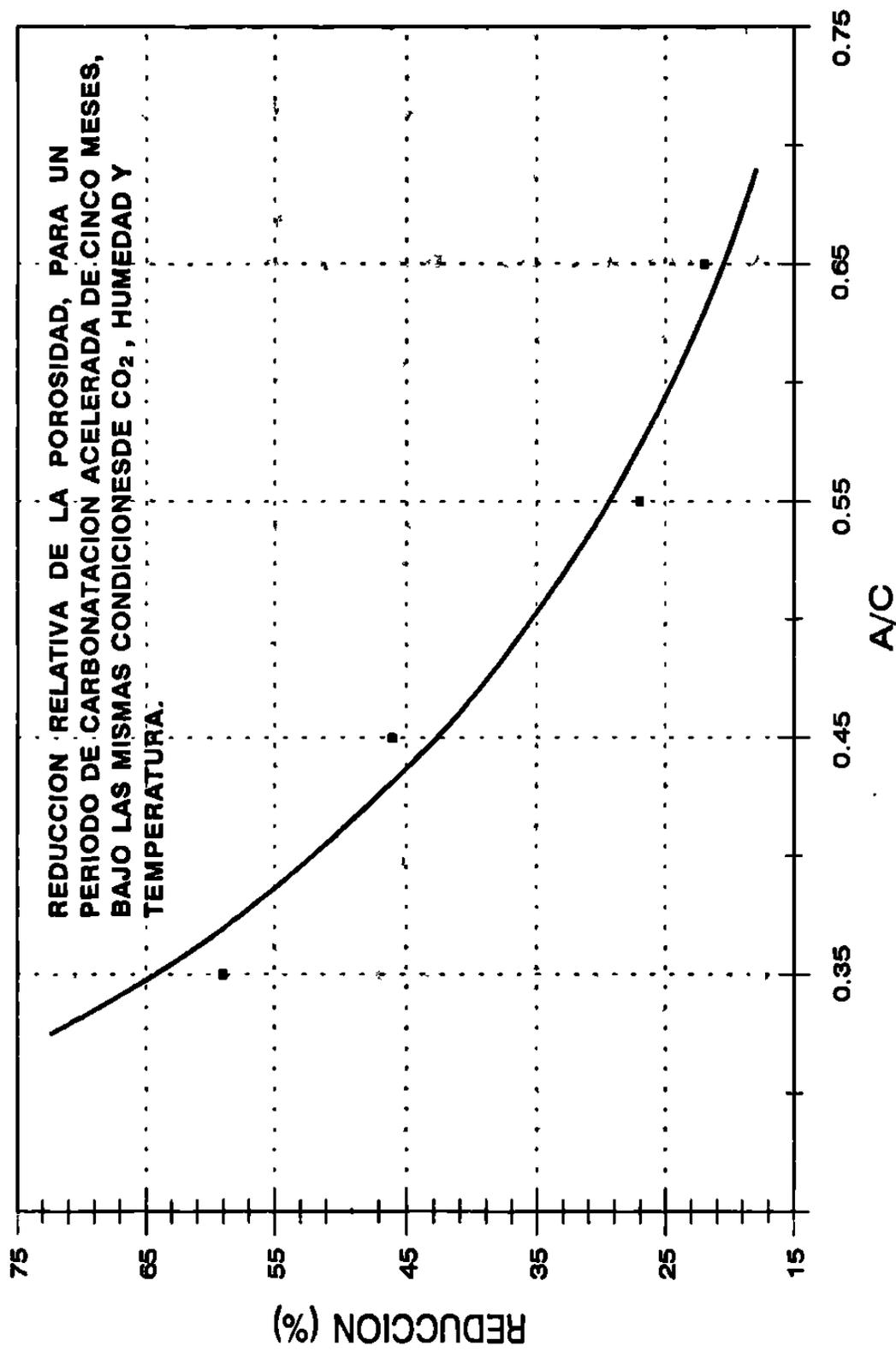
GRAF. N°18.- GRAFICA DE RELACION AGUA/CEMENTO(A/C) Vs POROSIDAD TOTAL(PT) DE MORTEROS NO CARBONATADOS(MNC) Y CARBONATADOS(MC)



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

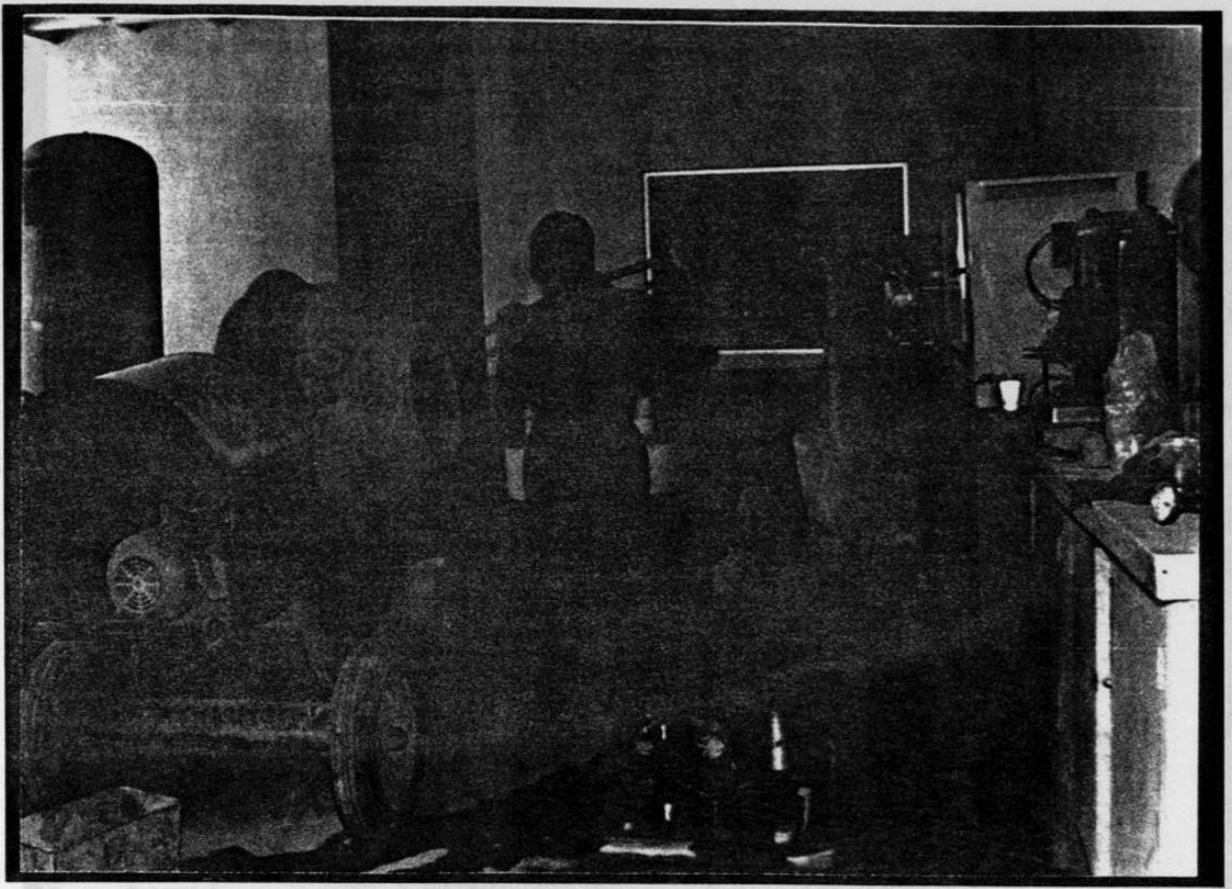


GRAF. N°21.- GRAFICA DE RELACION AGUA/CEMENTO(A/C) Vs REDUCCION EN LA POROSIDAD POR EFECTO DE LA CARBONATACION ACELERADA

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 Enginners, 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 Concgress 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



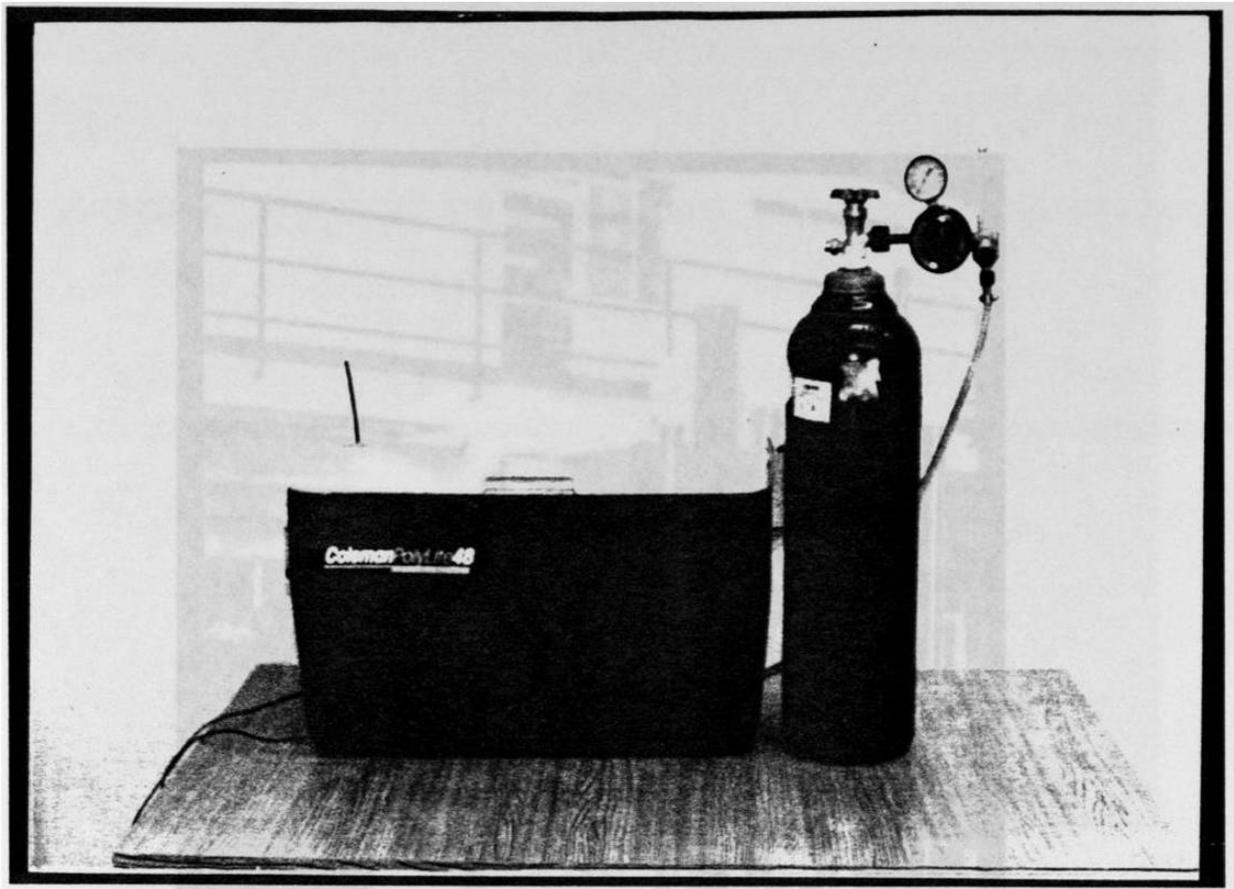
Fotografía 1

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



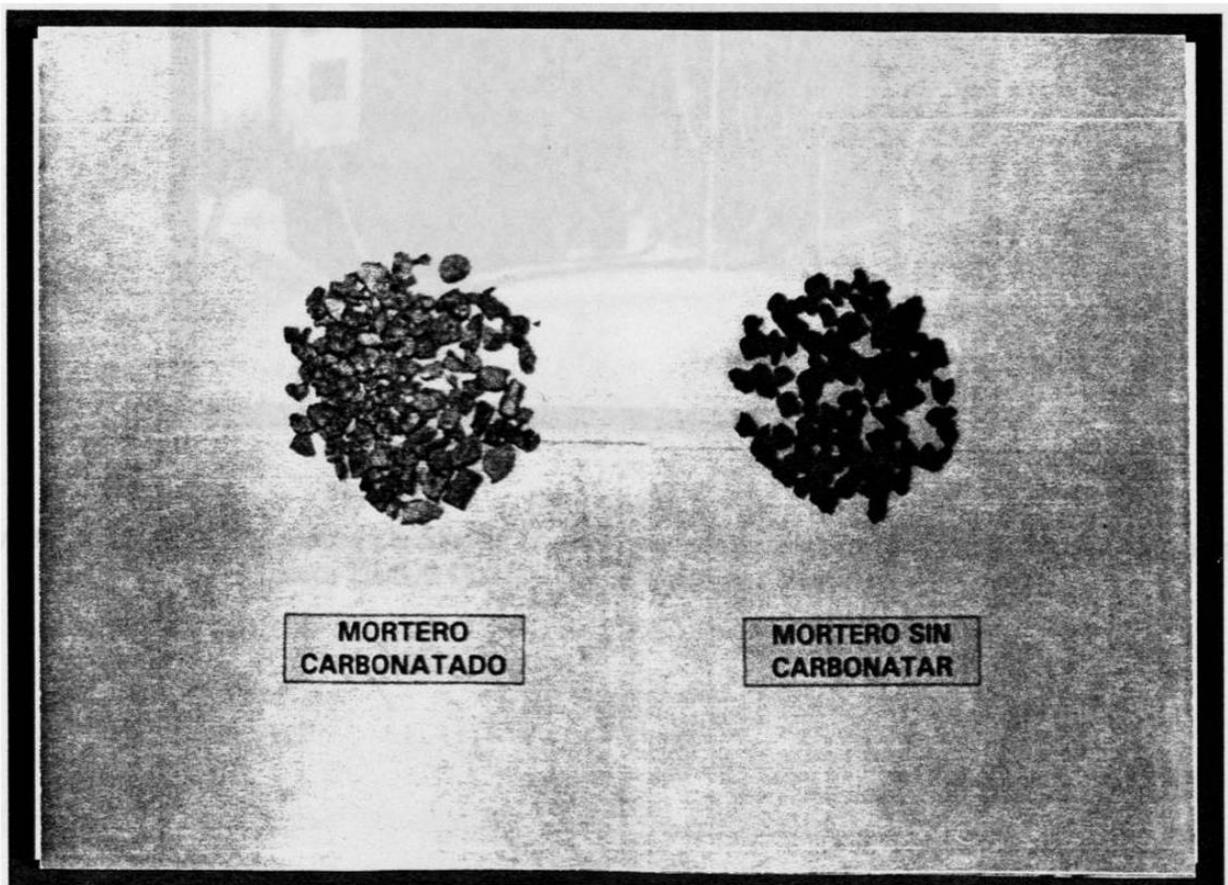
Fotografía 2

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



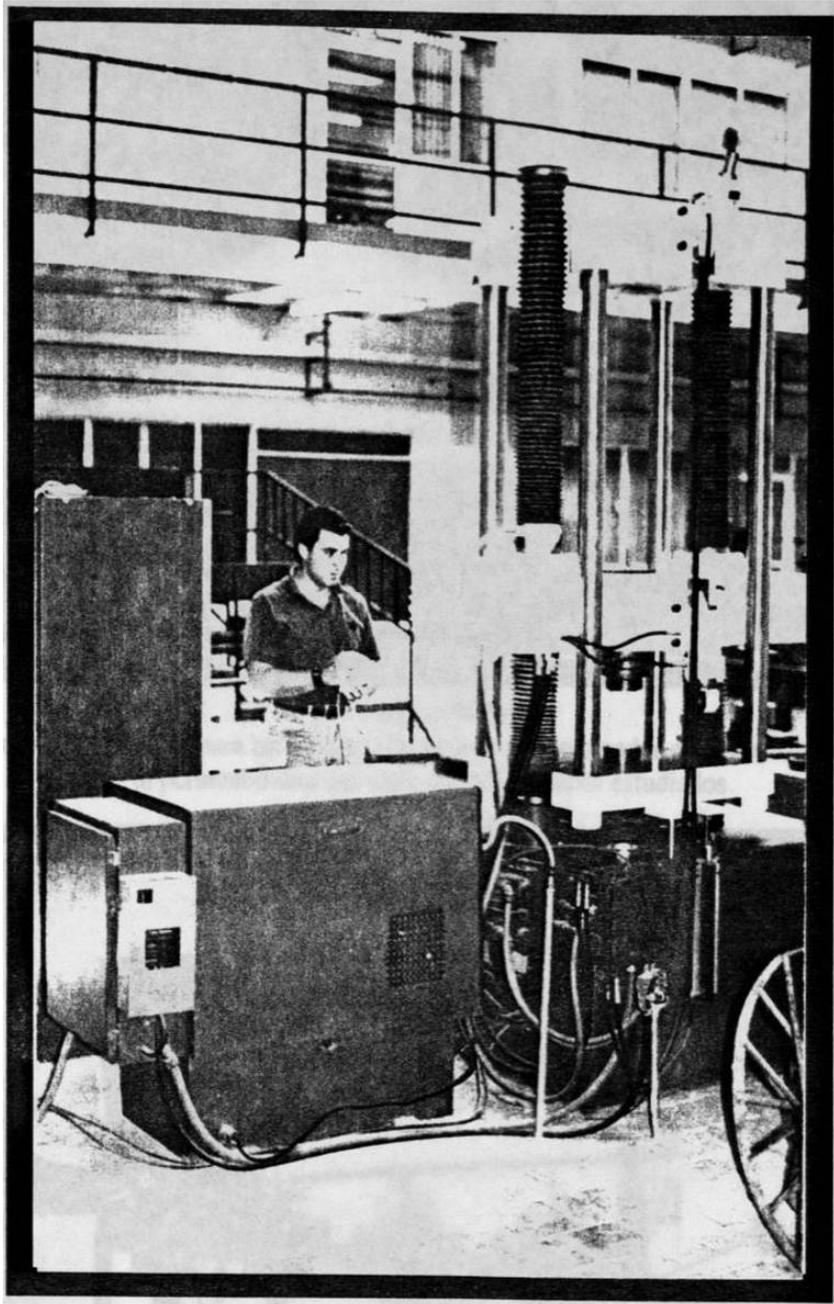
Fotografía 3

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



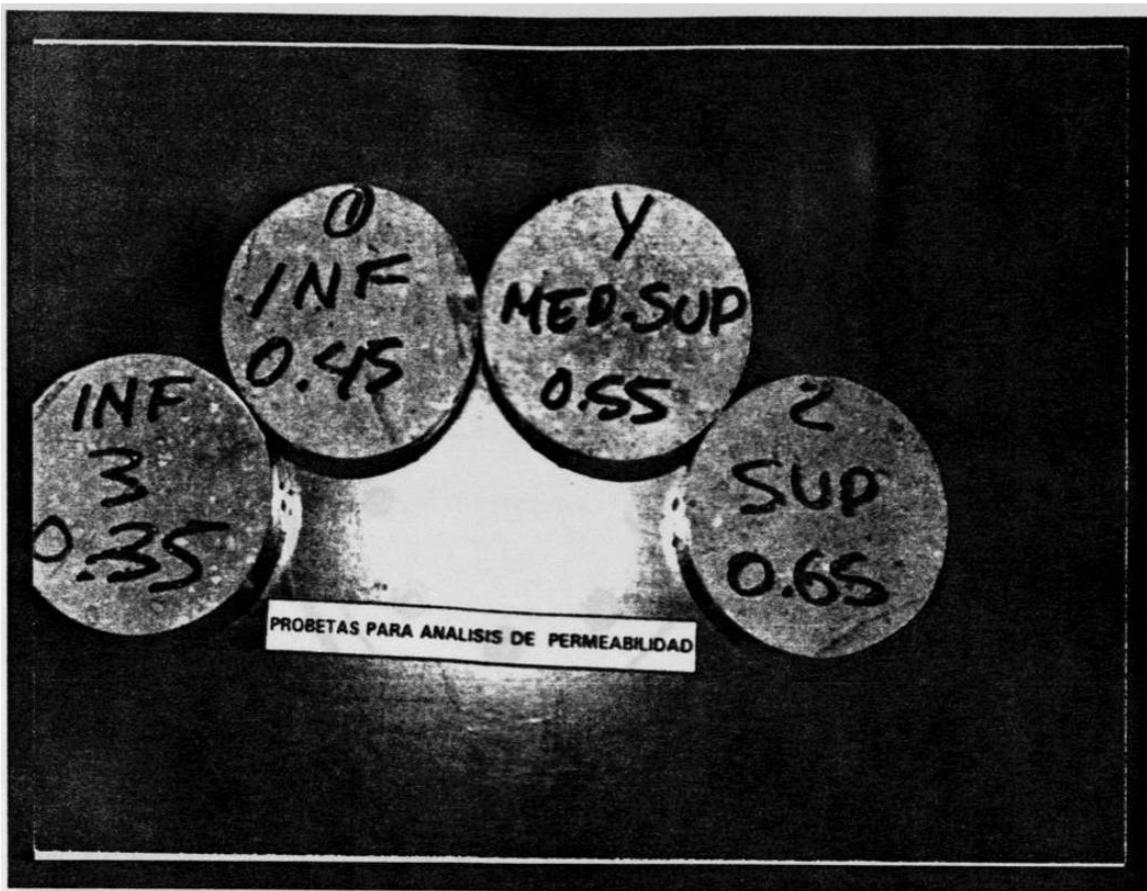
Fotografía 4

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.

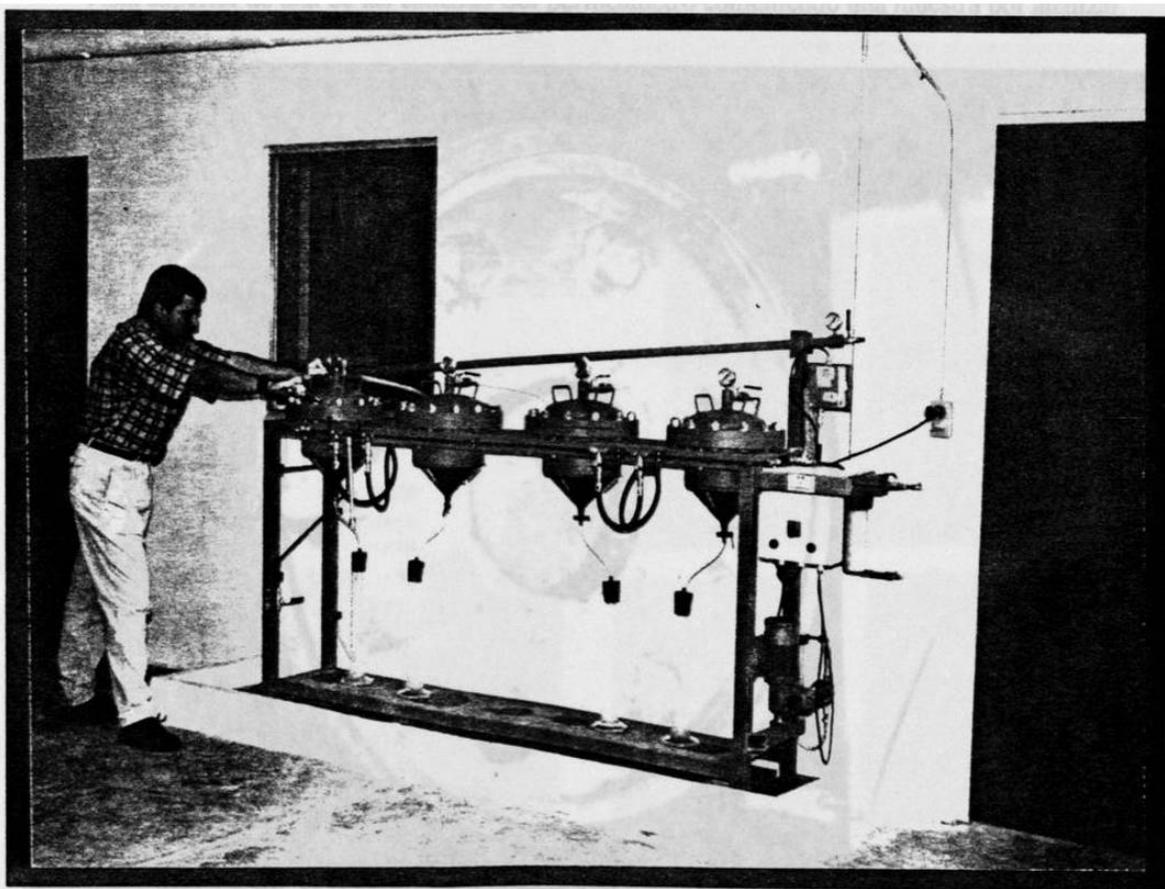


Fotografía 5

Ensaye 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.