



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA**

FACULTAD DE INGENIERÍA

Revisión y en su caso replanteamiento de la Curva de Abrams, para obtener la resistencia a compresión del concreto hidráulico, mediante la relación A/C en algunos de los nuevos tipos de cemento establecidos en la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-1999.

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL-TECNOLOGÍA DE LA CONSTRUCCIÓN

P R E S E N T A :

OSCAR ISIDRO MONTER ESPINOSA

TUTOR:

ING. JUAN LUIS COTTIER CAVIEDES



2007



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: M.I. Fernando Favela Losoya

Secretario: Ing. Juan Lu3s Cottier Caviedes

Vocal: M.I. Salvador D3az D3az

1er. Suplente: Ing. Carlos Su3rez Salazar

2do. Suplente: Dr. Jes3s Hugo Meza Puesto

Lugar donde se realiz3 la tesis:

Universidad Aut3noma Metropolitana-Azcapotzalco

TUTOR DE TESIS:

Ing. Juan Lu3s Cottier Caviedes

FIRMA

AGRADECIMIENTOS

A Dios por todo, sin él no hay nada.

A mi padre, quien en su loca idea de sentirse libre rompió una familia.

A mi madre, que en nuevo papel me da los ánimos para seguir adelante.

A mis hermanos, por lo que fueron, son y serán por siempre.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo.

A mi país, esperando algún día valore nuestra verdadera fuerza como profesionistas.

A todos mis profesores y amigos, en breves palabras quiero decirles gracias por darme la oportunidad de compartir experiencias y conocimientos.

ÍNDICE

| | |
|---|-----|
| Sinopsis | iii |
| Introducción | iv |
| Objetivos | iv |
| Objetivo general | |
| Objetivo particular | |
| Objetivo específico | |
| Justificación de la investigación | iv |
| Utilidad de la investigación | iv |
| Utilidad académica | |
| Utilidad práctica | |
| Hipótesis | iv |
| Alcances | v |
| CAPÍTULO 1. GENERALIDADES | |
| Introducción | 1 |
| 1.1 Concreto hidráulico | 1 |
| 1.2 Cemento hidráulico portland | 1 |
| 1.2.1 Hidratación del cemento | 2 |
| 1.2.2 Relación A/C <i>versus</i> resistencia a compresión | 3 |
| 1.2.3 Química básica del cemento | 3 |
| 1.2.4 Clasificación de los cementos hidráulicos según la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-1999 | 5 |
| 1.3 Agregados pétreos | 6 |
| 1.4 Agua de mezclado | 7 |
| Resumen | 8 |
| CAPÍTULO 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL | |
| Introducción | 9 |
| 2.1 Elección de los tres tipos de cemento a verificar | 9 |
| 2.2 Diseño del experimento | 9 |
| 2.3 Pruebas físicas a los agregados pétreos | 10 |
| 2.3.1 Preliminares | 10 |
| 2.3.2 Muestreo del agregado | 11 |
| 2.3.3 Reducción de las muestras | 11 |
| 2.3.4 Análisis granulométrico | 11 |
| 2.3.5 Masa volumétrica suelta y compacta | 12 |
| 2.3.6 Absorción, masa específica seca y saturada superficie seca | 12 |
| 2.4 Diseño y fabricación de mezclas de ajuste | 13 |

| | | |
|-------|--|----|
| 2.5 | Diseño de las mezclas de prueba | 17 |
| 2.5.1 | Cemento CPP 30R | 17 |
| 2.5.2 | Cemento CPC 30R | 17 |
| 2.5.3 | Cemento CPO 40R/ B | 17 |
| 2.6 | Fabricación, curado y cabeceo de especímenes | 18 |
| 2.7 | Ensaye a compresión de los especímenes de prueba | 20 |
| 2.7.1 | Corrección de la resistencia a compresión simple por temperatura de curado | 22 |
| | Resumen | 23 |

CAPÍTULO 3. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

| | | |
|-----|--|----|
| | Introducción | 24 |
| 3.1 | Interpretación de resultados | 24 |
| 3.2 | Validación de la hipótesis | 31 |

| | | |
|--|-------------------------------|----|
| | CONCLUSIONES | 32 |
|--|-------------------------------|----|

ANEXOS

| | | |
|---------|--|------|
| Anexo A | Pruebas físicas a los agregados pétreos | I |
| Anexo B | Diseño de mezclas de concreto | VI |
| Anexo C | Diseño de mezclas de concreto definitivas para cada relación A/C y tipo de cemento evaluado | XIII |
| Anexo D | Diseño de mortero azufre-arena para el cabeceo de los especímenes de prueba | XVII |
| Anexo E | Ensaye a compresión de los especímenes de concreto. | XLIV |
| Anexo F | Calibración del equipo de ensaye (prensa hidráulica). | LIV |
| Anexo G | Corrección por temperatura de curados | LVI |

BIBLIOGRAFÍA

SINOPSIS

La resistencia mecánica a compresión simple y la relación agua-cemento (A/C), son algunos de los factores que generalmente se utilizan para diseñar una mezcla de concreto hidráulico.

Existen diversos métodos para el diseño de estas mezclas, entre los cuales destacan el de volumen absoluto, el de mínimos vacíos y el de relación A/C, algunos de éstos propuestos por el American Concrete Institute (ACI) y el Portland Cement Association (PCA). En este sentido, ambos manifiestan que la resistencia a compresión está en función de la relación agua-cemento.

La mayoría de los laboratorios particulares que diseñan mezclas de concreto hidráulico, así como en algunas Instituciones de Educación Superior, utilizan relaciones A/C propuestas por bibliografía extranjera o bien atrasada, en el sentido de no estar actualizada a las nuevas especificaciones del cemento mexicano.

El presente trabajo de investigación, tiene como propósito evaluar la resistencia a compresión del concreto hidráulico en función de su correspondiente relación A/C para tres tipos de cemento evaluados: CPP 30R, CPC 30R y CPO 40R, todos ellos fabricados en México y que cumplen con la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-1999.

El trabajo de investigación consistió en determinar las propiedades físicas de los agregados pétreos utilizados y en base a ellos, diseñar las mezclas de concreto necesarias para obtener la dosificación base real consistente, en la cual se mantuvo constante la cantidad de agregados y agua, variando únicamente la cantidad de cemento. El método de dosificación utilizado fue el propuesto por el ACI a través de su comité 211.1.

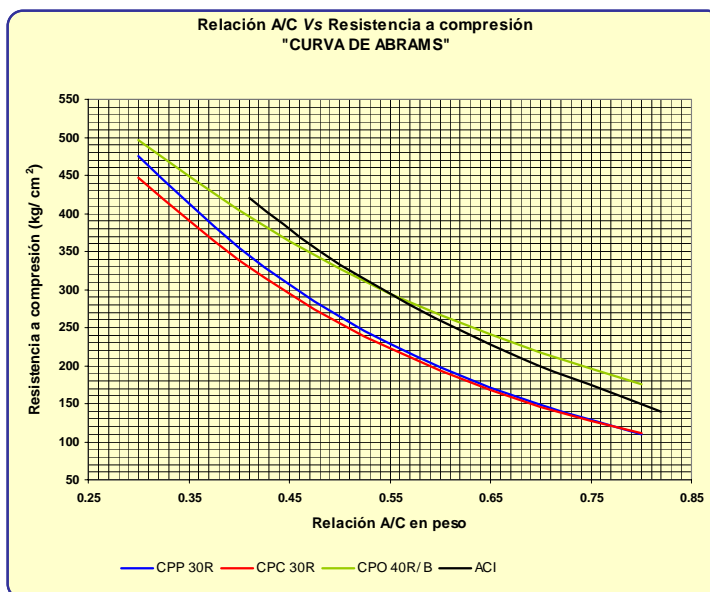
Las relaciones A/C consideradas en este trabajo fueron 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7 y 0,8 para cada uno de los tres tipos de cemento portland evaluados.

Para evitar en lo posible cualquier variabilidad en los resultados, todas las pruebas realizadas tanto a los agregados como al concreto en estado fresco y endurecido se realizaron conforme a lo indicado en las normas oficiales mexicanas (NOM) y normas mexicanas (NMX).

De cada relación A/C se obtuvieron 10 especímenes cilíndricos de 15x30 cm que fueron ensayados a compresión simple a la edad de 28 días. Para obtener la **Curva de Abrams** representativa para cada tipo de cemento. Se utilizó para su ajuste la regresión exponencial a través de métodos numéricos.

De esta manera se puede confirmar que la relación propuesta por el comité 211.1 del ACI no es representativa de los cementos portland evaluados, ya que su uso puede implicar diferencias en decremento de su resistencia de hasta 90 kg/cm².

De manera práctica, se resume el resultado de esta investigación con la siguiente gráfica:



INTRODUCCIÓN

La resistencia mecánica a compresión simple es el factor que se utiliza generalmente para diseñar una mezcla de concreto hidráulico, la cual está en función de la relación agua-cemento (A/C). El American Concrete Institute (ACI), el Portland Cement Association (PCA) entre otros, sugieren métodos de dosificación basados en este parámetro; sin embargo, en la mayoría de pequeños laboratorios de materiales de construcción e incluso en la enseñanza e investigación a nivel superior y posgrado, ésta relación no ha sido adecuada a los tipos de cemento que se producen en México y cuya normalización, incluso ha cambiado, utilizando en su lugar las relaciones propuestas por las fuentes antes citadas.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Determinar mediante experimentación, si la Curva de Abrams propuesta por el método de dosificación del ACI corresponde a alguno de los tres tipos de cemento hidráulico propuestos, enunciados en la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-1999 "Cementos hidráulicos-especificaciones y métodos de prueba".

OBJETIVO PARTICULAR

En caso de que la Curva o Curvas de Abrams obtenidas, no correspondan a la sugerida por el ACI para el diseño de mezclas de concreto hidráulico normal, formular la actual, capaz de correlacionar la resistencia mecánica a compresión del concreto hidráulico y su correspondiente relación A/C, para cada uno de los tres tipos de cemento evaluados.

OBJETIVO ESPECÍFICO

En caso de que se realice un ajuste a la curva de Abrams propuesta por el comité 211.1 del ACI, evaluar si existe algún beneficio técnico o económico.

JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El cambio propuesto en la normalización del cemento se propone en la norma mexicana NMX-C-414-ONCCE-1999, misma que establece una amplia variedad en función de su tipo, características especiales y clase resistente, por lo que resulta imperativo corroborar y en su caso obtener, la relación entre la resistencia mecánica a compresión y la proporción A/C, para al menos los tres tipos de cemento más comercializados en el Distrito Federal.

UTILIDAD DE LA INVESTIGACIÓN

UTILIDAD ACADÉMICA.

Su principal utilidad es actualizar las tablas o gráficas correspondientes a la relación agua-cemento "versus" resistencia a compresión simple, la cual, hoy en día a pesar de no estar actualizada, es ampliamente utilizada en la enseñanza del diseño de mezclas de concreto, así como en las investigaciones realizadas a partir de la aprobación de la norma mexicana anteriormente citada.

UTILIDAD PRÁCTICA.

Tener la certidumbre de que las relaciones obtenidas sirven para actualizar los métodos utilizados para la dosificación de concreto hidráulico, siendo aplicable para los tres tipos de cemento comúnmente comercializados en el Distrito Federal.

HIPÓTESIS

La relación entre la resistencia a compresión simple y la proporción A/C sugerida por el American Concrete Institute a través de su comité 211.1, no corresponde a los tres tipos de cemento hidráulico comúnmente ofertados en el Distrito Federal, consecuentemente, el empleo de dichas relaciones conllevan una variación que puede resultar significativa, en el diseño de una mezcla de concreto, tanto a nivel de investigación, como de uso práctico en la fabricación de un elemento estructural, lo que implica una variación en costo y por tanto en precio.

Para comprobar la validez de la hipótesis, se realizó una investigación de carácter comparativo-propositivo.

ALCANCES

En cuanto a la forma y tipo de investigación, se considera lo siguiente:

- Se busca actualizar los datos requeridos para diseñar una mezcla de concreto hidráulico en función de su resistencia mecánica a compresión simple.
- Realizar las pruebas necesarias y pertinentes en laboratorio conforme a las normas aplicables, con la intención de normalizar los resultados.
- Hacer un análisis completo de los resultados obtenidos e inferir las conclusiones del proyecto de investigación, para en su caso, validar la hipótesis.

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se menciona de manera breve lo que es el concreto hidráulico, sus componentes básicos y como éstos interactúan en sus propiedades. Asimismo, se trata de manera general la clasificación y especificaciones de los cementos hidráulicos conforme a la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-1999.

1.1 CONCRETO HIDRÁULICO

El concreto hidráulico convencional se constituye de tres componentes esenciales: cemento portland, agregados pétreos (grava y arena) y agua, que al mezclarlos introducen de manera simultánea lo que se conoce como aire atrapado, el cual es indeseable y difiere del aire incluido.

Como resultado de esta mezcla, se obtiene una masa plástica que en pocas horas cambia a un estado rígido, cuyo comportamiento mecánico y durabilidad dependen de tres aspectos básicos:

- a) Características, composición y propiedades de la pasta de cemento (cemento y agua). En este sentido es importante una correcta elección del cemento a utilizar y el empleo de una relación A/C conveniente.
- b) Calidad de los agregados. La cual está en función del uso e importancia de la estructura.
- c) Afinidad de la matriz cementante con los agregados. Depende de las características físicas y químicas del cemento utilizado y la composición mineralógica y petrográfica de las rocas que constituyen a los agregados y de éstos, su forma, tamaño máximo y textura superficial.

1.2 CEMENTO HIDRÁULICO PORTLAND

Los cementantes hidráulicos fraguan y endurecen al reaccionar químicamente con el agua, aún estando inmersos en ella, siendo principalmente: cales, cementos hidráulicos, algunas escorias y ciertos materiales con propiedades puzolánicas.

El cemento hidráulico es un material finamente pulverizado que una vez endurecido conserva su resistencia y estabilidad; puede clasificarse en:

- Cemento portland
- Cemento aluminoso
- Cemento sobresulfatado
- Cemento expansivo
- Cemento natural.

A partir del clinker Pórtland es posible fabricar tres clases principales de cementos hidráulicos para la elaboración de concreto.

- Los **cementos portland**, que se obtiene moliendo el clinker y yeso.
- Los **cementos portland compuestos**, en ellos se combina el clinker, el yeso y otro cementante que puede ser escoria o puzolana.
- Los **cementos expansivos**, en ellos se añade al clinker otros componentes especiales de carácter sulfatado, cálcico y aluminoso. Se utilizan en concretos de contracción compensada, donde los cambios de volumen pueden ser motivados por variaciones de humedad, temperatura, reacciones químicas entre el cemento y los agregados y la pérdida de agua por evaporación.
- **Cemento blanco**. En este caso, el clinker portland se produce seleccionando materias primas con bajas concentraciones de hierro y manganeso. Su uso se destina principalmente a trabajos arquitectónicos y decorativos, en donde no se requieren grandes consumos de cemento, ya que su precio es alto (actualmente se precio es el doble del cemento gris).

La influencia que el cemento portland ejerce en el concreto, está en función de la composición química del clinker, de su finura de molienda y en caso de contener puzolana de las características físicas, químicas y contenido de ésta.

Por ejemplo, al aumentar la finura el cemento éste se hidrata más rápido, propiciando que el concreto adquiera resistencia con mayor rapidez y que sus partículas puedan mantenerse en suspensión en la mezcla, lo que mejora su cohesión, manejabilidad y capacidad de retención de agua. En contrapartida, una mayor finura representa incremento en la generación de calor y mayor demanda de agua de mezclado en el concreto, lo que se traduce en mayores cambios volumétricos de éste y posibles agrietamientos en las estructuras. Para evitar este efecto, se recomienda utilizar mezclas de concreto con menor contenido de agua.

El empleo de cementos portland con puzolana puede acelerar la pérdida de revenimiento, al producirse un resecamiento prematuro provocado por la avidéz de agua de la puzolana.

El tiempo de fraguado depende entre otros factores del contenido de cemento, su tipo y su finura; tienden a fraguar un poco más rápido las mezclas de alto consumo de cemento que las de bajo consumo.

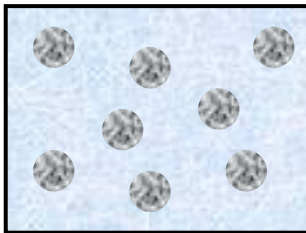
En cuanto a la resistencia del concreto al ataque de sulfatos, es necesario seleccionar un cemento cuya composición química sea apropiada.

La elección del tipo adecuado de cemento depende de la aplicación particular del concreto y es recomendado en la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-1999, la cual se trata más adelante.

1.2.1 Hidratación del cemento

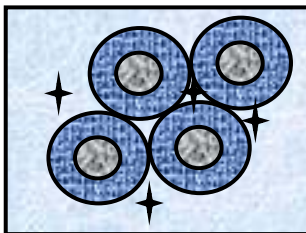
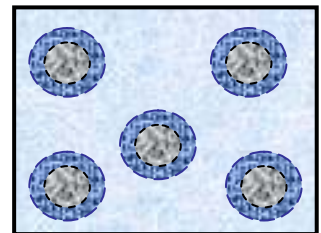
Al mezclar el cemento portland con el agua, se generan reacciones químicas que se manifiestan inicialmente en desprendimiento de calor. En la mezcla de concreto se observa una gradual rigidización, que culmina con su endurecimiento; proceso que puede durar incluso años, según la cantidad de cemento remanente no hidratado.

De manera esquemática, el proceso de hidratación de los granos de cemento es el siguiente:



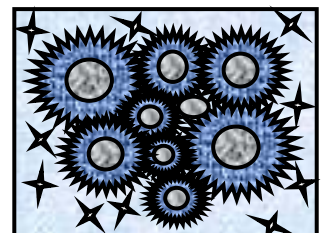
- a) Los granos de cemento están inmersos en agua, lo que propicia su disolución, misma que produce una intensa reacción exotérmica.

- b) Al cabo de algunos minutos comienza a formarse alrededor de los granos de cemento una película gelatinosa que inhibe temporalmente su hidratación, hecho que permite transportar, colocar y moldear la mezcla de concreto antes que comience su etapa de fraguado.



- c) Al continuar la hidratación de los granos de cemento, aumenta el espesor de la película, creando puntos de contacto e inmovilizando los granos, iniciándose su rigidización. También aparecen cristales de hidróxido de calcio.

- d) Se desarrollan filamentos tubulares en la película gelatinosa que forman una trama que aglutina los granos en proceso de hidratación, induciendo su endurecimiento y obteniendo resistencia mecánica.



1.2.2 RELACIÓN A/C VERSUS RESISTENCIA A COMPRESIÓN

El diseño de una estructura de concreto se realiza con base en una determinada resistencia mecánica y a una edad específica, siendo ésta usualmente a 28 días, considerando que en este lapso el concreto normalmente adquiere el 80% de su resistencia potencial.

La falla del concreto se produce por el crecimiento progresivo de microfisuras y otras discontinuidades que existen en él y que se originan desde el momento de su colocación y compactación, de modo que, cuando es sometido a esfuerzos, dichas discontinuidades crecen en número y extensión hasta provocar la falla.

La resistencia mecánica del concreto depende de la resistencia de los agregados, la pasta de cemento y la adherencia entre ambos, por lo que será la que resulte más débil de las tres.

Respecto a la adherencia de la pasta de cemento y el agregado, ésta progresa con la hidratación del cemento, sin embargo, hay otros aspectos específicos que la modifican, tales como la forma, textura superficial y tamaño de las partículas de los agregados.

La resistencia del concreto convencional depende principalmente de la resistencia de la pasta, misma que es consecuencia del proceso de hidratación de los granos de cemento. Este proceso se realiza con relativa rapidez durante las primeras semanas a partir de la elaboración de la mezcla, disminuyendo posteriormente su velocidad; no obstante, si las condiciones de humedad y temperatura continúan siendo favorables, el proceso de hidratación del cemento y de adquisición de resistencia mecánica de la pasta puede prolongarse durante meses e incluso años.

Asimismo, la resistencia mecánica de la pasta de cemento endurecida, es gobernada por la influencia de dos variables: la cantidad de productos de hidratación generados y la proporción del espacio disponible que ha sido ocupado por dichos productos de hidratación.

La cantidad de productos de hidratación depende básicamente de las características físicas y químicas del cemento, el grado de humedad y temperatura de curado y de su edad; sin embargo, si se normalizan la humedad y temperatura de curado, el desarrollo de la hidratación va a depender esencialmente del tiempo.

En cuanto al grado de ocupación del espacio disponible para los productos de hidratación, no solo depende de la cantidad de gel, sino del tamaño del espacio originalmente disponible para su acomodo, que a su vez es determinado por la cantidad proporcional de agua de mezcla; es decir, por la proporción que representa el volumen original de agua con respecto al volumen total de la pasta al ser mezclada. Por consiguiente, a medida que se incrementa la proporción de agua en la pasta, mayor es el espacio disponible y menor el grado de ocupación de este espacio por el gel de cemento, con lo cual permanece libre una mayor proporción de éste espacio en la pasta de cemento hidratada, esto es, aumenta su porosidad.

En términos generales, la resistencia mecánica de la pasta de cemento hidratada depende de la cuantía de su porosidad total debida a los poros intrínsecos del gel y los poros capilares de la pasta hidratada.

Para fines prácticos, ha sido costumbre considerar a la relación A/C como medio de enlace entre la porosidad y la resistencia mecánica de la pasta de cemento hidratada. De tal modo que, si la resistencia de los agregados y la adherencia pasta-agregado son satisfactorios, la resistencia mecánica del concreto endurecido pasa a depender sustancialmente de la resistencia de la pasta y esta a su vez está regulada mediante el ajuste de su relación agua/ cemento.

1.2.3 Química básica del cemento.

Durante la calcinación del clinker para fabricar cemento portland, el óxido de calcio se combina con los demás componentes de la materia prima para formar cuatro compuestos fundamentales que constituyen el 90% de la masa del cemento, los cuales se presentan a continuación junto a sus fórmulas químicas y abreviaturas:

- Silicato tricálcico = $3\text{CaO SiO}_2 = \text{C}_3\text{S}$
- Silicato dicálcico = $2\text{CaO SiO}_2 = \text{C}_2\text{S}$

- Aluminato tricálcico = $3\text{CaO Al}_2\text{O}_3 = \text{C}_3\text{A}$
- Alúminoferrito tetracálcico = $4\text{CaO Al}_2\text{O}_3 \text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{C}_4\text{AF}$

Como se observa, el cemento está constituido por silicatos de calcio que son responsables de la resistencia mecánica a compresión.

El **silicato tricálcico (C₃S)** se hidrata y endurece rápidamente, aportando al concreto resistencia mecánica a corto y mediano plazo, la cual se incrementa mientras mayor sea su concentración. Este compuesto en gran medida es responsable del fraguado inicial.

El **silicato dicálcico (C₂S)**, se hidrata y endurece lentamente y contribuye en gran parte al incremento de resistencia a edades mayores de una semana.

El **aluminato tricálcico (C₃A)**, propicia mayor velocidad en el fraguado y libera gran cantidad de calor durante los primeros días de hidratación y endurecimiento. También contribuye levemente al desarrollo de la resistencia temprana. Su presencia hace al concreto más susceptible de sufrir daño, ya que puede reaccionar con sulfatos externos para dar sulfoaluminato de calcio hidratado, cuya formación gradual se acompaña de expansiones que lo desintegran paulatinamente. El yeso, que se agrega al cemento durante la molienda final, retrasa la velocidad de hidratación del C₃A.

El **alúminoferrito tetracálcico (C₄AF)**, contribuye poco a la resistencia del concreto, sin embargo sirve como fundente durante la calcinación del clinker y favorece la hidratación de los otros compuestos.

El cemento también contiene óxidos de sodio y de potasio, cuyo contenido suele limitarse para evitar reacciones dañinas del cemento.

La influencia del cemento en las características del concreto son de manera general las siguientes:

La finura es la única característica del cemento que puede aportar beneficio a la cohesión y la manejabilidad de las mezclas de concreto; sin embargo, existen otros factores con efectos más decisivos para evitar que las mezclas se segreguen durante su manejo y colocación como son, la distribución granulométrica y el tamaño máximo del agregado, el consumo unitario de cemento, la adición de aditivos inclusores de aire y el diseño de la mezcla de concreto.

Respecto a la estabilidad volumétrica, el primer cambio importante de volumen que se manifiesta en el concreto, es la llamada contracción plástica, la cual ocurre en la etapa de fraguado y es responsable de agrietamientos tempranos en estructuras con gran superficie expuesta como son los pavimentos. Suele relacionarse principalmente con el exceso de agua en la mezcla de concreto y su rápida pérdida por evaporación.

El segundo cambio volumétrico de importancia es la contracción térmica, la cual se origina por el enfriamiento gradual del concreto después de haberse sobre calentado por efecto del calor de hidratación acumulado, ya sea porque éste fue excesivo o por no haber tenido facilidad para su disipación. En cualquier caso, la influencia del cemento puede ser significativa, por lo que debe elegirse el cemento adecuado en función de su calor de hidratación.

Algunos concretos son propensos a sufrir daños debido a la contracción por secado, principalmente los que contienen puzolana natural como parte del material cementante, ya que ésta al estar finamente molida incrementa la demanda de agua mezclado, trasladando sus efectos al concreto endurecido, aumentando su contracción.

También la estabilidad química del cemento y de los agregados juega un papel importante en el desempeño del concreto. Ningún agregado es completamente inerte al permanecer en contacto con la pasta de cemento, debido a los diversos procesos y reacciones químicas que en distinto grado suelen producirse entre ambos. Algunas de estas reacciones son benéficas porque contribuyen a la adhesión del agregado con la pasta, pero otras son perjudiciales porque generan expansiones internas que causan daño y pueden terminar por destruir al concreto y que están representadas por los álcalis, óxidos de sodio y de potasio, que normalmente proceden del cemento. Estas reacciones se designan genéricamente como reacciones álcali-agregado, pudiendo presentarse en tres modalidades: álcali-sílice, álcali-silicato y álcali-carbonato.

1.2.4 Clasificación de los cementos hidráulicos según la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-1999

Esta norma mexicana trata sobre las especificaciones y métodos de prueba de los cementos hidráulicos, haciendo énfasis en los aspectos de resistencia mecánica y durabilidad. Para tal fin, establece los rangos de los componentes que forman los diversos tipos de cemento, indicando las exigencias mecánicas, físicas y químicas que deben satisfacer.

La actual clasificación de los cementos sustituye a la anterior norma oficial mexicana NOM-C-1-1980, cuya comparativa es la siguiente:

| NOM-C-1-1980 | | NMX-C-414-ONNCCE-1999 | |
|--------------|---------------------------|-----------------------|--|
| Tipo | Denominación | Tipo | Denominación |
| I | Normal | CPO | Cemento Portland Ordinario |
| II | Modificado | CPP | Cemento Portland Puzolánico |
| III | Resistencia rápida | CPEG | Cemento Portland con Escoria Granulada de alto horno |
| IV | Bajo calor de hidratación | CPC | Cemento Portland Compuesto |
| V | Resistente a los sulfatos | CPS | Cemento Portland con humo de sílice |
| | | CEG | Cemento con Escoria Granulada de alto horno |

Los cementos clasificados conforme a la norma mexicana arriba citada, pueden presentar adicionalmente una o mas características especiales, mismas que se clasifican en:

| Nomenclatura | Características especiales de los cementos |
|--------------|--|
| RS | Resistente a los Sulfatos |
| BRA | Baja Reactividad Álcali agregado |
| BCH | Bajo Calor de Hidratación |
| B | Blanco |

Por otra parte, la resistencia normal de un cemento es la resistencia mecánica a la compresión a los 28 días y se indica por las clases resistentes 20, 30 ó 40.

La resistencia inicial de un cemento, es la resistencia mecánica a la compresión a los tres días. Para indicar que un tipo de cemento debe cumplir con una resistencia inicial especificada, se le agrega la letra R después de la clase. Sólo se definen valores de resistencia inicial a 30R y 40R.

En cuanto a su resistencia mecánica a compresión, esta norma los clasifica como sigue:

| Clase Resistente | Resistencia a compresión (Mpa) | | |
|------------------|--------------------------------|---------|--------|
| | 3 días | 28 días | |
| | mínimo | mínimo | máximo |
| 20 | - - | 20 | 40 |
| 30 | - - | 30 | 50 |
| 30 R | 20 | 30 | 50 |
| 40 | - - | 40 | - - |
| 40 R | 30 | 40 | - - |

Es importante señalar, que la única especificación química que se hace a los tipos de cemento, es la cantidad máxima permitida de trióxido de azufre (SO₃), limitándose a indicar que será aquella que no cause expansiones mayores a 0,020% a los catorce días de inmersión en agua. No indica la cantidad de

los cuatro principales compuestos que los constituyen (C_3S , C_2S , C_3A y C_4AF) para cada uno de los seis tipos de cemento clasificados.

En cuanto a la designación de los cementos, ésta se ha normalizado, por lo que éstos se identifican por el tipo, clase resistente, resistencia inicial especificada (en su caso) y la o las características especiales que posea.

Por último, esta norma en su apéndice informativo da una serie de recomendaciones generales para el uso de los cementos que pueden resumirse en:

- a) Es necesario distinguir los cementos de uso general y los idóneos para usos específicos. La distinción debe hacerse en términos de la resistencia mecánica y la durabilidad del concreto.
- b) Es aconsejable utilizar siempre que se pueda un cemento de uso general, de producción uniforme y empleo local, bien conocido y acreditado. En este caso cementos tipo CPO y CPP.

1.3 AGREGADOS PÉTREOS

La influencia de los agregados pétreos en el concreto es importante, ya que por ejemplo, la masa unitaria del concreto depende de la masa específica de los mismos.

Los agregados de masa normal proceden de rocas con masa específica entre 2.4 y 2.8, que al utilizarlos producen concretos con masa volumétrica en estado fresco entre 2 200 a 2 550 kg/ m³.

Los agregados pueden clasificarse según la roca que los origina en ígneos, sedimentarios y metamórficos. Por el modo de fragmentación en naturales, manufacturados y mixtos y por el tamaño de sus partículas en agregado grueso (gravas) y agregado fino (arena).

El empleo de agregados con granulometría continua para la fabricación de mezclas de concreto, es conveniente por economía y manejabilidad.

Los efectos que la granulometría de la grava produce sobre la manejabilidad de las mezclas de concreto no son tan notables como los que produce la arena.

Arenas con módulo de finura inferior a 2,3, son consideradas demasiado finas e inconvenientes, debido a que requieren mayor consumo de pasta de cemento, lo que repercute en cambios volumétricos; por otro lado, si el módulo de finura es mayor a 3,1 resultan demasiado gruesas, produciendo mezclas ásperas, segregables y proclives al sangrado.

Los materiales contaminantes más comunes en los agregados son limos, arcilla, materia orgánica, carbón, lignito, partículas ligeras y terrones.

Respecto al limo y la arcilla, ambos materiales son indeseables por el tamaño de sus partículas, ya que incrementan el requerimiento de agua de mezclado y los cambios volumétricos del concreto. La arcilla se considera más perjudicial por su carácter plástico. Las pruebas para cuantificar el contenido de ellos, es a través del tamizado por lavado por la malla No.200. Para finos de carácter arcilloso, se realiza la prueba del equivalente de arena.

La materia orgánica que contamina los agregados suele hallarse en forma de humus, fragmentos de raíces, plantas y trozos de madera. La contaminación excesiva de estos materiales interfiere con el proceso normal de hidratación del cemento, afectando la resistencia y durabilidad del concreto. Para establecer el límite máximo permisible de contaminación con materia orgánica en la arena, se aplica la llamada prueba colorimétrica.

La determinación del contenido de partículas ligeras en los agregados se realiza por medio de flotación en un líquido pesado con densidad cercana a dos.

Las sales inorgánicas que ocasionalmente pueden encontrarse como contaminación en los agregados de origen natural son los sulfatos y los cloruros. Los sulfatos reaccionan con el aluminato tricálcico (C_3A) del cemento, produciendo en altas concentraciones expansiones capaces de destruir paulatinamente el concreto; sin embargo, las cantidades que eventualmente contienen los agregados no producen concentraciones riesgosas; los cloruros originan un medio favorable para que se produzca corrosión en el acero de refuerzo.

Entre las características físicas que contribuyen a definir la calidad intrínseca de las rocas destacan su masa específica, sanidad, porosidad, absorción, resistencia mecánica, resistencia a la abrasión, módulo de elasticidad y propiedades térmicas.

La masa específica de una roca puede ser un buen índice de su porosidad. Cuando el agregado manifiesta una masa específica menor a 2.4, puede ser motivo para dudar de su capacidad de producir concreto de masa normal y por consecuencia dudar de su calidad. Una excesiva porosidad puede tener efectos indeseables en el concreto, como limitada resistencia mecánica, alta deformabilidad y alta capacidad de absorber agua. La absorción no solo depende de la porosidad de la roca, sino también de otros aspectos tales como la distribución granulométrica, el contenido de finos, el tamaño máximo del agregado, la forma y textura superficial de las partículas.

La sanidad de los agregados se define como la condición de que se halle libre de grietas, defectos y fisuras. Es un buen índice para predecir su desempeño en el concreto y tiene relación con la durabilidad del concreto.

La resistencia mecánica del concreto endurecido, especialmente a compresión depende más de la resistencia de la pasta de cemento y de su adherencia con los agregados, que la resistencia de éstos; sin embargo, cuando se trata de concretos con valores de resistencia superiores a los 500 kg/ cm² o bien de concretos compactados con rodillo, la resistencia mecánica de los agregados adquiere mayor influencia. El ensaye que se considera más representativo de la resistencia mecánica de los agregados es la resistencia al aplastamiento.

La resistencia a la abrasión, es la resistencia que los agregados gruesos oponen a sufrir desgaste, rotura o desintegración de sus partículas. La prueba con que se califica de ordinario esta resistencia se lleva a cabo en la "Máquina de los Ángeles". Esta prueba también se aplica para detectar la presencia de partículas menos duras y resistentes dentro del conjunto del agregado grueso.

La forma y textura de los agregados tiene influencia en la manejabilidad del concreto en estado fresco y en la adherencia de las partículas con la pasta de cemento en el concreto endurecido. En igualdad de condiciones, son preferibles los agregados de formas redondeadas para los concretos convencionales con resistencias que no excedan de 250 kg/ cm². Para los concretos de alta resistencia, el agregado ideal debe ser limpio, cúbico, anguloso, ser producto de trituración, con un mínimo de partículas planas y alargadas, ya que reducen su manejabilidad, dificultan su acomodo y compactación, afectando la resistencia mecánica del concreto endurecido.

1.4 AGUA DE MEZCLADO

En relación al concreto, el agua tiene dos diferentes aplicaciones: como ingrediente en la elaboración de las mezclas y como medio de curado de las estructuras recién construidas.

Como componente del concreto, el agua suele representar aproximadamente entre un 10 y 25 por ciento del volumen de la mezcla, dependiendo del tamaño máximo del agregado que se utilice y del revenimiento que se requiera. Lo anterior confiere a la calidad del agua, una influencia importante en el comportamiento y las propiedades del concreto, pues cualquier sustancia dañina que contenga, aún en proporciones reducidas, puede tener efectos adversos en él.

La práctica común consiste en utilizar agua cuyo contenido de sales inorgánicas, sólidos en suspensión, materia orgánica, dióxido de carbono disuelto, etcétera, sean empíricamente bajas.

El agua de mezclado definitivamente debe carecer de grasas, aceites, azúcares y ácidos, los cuales deben eliminarse antes de considerar su empleo. De manera general se considera que si el agua es clara e insípida, puede utilizarse en la fabricación del concreto y su curado, siempre que la estructura por colar no sea importante.

Los efectos indeseables que el agua de mezclado de calidad inadecuada puede producir en el concreto son a corto, mediano y largo plazo. Los efectos a corto plazo normalmente se relacionan con el tiempo de fraguado y las resistencias iniciales. Los de mediano plazo con las resistencias posteriores a 28 días y los de largo plazo pueden consistir en el ataque de sulfatos, la reacción álcali-agregado y la corrosión del acero de refuerzo.

La prevención de los efectos a largo plazo se consigue por medio del análisis químico del agua antes de emplearla, verificando que no contenga cantidades excedidas de sulfatos, álcalis, cloruros y dióxido de carbono disuelto.

Para prevenir los efectos a corto y mediano plazo, se acostumbra precalificar el agua mediante pruebas comparativas de tiempo de fraguado y de resistencia a compresión a 7 y 28 días. En estas pruebas se comparan especímenes elaborados con mezclas idénticas, en las que solo cambia la procedencia del agua de mezclado, agua destilada para la mezcla testigo y agua en estudio para la mezcla de prueba.

RESUMEN

El concreto hidráulico convencional es originalmente una masa plástica que puede adoptar la forma del recipiente que lo contiene y que de manera gradual se rigidiza y endurece. Y es el resultado de mezclar cemento portland, agregados pétreos (grava y arena), agua y aire atrapado.

La resistencia mecánica del concreto esta dado por tres factores principales que a su vez dependen de otros:

- La pasta de cemento (agua y cemento). Está en función de la proporción A/C, de la finura del cemento y su tipo.
- La calidad de los agregados pétreos. Depende de su origen, manera de obtención, tamaño y distribución de sus partículas, masa específica, sanidad, porosidad, absorción, resistencia a la abrasión y resistencia mecánica.
- La afinidad y adherencia entre los agregados y la pasta. Principalmente depende de la forma, textura, tamaño y composición química del agregado.

El agua de mezclado juega también un papel importante en la fabricación y curado del concreto; sin embargo, a la fecha no se han homologado los criterios de calidad mínima, aspecto fundamental, por la carencia cada vez mayor de agua potable.

Respecto a la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-1999, en mi opinión da mayor importancia a garantizar una resistencia mecánica que otros aspectos fundamentales como lo es su propia composición química.

CAPÍTULO 2. DESARROLLO EXPERIMENTAL

INTRODUCCIÓN

Este capítulo trata sobre la elección de los tres tipos de cementos a evaluar, el diseño y desarrollo de la experimentación, incluyendo lo relativo al muestreo y las pruebas físicas realizadas a los agregados, el diseño de cada una de las mezclas de ajuste para llegar a las mezclas de prueba para cada uno de los tipos de cemento por verificar para cada relación A/C, con la intención de obtener la resistencia a compresión simple a la edad de 28 días.

2.1 ELECCIÓN DE LOS TRES TIPOS DE CEMENTO A VERIFICAR.

De lo señalado en el capítulo anterior, los cementos portland que se verificarán son:

- CPP 30R (Cemento Portland Puzolánico), marca Apasco.
- CPC 30R (Cemento Portland Compuesto), marca Tolteca.
- CPO 40R/ B (Cemento Portland Ordinario Blanco), marca Cruz Azul.

Lo anterior obedece a que son cementos hidráulicos de uso común en el Distrito Federal, ya que son los que se ofertan comúnmente en las casas de materiales. Debido a que cada cemento evaluado debe cumplir con lo establecido en la norma NMX-C-414-ONNCCE-1999 “Cementos hidráulicos-especificaciones y métodos de prueba”, la idea de mencionar la marca, es de carácter meramente informativo.

El cemento utilizado en la realización de este proyecto se adquirió a través de distintas casas de materiales y en diferente marca por cada tipo, intentando con ello un muestreo aleatorio, adquiriéndolo envasado en bultos de 50 kg, los cuales se compraron un día antes de su utilización para evitar accidentalmente su hidratación. La forma de verificar que el cemento estuviera “fresco” cuando se adquiría fue oprimiendo los bultos de papel con el dedo pulgar en varios sitios, si se deformaba se consideraba adecuado para utilizarlo.

El volumen de cemento que se compró para realizar las mezclas para cada Curva de Abrams fue de seis bultos de 50 kg cada uno. Para la fabricación de las primeras mezclas de prueba y ajuste, se compraron cuatro bultos de 50 kg tipo CPC-30R.

2.2 DISEÑO DEL EXPERIMENTO.

Distinguidos los tipos de cemento portland por verificar, se procedió a establecer el tipo de agregado pétreo, al cual se le realizaron algunas pruebas físicas, cuyos resultados son necesarios para el diseño de las mezclas de concreto. Las pruebas fueron realizadas conforme a lo indicado en las Normas Oficiales Mexicanas (NOM) y Normas Mexicanas (NMX) correspondientes, siendo:

| PRUEBA DE LABORATORIO | NORMA CORRESPONDIENTE |
|--|-----------------------|
| Muestreo | NMX-C-030-1997-ONNCCE |
| Reducción de muestras | NMX-C-170-1997-ONNCCE |
| Análisis granulométrico | NMX-C-077-1997-ONNCCE |
| Masa volumétrica suelta | NOM-C-073-1983 |
| Masa volumétrica compacta | NOM-C-073-1983 |
| Masa específica seca (agregado grueso) | NMX-C-164-ONNCCE-2002 |
| Masa específica seca (agregado fino) | NOM-C-165-1984 |
| Masa específica saturada superficie seca (agregado grueso) | NMX-C-164-ONNCCE-2002 |
| Masa específica saturada superficie seca (agregado fino) | NOM-C-165-1984 |
| Absorción (agregado grueso) | NMX-C-164-ONNCCE-2002 |
| Absorción (agregado fino) | NOM-C-165-1984 |

Obtenidas las propiedades físicas de los agregados, se diseñó conforme al método propuesto por el American Concrete Institute (ACI) a través de su comité 211.1 el proyecto de mezcla inicial (PMI), misma que fue fabricada y corregida por revenimiento, obteniendo así la mezcla de ajuste uno (MA-1); de ésta mezcla se obtuvo el volumen real de aire atrapado, su masa volumétrica en estado fresco y nuevamente su revenimiento, con la intención de calcular la dosificación base real, con la cual se fabricó la mezcla de prueba uno (MP-1).

A partir de la dosificación base real y con la finalidad de comprobar que no hubiera variación en el volumen de aire atrapado, en la masa volumétrica del concreto fresco y su revenimiento, se fabricó la mezcla de prueba dos (MP-2). Corroborado lo anterior, se procedió a fabricar una tercera mezcla de prueba (MP-3), cuya relación A/C fue 0,28, a efecto de constatar la trabajabilidad del concreto para esta relación.

Es importante señalar que previo a determinar la dosificación momentánea de cualquiera de las mezclas de concreto hidráulico, fue necesario conocer la dosificación base real y la humedad de los agregados al momento de fabricar el concreto.

Una vez definida y corroborada la dosificación base real, se elaboraron distintas mezclas por cada tipo de cemento a verificar, cuyo diseño se ajustó para cada una de las siguientes relaciones A/C: 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7 y 0,8. De cada mezcla se elaboraron 10 especímenes cilíndricos de 15 x 30 cm, siguiendo el procedimiento señalado en la norma NOM-C-160-1986.

Los especímenes fueron desmoldados 24 horas después de su fabricación, procediendo a curarlos para posteriormente ensayarlos a compresión simple a la edad de 28 días, conforme a la norma NMX-C-083-ONNCCE-2002, cabeceándolos previamente con un mortero de azufre y arena, según la resistencia mecánica esperada.

Terminado el ensaye, se procedió al cálculo de resultados y su interpretación, utilizando la regresión exponencial como herramienta estadística para obtener la curva representativa entre la relación A/C y su correspondiente resistencia a compresión simple, obteniendo así la Curva de Abrams respectiva.

2.3 PRUEBAS FÍSICAS A LOS AGREGADOS PÉTREOS.

Para la realización de este trabajo, se consideró utilizar agregados normales, surtidos por cualquier casa de materiales, en el entendido de que éstos no satisfacen características especiales, por ejemplo, alta densidad, ser producto de algún proceso específico de obtención o trituración, entre otros, con la intención de suponer un concreto convencional elaborado con agregados comunes. Para evitar agregar una variable mas a la experimentación, se adquirió en una sola entrega la cantidad suficiente de los mismos para garantizar la terminación del experimento.

El diseño de concreto hidráulico conforme al método propuesto se basa en conocer las propiedades físicas de los agregados utilizados, mismas que se indicaron en el numeral anterior y se tratan a continuación:

2.3.1 Preliminares. Los agregados pétreos provienen de un banco ubicado en el Municipio de Huixquilucan, Estado de México y se trata de material basáltico. Con la intención de reducir incertidumbres, se adquirieron 3 m³ de cada uno (grava y arena), garantizando así su existencia para todo el proyecto. Para evitar la contaminación y disgregación de los materiales, se procedió a almacenarlos en un lugar cubierto.



Fig.01 (izquierda). Grava adquirida para el desarrollo de la experimentación.

Fig.02 (derecha). Arena adquirida para el desarrollo de la experimentación.



2.3.2 Muestreo del agregado. El muestreo del material almacenado se hizo como lo indica la norma mexicana NMX-C-030-1997-ONNCCE "Agregados-Muestreo" en su inciso 6.3.8. La cantidad en peso de la muestra compuesta fue suficiente para realizar las pruebas de laboratorio consideradas.



Fig.03 Almacén temporal de agregados



Fig.04 Muestra de agregado grueso

2.3.3 Reducción de las muestras. La reducción de cada una de las muestras compuestas obtenidas, se realizó conforme a la norma mexicana NMX-C-170-1997-ONNCCE "Reducción de las muestras de agregados obtenidas en el campo al tamaño requerido para las pruebas".

En el caso de la grava, su reducción se hizo conforme al método B inciso 4.2 de la norma (cuarteo manual). El tamaño de la muestra reducida fue el requerido por la prueba de laboratorio respectiva, que a su vez, fue el resultado de reducir toda la muestra compuesta obtenida del almacén.

Para la arena se utilizó el método A inciso 4.1 de la norma respectiva (cuarteo mecánico). El tamaño de la muestra reducida se obtuvo de igual manera que la grava.



Fig.05 Reducción de la grava método B



Fig.06 Reducción de la arena método A

2.3.4 Análisis granulométrico. La realización de esta prueba se hizo como se indica en la norma mexicana NMX-C-077-1997-ONNCCE "Método de prueba análisis granulométrico".

En el caso de la arena, el tamaño de la muestra reducida fue superior a 500 gramos, cumpliendo con el inciso 4.2 de la norma. En el caso de la grava, el tamaño de la muestra reducida cumplió con el mínimo establecido en el inciso 4.3 de la misma norma.



Fig.07 Cribado de arena



Fig.08 Pesado del retenido parcial de grava

En cualquier caso, la prueba de granulometría se hizo con el material completamente seco y a temperatura ambiente. El proceso de tamizado fue manual en el caso de las gravas, mientras que en las arenas se utilizó un cribador eléctrico. El tamaño de las mallas o tamices fue de 20 cm de diámetro para el agregado fino y de 40 cm para el grueso.

Los datos y resultados de las pruebas realizadas se muestran en el anexo A (Pruebas físicas a los agregados pétreos).

2.3.5 Masa volumétrica suelta y compacta. Esta prueba se realizó conforme lo marca la norma oficial mexicana NOM-C-073-1983 “Agregados para concreto” por no disponer de una actualizada. Los recipientes utilizados en la prueba en gravas y arenas cumplen con lo estipulado en el inciso 4.3. Su volumen se obtuvo como lo marca el inciso 6.1, el factor considerado fue 0,99862.



Figuras 09, 10 y 11 Determinación de la masa suelta y compacta del agregado fino (arena)

Para determinar la masa compacta y suelta, se siguió el procedimiento marcado en el inciso 6.1.2. y 6.3. respectivamente.



Figuras 12, 13 y 14 Determinación de la masa suelta y compacta del agregado grueso (grava)

Las pruebas se realizaron con el material (grava y arena) en estado seco.

2.3.6 Absorción, masa específica seca y saturada superficie seca.

Grava. La prueba se hizo conforme lo estipula la norma mexicana NMX-C-164-ONNCCE-2002 “Determinación de la masa específica y absorción de agua del agregado grueso”, reduciendo primero la muestra combinada obtenida en el almacén, procediendo enseguida a secarla y posteriormente limpiarla con aire comprimido, cuidando de no perder material grueso (material retenido por la criba No.4), lo anterior debido a la carencia de agua que hubo en las instalaciones donde se realizaron las pruebas. Una vez limpio el material, se puso a saturar en agua limpia durante el tiempo requerido en el mismo inciso.

Para obtener la masa específica se utilizó el método del picnómetro de sifón señalado en el inciso 7.1.3. La masa del agregado requerida se obtuvo por la reducción de la muestra combinada.

Se utilizó una probeta graduada con aproximación de 10 mililitros para medir el volumen del líquido desplazado en el picnómetro de sifón.



Fig.15 (izquierda) Cribado de la grava por la malla No.4 después de saturarse para llevarla a su estado saturado superficie seca.



Fig.16. (Derecha) Recolección del volumen desalojado por la masa de la muestra llevada previamente a su estado saturado superficie seca.

Para determinar su absorción, se utilizó el método propuesto en el inciso 7.1.4.2 de la misma norma. El cálculo se llevó a cabo conforme el inciso 8.

Arena. Para este material se utilizó como referencia la norma oficial mexicana NOM-C-165-1984 “Masa específica y absorción de agua del agregado fino”.

Se utilizó un frasco de Chapman con capacidad de 450 ml, graduado con aproximación de 1 ml, equipo que no menciona la norma, teniendo cuidado de expulsar el aire atrapado antes de medir el volumen desplazado de agua.

El molde y pisón utilizados cumplen con las especificaciones del inciso 4.3 y 4.4.

Para llevar el material a su estado saturado superficie seca se siguió el procedimiento descrito en el inciso 5 de la norma citada; en ningún momento se llegó a secar el material más allá de su condición saturada superficie seca.



Figuras 17, 18 y 19 Determinación de la masa específica en estado saturado superficie seca

Los resultados de las pruebas se presentan en el mismo formato de la prueba de pesos volumétricos, **anexo A** (Pruebas físicas a los agregados pétreos).

Resultado de las pruebas físicas a los agregados pétreos:

| | T.N. | M.F. | Abs (%) | PVS (kg/m ³) | PVC (kg/m ³) | Pesss (kg/dm ³) | Pes (kg/dm ³) | H (%) |
|--------------|-------|------|---------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|---------------------------|-------|
| Grava | 38 mm | - - | 4,26 | 1 367 | 1 424 | 2,38 | 2,28 | 0,90 |
| Arena | - - | 2,92 | 8,70 | 1 422 | 1 503 | 2,34 | 2,15 | 5,00 |

2.4 DISEÑO Y FABRICACIÓN DE MEZCLAS DE AJUSTE.

Como se ha mencionado, el método utilizado para el diseño de todas las mezclas de concreto hidráulico realizadas en este trabajo es el propuesto por el comité 211.1 del American Concrete Institute “Proporcionamiento de mezclas de concreto normal, pesado y masivo”.

Para obtener la relación agua-cemento y su correspondiente resistencia a compresión simple para cada tipo de cemento evaluado, se diseñó un proyecto de mezcla inicial con resistencia a 28 días de 250

kg/cm² y revenimiento de 10 cm. La resistencia se fijó arbitrariamente, considerando que es la generalmente utilizada en estructuras de concreto, asimismo, su relación A/C la hace ser una mezcla manejable al estar comprendida entre 0,28 y 0,8. El revenimiento se especificó para obtener un concreto manejable en estado fresco.

Una vez elaborado el proyecto de mezcla inicial (PMI), se le realizó la prueba de revenimiento conforme a lo señalado en la norma NMX-C-156-1997-ONNCCE; el revenimiento obtenido en esta mezcla resultó de 7 cm, procediendo enseguida a su corrección¹, obteniéndose así la **mezcla de ajuste uno (MA-1)**, de la cual se obtuvo su revenimiento, masa volumétrica fresca y volumen de aire atrapado, elaborando dos especímenes cilíndricos de 15x30 cm para su ensaye a 7 días y predecir su resistencia a 28 días.

Con los datos anteriores, excepto de resistencia a compresión a 7 días, se procedió a corregir el diseño de la mezcla de ajuste uno (MA-1) a través del cálculo de su dosificación base real, añadiendo mayor cantidad de arena para mejorar la relación grava-arena, ya que el proyecto de mezcla inicial (PMI) presentó exceso de agregado grueso. La mezcla obtenida se nombró como mezcla de prueba uno (**MP-1**), de la cual se obtuvieron nuevamente el revenimiento, masa volumétrica y volumen de aire atrapado, mismos que no variaron sustancialmente con los obtenidos en la MA-1. De esta mezcla se elaboraron dos especímenes para su ensaye a 7 días.

Para corroborar que con esta mezcla se obtenía el revenimiento solicitado y que la masa volumétrica del concreto fresco y su volumen de aire atrapado fueran cercanos a los obtenidos en la MP-1, sin importar la humedad relativa de los agregados, a partir de su dosificación momentánea se procedió a fabricar la mezcla de prueba dos (MP-2), cuyos resultados fueron semejantes a los obtenidos anteriormente. De ésta también se hicieron 2 especímenes cilíndricos para su ensaye a la misma edad.

Finalmente se realizó una mezcla de concreto hidráulico con relación A/C de 0,282 (**MP-3**); dejando fija la cantidad de agregados². Esta mezcla se hizo únicamente para verificar su manejabilidad y saber la factibilidad de su fabricación y compactación.

A continuación se presenta el resumen de las dosificaciones de las mezclas obtenidas, tanto consistente (considerando los agregados en estado saturado superficie seca) como momentánea (considerando al momento de su fabricación la humedad de los agregados). El cálculo pormenorizado de las dosificaciones, su resistencia a compresión simple a 7 días y su proyección a 28 días se muestran en el **anexo B**.

Proyecto de mezcla inicial (PMI)

| PMI | P'h (kg) | P's (kg) | P'sss (kg) |
|--------------------------|----------|----------|------------|
| Cemento | 7,370 | 7,370 | 7,370 |
| Grava | 25,103 | 24,879 | 25,939 |
| Arena | 15,776 | 15,025 | 16,332 |
| Agua | 5,917 | 6,892 | 4,525 |
| 25 dm³ | 54,166 | 54,166 | 54,166 |



Fig.20. Mezclado del concreto

¹ De manera empírica se ha establecido la siguiente regla para la corrección del revenimiento: "considerar 2 kg de agua y la correspondiente cantidad de cemento para no alterar la relación A/C, por cm faltante de revenimiento por metro cúbico de concreto". León Fernández Orozco†. Laboratorio de Materiales de Construcción y Control de Calidad. 3ª edición año 2000, Universidad Autónoma Metropolitana, pág. 62.

² Esta cantidad corresponde a su condición saturada superficie seca, la cual cambia si se considera en estado húmedo (dosificación momentánea).

CARACTERÍSTICAS:**Revenimiento:** 7 cm.**PVc** = no se obtuvo sino después de realizar la corrección por revenimiento.**Vol. de aire** = no se obtuvo sino después de realizar la corrección por revenimiento.**Relación A/C** = 0,614**Relación Grava-arena:** se notó con exceso de grava, ya que al enrasar la mezcla con una cuchara de albañil, no se alcanza a cubrir con facilidad la grava, por lo que en el cálculo de la dosificación base real, se considerará agregar más arena que grava.**Mezcla de Ajuste uno (MA-1) una vez corregida por revenimiento el PMI**

| MA-1 | P'h (kg) | P's (kg) | P'sss (kg) |
|--------------------------|----------|----------|------------|
| Cemento | 7,614 | 7,614 | 7,614 |
| Grava | 25,103 | 24,879 | 25,939 |
| Arena | 15,776 | 15,025 | 16,332 |
| Agua | 6,067 | 7,042 | 4,675 |
| 25 dm³ | 54,560 | 54,560 | 54,560 |



Fig. 21. Prueba de revenimiento

CARACTERÍSTICAS:**Revenimiento:** 9,0 cm**PVc** = 2 186,656 kg/m³**Vol. de aire** = 2%**Relación A/C** = 0,525**Relación grava-arena:** aún con el incremento de lechada en la mezcla, se notó ligeramente excedida de grava, por lo que en el cálculo de la dosificación base real, se considerará agregar más arena que grava.

Consideramos que el revenimiento no varió mucho debido al tiempo que tardó en realizarse la corrección y la prueba. De esta mezcla se elaboraron dos cilindros de 15x30 cm para su ensaye a compresión a la edad de 7 días.

Mezcla de prueba uno (MP-1) dosificación base real

| MP-1 | P'h (kg) | P's (kg) | P'sss (kg) |
|--------------------------|----------|----------|------------|
| Cemento | 7,629 | 7,629 | 7,629 |
| Grava | 25,150 | 24,926 | 26,023 |
| Arena | 15,805 | 15,052 | 16,858 |
| Agua | 6,083 | 7,060 | 4,157 |
| 25 dm³ | 54,667 | 54,667 | 54,667 |



Fig.22. Verificación práctica del sangrado de la mezcla

CARACTERÍSTICAS:**Revenimiento:** 9,5 cm**PVc** = 2 171,822 kg/ m³**Relación A/C** = 0,545**Vol. de Aire** = 2,0%

Relación grava-arena: la considero buena, ya que al enrasar la mezcla con una cuchara de albañil, se cubre la grava con facilidad. De la mezcla se elaboraron dos especímenes cilíndricos de 15x30 cm para su ensaye a compresión simple a la edad de 7 días y predecir su resistencia a 28 días.

Mezcla de prueba dos (MP-2) para comprobar la MP-1

| MP-2 | P'h (kg) | P's (kg) | P'sss (kg) |
|--------------------------|----------|----------|------------|
| Cemento | 7,629 | 7,629 | 7,629 |
| Grava | 25,185 | 24,925 | 26,022 |
| Arena | 15,960 | 15,053 | 16,858 |
| Agua | 5,893 | 7,060 | 4,158 |
| 25 dm³ | 54,667 | 54,667 | 54,667 |



Fig.23. Determinación de la masa volumétrica del concreto fresco

CARACTERÍSTICAS:

Revenimiento: 10,5cm (variación de +1,0 cm respecto al revenimiento anterior).

PVc = 2 184,323 kg/ m³ (variación menor al 1% respecto al peso anterior).

Vol. de Aire = 2,0%

Relación A/C = 0,545

Relación grava-arena: buena, ya que al enrasar la mezcla con una cuchara de albañil, se cubrió la grava con facilidad. Con esta mezcla se elaboraron dos especímenes cilíndricos de 15x30 cm para ensayarlos a compresión a la edad de 7 días y comparar los resultados con la mezcla de prueba uno (MP-1).

Al dar muy parecidos los resultados de estas mezclas de concreto (MP-1 y MP-2), se procedió a diseñar una mezcla de prueba tres (MP-3) para una relación agua-cemento de 0,28, con la intención de verificar su manejabilidad. Para ello únicamente se varió la cantidad de agua y cemento de la MP-2 dejando fijas las cantidades de grava y arena, resultando:

Mezcla de prueba tres (MP-3) para verificar manejabilidad para relación A/C = 0,28

| MP-3 | P'h (kg) | P's (kg) | P'sss (kg) |
|--------------------------|----------|----------|------------|
| Cemento | 14,745 | 14,745 | 14,745 |
| Grava | 25,185 | 24,925 | 26,022 |
| Arena | 15,959 | 15,052 | 16,858 |
| Agua | 5,894 | 7,061 | 4,158 |
| 25 dm³ | 61,783 | 61,783 | 61,783 |



Fig.24. Determinación del volumen de aire atrapado en el concreto fresco.

CARACTERÍSTICAS:

Revenimiento: cero

PVc: no se pudo obtener por el alto volumen de huecos que presenta la mezcla, imposible de reducir mediante la compactación mecánica a través de una mesa de vibrado.

Vol. de Aire = No se pudo obtener por las mismas razones.

Relación A/C = 0,282

Relación grava-arena: regular (apenas se alcanza a cubrir la grava al pasar la cuchara sobre la mezcla con muchas pasadas). De esta mezcla se elaboraron dos especímenes cilíndricos de 15x30 cm para su

ensaye a compresión a la edad de 7 días y predecir su resistencia a 28 días. La compactación de dichos especímenes fue con ayuda de una mesa vibratoria.

El desarrollo de cálculo de cada dosificación, así como los resultados del ensaye a compresión a 7 días y su predicción a 28 días, se incluyen en el **anexo B**.

2.5 DISEÑO DE LAS MEZCLAS DE PRUEBA.

Obtenida la dosificación base real, se procedió a calcular las dosificaciones necesarias para obtener la relación agua-cemento y su correspondiente resistencia a compresión simple. Para ello se dejaron fijas las cantidades de grava, arena y agua, cambiando únicamente la cantidad de cemento, respecto a la dosificación consistente (considerando el material en estado saturado superficie seca).

Las dosificaciones como podrá observarse, varían según la humedad relativa de los agregados (dosificación momentánea). Es importante recordar que la cantidad de agua considerada en la relación A/C, obedece al agua útil, es decir, aquella cantidad de agua que forma parte de la lechada y no toma en cuenta la que está dentro de los agregados.

El hecho de variar la cantidad de cemento en lugar del agua, obedece a que el método recomendado por el ACI, está en función del revenimiento y el tamaño nominal del agregado grueso, mismos que determinan la cantidad de agua a utilizar y en función de ésta, se determina la cantidad de cemento a través de la relación A/C.

2.5.1 Cemento CPP 30 R.

El primer cemento evaluado fue el **CPP 30 R (Cemento Portland Puzolánico de clase resistente 30, con alta resistencia inicial)**, cuyas relaciones A/C propuestas fueron 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7 y 0,8. De cada una de ellas se fabricaron 10 especímenes cilíndricos de 15 x 30 cm, los cuales fueron ensayados a compresión simple a la edad de 28 días.

2.5.2 Cemento CPC 30 R.

El segundo tipo de cemento utilizado fue el **CPC 30 R (Cemento Portland Compuesto de clase resistente 30, con alta resistencia inicial)**. Para este cemento solo se consideraron las siguientes relaciones A/C: 0,3; 0,4; 0,5; 0,6 y 0,7, ya que la mezcla con relación A/C = 0,8 resulta muy fluida debido a la dispersión de sus partículas.

De igual forma, se fabricaron 10 especímenes cilíndricos de 15 x 30 cm por cada relación A/C, mismos que fueron ensayados a compresión simple a la edad de 28 días.

2.5.3 Cemento CPO 40 R/B.

Por último, se utilizó cemento **CPO 40 R (Cemento Portland Ordinario de clase resistente 40, con alta resistencia inicial)** con las variaciones A/C siguientes: 0,3; 0,4; 0,5; 0,6 y 0,7, fabricándose 10 especímenes cilíndricos de 15 x 30 cm, los cuales fueron ensayados a compresión simple a la edad de 28 días.

A continuación se resumen las dosificaciones base para cada relación agua-cemento utilizada y para cada cemento evaluado. El análisis detallado de cada una se muestra en el **anexo C**.

El factor F, indica la cantidad de dm^3 fabricado por $1\ 000dm^3$ de concreto.

| A/C = 0.300 | Dosificación Base | | | Cemento CPP 30R | | | Cemento CPC 30R | | | Cemento CPO 40 R/B | | |
|-------------|-------------------|----------|------------|-----------------|-------|----------|-----------------|-------|----------|--------------------|-------|----------|
| | P's (kg) | P's (kg) | P'sss (kg) | H | F | P'h (kg) | H | F | P'h (kg) | H | F | P'h (kg) |
| Cemento | 554.341 | 33.260 | 33.260 | - - - | 0.060 | 33.260 | - - - | 0.060 | 33.260 | - - - | 0.063 | 34.923 |
| Grava | 997.012 | 59.821 | 62.453 | 0.010 | | 60.419 | 0.016 | | 60.778 | 0.015 | | 63.754 |
| Arena | 602.077 | 36.125 | 40.460 | 0.039 | | 37.533 | 0.053 | | 38.039 | 0.052 | | 39.903 |
| Agua | 282.413 | 16.945 | 9.978 | - - - | | 14.938 | - - - | | 14.073 | - - - | | 14.877 |
| Masa (kg) | 2435.843 | 146.151 | 146.151 | | | 146.150 | | | 146.150 | | | 153.457 |

| A/C = 0,400 | Dosificación Base | | | Cemento CPP 30R | | | Cemento CPC 30R | | | Cemento CPO 40 R/ B | | |
|-------------|-------------------|----------|------------|-----------------|-------|----------|-----------------|-------|----------|---------------------|-------|----------|
| | P's (kg) | P's (kg) | P'sss (kg) | H | F | P'h (kg) | H | F | P'h (kg) | H | F | P'h (kg) |
| Cemento | 415.730 | 27.022 | 27.022 | - - - | 0.065 | 27.022 | - - - | 0.065 | 27.022 | - - - | 0.065 | 27.022 |
| Grava | 997.012 | 64.806 | 67.657 | 0.013 | | 65.648 | 0.014 | | 65.713 | 0.013 | | 65.648 |
| Arena | 602.077 | 39.135 | 43.831 | 0.041 | | 40.740 | 0.044 | | 40.857 | 0.045 | | 40.896 |
| Agua | 282.413 | 18.357 | 10.809 | - - - | | 15.910 | - - - | | 15.728 | - - - | | 15.753 |
| Masa (kg) | 2297.232 | 149.320 | 149.319 | | | 149.320 | | | 149.320 | | | 149.319 |

| A/C = 0,500 | Dosificación Base | | | Cemento CPP 30R | | | Cemento CPC 30R | | | Cemento CPO 40 R/ B | | |
|-------------|-------------------|----------|------------|-----------------|-------|----------|-----------------|-------|----------|---------------------|-------|----------|
| | P's (kg) | P's (kg) | P'sss (kg) | H | F | P'h (kg) | H | F | P'h (kg) | H | F | P'h (kg) |
| Cemento | 332.592 | 21.618 | 21.618 | - - - | 0.065 | 21.618 | - - - | 0.065 | 21.618 | - - - | 0.065 | 21.618 |
| Grava | 997.012 | 64.806 | 67.657 | 0.011 | | 65.519 | 0.016 | | 65.843 | 0.013 | | 65.648 |
| Arena | 602.077 | 39.135 | 43.831 | 0.041 | | 40.740 | 0.048 | | 41.014 | 0.045 | | 40.896 |
| Agua | 282.413 | 18.357 | 10.809 | - - - | | 16.039 | - - - | | 15.441 | - - - | | 15.753 |
| Masa (kg) | 2214.094 | 143.916 | 143.915 | | | 143.916 | | | 143.916 | | | 143.915 |

| A/C = 0,600 | Dosificación Base | | | Cemento CPP 30R | | | Cemento CPC 30R | | | Cemento CPO 40 R/ B | | |
|-------------|-------------------|----------|------------|-----------------|-------|----------|-----------------|-------|----------|---------------------|-------|----------|
| | P's (kg) | P's (kg) | P'sss (kg) | H | F | P'h (kg) | H | F | P'h (kg) | H | F | P'h (kg) |
| Cemento | 277.161 | 18.015 | 18.015 | - - - | 0.065 | 18.015 | - - - | 0.065 | 18.015 | - - - | 0.065 | 18.015 |
| Grava | 997.012 | 64.806 | 67.657 | 0.017 | | 65.907 | 0.009 | | 65.389 | 0.012 | | 65.583 |
| Arena | 602.077 | 39.135 | 43.831 | 0.059 | | 41.444 | 0.042 | | 40.779 | 0.047 | | 40.974 |
| Agua | 282.413 | 18.357 | 10.809 | - - - | | 14.946 | - - - | | 16.130 | - - - | | 15.740 |
| Masa (kg) | 2158.663 | 140.313 | 140.312 | | | 140.312 | | | 140.313 | | | 140.312 |

| A/C = 0,700 | Dosificación Base | | | Cemento CPP 30R | | | Cemento CPC 30R | | | Cemento CPO 40 R/ B | | |
|-------------|-------------------|----------|------------|-----------------|-------|----------|-----------------|-------|----------|---------------------|-------|----------|
| | P's (kg) | P's (kg) | P'sss (kg) | H | F | P'h (kg) | H | F | P'h (kg) | H | F | P'h (kg) |
| Cemento | 237.561 | 15.441 | 15.441 | - - - | 0.065 | 15.441 | - - - | 0.065 | 15.441 | - - - | 0.065 | 15.441 |
| Grava | 997.012 | 64.806 | 67.657 | 0.012 | | 65.583 | 0.009 | | 65.389 | 0.012 | | 65.583 |
| Arena | 602.077 | 39.135 | 43.831 | 0.046 | | 40.935 | 0.042 | | 40.779 | 0.050 | | 41.092 |
| Agua | 282.413 | 18.357 | 10.809 | - - - | | 15.779 | - - - | | 16.130 | - - - | | 15.622 |
| Masa (kg) | 2119.063 | 137.739 | 137.738 | | | 137.738 | | | 137.739 | | | 137.738 |

| A/C = 0,800 | Dosificación Base | | | Cemento CPP 30R | | | Cemento CPC 30R | | | Cemento CPO 40 R/ B | | |
|-------------|-------------------|----------|------------|-----------------|-------|----------|-----------------|-------------------------|----------|---------------------|-------------------------|----------|
| | P's (kg) | P's (kg) | P'sss (kg) | H | F | P'h (kg) | H | F | P'h (kg) | H | F | P'h (kg) |
| Cemento | 207.869 | 14.551 | 14.551 | - - - | 0.070 | 14.551 | - - - | Mezcla demasiado fluida | - - - | - - - | Mezcla demasiado fluida | - - - |
| Grava | 997.012 | 69.791 | 72.862 | 0.009 | | 70.419 | - - - | | - - - | - - - | | - - - |
| Arena | 602.077 | 42.145 | 47.203 | 0.040 | | 43.831 | - - - | | - - - | - - - | | - - - |
| Agua | 282.413 | 19.769 | 11.641 | - - - | | 17.455 | - - - | | - - - | - - - | | - - - |
| Masa (kg) | 2089.371 | 146.256 | 146.256 | | | 146.256 | | | - - - | | | - - - |

2.6 Fabricación, curado y cabeceo de especímenes.

Para la fabricación de los especímenes no fue necesario realizar un muestreo del concreto fresco, ya que el volumen fabricado fue el suficiente para realizar la prueba de revenimiento y por aparte, el llenado de los 10 especímenes de 15x30 cm.



Fig.25. (Izquierda). Artesa con parte de la mezcla de concreto fabricado.



Fig.26. (Derecha). Prueba de revenimiento.

La prueba de revenimiento se hizo conforme a la norma mexicana NMX-C-156-1997-ONNCCE "Determinación del revenimiento en el concreto fresco"; el equipo utilizado cumplió con lo especificado en dicha norma.

La fabricación de los especímenes se hizo conforme a la norma NOM-C-160-1986 “Elaboración y curado en obra de especímenes de concreto”.

Respecto al curado de los especímenes, éste se hizo mediante inmersión, tal como lo señala la norma mexicana NMX-C-148-ONNCCE-2002 “Gabinetes y cuartos húmedos y tanques de almacenamiento para el curado de especímenes de mortero y concreto de cementantes hidráulico”, en su numeral 3.4, salvo el mantener la temperatura del agua en un rango de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$. En nuestro caso, la temperatura del agua de curado fue en promedio de 18°C . Para poder detectar alguna diferencia en la resistencia del concreto curado a esta temperatura y la indicada en la norma señalada, se elaboraron seis especímenes con una misma mezcla de concreto, los cuales fueron curados por inmersión, tres de ellos a una temperatura de 24°C y los otros tres a 18°C ver **anexo G**.



Fig.27. (Izquierda). Llenado de los moldes cilíndricos de 15x30 cm.



Fig.28. (Derecha). Espécimen de concreto terminado y enrasado.

Una vez que los especímenes cumplieron la edad de 28 días, se procedió a sacarlos del tanque de almacenamiento con agua para su cabeceo y ensaye. El cabeceo se realizó conforme lo indicado en la norma mexicana NMX-C-109-1997-ONNCCE “Cabeceo de especímenes cilíndricos”. Al azufre utilizado para el cabeceo se le hizo una prueba de resistencia mecánica a compresión, resultando en promedio de 170 kg/cm^2 , por lo que se tuvo que mejorar mediante la adición de arena. La proporción en peso utilizada fue 60% azufre y 40% arena basáltica del #100. Con esto, la resistencia promedio obtenida de tres especímenes cúbicos de 5x5 cm fue en promedio de 520 kg/cm^2 . Esta elección de mortero de cabeceo se hizo en función del trabajo de investigación desarrollado en la Universidad Autónoma Metropolitana por el Área de Construcción³, el cual se presenta en el **anexo D**.



Fig.29. (Izquierda). Cabeceador de acero con respaldo y guía para asegurar la perpendicularidad entre el eje longitudinal y las caras de aplicación de carga. Mazo de neopreno para desmolde del espécimen una vez endurecido el mortero de cabeceo.



Fig.30. (Derecha). Espécimen con mortero azufre-arena del No.100 en proporción 60-40 en peso. La fotografía corresponde al espécimen No. 10, relación A/C = 0,4 y cemento CPO 40R/ B.

³ Estudio de morteros compuestos para cabeceo de especímenes cilíndricos de concreto. Ing. Francisco González Díaz. Universidad Autónoma Metropolitana, 2003.

2.7 ENSAYE A COMPRESIÓN DE LOS ESPECÍMENES DE PRUEBA

El ensaye a compresión de los especímenes se realizó en una prensa hidráulica de doble manómetro, con capacidad de 120 toneladas. La calibración del equipo se verificó antes de realizar las pruebas, la cual se detalla en el **anexo F**, cumpliendo con lo señalado en el numeral 4.3 de la norma mexicana NMX-C-083-ONNCCE-2002. La prensa tiene un motor eléctrico que permite regular la velocidad de carga, misma que se fijó en 2,4 kN/s, considerando que el diámetro promedio de los especímenes es de 15 cm. El ensaye se hizo conforme la norma mexicana antes citada. El tiempo de maduración del mortero de cabeceo fue de 2 horas.



Fig.31. (Izquierda). Prensa hidráulica con capacidad de 120 toneladas, doble manómetro, motor eléctrico con regulador de velocidad de carga. El equipo cumple con lo especificado en la norma mexicana NMX-C-083-ONNCCE-2002.



Fig.32. (Derecha). Residuos de un espécimen ensayado a compresión simple. Como puede observarse, la preparación del espécimen y la aplicación de la carga fueron adecuados.

Una vez obtenida la carga de falla de los especímenes, se procedió a calcular su resistencia a compresión mediante la expresión:
$$\sigma = \frac{P \text{ (kg)}}{A \text{ (cm}^2\text{)}} \times 9.81 \frac{\text{(m)}}{\text{(seg}^2\text{)}}$$

En el **Anexo E** se presentan los datos correspondientes al ensaye de los especímenes, incluyendo la carga de falla. En principio se consideró la relación A/C y el promedio aritmético del conjunto de 10 valores de resistencia, para obtener la Curva de Abrams para cada tipo de cemento evaluado; sin embargo, este criterio no considera la distribución real de los datos obtenidos, por lo que en su lugar, se propuso obtener una función que pudiera ajustarse a los puntos obtenidos (abscisas: relación A/C, ordenadas: resistencia a compresión).

A continuación se muestra el resumen de resultados a compresión para cada relación A/C para los tres tipos de cemento portland evaluados.

RESULTADOS DE PRUEBAS A COMPRESIÓN EN ESPECÍMENES DE CONCRETO HIDRÁULICO

Fecha de fabricación: Sábado, 15 de Octubre de 2005 **Tipo de cemento:** Cemento CPC 30R
Fecha de ensaye: Sábado, 12 de Noviembre de 2005 **Relaciones A/C utilizadas:** 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7 y 0,8
No. total de especímenes elaborados: 60 **Número de especímenes por relación A/C:** 10
No. total de especímenes ensayados: 60

| No. de ensaye | Relación A/C | No. de muestra | Resistencia (Kg/cm ²) | Promedio aritmético | No. de ensaye | Relación A/C | No. de muestra | Resistencia (Kg/cm ²) | Promedio aritmético |
|---------------|--------------|----------------|-----------------------------------|---|---------------|--------------|----------------|--|---|
| 1 | 0.3 | M-1 | 402 | Resistencia a compresión (Kg/ cm ²) | 31 | 0.6 | M-1 | 210 | Resistencia a compresión (Kg/ cm ²) |
| 2 | | M-2 | 407 | | 32 | | M-2 | 207 | |
| 3 | | M-3 | 434 | | 33 | | M-3 | 204 | |
| 4 | | M-4 | 420 | | 34 | | M-4 | 245 | |
| 5 | | M-5 | 443 | 35 | M-5 | | 221 | 218 | |
| 6 | | M-6 | 420 | 36 | M-6 | | 226 | | |
| 7 | | M-7 | 387 | 37 | M-7 | | 223 | Peso volumétrico (Kg/ m ³) | |
| 8 | | M-8 | 386 | 38 | M-8 | | 217 | | |
| 9 | | M-9 | 439 | 39 | M-9 | | 223 | 2142 | |
| 10 | | M-10 | 417 | 40 | M-10 | | 204 | | |
| 11 | 0.4 | M-1 | 329 | Resistencia a compresión (Kg/ cm ²) | 41 | 0.7 | M-1 | 154 | Resistencia a compresión (Kg/ cm ²) |
| 12 | | M-2 | 338 | | 42 | | M-2 | 155 | |
| 13 | | M-3 | 337 | | 43 | | M-3 | 154 | |
| 14 | | M-4 | 348 | | 44 | | M-4 | 144 | |
| 15 | | M-5 | 343 | 45 | M-5 | | 156 | 155 | |
| 16 | | M-6 | 345 | 46 | M-6 | | 155 | | Peso volumétrico (Kg/ m ³) |
| 17 | | M-7 | 335 | 47 | M-7 | | 165 | | |
| 18 | | M-8 | 364 | 48 | M-8 | | 153 | 2135 | |
| 19 | | M-9 | 350 | 49 | M-9 | | 155 | | |
| 20 | | M-10 | 327 | 50 | M-10 | | 156 | | |
| 21 | 0.5 | M-1 | 251 | Resistencia a compresión (Kg/ cm ²) | 51 | 0.8 | M-1 | 87 | Resistencia a compresión (Kg/ cm ²) |
| 22 | | M-2 | 265 | | 52 | | M-2 | 115 | |
| 23 | | M-3 | 269 | | 53 | | M-3 | 110 | |
| 24 | | M-4 | 269 | | 54 | | M-4 | 94 | |
| 25 | | M-5 | 250 | 55 | M-5 | | 114 | 99 | |
| 26 | | M-6 | 259 | 56 | M-6 | | 91 | | Peso volumétrico (Kg/ m ³) |
| 27 | | M-7 | 260 | 57 | M-7 | | 111 | | |
| 28 | | M-8 | 257 | 58 | M-8 | | 83 | 2129 | |
| 29 | | M-9 | 259 | 59 | M-9 | | 109 | | |
| 30 | | M-10 | 246 | 60 | M-10 | | 76 | | |

RESULTADOS DE PRUEBAS A COMPRESIÓN EN ESPECÍMENES DE CONCRETO HIDRÁULICO

Fecha de fabricación: Sábado, 22 de Octubre de 2005 **Tipo de cemento:** Cemento CPP 30R
Fecha de ensaye: Sábado, 19 de Noviembre de 2005 **Relaciones A/C utilizadas:** 0,3; 0,4; 0,5; 0,6 y 0,7
No. total de especímenes elaborados: 50 **Número de especímenes por relación A/C:** 10
No. total de especímenes ensayados: 50

| No. de ensaye | Relación A/C | No. de muestra | Resistencia (Kg/cm ²) | Promedio aritmético | No. de ensaye | Relación A/C | No. de muestra | Resistencia (Kg/cm ²) | Promedio aritmético |
|---------------|--------------|----------------|-----------------------------------|---|---------------|--------------|----------------|-----------------------------------|---|
| 1 | 0.3 | M-1 | 446 | Resistencia a compresión (Kg/ cm ²) | 31 | 0.6 | M-1 | 234 | Resistencia a compresión (Kg/ cm ²) |
| 2 | | M-2 | 457 | | 32 | | M-2 | 240 | |
| 3 | | M-3 | 456 | | 33 | | M-3 | 218 | |
| 4 | | M-4 | 467 | | 34 | | M-4 | 226 | |
| 5 | | M-5 | 451 | 35 | M-5 | | 215 | 223 | |
| 6 | | M-6 | 468 | 36 | M-6 | | 231 | | Peso volumétrico (Kg/ m ³) |
| 7 | | M-7 | 462 | 37 | M-7 | | 214 | | |
| 8 | | M-8 | 465 | 38 | M-8 | | 217 | 2158 | |
| 9 | | M-9 | 466 | 39 | M-9 | | 215 | | |
| 10 | | M-10 | 468 | 40 | M-10 | | 206 | | |
| 11 | 0.4 | M-1 | 352 | Resistencia a compresión (Kg/ cm ²) | 41 | 0.7 | M-1 | 141 | Resistencia a compresión (Kg/ cm ²) |
| 12 | | M-2 | 347 | | 42 | | M-2 | 140 | |
| 13 | | M-3 | 371 | | 43 | | M-3 | 136 | |
| 14 | | M-4 | 358 | | 44 | | M-4 | 142 | |
| 15 | | M-5 | 368 | 45 | M-5 | | 137 | 137 | |
| 16 | | M-6 | 374 | 46 | M-6 | | 135 | | Peso volumétrico (Kg/ m ³) |
| 17 | | M-7 | 343 | 47 | M-7 | | 123 | | |
| 18 | | M-8 | 364 | 48 | M-8 | | 136 | 2135 | |
| 19 | | M-9 | 343 | 49 | M-9 | | 134 | | |
| 20 | | M-10 | 360 | 50 | M-10 | | 134 | | |
| 21 | 0.5 | M-1 | 269 | Resistencia a compresión (Kg/ cm ²) | | | | | |
| 22 | | M-2 | 258 | | | | | | |
| 23 | | M-3 | 246 | | | | | | |
| 24 | | M-4 | 262 | | | | | | |
| 25 | | M-5 | 260 | 266 | | | | | |
| 26 | | M-6 | 291 | Peso volumétrico (Kg/ m ³) | | | | | |
| 27 | | M-7 | 282 | | | | | | |
| 28 | | M-8 | 259 | | | | | | |
| 29 | | M-9 | 261 | | | | | | |
| 30 | | M-10 | 267 | 2158 | | | | | |

RESULTADOS DE PRUEBAS A COMPRESIÓN EN ESPECÍMENES DE CONCRETO HIDRÁULICO

Fecha de fabricación: Sábado, 29 de Octubre de 2005 **Tipo de cemento:** Cemento CPO 40R
Fecha de ensaye: Sábado, 26 de Noviembre de 2005 **Relaciones A/C utilizadas:** 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7.
No. total de especímenes elaborados: 50 **Número de especímenes por relación A/C:** 10
No. total de especímenes ensayados: 50

| No. de ensaye | Relación A/C | No. de muestra | Resistencia (Kg/cm ²) | Promedio aritmético | No. de ensaye | Relación A/C | No. de muestra | Resistencia (Kg/cm ²) | Promedio aritmético |
|---------------|--------------|----------------|-----------------------------------|---|---------------|--------------|----------------|-----------------------------------|---|
| 1 | 0.3 | M-1 | 474 | Resistencia a compresión (Kg/ cm ²) 479 | 31 | 0.6 | M-1 | 263 | Resistencia a compresión (Kg/ cm ²) 265 |
| 2 | | M-2 | 472 | | 32 | | M-2 | 291 | |
| 3 | | M-3 | 496 | | 33 | | M-3 | 268 | |
| 4 | | M-4 | 465 | | 34 | | M-4 | 282 | |
| 5 | | M-5 | 488 | | 35 | | M-5 | 265 | |
| 6 | | M-6 | 452 | Peso volumétrico (Kg/ m ³) 2177 | 36 | | M-6 | 237 | Peso volumétrico (Kg/ m ³) 2125 |
| 7 | | M-7 | 496 | | 37 | | M-7 | 257 | |
| 8 | | M-8 | 475 | | 38 | | M-8 | 251 | |
| 9 | | M-9 | 479 | | 39 | | M-9 | 271 | |
| 10 | | M-10 | 488 | | 40 | | M-10 | 263 | |
| 11 | 0.4 | M-1 | 419 | Resistencia a compresión (Kg/ cm ²) 413 | 41 | 0.7 | M-1 | 217 | Resistencia a compresión (Kg/ cm ²) 212 |
| 12 | | M-2 | 408 | | 42 | | M-2 | 210 | |
| 13 | | M-3 | 439 | | 43 | | M-3 | 208 | |
| 14 | | M-4 | 403 | | 44 | | M-4 | 229 | |
| 15 | | M-5 | 411 | | 45 | | M-5 | 212 | |
| 16 | | M-6 | 389 | Peso volumétrico (Kg/ m ³) 2164 | 46 | | M-6 | 207 | Peso volumétrico (Kg/ m ³) 2139 |
| 17 | | M-7 | 416 | | 47 | | M-7 | 212 | |
| 18 | | M-8 | 415 | | 48 | | M-8 | 205 | |
| 19 | | M-9 | 407 | | 49 | | M-9 | 213 | |
| 20 | | M-10 | 418 | | 50 | | M-10 | 207 | |
| 21 | 0.5 | M-1 | 321 | Resistencia a compresión (Kg/ cm ²) 344 | | | | | |
| 22 | | M-2 | 342 | | | | | | |
| 23 | | M-3 | 332 | | | | | | |
| 24 | | M-4 | 356 | | | | | | |
| 25 | | M-5 | 371 | | | | | | |
| 26 | | M-6 | 342 | Peso volumétrico (Kg/ m ³) 2143 | | | | | |
| 27 | | M-7 | 340 | | | | | | |
| 28 | | M-8 | 352 | | | | | | |
| 29 | | M-9 | 337 | | | | | | |
| 30 | | M-10 | 350 | | | | | | |

2.7.1 Corrección de la resistencia a compresión simple por temperatura de curado.

El curado de todos los especímenes de concreto fue mediante inmersión en agua saturada con cal para evitar el fenómeno de lixiviación. Se llevó un registro de la temperatura del agua, la cual en promedio estuvo a 17° centígrados. Al estar fuera del rango establecido en la norma mexicana correspondiente, se procedió a fabricar seis especímenes de concreto para corroborar si existe un cambio sustancial en su resistencia por variación de temperatura, procediendo a curar tres de ellos por inmersión a una temperatura de 23° C y los otros tres a una temperatura de 18° C.

La variación encontrada fue de -1,56%, lo cual no consideramos representativo, ya que existen factores de variación que pueden involucrar una variación más significativa; no obstante, se proporciona la información necesaria para poder ser considerada en caso de que así se requiera. La realización de esta comparativa entre las temperaturas de curado por inmersión y su resistencia a compresión simple se detallan en el **anexo G**.

RESUMEN

El experimento consistió en obtener una muestra de diez especímenes cilíndricos de 15x30cm para las relaciones A/C = 0,3; 0,4; 0,5; 0,6 y 0,7 y para cada uno de los tres tipos de cemento portland verificados (CPP 30R, CPC 30R y CPO 40R/ B), totalizando 160 especímenes.

Previo al diseño de las mezclas, se realizaron en los agregados las pruebas físicas de granulometría, masa volumétrica suelta y compacta, masa específica seca y en estado saturado superficie seca y su absorción.

Para cada mezcla de prueba se realizaron en el concreto fresco las pruebas de revenimiento, sangrado y consistencia, además de obtener su masa volumétrica y contenido de aire atrapado.

Una vez obtenido el diseño definitivo del concreto y para dosificar la mezcla para cada relación A/C, se procedió a variar únicamente la cantidad de cemento, considerando a los agregados en estado saturado superficie seca, es decir, considerando el agua útil de la mezcla.

Tanto las pruebas realizadas a los agregados pétreos como al concreto en estado fresco y endurecido se hicieron conforme a lo indicado en las normas oficiales mexicanas y normas mexicanas.

Todos los especímenes fueron ensayados a compresión simple a la edad de 28 días. Previo al ensaye, cada espécimen fue cabeceado con mortero azufre-arena.

La tabla siguiente sintetiza los resultados obtenidos de laboratorio:

| Relación A/C | Resistencia a compresión (kg/ cm ²)** | | | |
|-----------------|---|---------|---------|------|
| | CPO 40R/ B | CPC 30R | CPP 30R | ACI* |
| 0.3 | 497 | 447 | 476 | - - |
| 0.4 | 404 | 338 | 355 | 430 |
| 0.5 | 328 | 256 | 265 | 334 |
| 0.6 | 267 | 193 | 198 | 260 |
| 0.7 | 217 | 146 | 148 | 200 |
| 0.8 | 176 | 111 | 110 | 150 |

* Valores correspondientes a la tabla 6.3.4 (a) propuesta por el comité 211.1 del American Concrete Institute

** Los valores corresponden al resultado de haber ajustado una función exponencial al conjunto de datos.

CAPÍTULO 3. INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

INTRODUCCIÓN

En este último capítulo, se hace la interpretación de los resultados relativos a las pruebas de laboratorio, la validación de la hipótesis y la conclusión particular sobre la misma. Posteriormente, se comenta la aplicación del presente trabajo y la conclusión general del mismo.

3.1 INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

La interpretación de resultados está en función de los objetivos establecidos en este trabajo.

Para cumplir con el objetivo general y particular de la presente investigación, es necesario determinar la resistencia a compresión que corresponde a cada relación A/C, mismas que fueron establecidas en el desarrollo experimental.

En el caso del objetivo general, es necesario comparar la curva característica propuesta por el ACI a través de su comité 211.1, contra la obtenida específicamente de los cementos considerados: CPP 30R, CPC 30R y CPO 40R.

Como resultado del trabajo de laboratorio, se obtuvo para cada relación A/C una serie de 10 valores de resistencia a compresión simple a la edad de 28 días, el conjunto de estas series con su respectiva relación A/C integran el universo de datos con los que se evaluó cada cemento.

Interpretando los resultados que se muestran a continuación, tenemos un solo valor como abscisa (relación A/C) al cual corresponden 10 valores como ordenadas (resistencia a compresión obtenida).

Es importante señalar que los valores considerados, corresponden a los corregidos por temperatura, debido a que la variación de resistencia entre especímenes curados por inmersión en agua saturada con cal para evitar el fenómeno de lixiviación a una temperatura de 23°C y especímenes curados a temperatura de 18°C bajo las mismas condiciones, representa una variación promedio de 1,56%, variación inferior a la que presentan entre si los mismos especímenes que constituyen cada serie de datos.

RESULTADOS DE PRUEBAS A COMPRESIÓN EN ESPECÍMENES DE CONCRETO HIDRÁULICO

Fecha de fabricación: Sábado, 15 de Octubre de 2005

Tipo de cemento: Cemento CPC 30R

Fecha de ensaye: Sábado, 12 de Noviembre de 2005

Relaciones A/C utilizadas: 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7 y 0,8

No. total de especímenes elaborados: 60

Número de especímenes por relación A/C: 10

No. total de especímenes ensayados: 60

| No. de ensaye | Relación A/C | No. de muestra | Resistencia (Kg/cm ²) | No. de ensaye | Relación A/C | No. de muestra | Resistencia (Kg/cm ²) | No. de ensaye | Relación A/C | No. de muestra | Resistencia (Kg/cm ²) |
|---------------|--------------|----------------|-----------------------------------|---------------|--------------|----------------|-----------------------------------|---------------|--------------|----------------|-----------------------------------|
| 1 | 0,3 | M-1 | 402 | 21 | 0,5 | M-1 | 251 | 41 | 0,7 | M-1 | 154 |
| 2 | | M-2 | 407 | 22 | | M-2 | 265 | 42 | | M-2 | 155 |
| 3 | | M-3 | 434 | 23 | | M-3 | 269 | 43 | | M-3 | 154 |
| 4 | | M-4 | 420 | 24 | | M-4 | 269 | 44 | | M-4 | 144 |
| 5 | | M-5 | 443 | 25 | | M-5 | 250 | 45 | | M-5 | 156 |
| 6 | | M-6 | 420 | 26 | | M-6 | 259 | 46 | | M-6 | 155 |
| 7 | | M-7 | 387 | 27 | | M-7 | 260 | 47 | | M-7 | 165 |
| 8 | | M-8 | 386 | 28 | | M-8 | 257 | 48 | | M-8 | 153 |
| 9 | | M-9 | 439 | 29 | | M-9 | 259 | 49 | | M-9 | 155 |
| 10 | | M-10 | 417 | 30 | | M-10 | 246 | 50 | | M-10 | 156 |
| 11 | 0,4 | M-1 | 329 | 31 | 0,6 | M-1 | 210 | 51 | 0,8 | M-1 | 87 |
| 12 | | M-2 | 338 | 32 | | M-2 | 207 | 52 | | M-2 | 115 |
| 13 | | M-3 | 337 | 33 | | M-3 | 204 | 53 | | M-3 | 110 |
| 14 | | M-4 | 348 | 34 | | M-4 | 245 | 54 | | M-4 | 94 |
| 15 | | M-5 | 343 | 35 | | M-5 | 221 | 55 | | M-5 | 114 |
| 16 | | M-6 | 345 | 36 | | M-6 | 226 | 56 | | M-6 | 91 |
| 17 | | M-7 | 335 | 37 | | M-7 | 223 | 57 | | M-7 | 111 |
| 18 | | M-8 | 364 | 38 | | M-8 | 217 | 58 | | M-8 | 83 |
| 19 | | M-9 | 350 | 39 | | M-9 | 223 | 59 | | M-9 | 109 |
| 20 | | M-10 | 327 | 40 | | M-10 | 204 | 60 | | M-10 | 76 |

RESULTADOS DE PRUEBAS A COMPRESIÓN EN ESPECÍMENES DE CONCRETO HIDRÁULICO

Fecha de fabricación: Sábado, 22 de Octubre de 2005
 Fecha de ensaye: Sábado, 19 de Noviembre de 2005

Tipo de cemento: Cemento CPP 30R
 Relaciones A/C utilizadas: 0,3; 0,4; 0,5; 0,6 y 0,7.

No. total de especímenes elaborados: 50
 No. total de especímenes ensayados: 50

Número de especímenes por relación A/C: 10

| No. de ensaye | Relación A/C | No. de muestra | Resistencia (Kg/cm ²) | No. de ensaye | Relación A/C | No. de muestra | Resistencia (Kg/cm ²) | No. de ensaye | Relación A/C | No. de muestra | Resistencia (Kg/cm ²) |
|---------------|--------------|----------------|-----------------------------------|---------------|--------------|----------------|-----------------------------------|---------------|--------------|----------------|-----------------------------------|
| 1 | 0.3 | M-1 | 446 | 21 | 0.5 | M-1 | 269 | 41 | 0.7 | M-1 | 141 |
| 2 | | M-2 | 457 | 22 | | M-2 | 258 | 42 | | M-2 | 140 |
| 3 | | M-3 | 456 | 23 | | M-3 | 246 | 43 | | M-3 | 136 |
| 4 | | M-4 | 467 | 24 | | M-4 | 262 | 44 | | M-4 | 142 |
| 5 | | M-5 | 451 | 25 | | M-5 | 260 | 45 | | M-5 | 137 |
| 6 | | M-6 | 468 | 26 | | M-6 | 291 | 46 | | M-6 | 135 |
| 7 | | M-7 | 462 | 27 | | M-7 | 282 | 47 | | M-7 | 123 |
| 8 | | M-8 | 465 | 28 | | M-8 | 259 | 48 | | M-8 | 136 |
| 9 | | M-9 | 466 | 29 | | M-9 | 261 | 49 | | M-9 | 134 |
| 10 | | M-10 | 468 | 30 | | M-10 | 267 | 50 | | M-10 | 134 |
| 11 | 0.4 | M-1 | 352 | 31 | 0.6 | M-1 | 234 | | | | |
| 12 | | M-2 | 347 | 32 | | M-2 | 240 | | | | |
| 13 | | M-3 | 371 | 33 | | M-3 | 218 | | | | |
| 14 | | M-4 | 358 | 34 | | M-4 | 226 | | | | |
| 15 | | M-5 | 368 | 35 | | M-5 | 215 | | | | |
| 16 | | M-6 | 374 | 36 | | M-6 | 231 | | | | |
| 17 | | M-7 | 343 | 37 | | M-7 | 214 | | | | |
| 18 | | M-8 | 364 | 38 | | M-8 | 217 | | | | |
| 19 | | M-9 | 343 | 39 | | M-9 | 215 | | | | |
| 20 | | M-10 | 360 | 40 | | M-10 | 206 | | | | |

RESULTADOS DE PRUEBAS A COMPRESIÓN EN ESPECÍMENES DE CONCRETO HIDRÁULICO

Fecha de fabricación: Sábado, 29 de Octubre de 2005
 Fecha de ensaye: Sábado, 26 de Noviembre de 2005

Tipo de cemento: Cemento CPO 40R
 Relaciones A/C utilizadas: 0,3; 0,4; 0,5; 0,6 y 0,7.

No. total de especímenes elaborados: 50
 No. total de especímenes ensayados: 50

Número de especímenes por relación A/C: 10

| No. de ensaye | Relación A/C | No. de muestra | Resistencia (Kg/cm ²) | No. de ensaye | Relación A/C | No. de muestra | Resistencia (Kg/cm ²) | No. de ensaye | Relación A/C | No. de muestra | Resistencia (Kg/cm ²) |
|---------------|--------------|----------------|-----------------------------------|---------------|--------------|----------------|-----------------------------------|---------------|--------------|----------------|-----------------------------------|
| 1 | 0,3 | M-1 | 474 | 21 | 0,5 | M-1 | 321 | 41 | 0,7 | M-1 | 217 |
| 2 | | M-2 | 472 | 22 | | M-2 | 342 | 42 | | M-2 | 210 |
| 3 | | M-3 | 496 | 23 | | M-3 | 332 | 43 | | M-3 | 208 |
| 4 | | M-4 | 465 | 24 | | M-4 | 356 | 44 | | M-4 | 229 |
| 5 | | M-5 | 488 | 25 | | M-5 | 371 | 45 | | M-5 | 212 |
| 6 | | M-6 | 452 | 26 | | M-6 | 342 | 46 | | M-6 | 207 |
| 7 | | M-7 | 496 | 27 | | M-7 | 340 | 47 | | M-7 | 212 |
| 8 | | M-8 | 475 | 28 | | M-8 | 352 | 48 | | M-8 | 205 |
| 9 | | M-9 | 479 | 29 | | M-9 | 337 | 49 | | M-9 | 213 |
| 10 | | M-10 | 488 | 30 | | M-10 | 350 | 50 | | M-10 | 207 |
| 11 | 0,4 | M-1 | 419 | 31 | 0,6 | M-1 | 263 | | | | |
| 12 | | M-2 | 408 | 32 | | M-2 | 291 | | | | |
| 13 | | M-3 | 439 | 33 | | M-3 | 268 | | | | |
| 14 | | M-4 | 403 | 34 | | M-4 | 282 | | | | |
| 15 | | M-5 | 411 | 35 | | M-5 | 265 | | | | |
| 16 | | M-6 | 389 | 36 | | M-6 | 237 | | | | |
| 17 | | M-7 | 416 | 37 | | M-7 | 257 | | | | |
| 18 | | M-8 | 415 | 38 | | M-8 | 251 | | | | |
| 19 | | M-9 | 407 | 39 | | M-9 | 271 | | | | |
| 20 | | M-10 | 418 | 40 | | M-10 | 263 | | | | |

De la información anterior, procederemos a comparar la Curva de Abrams propuesta por el ACI, calculando a través de métodos numéricos y con ayuda de herramientas estadísticas, la función matemática aproximada a partir de los resultados, en este caso una regresión o "ajuste de curva".

De inicio podemos descartar se trate de una regresión lineal por obvios motivos, por lo que la regresión tendría que ser polinomial, exponencial o potencial. Para determinar el tipo de regresión que permite un mejor ajuste de la función a los puntos dados, es necesario proponer una tolerancia o margen de error, mismo que se compara con el error estándar evaluado en la función (obtenido a través de mínimos cuadrados). La primera función considerada sería un polinomio de segundo grado, en seguida una de tercer grado y así sucesivamente. No hay que perder de vista que la mejor aproximación de un polinomio no está en función de su grado, sino de comparar su correspondiente error contra la tolerancia que se ha fijado, sin descuidar que entre mayor es el grado del polinomio, más inestable puede volverse el sistema de ecuaciones lineales que utilizamos para resolverlo.

Una manera práctica de proponer la función de ajuste, es el de graficar por tabulación los puntos obtenidos y con ello darnos idea de ella; en tal sentido, hay que recordar que el Ing. Duff A. Abrams¹ realizó investigaciones sobre los efectos de la cantidad de agua de mezclado en la resistencia del concreto, y que de manera práctica se resume en la siguiente gráfica, estableciendo la ecuación de la

curva como $S = \frac{A}{B^X}$; donde:

S= resistencia del concreto a compresión

A y B= son constantes que dependen de la calidad del cemento utilizado, edad del concreto, condiciones de curado, etc.

X= relación A/C en volumen

Nota: Es pertinente señalar que está fuera del alcance de este trabajo una revisión de las teorías de diseño de concreto.

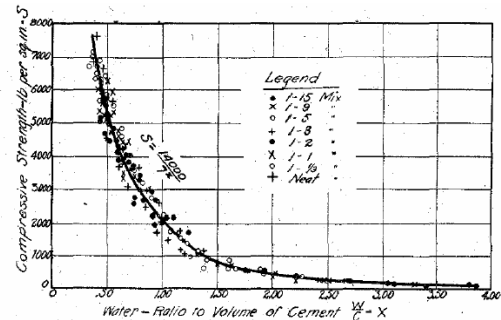


FIG. 1. RELATION BETWEEN STRENGTH OF CONCRETE AND WATER CONTENT
Twenty-eight-day compression tests of 6 by 12-inch cylinders. (Series 83.)

De lo anterior, se concluye que la función que debe considerarse para ajustar los resultados obtenidos es la regresión exponencial, cuyo procedimiento de manera sucinta, se desarrolla a continuación:

La función exponencial, de manera general está dada por la expresión $y = Ae^{BX}$, misma que es posible transformar utilizando logaritmos:

$$\ln y = \ln A + \ln e^{BX}$$

$$\ln y = \ln A + BX \dots \dots 1)$$

si $a_0 = \ln A$ y $a_1 = B$, podemos escribir la ecuación 1) como:

$$\ln y = a_0 + a_1X \dots \dots 2)$$

Por otra parte, al utilizar métodos numéricos para ajustar una función exponencial a los resultados obtenidos, se obtiene el siguiente sistema matricial:

$$\begin{bmatrix} M & \Sigma X \\ \Sigma X & \Sigma X^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Sigma \ln y \\ \Sigma X \ln y \end{bmatrix}$$

donde: M = número de datos del sistema
X = relación A/C
y = resistencia a compresión simple

realizando las operaciones queda:

$$\begin{aligned} Ma_0 + \Sigma Xa_1 &= \Sigma \ln y \\ \Sigma Xa_0 + \Sigma X^2a_1 &= \Sigma X \ln y \end{aligned}$$

3.1.1 Cemento CPC 30R.

Resolviendo el sistema con los resultados específicos del cemento tipo CPC 30R queda:

¹ Design of Concrete Mixtures. Duff A. Abrams, Lewis Institute, 1924.

| | X | Y | X ² | ln Y | x ln Y |
|----|------------|------------|----------------|----------------|------------------|
| 1 | 0.3 | 402 | 0.09 | 5.996452 | 1.798936 |
| 2 | 0.3 | 407 | 0.09 | 6.008813 | 1.802644 |
| 3 | 0.3 | 434 | 0.09 | 6.073045 | 1.821914 |
| 4 | 0.3 | 420 | 0.09 | 6.040255 | 1.812077 |
| 5 | 0.3 | 443 | 0.09 | 6.09357 | 1.828071 |
| 6 | 0.3 | 420 | 0.09 | 6.040255 | 1.812077 |
| 7 | 0.3 | 387 | 0.09 | 5.958425 | 1.787528 |
| 8 | 0.3 | 386 | 0.09 | 5.955837 | 1.786751 |
| 9 | 0.3 | 439 | 0.09 | 6.084499 | 1.82535 |
| 10 | 0.3 | 417 | 0.09 | 6.033086 | 1.809926 |
| 11 | 0.4 | 329 | 0.16 | 5.796058 | 2.318423 |
| 12 | 0.4 | 338 | 0.16 | 5.823046 | 2.329218 |
| 13 | 0.4 | 337 | 0.16 | 5.820083 | 2.328033 |
| 14 | 0.4 | 348 | 0.16 | 5.852202 | 2.340881 |
| 15 | 0.4 | 343 | 0.16 | 5.83773 | 2.335092 |
| 16 | 0.4 | 345 | 0.16 | 5.843544 | 2.337418 |
| 17 | 0.4 | 335 | 0.16 | 5.814131 | 2.325652 |
| 18 | 0.4 | 364 | 0.16 | 5.897154 | 2.358862 |
| 19 | 0.4 | 350 | 0.16 | 5.857933 | 2.343173 |
| 20 | 0.4 | 327 | 0.16 | 5.78996 | 2.315984 |
| 21 | 0.5 | 251 | 0.25 | 5.525453 | 2.762727 |
| 22 | 0.5 | 265 | 0.25 | 5.57973 | 2.789865 |
| 23 | 0.5 | 269 | 0.25 | 5.594711 | 2.797356 |
| 24 | 0.5 | 269 | 0.25 | 5.594711 | 2.797356 |
| 25 | 0.5 | 250 | 0.25 | 5.521461 | 2.760731 |
| 26 | 0.5 | 259 | 0.25 | 5.556828 | 2.778414 |
| 27 | 0.5 | 260 | 0.25 | 5.560682 | 2.780341 |
| 28 | 0.5 | 257 | 0.25 | 5.549076 | 2.774538 |
| 29 | 0.5 | 259 | 0.25 | 5.556828 | 2.778414 |
| 30 | 0.5 | 246 | 0.25 | 5.505332 | 2.752666 |
| 31 | 0.6 | 210 | 0.36 | 5.347108 | 3.208265 |
| 32 | 0.6 | 207 | 0.36 | 5.332719 | 3.199631 |
| 33 | 0.6 | 204 | 0.36 | 5.31812 | 3.190872 |
| 34 | 0.6 | 245 | 0.36 | 5.501258 | 3.300755 |
| 35 | 0.6 | 221 | 0.36 | 5.398163 | 3.238898 |
| 36 | 0.6 | 226 | 0.36 | 5.420535 | 3.252321 |
| 37 | 0.6 | 223 | 0.36 | 5.407172 | 3.244303 |
| 38 | 0.6 | 217 | 0.36 | 5.379897 | 3.227938 |
| 39 | 0.6 | 223 | 0.36 | 5.407172 | 3.244303 |
| 40 | 0.6 | 204 | 0.36 | 5.31812 | 3.190872 |
| 41 | 0.7 | 154 | 0.49 | 5.036953 | 3.525867 |
| 42 | 0.7 | 155 | 0.49 | 5.043425 | 3.530398 |
| 43 | 0.7 | 154 | 0.49 | 5.036953 | 3.525867 |
| 44 | 0.7 | 144 | 0.49 | 4.969813 | 3.478869 |
| 45 | 0.7 | 156 | 0.49 | 5.049856 | 3.534899 |
| 46 | 0.7 | 155 | 0.49 | 5.043425 | 3.530398 |
| 47 | 0.7 | 165 | 0.49 | 5.105945 | 3.574162 |
| 48 | 0.7 | 153 | 0.49 | 5.030438 | 3.521307 |
| 49 | 0.7 | 155 | 0.49 | 5.043425 | 3.530398 |
| 50 | 0.7 | 156 | 0.49 | 5.049856 | 3.534899 |
| 51 | 0.8 | 87 | 0.64 | 4.465908 | 3.572726 |
| 52 | 0.8 | 115 | 0.64 | 4.744932 | 3.795946 |
| 53 | 0.8 | 110 | 0.64 | 4.70048 | 3.760384 |
| 54 | 0.8 | 94 | 0.64 | 4.543295 | 3.634636 |
| 55 | 0.8 | 114 | 0.64 | 4.736198 | 3.788958 |
| 56 | 0.8 | 91 | 0.64 | 4.51086 | 3.608688 |
| 57 | 0.8 | 111 | 0.64 | 4.70953 | 3.767624 |
| 58 | 0.8 | 83 | 0.64 | 4.418841 | 3.535073 |
| 59 | 0.8 | 109 | 0.64 | 4.691348 | 3.753078 |
| 60 | 0.8 | 76 | 0.64 | 4.330733 | 3.464586 |
| M | ΣX | ΣY | ΣX^2 | $\Sigma \ln y$ | $\Sigma X \ln y$ |
| 60 | 33 | 14873 | 19.9 | 324.253368 | 173.457339 |

60 $a_0 + 33,0 a_1 = 324,253368$ multiplicando por -33
33 $a_0 + 19,9 a_1 = 173,457339$ multiplicando por 60

-1 980 $a_0 - 1 089 a_1 = -10 700,361144$
1 980 $a_0 + 1 194 a_1 = 10 407,440340$

$$105 a_1 = -292,920804$$

$$a_1 = -2,789722$$

por lo tanto: $a_0 = 6,938570$

recordando que:

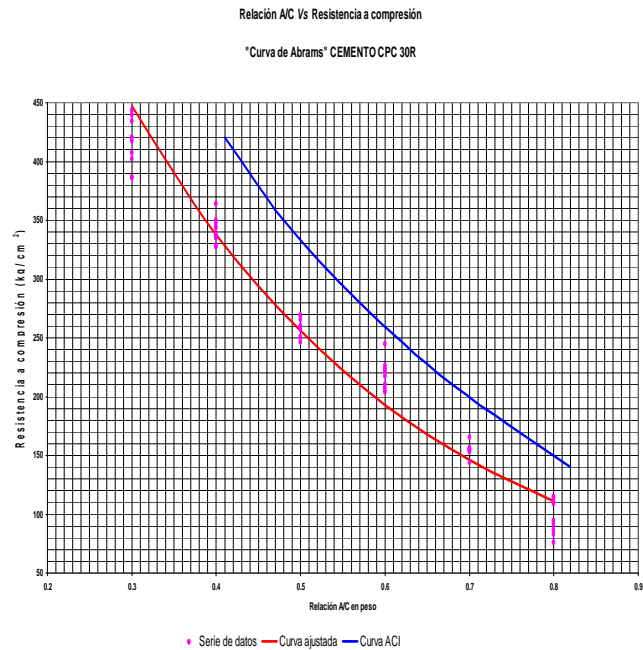
$$A = e^{a_0} = e^{6,938570} = 1 031,294409$$

$$B = a_1 = -2,789722$$

considerando que $y = A e^{Bx}$, podemos obtener la función representativa de la curva de Abrams para cemento tipo CPC 30R:

$$y = 1 031,294409 e^{-2,789722 X}$$

y cuya comparativa con la curva propuesta por el ACI puede observarse en la gráfica siguiente:



CEMENTO TIPO CPP 30R

| | X | Y | X2 | ln Y | x ln Y |
|-----------|------------|--------------|-------------|-------------------|-------------------|
| 1 | 0.3 | 446 | 0.09 | 6.100319 | 1.830096 |
| 2 | 0.3 | 457 | 0.09 | 6.124683 | 1.837405 |
| 3 | 0.3 | 456 | 0.09 | 6.122493 | 1.836748 |
| 4 | 0.3 | 467 | 0.09 | 6.146329 | 1.843899 |
| 5 | 0.3 | 451 | 0.09 | 6.111467 | 1.83344 |
| 6 | 0.3 | 468 | 0.09 | 6.148468 | 1.84454 |
| 7 | 0.3 | 462 | 0.09 | 6.135565 | 1.84067 |
| 8 | 0.3 | 465 | 0.09 | 6.142037 | 1.842611 |
| 9 | 0.3 | 466 | 0.09 | 6.144186 | 1.843256 |
| 10 | 0.3 | 468 | 0.09 | 6.148468 | 1.84454 |
| 11 | 0.4 | 352 | 0.16 | 5.863631 | 2.345452 |
| 12 | 0.4 | 347 | 0.16 | 5.849325 | 2.33973 |
| 13 | 0.4 | 371 | 0.16 | 5.916202 | 2.366481 |
| 14 | 0.4 | 358 | 0.16 | 5.880533 | 2.352213 |
| 15 | 0.4 | 368 | 0.16 | 5.908083 | 2.363233 |
| 16 | 0.4 | 374 | 0.16 | 5.924256 | 2.369702 |
| 17 | 0.4 | 343 | 0.16 | 5.83773 | 2.335092 |
| 18 | 0.4 | 364 | 0.16 | 5.897154 | 2.358862 |
| 19 | 0.4 | 343 | 0.16 | 5.83773 | 2.335092 |
| 20 | 0.4 | 360 | 0.16 | 5.886104 | 2.354442 |
| 21 | 0.5 | 269 | 0.25 | 5.594711 | 2.797356 |
| 22 | 0.5 | 258 | 0.25 | 5.55296 | 2.77648 |
| 23 | 0.5 | 246 | 0.25 | 5.505332 | 2.752666 |
| 24 | 0.5 | 262 | 0.25 | 5.568345 | 2.784173 |
| 25 | 0.5 | 260 | 0.25 | 5.560682 | 2.780341 |
| 26 | 0.5 | 291 | 0.25 | 5.673323 | 2.836662 |
| 27 | 0.5 | 282 | 0.25 | 5.641907 | 2.820954 |
| 28 | 0.5 | 259 | 0.25 | 5.556828 | 2.778414 |
| 29 | 0.5 | 261 | 0.25 | 5.56452 | 2.78226 |
| 30 | 0.5 | 267 | 0.25 | 5.587249 | 2.793625 |
| 31 | 0.6 | 234 | 0.36 | 5.455321 | 3.273193 |
| 32 | 0.6 | 240 | 0.36 | 5.480639 | 3.288383 |
| 33 | 0.6 | 218 | 0.36 | 5.384495 | 3.230697 |
| 34 | 0.6 | 226 | 0.36 | 5.420535 | 3.252321 |
| 35 | 0.6 | 215 | 0.36 | 5.370638 | 3.222383 |
| 36 | 0.6 | 231 | 0.36 | 5.442418 | 3.265451 |
| 37 | 0.6 | 214 | 0.36 | 5.365976 | 3.219586 |
| 38 | 0.6 | 217 | 0.36 | 5.379897 | 3.227938 |
| 39 | 0.6 | 215 | 0.36 | 5.370638 | 3.222383 |
| 40 | 0.6 | 206 | 0.36 | 5.327876 | 3.196726 |
| 41 | 0.7 | 141 | 0.49 | 4.94876 | 3.464132 |
| 42 | 0.7 | 140 | 0.49 | 4.941642 | 3.459149 |
| 43 | 0.7 | 136 | 0.49 | 4.912655 | 3.438859 |
| 44 | 0.7 | 142 | 0.49 | 4.955827 | 3.469079 |
| 45 | 0.7 | 137 | 0.49 | 4.919981 | 3.443987 |
| 46 | 0.7 | 135 | 0.49 | 4.905275 | 3.433693 |
| 47 | 0.7 | 123 | 0.49 | 4.812184 | 3.368529 |
| 48 | 0.7 | 136 | 0.49 | 4.912655 | 3.438859 |
| 49 | 0.7 | 134 | 0.49 | 4.89784 | 3.428488 |
| 50 | 0.7 | 134 | 0.49 | 4.89784 | 3.428488 |
| M | Σ X | Σ Y | Σ X2 | Σ ln y | Σ X ln y |
| 50 | 25 | 14415 | 13.5 | 279.033712 | 136.592759 |

3.1.2 Cemento CPP 30R

Resolviendo el sistema con los resultados específicos del cemento tipo CPP 30R queda:

$$M a_0 + \sum X a_1 = \sum \ln y$$

$$\sum X a_0 + \sum X^2 a_1 = \sum X \ln y$$

$$50 a_0 + 25,0 a_1 = 279,033712$$

$$25 a_0 + 13,5 a_1 = 136,592759 \text{ multiplicando por } -2$$

$$50 a_0 + 25 a_1 = 279,033712$$

$$\underline{-50 a_0 - 27 a_1 = -273,185518}$$

$$-2 a_1 = 5,848194$$

$$a_1 = -2,924097$$

por lo tanto:

$$a_0 = 7,042723$$

recordando que:

$$A = e^{a_0} = e^{7,042723} = 1\,144,499840$$

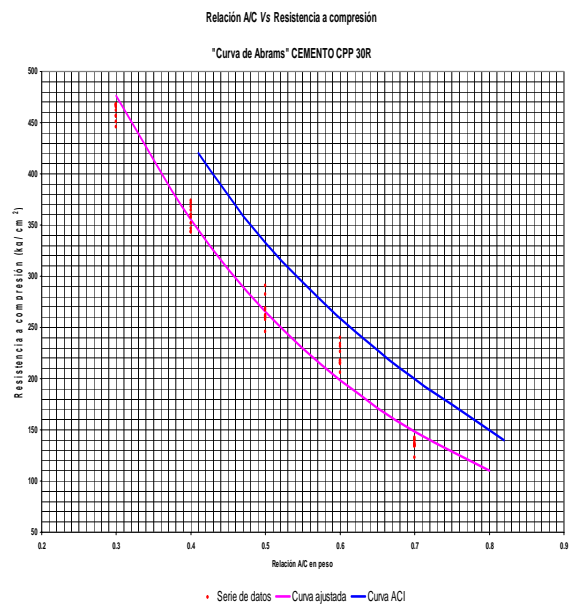
$$B = a_1 = -2,924097$$

Por lo tanto, la función representativa de la Curva de Abrams para cemento tipo CPP 30R resulta:

$$y = A e^{Bx}; \text{ entonces:}$$

$$y = 1\,144,499840 e^{-2,924097 X}$$

y cuya comparativa con la curva propuesta por el ACI puede observarse en la siguiente gráfica:



CEMENTO TIPO CPO 40R/ B

| | X | Y | X ² | ln Y | x ln Y |
|-----------|------------|--------------|------------------------|-------------------|-------------------|
| 1 | 0.3 | 474 | 0.09 | 6.161207 | 1.848362 |
| 2 | 0.3 | 472 | 0.09 | 6.156979 | 1.847094 |
| 3 | 0.3 | 496 | 0.09 | 6.206576 | 1.861973 |
| 4 | 0.3 | 465 | 0.09 | 6.142037 | 1.842611 |
| 5 | 0.3 | 488 | 0.09 | 6.190315 | 1.857095 |
| 6 | 0.3 | 452 | 0.09 | 6.113682 | 1.834105 |
| 7 | 0.3 | 496 | 0.09 | 6.206576 | 1.861973 |
| 8 | 0.3 | 475 | 0.09 | 6.163315 | 1.848995 |
| 9 | 0.3 | 479 | 0.09 | 6.171701 | 1.851510 |
| 10 | 0.3 | 488 | 0.09 | 6.190315 | 1.857095 |
| 11 | 0.4 | 419 | 0.16 | 6.037871 | 2.415148 |
| 12 | 0.4 | 408 | 0.16 | 6.011267 | 2.404507 |
| 13 | 0.4 | 439 | 0.16 | 6.084499 | 2.433800 |
| 14 | 0.4 | 403 | 0.16 | 5.998937 | 2.399575 |
| 15 | 0.4 | 411 | 0.16 | 6.018593 | 2.407437 |
| 16 | 0.4 | 389 | 0.16 | 5.963579 | 2.385432 |
| 17 | 0.4 | 416 | 0.16 | 6.030685 | 2.412274 |
| 18 | 0.4 | 415 | 0.16 | 6.028279 | 2.411312 |
| 19 | 0.4 | 407 | 0.16 | 6.008813 | 2.403525 |
| 20 | 0.4 | 418 | 0.16 | 6.035481 | 2.414192 |
| 21 | 0.5 | 321 | 0.25 | 5.771441 | 2.885721 |
| 22 | 0.5 | 342 | 0.25 | 5.834811 | 2.917406 |
| 23 | 0.5 | 332 | 0.25 | 5.805135 | 2.902568 |
| 24 | 0.5 | 356 | 0.25 | 5.874931 | 2.937466 |
| 25 | 0.5 | 371 | 0.25 | 5.916202 | 2.958101 |
| 26 | 0.5 | 342 | 0.25 | 5.834811 | 2.917406 |
| 27 | 0.5 | 340 | 0.25 | 5.828946 | 2.914473 |
| 28 | 0.5 | 352 | 0.25 | 5.863631 | 2.931816 |
| 29 | 0.5 | 337 | 0.25 | 5.820083 | 2.910042 |
| 30 | 0.5 | 350 | 0.25 | 5.857933 | 2.928967 |
| 31 | 0.6 | 263 | 0.36 | 5.572154 | 3.343292 |
| 32 | 0.6 | 291 | 0.36 | 5.673323 | 3.403994 |
| 33 | 0.6 | 268 | 0.36 | 5.590987 | 3.354592 |
| 34 | 0.6 | 282 | 0.36 | 5.641907 | 3.385144 |
| 35 | 0.6 | 265 | 0.36 | 5.579730 | 3.347838 |
| 36 | 0.6 | 237 | 0.36 | 5.468060 | 3.280836 |
| 37 | 0.6 | 257 | 0.36 | 5.549076 | 3.329446 |
| 38 | 0.6 | 251 | 0.36 | 5.525453 | 3.315272 |
| 39 | 0.6 | 271 | 0.36 | 5.602119 | 3.361271 |
| 40 | 0.6 | 263 | 0.36 | 5.572154 | 3.343292 |
| 41 | 0.7 | 217 | 0.49 | 5.379897 | 3.765928 |
| 42 | 0.7 | 210 | 0.49 | 5.347108 | 3.742976 |
| 43 | 0.7 | 208 | 0.49 | 5.337538 | 3.736277 |
| 44 | 0.7 | 229 | 0.49 | 5.433722 | 3.803605 |
| 45 | 0.7 | 212 | 0.49 | 5.356586 | 3.749610 |
| 46 | 0.7 | 207 | 0.49 | 5.332719 | 3.732903 |
| 47 | 0.7 | 212 | 0.49 | 5.356586 | 3.749610 |
| 48 | 0.7 | 205 | 0.49 | 5.323010 | 3.726107 |
| 49 | 0.7 | 213 | 0.49 | 5.361292 | 3.752904 |
| 50 | 0.7 | 207 | 0.49 | 5.332719 | 3.732903 |
| M | Σ X | Σ Y | Σ X² | Σ ln y | Σ X ln y |
| 50 | 25 | 17121 | 13.5 | 289.664771 | 142.759781 |

3.1.3 Cemento CPO 40R/ B

Resolviendo el sistema con los resultados específicos del cemento tipo CPO 40R/ B queda:

$$Ma_0 + \sum Xa_1 = \sum \ln y$$

$$\sum Xa_0 + \sum X^2 a_1 = \sum X \ln y$$

$$50 a_0 + 25,0 a_1 = 289,664771$$

$$25 a_0 + 13,5 a_1 = 142,759781 \text{ multiplicando por } -2$$

$$50 a_0 + 25,0 a_1 = 289,664771$$

$$-50 a_0 - 27,0 a_1 = -285,519562$$

$$-2 a_1 = 4,145209$$

$$a_1 = -2,072604$$

por lo tanto: $a_0 = 6,829597$

Recordando que:

$$A = e^{a_0} = e^{6,836439954} = 924,818036$$

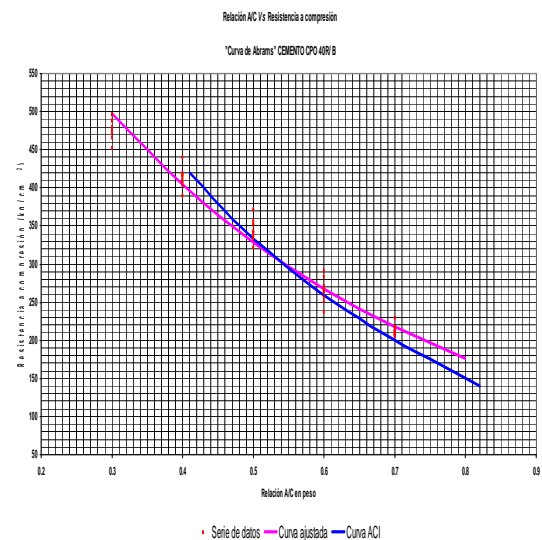
$$B = a_1 = -2,072604$$

Por lo tanto, la función representativa de la Curva de Abrams para cemento tipo CPO 40R/ B resulta:

$$y = A e^{Bx}; \text{ entonces:}$$

$$y = 924,818036 e^{-2,072604 X}$$

y cuya comparativa con la curva propuesta por el ACI puede observarse en la presente gráfica:

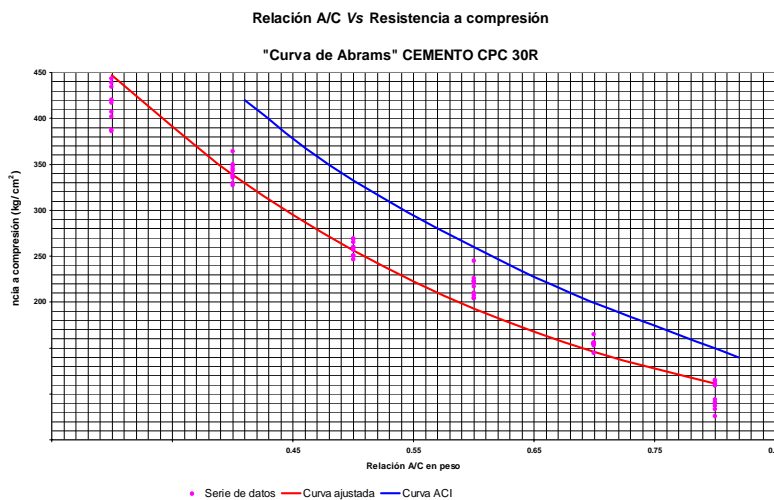


De lo anterior se puede concluir lo siguiente:

- La curva obtenida para cada tipo de cemento evaluado es única.
- Las curvas obtenidas son distintas a la propuesta por el ACI.

Respecto al objetivo particular del presente trabajo, con la interpretación que se hizo de los resultados obtenidos de laboratorio y el ajuste de curvas realizado, fue posible obtener una función aproximada que permite relacionar la resistencia mecánica a compresión del concreto hidráulico y su correspondiente relación A/C, para cada uno de los tres tipos de cemento evaluados, mismas que se presentan a continuación:

Cemento Portland Puzolánico (CPC 30R)



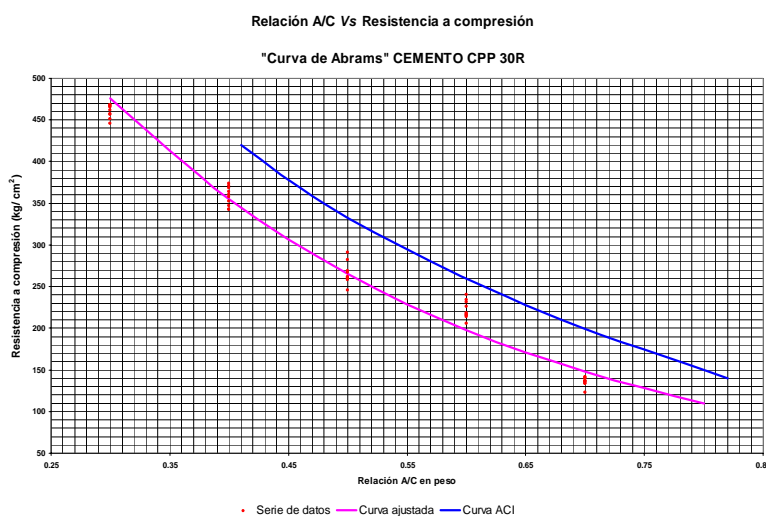
Función aproximada:

$$y = 1\,031,294409 e^{-2,789722 X}$$

Valores tabulados:

| A/C | f'c (kg/cm ²) |
|-----|---------------------------|
| 0.3 | 447 |
| 0.4 | 338 |
| 0.5 | 256 |
| 0.6 | 193 |
| 0.7 | 146 |
| 0.8 | 111 |

Cemento Portland Compuesto (CPP 30R)



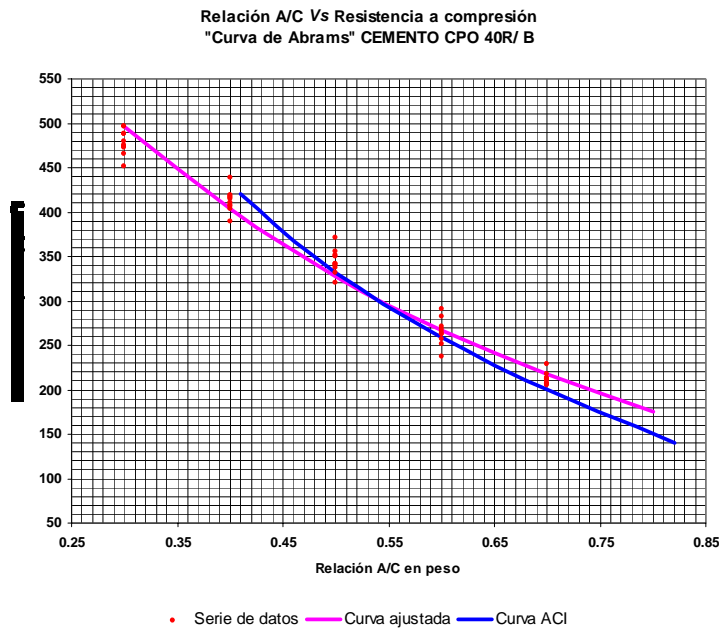
Función aproximada:

$$y = 1\,144,499840 e^{-2,924097 X}$$

Valores tabulados:

| A/C | f'c (kg/cm ²) |
|-----|---------------------------|
| 0.3 | 476 |
| 0.4 | 355 |
| 0.5 | 265 |
| 0.6 | 198 |
| 0.7 | 148 |
| 0.8 | 110 |

Cemento Portland Compuesto (CPO 40R/ B)



Función aproximada:

$$y = 931,1682252 e^{-2,072918025 X}$$

Valores tabulados:

| A/C | f'c (kg/ cm ²) |
|-----|-------------------------------|
| 0.3 | 497 |
| 0.4 | 404 |
| 0.5 | 328 |
| 0.6 | 267 |
| 0.7 | 217 |
| 0.8 | 176 |

Derivado de lo anterior, es posible llevar a cabo la validación de la hipótesis.

3.2 VALIDACIÓN DE LA HIPÓTESIS

Hipótesis.

La relación entre la resistencia a compresión simple y la proporción A/C sugerida por el American Concrete Institute a través de su comité 211.1, no corresponde a los tres tipos de cemento hidráulico comúnmente ofertados en el Distrito Federal, consecuentemente, el empleo de dichas relaciones conllevan una variación que puede resultar significativa, en el diseño de una mezcla de concreto, tanto a nivel de investigación, como de uso práctico en la fabricación de un elemento estructural, lo que implica una variación en costo y por tanto en precio.

Validación.

Como resultado de este trabajo de investigación, podemos confirmar que para una determinada resistencia a compresión del concreto, la correspondiente relación A/C difiere del propuesto por el ACI, resultando ser ésta, distinta para cada tipo de cemento portland evaluado. Ahora bien, considerando que en su mayoría los proyectos de diseño y dosificación en pequeña escala están basados en la curva propuesta por el ACI, sin importar el tipo de cemento utilizado, observamos que la resistencia (sin considerar variaciones estadísticas de calidad en la fabricación del concreto), resulta por debajo de la esperada, lo que invariablemente (sin el uso de aditivos) implica un aumento en la cantidad de cemento necesaria para obtener la resistencia a compresión simple requerida.

Por lo tanto, se cumple la hipótesis.

CONCLUSIONES.

La relación *A/C* versus su correspondiente resistencia a compresión simple que propone el American Concrete Institute a través de su comité 211.1, difiere de las obtenidas para cada uno de los tres tipos de cemento portland evaluados en el presente trabajo: CPC 30R, CPP 30R y CPO 40R/ B y que están considerados en la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-1999, por lo que la relación entre la proporción *A/C* y su correspondiente resistencia a compresión simple está en función del tipo de cemento portland utilizado.

Para cualquier relación *A/C*, los cementos mexicanos tipo CPP 30R y CPC 30R presentan una resistencia menor a compresión que la considerada por el ACI.

En el caso del cemento mexicano tipo CPO 40R/ Blanco, su resistencia a compresión es mayor respecto a la expresada por el ACI para relaciones *A/C* por arriba de 0,53; sin embargo, esta tendencia se invierte para relaciones *A/C* por debajo de ésta. Para el menor valor tabulado de *A/C* en la curva propuesta por el ACI, la diferencia entre ambas curvas es de 20 kg/cm².

Se puede concluir que para relaciones *A/C* mayores a 0,45, el cemento CPO 40R/ Blanco tiene una mayor resistencia mecánica a compresión respecto a los otros dos cementos, cercana a los 70 kg/cm².

La diferencia en la resistencia a compresión obtenida para una misma relación *A/C* para los tres tipos de cemento evaluados, tiende a reducirse conforme disminuye la relación *A/C*.

Respecto a la corrección por temperatura de curado, partiendo del hecho que distintos especímenes de una misma mezcla de concreto fueron curados por inmersión en agua saturada con la misma concentración de cal para evitar el fenómeno de lixiviación, a temperatura de 18 y 24°C, la variación en la resistencia a compresión del concreto no resulta significativa al ser menor de 1,56%, ya que existentes otras variantes que hacen que la resistencia entre especímenes fabricados con la misma mezcla de concreto varíen hasta en un 10%, por ejemplo: naturaleza heterogénea del concreto, grado de compactación, etc.

De observaciones hechas a distintas fotografías tomadas a especímenes de prueba ya fallados, se puede inferir que algunas partículas de agregado grueso, no tuvieron la resistencia adecuada para soportar los esfuerzos inducidos al concreto, ya que en ellas se observa rotura de los mismos y no una falla de adherencia entre estos y la pasta de cemento. Lo anterior se verificó en concretos con resistencia mayor a los 400 kg/ cm².

De la bibliografía consultada, se observa que algunas curvas de ajuste obtenidas para relacionar la Curva de Abrams son incorrectas, al considerarlas polinomiales y no exponenciales. El error se debe al ajustar la curva utilizando el programa de Excel, buscando que la curva arroje el menor error cuadrado (R^2), lo cual, desde el punto de vista de ingeniería es incorrecto, ya que la función tiene una distribución exponencial y en segunda, desde el punto de vista matemático, el ajuste polinomial para este caso en específico, es un sistema más inestable.

Por otra parte, podemos considerar que el uso de cemento CPO 40R para fabricar mezclas de concreto de baja resistencia mecánica a compresión, ofrece menor consumo de cemento, lo que implica un ahorro de cemento de casi un 20% en volumen, respecto a usar los tipos CPP o CPC para relaciones *A/C* mayores a 0,60; sin embargo, conforme decrece la relación *A/C*, la resistencia obtenida a compresión con los diferentes cementos evaluados tiende a ser menor, lo que propicia que el costo por utilizar cemento tipo CPO 40R/ Blanco se incremente.

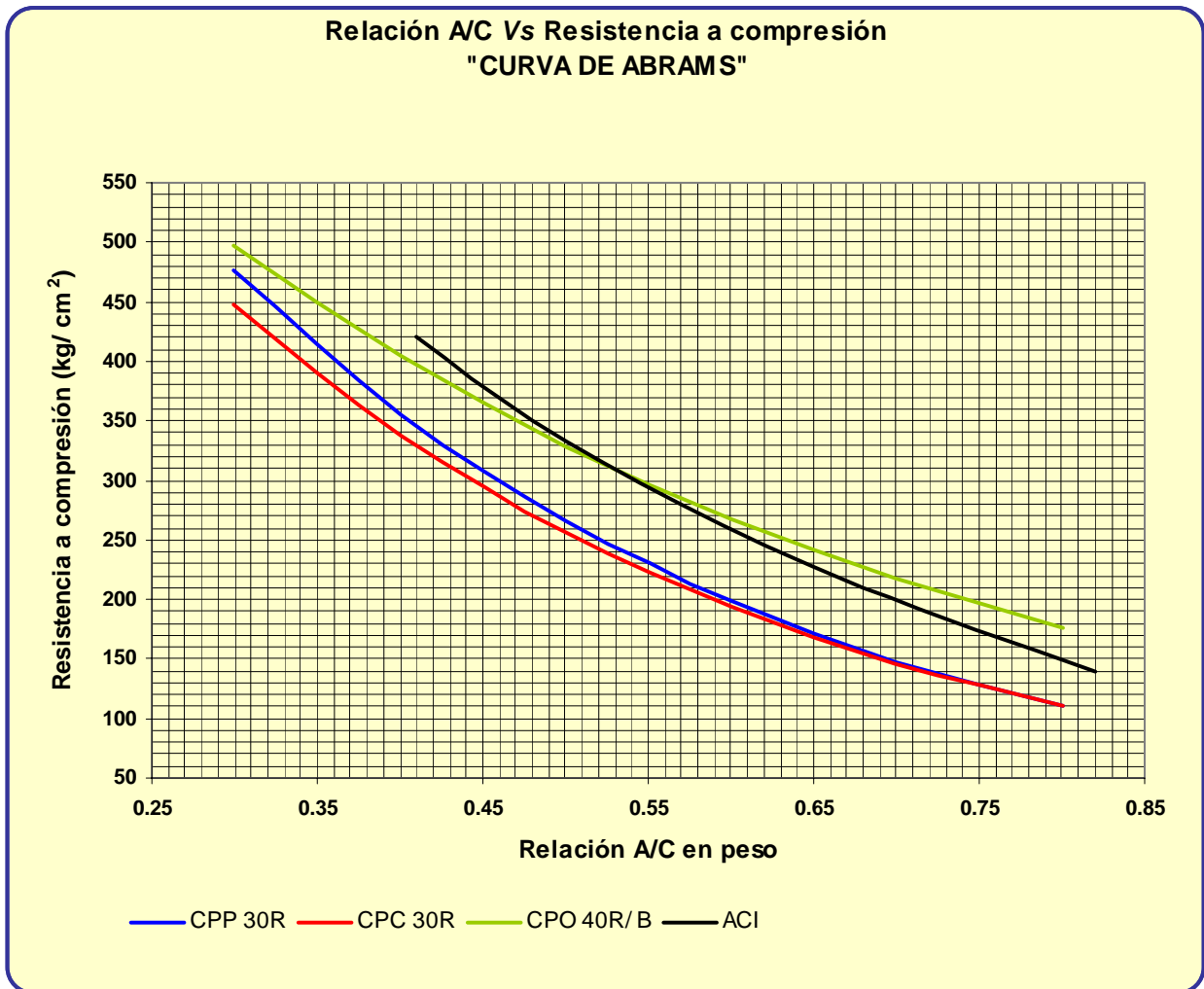
La elección de un determinado tipo de cemento no debe estar en función de la resistencia a compresión que se quiere obtener. Como se observa en la gráfica, la diferencia de resistencia entre ellos es relativamente pequeña, por lo que su elección debe hacerse en función de otras propiedades del cemento, tales como calor de hidratación, resistencia al ataque de sulfatos, etc.

Es de utilidad el divulgar los resultados obtenidos en el presente trabajo por lo siguiente:

- Es posible optimizar el consumo de cemento de manera racional y no de manera empírica.

- El costo de fabricación para concretos diseñados con estos nuevos parámetros sin considerar el uso de aditivos se incrementa, debido a que se requiere una mayor cantidad de cemento para obtener la resistencia a compresión deseada.

Por último, el resultado del presente trabajo de investigación se puede expresar en la siguiente gráfica:



ANEXO A

**PRUEBAS FÍSICAS A
LOS AGREGADOS
PÉTREOS**



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERÍA MAESTRÍA EN CONSTRUCCIÓN

Análisis Granulométrico de Agregados Pétreos

Proyecto: Revisión y en su caso replanteamiento de la
Curva de Abrams en algunos de los tipos de cemento
establecidos en la NMX-C-414-ONCCE-1999.

Material: Grava

Tipo muestra: combinada

reducida; muestreo en almacén

Prueba No. definitiva

Fecha: 10 de Septiembre 2005

Banco: Municipio de Huixquilucan, Estado de México

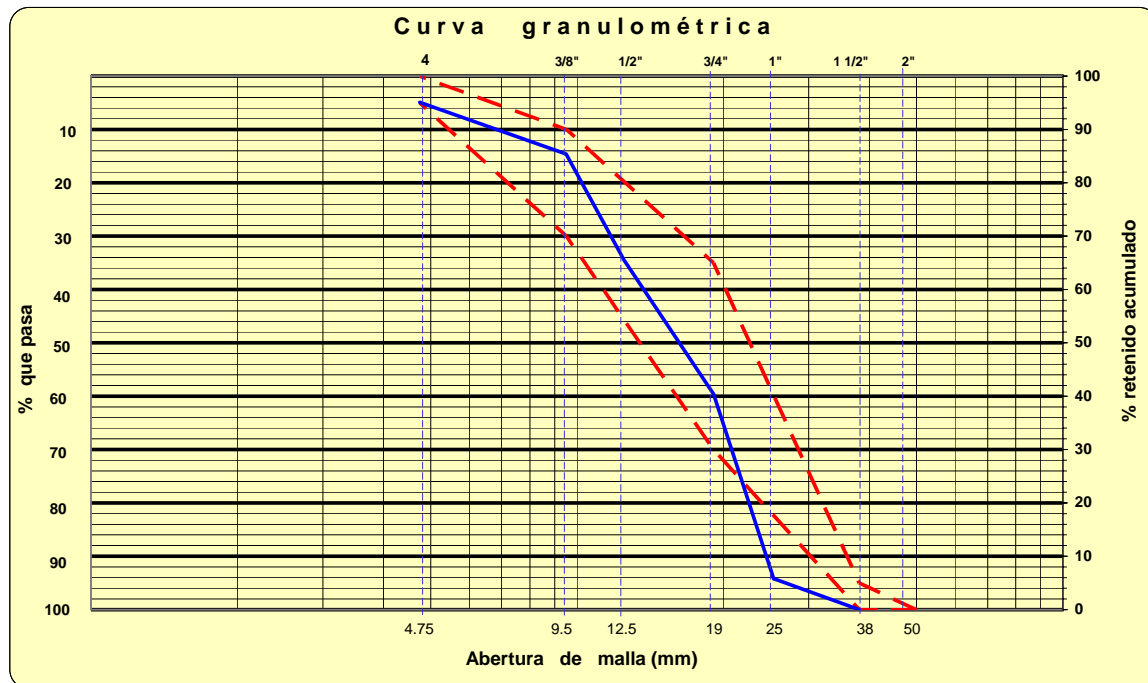
Peso inicial: 16080.0 gramos

| Abertura de la malla | | Peso retenido (gramos) | Retenido parcial % | Retenido acumulado % |
|----------------------|--------|------------------------|---------------------------------|----------------------|
| ASTM | NOM | | | |
| 1 1/2" | G 38 | 0.0 | 0.0 | 0.0 |
| 1" | G 25 | 936.0 | 5.8 | 5.8 |
| 3/4" | G 19 | 5562.0 | 34.6 | 40.4 |
| 1/2" | G 12.5 | 4036.0 | 25.1 | 65.5 |
| 3/8" | G 9.5 | 3206.0 | 19.9 | 85.4 |
| No. 4 | G 4.75 | 1560.0 | 9.7 | 95.1 |
| Charola | | 774.0 | 4.8 | 99.9 |
| Material perdido (g) | | 6.0 | Tamaño nominal: <u>38.00</u> mm | |

El muestreo del agregado se hizo conforme a la norma mexicana NMX-C-30.

Su reducción se hizo conforme a la norma mexicana NMX-C-170.

La prueba de granulometría se realizó conforme a la norma mexicana NMX-C-077.



Observaciones: Parte del material retenido en la malla de 1" y 3/4" es pedacería de concreto hidráulico

De la curva granulométrica se determina que el material no posee en cantidad suficiente partículas de 1".



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERÍA MAESTRÍA EN CONSTRUCCIÓN

Análisis Granulométrico de Agregados Pétreos

Proyecto: "Revisión y en su caso replanteamiento de la Curva de Abrams en algunos de los tipos de cemento establecidos en la NMX-C-414-ONCCE-1999.

Banco: _____

Peso inicial: 999.0 gramos

Material: Arena

Tipo muestra: combinada
reducida; muestreo en almacén

Prueba No. definitiva

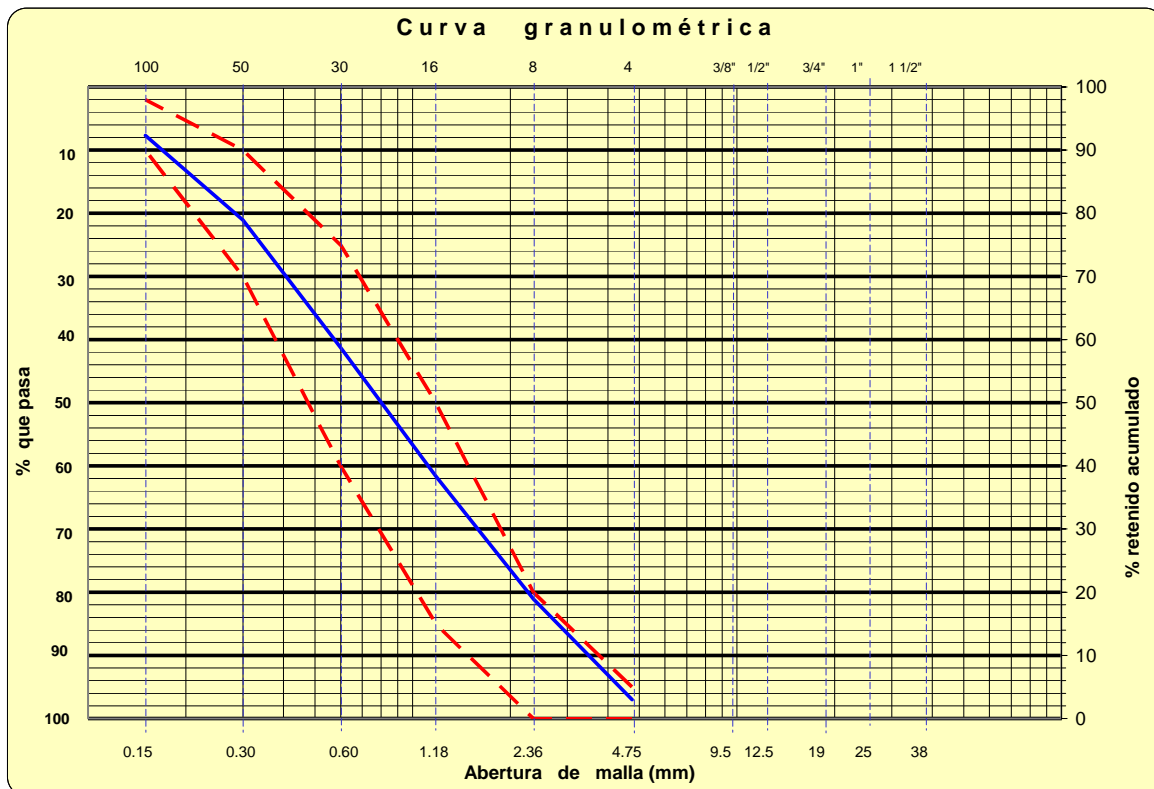
Fecha: 12 de Julio 2005

| Abertura de la malla | | Peso retenido (gramos) | Retenido parcial % | Retenido acumulado % |
|----------------------|--------|------------------------|-------------------------------|----------------------|
| ASTM | NOM | | | |
| No. 4 | G 4.75 | 28.0 | 2.8 | 2.8 |
| No. 8 | G 2.36 | 163.0 | 16.3 | 19.1 |
| No. 16 | G 1.18 | 198.0 | 19.8 | 38.9 |
| No. 30 | G 0.60 | 204.0 | 20.4 | 59.3 |
| No. 50 | G 0.30 | 200.0 | 20.0 | 79.3 |
| No. 100 | G 0.15 | 131.0 | 13.1 | 92.4 |
| Charola | | 74.0 | 7.4 | 99.8 |
| Material perdido (g) | | 1.0 | Modulo de finura: 2.92 | |

El muestreo del agregado se hizo conforme a la norma mexicana NMX-C-30.

Su reducción se hizo conforme a la norma mexicana NMX-C-170.

La prueba de granulometría se realizó conforme a la norma mexicana NMX-C-077.



Observaciones: El muestreo del agregado se hizo conforme a la norma mexicana NMX-C-30. Su reducción se hizo conforme a la norma mexicana NMX-C-170. La prueba de granulometría se realizó conforme a la norma mexicana NMX-C-077.



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERÍA MAESTRÍA EN CONSTRUCCIÓN

Masas Volumétricas, específicas y absorción de agregados pétreos

Proyecto: "Revisión y en su caso replanteamiento de la Curva de Abrams en algunos de los tipos de cemento establecidos en la NMX-C-414-ONCCE-1999.

Banco: Municipio de Huixquilucan, Estado de México.

Material: Arena

Tipo muestra: Combinada reducida; muestreo en almacén

Prueba No. DEFINITIVA

Fecha: 10 de Septiembre 2005

MASAS VOLUMÉTRICAS:

Mr = Masa del recipiente: 1882 g.
Vr = Volumen del recipiente (dm³): 2.7699
Mm = masa de la muestra de agregado (g)

| Masa volumétrica suelta: | |
|-----------------------------|-----------------------|
| Mr + Mm (1): | 5828 g. |
| Mr + Mm (2): | 5820 g. |
| Mr + Mm (3): | 5814 g. |
| promedio: | 5821 g. |
| Mm_{prom.} = | $\frac{3939}{g}$ |
| P.V.S. = | $\frac{1422}{kg/m^3}$ |

| Masa volumétrica compacta: | |
|-----------------------------|-----------------------|
| Mr + Mm (1): | 6036 g. |
| Mr + Mm (2): | 6058 g. |
| Mr + Mm (3): | 6044 g. |
| promedio: | 6046 g. |
| Mm_{prom.} = | $\frac{4164}{g}$ |
| P.V.C. = | $\frac{1503}{kg/m^3}$ |

Nota: La masas volumétrica compacta y suelta se obtuvieron con el material en estado seco.

MASAS ESPECÍFICAS:

Masa específica saturada superficie seca (Pe_{sss}):

$$P_{sss} = \frac{500}{214} \text{ g/cm}^3 \qquad P_{esss} = \underline{2.34} \text{ kg/dm}^3$$

Masa específica seca (Pe_s):

$$P_{es} = \frac{P_{esss}}{1 + Abs}; \qquad P_{es} = \frac{2.340}{1.0870} = \underline{2.15} \text{ kg/dm}^3$$

ABSORCIÓN:

$$P_{sss} = \frac{275}{253} \text{ g.} \qquad Abs (\%) = \underline{8.70}$$

Nota:
 El uso que se le dará a los resultados de esta prueba es para la dosificación de concreto hidráulico; sin embargo, se procedió a secar el material antes de ponerlo a saturar, debido a que al estar protegido dentro del almacén temporal, cuando se fabriquen las mezclas de prueba, la arena presentará un estado parcialmente seco.

ANEXO B

DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO HIDRÁULICO

B. DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO HIDRÁULICO UTILIZANDO EL MÉTODO SUGERIDO POR EL AMERICAN CONCRETE INSTITUTE A TRAVÉS DE SU COMITÉ 211.1 “Proporcionamiento de mezclas concreto normal, pesado y masivo”.

B.1 PROYECTO DE MEZCLA INICIAL (PMI)

a) Datos concreto a fabricar:

$$f'c = 250 \text{ kg/cm}^2; \text{ revenimiento: } 10\text{cm}$$

b) Datos de los agregados:

| | T.N. | M.F. | Abs (%) | PVS (kg/m ³) | PVC (kg/m ³) | Pesss (kg/dm ³) | Pes (kg/dm ³) | H (%) |
|--------------|-------|------|---------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------|---------------------------|-------|
| Grava | 38 mm | - - | 4,26 | 1367 | 1424 | 2,38 | 2,28 | 0,90 |
| Arena | - - | 2,92 | 8,70 | 1422 | 1503 | 2,34 | 2,15 | 5,00 |

c) Obtención de la cantidad de agua y volumen de aire atrapado por metro cúbico de concreto:

En función del Tamaño Nominal de 38 mm del agregado grueso y considerando el fabricar un concreto sin aire incluido, para obtener un revenimiento de 10cm la tabla 6.3.3 del método multicitado sugiere:

$$\text{Agua} = 181 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3};$$

| Tabla 6.3.3 Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revenimientos y tamaños máximos nominales de agregado | | | | | | |
|---|------|-------|-----|-----|-----|-----|
| Revenimiento, cm | 9.5* | 12.5* | 19* | 25* | 38* | 50* |
| Concreto sin aire incluido | | | | | | |
| 2.5 a 5.0 | 207 | 199 | 190 | 179 | 166 | 154 |
| 7.5 a 10 | 228 | 216 | 205 | 193 | 181 | 169 |
| 15.0 a 17.5 | 243 | 228 | 216 | 202 | 190 | 178 |
| Cantidad aproximada de aire en concreto sin aire incluido, porciento | 3.0 | 2.5 | 2.0 | 1.5 | 1.0 | 0.5 |

Tabla resumida considerando TN = 38 mm, rev. = 10 cm y concreto sin aire incluido.

mientras que el volumen de aire atrapado será:

$$\text{Aire} = \frac{1\%}{\text{m}^3}$$

d) Obtención de la cantidad de cemento:

La correspondencia entre la relación agua/cemento y la resistencia a compresión del concreto propuesta por el ACI en la tabla 6.3.4 (a) indica que, para obtener una $f'c = 250 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$ se requiere una

relación $\frac{A}{C} = 0,614$. Despejando de ésta la cantidad de cemento, tendremos:

$$C = \frac{A}{0,614} = \frac{181 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{0,614} = 294,788 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}; \text{ considerando que el cemento utilizado tiene un peso específico}$$

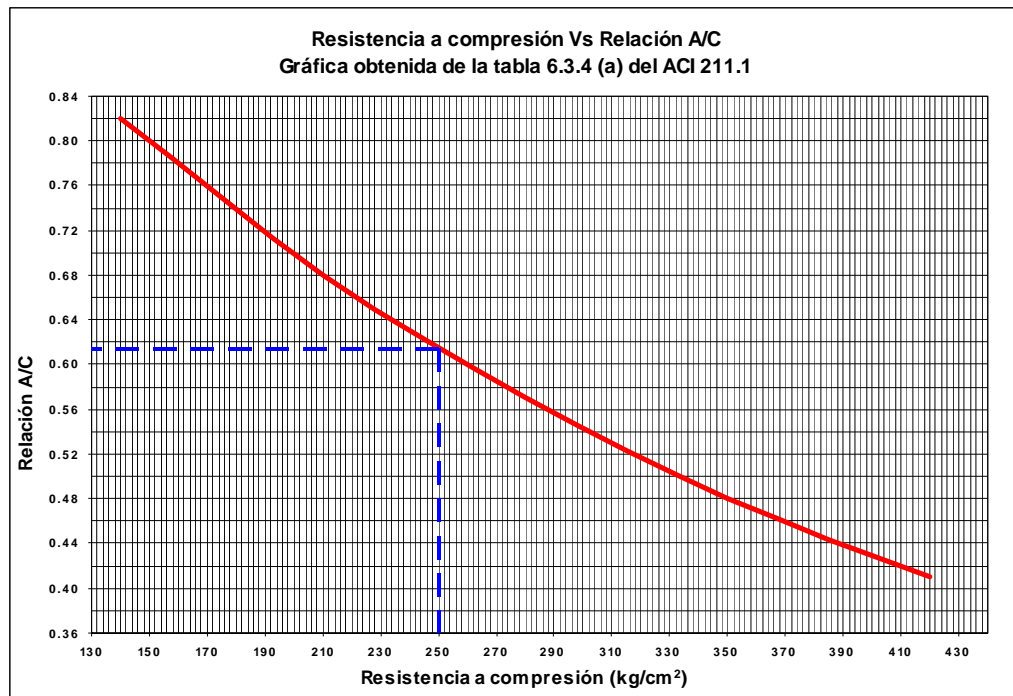
$Pe=3,14 \text{ kg/dm}^3$, podemos calcular el volumen de cemento por m^3 de concreto:

$$\text{Vol} = \frac{P}{P_e} = \frac{294,788 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{3,14 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}} = 93,882 \frac{\text{dm}^3}{\text{m}^3}$$

Tabla 6.3.4 (a) Correspondencia entre la relación agua/cemento y la resistencia a compresión del concreto (tabla resumida).

| Resistencia a la compresión a los 28 días kg/ cm ² * | Relación agua/cemento por peso | |
|--|--------------------------------|----------------------------|
| | Concreto sin aire incluido* | Concreto con aire incluido |
| 420 | 0.41 | - |
| 350 | 0.48 | 0.40 |
| 280 | 0.57 | 0.48 |
| 210 | 0.68 | 0.59 |
| 140 | 0.82 | 0.74 |

* Los valores son estimados para resistencias promedio de concreto que contenga no mas de 2 porciento de aire atrapado.



e) Obtención de la cantidad de agregado pétreo:

De la tabla 6.3.6 del método propuesto por el ACI, se puede determinar que la cantidad de grava esta dada por la expresión: $G = g' \text{ PVC}$, donde el factor g' está en función del T.N. de la grava y el modulo de finura de la arena.

Para el T.N. y modulo de finura que presentan nuestros agregados tendremos un factor:

$$g' = 0,698.$$

por lo tanto, la cantidad de grava será:

$$G = g' \text{ PVC} = 0,698 \times 1424 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 993,952 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}; \text{ en volumen tendremos:}$$

$$\text{Vol} = \frac{p}{\text{pes}} = \frac{993,952 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{2,28 \frac{\text{kg}}{\text{dm}^3}} = 435,944 \frac{\text{dm}^3}{\text{m}^3}$$

| Tabla 6.3.6 Volumen de agregado grueso por volumen unitario de concreto | | | | |
|---|--|------|------|------|
| Tamaño máximo nominal del agregado en mm | Volumen de agregado grueso varillado en seco, por volumen unitario de concreto para distintos módulos de finura de arena | | | |
| | 2.4 | 2.6 | 2.8 | 3.0 |
| 9.5 (3/8") | 0.50 | 0.48 | 0.46 | 0.44 |
| 12.5 (1/2") | 0.59 | 0.57 | 0.55 | 0.53 |
| 19 (3/4") | 0.66 | 0.64 | 0.62 | 0.60 |
| 25 (1") | 0.71 | 0.69 | 0.67 | 0.65 |
| 37.5 (1 1/2") | 0.75 | 0.73 | 0.71 | 0.69 |
| 50 (2") | 0.78 | 0.76 | 0.74 | 0.72 |
| 75 (3") | 0.82 | 0.80 | 0.78 | 0.76 |
| 150 (6") | 0.87 | 0.85 | 0.83 | 0.81 |

(Tabla resumida).

Con los datos anteriores es posible de manera teórica dosificar un metro cúbico de concreto (Ph).

| PMI | Vol (dm3) | Abs | Psss (kg) | H | Ph (kg) | F | P'h (kg) |
|-------------------|-----------|--------|-----------|-------|-----------|---------|----------|
| Cemento | 93,882 | - - - | 294,789 | - - - | 294,789 | 25/1000 | 7,370 |
| Grava | 435,944 | 0,0426 | 1037,547 | 0,009 | 1 004,109 | | 25,103 |
| Arena | 279,174 | 0,0870 | 653,267 | 0,050 | 631,031 | | 15,776 |
| Aire | 10,000 | - - - | - - - | - - - | - - - | | - - - |
| Agua | 181,000 | - - - | 181,000 | - - - | 236,674 | | 5,917 |
| Masa vol. teórica | 1 000,000 | | 2 166,603 | | 2 166,603 | | 54,166 |

Con la dosificación momentánea se elaboró el proyecto de mezcla inicial (PMI) para un volumen de 25 dm³ (P'h), con la finalidad de tener dos especímenes cilíndricos de 15 x 30cm para ensayar a 7 días de edad y predecir su resistencia mecánica a compresión simple, así como para obtener el volumen real de aire atrapado, masa volumétrica del concreto fresco y otras propiedades cualitativas como revenimiento, sangrado, consistencia y relación grava-arena.

Proyecto de mezcla inicial (PMI)

| PMI | P'h (kg) | P's (kg) | P'sss (kg) |
|------------------|----------|----------|------------|
| Cemento | 7,370 | 7,370 | 7,370 |
| Grava | 25,103 | 24,879 | 25,939 |
| Arena | 15,776 | 15,025 | 16,332 |
| Agua | 5,917 | 6,892 | 4,525 |
| Masa Volumétrica | 54,166 | 54,166 | 54,166 |

Elaborada la mezcla PMI, se realizó la prueba de revenimiento, obteniendo 7cm. Utilizando la recomendación empírica para corregir el revenimiento, misma que propone: "considerar 2 kg de agua y su correspondiente cantidad de cemento para no alterar la relación A/C, por cada cm faltante de revenimiento por metro cúbico de concreto"¹. Se procedió a corregir el revenimiento de la siguiente manera:

Cantidad de agua por corrección:

$$\frac{A}{C} = 0,614 \Rightarrow \frac{2 \text{ kg}}{\text{cm} \cdot \text{m}^3} \times 3 \text{ cm} \times 0,025 \text{ m}^3 = 0,150 \text{ kg};$$

¹ León Fernández Orozco†. Laboratorio de Materiales de Construcción y Control de Calidad. 3ª edición año 2000, Universidad Autónoma Metropolitana, pág. 62.

Cantidad de cemento por corrección:

$C = \frac{A}{0,614} = \frac{0,150 \text{ kg}}{0,614} = 0,244 \text{ kg}$; es decir, al diseño anterior se le añadió 150ml de agua y 244 g de cemento, quedando la dosificación ajustada como sigue:

B.2 MEZCLA DE AJUSTE UNO (MA-1). Proyecto de mezcla inicial corregida por revenimiento.

| MA-1 | P'h (kg) | P's (kg) | P'sss (kg) |
|--------------------|----------|----------|------------|
| Cemento | 7,614 | 7,614 | 7,614 |
| Grava | 25,103 | 24,879 | 25,939 |
| Arena | 15,776 | 15,025 | 16,332 |
| Agua | 6,067 | 7,042 | 4,675 |
| 25 dm ³ | 54,560 | 54,560 | 54,560 |

Características:

Revenimiento: 9,0 cm

PVc = 2 186,657 kg/m³

Vol. de aire = 2%

Relación A/C = 0,614

Relación grava-arena: la considero buena, ya que al enrasar la mezcla con una cuchara de albañil, se

cubrió la grava con facilidad.

Consideramos que el revenimiento no varió mucho debido al tiempo que tardó en realizarse la corrección de la mezcla y la prueba. De esta mezcla se elaboraron dos cilindros de 15x30 cm para su ensaye a compresión a la edad de 7 días. Hecha la mezcla, se procedió al cálculo de su dosificación base real.

B.3 DOSIFICACIÓN BASE REAL

| | P'h (kg) | Correcciones (kg) | P'h (kg) | Factor | Ph (kg) | Ps (kg) | P'sss (kg) |
|---------|----------|-------------------|----------|-----------------------------|-----------|-----------|------------|
| Cemento | 7,370 | + 0,244 | 7,614 | $\frac{2\ 186,656}{54,560}$ | 305,154 | 305,154 | 305,154 |
| Grava | 25,103 | - - - | 25,103 | | 1 006,078 | 997.104 | 1 039,581 |
| Arena | 15,776 | - - - | 15,776 | | 632.271 | 602,163 | 654,551 |
| Agua | 5,917 | +0,150 | 6,067 | | 243,153 | 282,235 | 187,370 |
| | 54,166 | | 54,560 | | 2 186,656 | 2 186,656 | 2 186,656 |

| | Vol (dm ³) | P'sss (kg/ dm ³) | Correcciones (kg) | P'sscc (kg) | P'sscc (kg) | Vol (dm ³) |
|---------|------------------------|------------------------------|-------------------|-------------|-------------|------------------------|
| Cemento | 97,183 | - - - | - - - | 305,154 | - - - | 97,183 |
| Grava | 436,799 | 2,38 | 1,300 | 1 040,881 | 2,383 | 436,799 |
| Arena | 279,723 | 2,34 | 19,775 | 674,326 | 2,411 | 279.723 |
| Aire | 20,000 | - - - | - - - | - - - | - - - | 20,000 |
| Agua | 187,370 | - - - | - 21,075 | 166,295 | - - - | 166,295 |
| | 1021,075 | | | 2 186,656 | | 1000,000 |

| | Absc | Ps (kg) | Ph (kg) | P'h (kg) |
|---------|-------|-----------|-----------|----------|
| Cemento | - - - | 305,154 | 305,154 | 7,629 |
| Grava | 0,044 | 997,012 | 1 005,935 | 25,150 |
| Arena | 0,120 | 602,077 | 632,181 | 15,805 |
| Agua | - - - | 282,413 | 243,336 | 6,083 |
| | | 2 186,656 | 2 186,656 | 54,666 |

B.4 MEZCLA DE PRUEBA UNO (MP-1)

| MP-1 | P'h (kg) | P's (kg) | P'sss (kg) |
|--------------------------|----------|----------|------------|
| Cemento | 7,629 | 7,629 | 7,629 |
| Grava | 25,150 | 24,926 | 26,023 |
| Arena | 15,805 | 15,052 | 16,858 |
| Agua | 6,083 | 7,060 | 4,157 |
| Vol = 25 dm ³ | 54,667 | 54,667 | 54,667 |

Características:

Revenimiento: 9,5 cm

PVc = 2 171,822 kg/ m³

Relación A/C = 0,545

Vol. de Aire = 2,0%

Relación grava-arena: la considero buena, ya que al enrasar la mezcla con una cuchara de albañil, se cubrió la grava con facilidad. De esta mezcla se elaboraron dos especímenes cilíndricos de 15x30 cm para su ensaye a compresión simple a la edad de 7 días y predecir su resistencia a 28 días.

B.5 MEZCLA DE PRUEBA DOS (MP-2)

Posteriormente se procedió a reproducir la misma mezcla de prueba 1, llamándola **Mezcla de Prueba 2 (MP-2)**, con la intención de corroborar los resultados obtenidos con la anterior. Debido al cambio de humedad en los agregados, la dosificación resultante fue:

| | Ps (kg) | H | Ph (kg) | P'h (kg) | P's (kg) | P'sss (kg) |
|---------|-----------|--------|-----------|----------|----------|------------|
| Cemento | 305,154 | - - - | 305,154 | 7,629 | 7,629 | 7,629 |
| Grava | 997,012 | 0,0104 | 1 007,381 | 25,185 | 24,925 | 26,022 |
| Arena | 602,077 | 0,0603 | 638,382 | 15,960 | 15,053 | 16,858 |
| Agua | 282,413 | - - - | 235,739 | 5,893 | 7,060 | 4,158 |
| | 2 186,656 | | 2 186,656 | 54,667 | 54,667 | 54,667 |

Características:

Revenimiento: 10,5cm (variación de +1,0 cm respecto al revenimiento anterior).

PVc = 2 184,323 kg/ m³ (variación menor al 1% respecto al peso anterior).

Vol. de Aire = 2,0%

Relación A/C = 0,545

Relación grava-arena: la considero buena, ya que al enrasar la mezcla con una cuchara de albañil, se cubrió la grava con facilidad. Con esta mezcla se elaboraron dos especímenes cilíndricos de 15x30 cm para ensayarlos a compresión simple a la edad de 7 días y comparar los resultados con la mezcla de prueba anterior (MP-1).

Al ser muy parecidos los resultados de estas mezclas de concreto (MP-1 y MP-2), se procedió a diseñar la mezcla de prueba tres (MP-3) para una relación agua-cemento de 0,28. Para ello, únicamente se varió la cantidad de agua y cemento de la MP-2, dejando fijas las cantidades de grava y arena. De lo anterior resultó:

B.6 MEZCLA DE PRUEBA TRES (MP-3) RELACIÓN A/C = 0,28

| MP-3 | P'h (kg) | P's (kg) | P'sss (kg) |
|--------------------|----------|----------|------------|
| Cemento | 14,745 | 14,745 | 14,745 |
| Grava | 25,185 | 24,925 | 26,022 |
| Arena | 15,959 | 15,052 | 16,858 |
| Agua | 5,894 | 7,061 | 4,158 |
| 25 dm ³ | 61,783 | 61,783 | 61,783 |

Revenimiento: cero

PVc: no se pudo obtener por el alto volumen de huecos que presenta la mezcla, imposible de reducir mediante la compactación manual.

Vol. de Aire = No se pudo obtener por las mismas razones.

Relación A/C = 0,282

Relación G/A: regular, se alcanza a cubrir apenas la grava al pasar la cuchara sobre la mezcla con muchas pasadas. De esta mezcla también se elaboraron dos especímenes cilíndricos de 15x30 cm para su ensaye a compresión a la edad de 7 días y predecir su resistencia a 28 días. La compactación de dichos especímenes fue con ayuda de una mesa vibratoria.

Los resultados a compresión de los especímenes se muestran a continuación:

| | MA-1 | | MP-1 | | MP-2 | | MP-3 | |
|----------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | m-1 | m-2 | m-1 | m-2 | m-1 | m-2 | m-1 | m-2 |
| $\phi 1$ | 15,0 | 15,0 | 15,0 | 15,1 | 15,1 | 15,0 | 15,1 | 15,0 |
| $\phi 2$ | 14,9 | 15,1 | 15,1 | 15,0 | 15,1 | 15,0 | 15,1 | 15,0 |
| h | 30,1 | 30,1 | 30,1 | 30,1 | 30,0 | 30,2 | 30,1 | 30,1 |
| peso (g) | 11 639 | 11 644 | 11 521 | 11 605 | 11 463 | 11 619 | 11 691 | 11 731 |
| Carga (kg) | 30 600 | 30 400 | 27 000 | 28 000 | 28 200 | 27 000 | 59200 | 59 800 |
| $f'c_7$ (kg/cm ²) | 174 | 171 | 152 | 157 | 157 | 153 | 331 | 338 |
| $f'c_{28}$ (kg/cm ²) | 259 | 256 | 232 | 238 | 238 | 233 | 406 | 411 |

De la tabla anterior podemos observar que la resistencia a compresión de las mezclas de prueba 1 y 2 son aproximadas y que aunado a la semejanza de su masa volumétrica en estado fresco y contenido de aire, podemos decir que son homogéneas.

De manera teórica la relación A/C para la mezcla MA-1 corresponde a 0,614; sin embargo, su resistencia a compresión simple resulta mayor que la obtenida de las mezclas de prueba 1 y 2, correspondiendo a ambas una relación A/C de 0.545. Si consideramos la absorción de los agregados obtenida de la dosificación base real, en lugar de la obtenida en primer instancia de las pruebas de laboratorio de los agregados, encontramos que la relación A/C corresponde a 0,542 en lugar de 0,614, por lo que su resistencia debe ser ligeramente mayor que la obtenida con 0,545, resultado que se comprueba en la tabla.

Para la predicción de resistencia a compresión simple a 28 días a partir de la de 7 días se utilizó la expresión matemática:

$$f_{28} = 1,78f_7 - 0,00167f_7^2 ; \text{ donde:}$$

f_{28} = resistencia esperada a compresión simple a 28 días en kg/cm²

f_7 = resistencia obtenida por ensaye a compresión simple a 7 días en kg/cm²

La expresión se obtuvo de una investigación² realizada con una muestra de 296 especímenes cilíndricos de 15x30 cm, considerando cemento tipo I, agregado andesítico y curado normal; factores en nada parecidos a los utilizados: cemento tipo CPC-30R, agregado basáltico y curado por inmersión a una temperatura promedio de 17° centígrados. No obstante, esta predicción solo se consideró como un parámetro, sin importar su precisión.

² León Fernández Orozco†, Laboratorio de Materiales de Construcción, Tomo 1 pág.94 y 95. UAM-Azcapotzalco, México, D.F. año 2000.

ANEXO C

DISEÑO DE MEZCLAS DE
CONCRETO DEFINITIVAS
PARA CADA RELACIÓN
A/C Y TIPO DE CEMENTO
EVALUADO

**ANEXO C. DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO DEFINITIVAS
PARA CADA RELACIÓN A/C Y TIPO DE CEMENTO EVALUADO**

| CPP 30 R | Ps (kg) | H | Ph (kg) | Abs | Psss (kg) | F | P's (kg) | P'h (kg) | P'sss (kg) |
|-----------|----------|--------------|----------|-------|-----------|--------------|----------|----------|------------|
| Cemento | 554.341 | - - - | 554.341 | - - - | 554.341 | 0.060 | 33.260 | 33.260 | 33.260 |
| Grava | 997.012 | 0.010 | 1006.982 | 0.044 | 1040.881 | | 59.821 | 60.419 | 62.453 |
| Arena | 602.077 | 0.039 | 625.558 | 0.12 | 674.326 | | 36.125 | 37.533 | 40.460 |
| Agua | 282.413 | - - - | 248.962 | - - - | 166.295 | | 16.945 | 14.938 | 9.978 |
| Masa (kg) | 2435.843 | | 2435.843 | | 2435.843 | | 146.151 | 146.150 | 146.151 |

A/C = 0.300

Revenimiento = cero

| CPP 30 R | Ps (kg) | H | Ph (kg) | Abs | Psss (kg) | F | P's (kg) | P'h (kg) | P'sss (kg) |
|-----------|----------|--------------|----------|-------|-----------|--------------|----------|----------|------------|
| Cemento | 415.730 | - - - | 415.73 | - - - | 415.73 | 0.065 | 27.022 | 27.022 | 27.022 |
| Grava | 997.012 | 0.013 | 1009.973 | 0.044 | 1040.881 | | 64.806 | 65.648 | 67.657 |
| Arena | 602.077 | 0.041 | 626.762 | 0.12 | 674.326 | | 39.135 | 40.740 | 43.831 |
| Agua | 282.413 | - - - | 244.767 | - - - | 166.295 | | 18.357 | 15.910 | 10.809 |
| Masa (kg) | 2297.232 | | 2297.232 | | 2297.232 | | 149.320 | 149.320 | 149.319 |

A/C = 0.400

Revenimiento = 6 cm

| CPP 30 R | Ps (kg) | H | Ph (kg) | Abs | Psss (kg) | F | P's (kg) | P'h (kg) | P'sss (kg) |
|-----------|----------|--------------|----------|-------|-----------|--------------|----------|----------|------------|
| Cemento | 332.592 | - - - | 332.592 | - - - | 332.592 | 0.065 | 21.618 | 21.618 | 21.618 |
| Grava | 997.012 | 0.011 | 1007.979 | 0.044 | 1040.881 | | 64.806 | 65.519 | 67.657 |
| Arena | 602.077 | 0.041 | 626.762 | 0.12 | 674.326 | | 39.135 | 40.740 | 43.831 |
| Agua | 282.413 | - - - | 246.761 | - - - | 166.295 | | 18.357 | 16.039 | 10.809 |
| Masa (kg) | 2214.094 | | 2214.094 | | 2214.094 | | 143.916 | 143.916 | 143.915 |

A/C = 0.500

Revenimiento = 9 cm

| CPP 30 R | Ps (kg) | H | Ph (kg) | Abs | Psss (kg) | F | P's (kg) | P'h (kg) | P'sss (kg) |
|-----------|----------|--------------|----------|-------|-----------|--------------|----------|----------|------------|
| Cemento | 277.161 | - - - | 277.161 | - - - | 277.161 | 0.065 | 18.015 | 18.015 | 18.015 |
| Grava | 997.012 | 0.017 | 1013.961 | 0.044 | 1040.881 | | 64.806 | 65.907 | 67.657 |
| Arena | 602.077 | 0.059 | 637.6 | 0.12 | 674.326 | | 39.135 | 41.444 | 43.831 |
| Agua | 282.413 | - - - | 229.941 | - - - | 166.295 | | 18.357 | 14.946 | 10.809 |
| Masa (kg) | 2158.663 | | 2158.663 | | 2158.663 | | 140.313 | 140.312 | 140.312 |

A/C = 0.600

Revenimiento = 10 cm

| CPP 30 R | Ps (kg) | H | Ph (kg) | Abs | Psss (kg) | F | P's (kg) | P'h (kg) | P'sss (kg) |
|-----------|----------|--------------|----------|-------|-----------|--------------|----------|----------|------------|
| Cemento | 237.561 | - - - | 237.561 | - - - | 237.561 | 0.065 | 15.441 | 15.441 | 15.441 |
| Grava | 997.012 | 0.012 | 1008.976 | 0.044 | 1040.881 | | 64.806 | 65.583 | 67.657 |
| Arena | 602.077 | 0.046 | 629.773 | 0.12 | 674.326 | | 39.135 | 40.935 | 43.831 |
| Agua | 282.413 | - - - | 242.753 | - - - | 166.295 | | 18.357 | 15.779 | 10.809 |
| Masa (kg) | 2119.063 | | 2119.063 | | 2119.063 | | 137.739 | 137.738 | 137.738 |

A/C = 0.700

Revenimiento = 16 cm

| CPP 30 R | Ps (kg) | H | Ph (kg) | Abs | Psss (kg) | F | P's (kg) | P'h (kg) | P'sss (kg) |
|-----------|----------|--------------|----------|-------|-----------|--------------|----------|----------|------------|
| Cemento | 207.869 | - - - | 207.869 | - - - | 207.869 | 0.070 | 14.551 | 14.551 | 14.551 |
| Grava | 997.012 | 0.009 | 1005.985 | 0.044 | 1040.881 | | 69.791 | 70.419 | 72.862 |
| Arena | 602.077 | 0.040 | 626.16 | 0.12 | 674.326 | | 42.145 | 43.831 | 47.203 |
| Agua | 282.413 | - - - | 249.357 | - - - | 166.295 | | 19.769 | 17.455 | 11.641 |
| Masa (kg) | 2089.371 | | 2089.371 | | 2089.371 | | 146.256 | 146.256 | 146.256 |

A/C = 0.800

Revenimiento = no se pudo obtener (demasiado fluido)

**ANEXO C. DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO DEFINITIVAS
PARA CADA RELACIÓN A/C Y TIPO DE CEMENTO A EVALUAR**

| CPC 30 R | Ps (kg) | H | Ph (kg) | Abs | Psss (kg) | F | P's (kg) | P'h (kg) | P'sss (kg) |
|-----------|----------|-------|----------|-------|-----------|-------|----------|----------|------------|
| Cemento | 554.341 | - - - | 554.341 | - - - | 554.341 | 0.060 | 33.260 | 33.260 | 33.260 |
| Grava | 997.012 | 0.016 | 1012.964 | 0.044 | 1040.881 | | 59.821 | 60.778 | 62.453 |
| Arena | 602.077 | 0.053 | 633.987 | 0.12 | 674.326 | | 36.125 | 38.039 | 40.460 |
| Agua | 282.413 | - - - | 234.551 | - - - | 166.295 | | 16.945 | 14.073 | 9.978 |
| Masa (kg) | 2435.843 | | 2435.843 | | 2435.843 | | 146.151 | 146.150 | 146.151 |

A/C = 0.300

Revenimiento = cero

| CPC 30 R | Ps (kg) | H | Ph (kg) | Abs | Psss (kg) | F | P's (kg) | P'h (kg) | P'sss (kg) |
|----------|----------|-------|----------|-------|-----------|-------|----------|----------|------------|
| Cemento | 415.730 | - - - | 415.73 | - - - | 415.73 | 0.065 | 27.022 | 27.022 | 27.022 |
| Grava | 997.012 | 0.014 | 1010.97 | 0.044 | 1040.881 | | 64.806 | 65.713 | 67.657 |
| Arena | 602.077 | 0.044 | 628.568 | 0.12 | 674.326 | | 39.135 | 40.857 | 43.831 |
| Agua | 282.413 | - - - | 241.964 | - - - | 166.295 | | 18.357 | 15.728 | 10.809 |
| | 2297.232 | | 2297.232 | | 2297.232 | | 149.320 | 149.320 | 149.319 |

A/C = 0.400

Revenimiento = 4 cm

| CPC 30 R | Ps (kg) | H | Ph (kg) | Abs | Psss (kg) | F | P's (kg) | P'h (kg) | P'sss (kg) |
|----------|----------|-------|----------|-------|-----------|-------|----------|----------|------------|
| Cemento | 332.592 | - - - | 332.592 | - - - | 332.592 | 0.065 | 21.618 | 21.618 | 21.618 |
| Grava | 997.012 | 0.016 | 1012.964 | 0.044 | 1040.881 | | 64.806 | 65.843 | 67.657 |
| Arena | 602.077 | 0.048 | 630.977 | 0.12 | 674.326 | | 39.135 | 41.014 | 43.831 |
| Agua | 282.413 | - - - | 237.561 | - - - | 166.295 | | 18.357 | 15.441 | 10.809 |
| | 2214.094 | | 2214.094 | | 2214.094 | | 143.916 | 143.916 | 143.915 |

A/C = 0.500

Revenimiento = 9 cm

| CPC 30 R | Ps (kg) | H | Ph (kg) | Abs | Psss (kg) | F | P's (kg) | P'h (kg) | P'sss (kg) |
|----------|----------|-------|----------|-------|-----------|-------|----------|----------|------------|
| Cemento | 277.161 | - - - | 277.161 | - - - | 277.161 | 0.065 | 18.015 | 18.015 | 18.015 |
| Grava | 997.012 | 0.009 | 1005.985 | 0.044 | 1040.881 | | 64.806 | 65.389 | 67.657 |
| Arena | 602.077 | 0.042 | 627.364 | 0.12 | 674.326 | | 39.135 | 40.779 | 43.831 |
| Agua | 282.413 | - - - | 248.153 | - - - | 166.295 | | 18.357 | 16.130 | 10.809 |
| | 2158.663 | | 2158.663 | | 2158.663 | | 140.313 | 140.313 | 140.312 |

A/C = 0.600

Revenimiento = 10 cm

| CPC 30 R | Ps (kg) | H | Ph (kg) | Abs | Psss (kg) | F | P's (kg) | P'h (kg) | P'sss (kg) |
|----------|----------|-------|----------|-------|-----------|-------|----------|----------|------------|
| Cemento | 237.561 | - - - | 237.561 | - - - | 237.561 | 0.065 | 15.441 | 15.441 | 15.441 |
| Grava | 997.012 | 0.009 | 1005.985 | 0.044 | 1040.881 | | 64.806 | 65.389 | 67.657 |
| Arena | 602.077 | 0.042 | 627.364 | 0.12 | 674.326 | | 39.135 | 40.779 | 43.831 |
| Agua | 282.413 | - - - | 248.153 | - - - | 166.295 | | 18.357 | 16.130 | 10.809 |
| | 2119.063 | | 2119.063 | | 2119.063 | | 137.739 | 137.739 | 137.738 |

A/C = 0.700

Revenimiento = 18 cm

**ANEXO C. DISEÑO DE MEZCLAS DE CONCRETO DEFINITIVAS
PARA CADA RELACIÓN A/C Y TIPO DE CEMENTO A EVALUAR**

| CPO 40 R/ B | Ps (kg) | H | Ph (kg) | Abs | Psss (kg) | F | P's (kg) | P'h (kg) | P'sss (kg) |
|-------------|----------|--------------|----------|-------|-----------|--------------|----------|----------|---------------|
| Cemento | 554.341 | - - - | 554.341 | - - - | 554.341 | 0.063 | 34.923 | 34.923 | 34.923 |
| Grava | 997.012 | 0.015 | 1011.967 | 0.044 | 1040.881 | | 62.812 | 63.754 | 65.576 |
| Arena | 602.077 | 0.052 | 633.385 | 0.12 | 674.326 | | 37.931 | 39.903 | 42.483 |
| Agua | 282.413 | - - - | 236.15 | - - - | 166.295 | | 17.792 | 14.877 | 10.477 |
| Masa (kg) | 2435.843 | | 2435.843 | | 2435.843 | | 153.458 | 153.457 | 153.459 |

A/C = 0.300

Revenimiento = cero

| CPO 40 R/ B | Ps (kg) | H | Ph (kg) | Abs | Psss (kg) | F | P's (kg) | P'h (kg) | P'sss (kg) |
|-------------|----------|--------------|----------|-------|-----------|--------------|----------|----------|---------------|
| Cemento | 415.730 | - - - | 415.73 | - - - | 415.73 | 0.065 | 27.022 | 27.022 | 27.022 |
| Grava | 997.012 | 0.013 | 1009.973 | 0.044 | 1040.881 | | 64.806 | 65.648 | 67.657 |
| Arena | 602.077 | 0.045 | 629.17 | 0.12 | 674.326 | | 39.135 | 40.896 | 43.831 |
| Agua | 282.413 | - - - | 242.359 | - - - | 166.295 | | 18.357 | 15.753 | 10.809 |
| | 2297.232 | | 2297.232 | | 2297.232 | | 149.320 | 149.319 | 149.319 |

A/C = 0.400

Revenimiento = 4 cm

| CPO 40 R/ B | Ps (kg) | H | Ph (kg) | Abs | Psss (kg) | F | P's (kg) | P'h (kg) | P'sss (kg) |
|-------------|----------|--------------|----------|-------|-----------|--------------|----------|----------|---------------|
| Cemento | 332.592 | - - - | 332.592 | - - - | 332.592 | 0.065 | 21.618 | 21.618 | 21.618 |
| Grava | 997.012 | 0.013 | 1009.973 | 0.044 | 1040.881 | | 64.806 | 65.648 | 67.657 |
| Arena | 602.077 | 0.045 | 629.17 | 0.12 | 674.326 | | 39.135 | 40.896 | 43.831 |
| Agua | 282.413 | - - - | 242.359 | - - - | 166.295 | | 18.357 | 15.753 | 10.809 |
| | 2214.094 | | 2214.094 | | 2214.094 | | 143.916 | 143.915 | 143.915 |

A/C = 0.500

Revenimiento = 10 cm

| CPO 40 R/ B | Ps (kg) | H | Ph (kg) | Abs | Psss (kg) | F | P's (kg) | P'h (kg) | P'sss (kg) |
|-------------|----------|--------------|----------|-------|-----------|--------------|----------|----------|---------------|
| Cemento | 277.161 | - - - | 277.161 | - - - | 277.161 | 0.065 | 18.015 | 18.015 | 18.015 |
| Grava | 997.012 | 0.012 | 1008.976 | 0.044 | 1040.881 | | 64.806 | 65.583 | 67.657 |
| Arena | 602.077 | 0.047 | 630.375 | 0.12 | 674.326 | | 39.135 | 40.974 | 43.831 |
| Agua | 282.413 | - - - | 242.151 | - - - | 166.295 | | 18.357 | 15.740 | 10.809 |
| | 2158.663 | | 2158.663 | | 2158.663 | | 140.313 | 140.312 | 140.312 |

A/C = 0.600

Revenimiento = 14 cm

| CPO 40 R/ B | Ps (kg) | H | Ph (kg) | Abs | Psss (kg) | F | P's (kg) | P'h (kg) | P'sss (kg) |
|-------------|----------|--------------|----------|-------|-----------|--------------|----------|----------|---------------|
| Cemento | 237.561 | - - - | 237.561 | - - - | 237.561 | 0.065 | 15.441 | 15.441 | 15.441 |
| Grava | 997.012 | 0.012 | 1008.976 | 0.044 | 1040.881 | | 64.806 | 65.583 | 67.657 |
| Arena | 602.077 | 0.050 | 632.181 | 0.12 | 674.326 | | 39.135 | 41.092 | 43.831 |
| Agua | 282.413 | - - - | 240.345 | - - - | 166.295 | | 18.357 | 15.622 | 10.809 |
| | 2119.063 | | 2119.063 | | 2119.063 | | 137.739 | 137.738 | 137.738 |

A/C = 0.700

Revenimiento = mezcla demasiado fluida

ANEXO D

DISEÑO DE MORTERO AZUFRE-ARENA PARA EL CABECEO DE LOS ESPECÍMENES DE PRUEBA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA
UNIDAD AZCAPTZALCO
CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE MATERIALES
ÁREA DE CONSTRUCCIÓN

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

**“ESTUDIO DE MORTEROS COMPUESTOS PARA CABECEO DE
ESPECIMENES CILINDRICOS DE CONCRETO”**



ELABORÓ:

M. EN C. FRANCISCO GONZÁLEZ DÍAZ
M. EN I. J. ANTONIO FLORES BUSTAMANTE
M. EN I. LUIS ROCHA CHIU
M. EN I. N. ADÁN VÁZQUEZ ROJAS

JULIO DE 2003

INTRODUCCIÓN

Para determinar la resistencia a compresión del concreto hidráulico, se han utilizando especímenes cilíndricos, en los cuales los extremos de ellos o las caras de aplicación de carga no deben apartarse de la perpendicularidad al eje en más de 0.5° , aproximadamente 3mm en 300mm, y no se permiten irregularidades respecto de un plano que exceda de 0.05mm en las bases del cilindro endurecido, en relación con este último requisito por la propia naturaleza de elaboración de él, al menos una de sus caras de aplicación de la carga presenta irregularidades, mismas que tienen que ser corregidas por alguna de las siguientes técnicas: refrentado con mortero de azufre, placas de neopreno, pulido, etc. De estas alternativas, el cabeceo con mortero de azufre es la técnica más empleada por los laboratorios de pruebas.

En función de lo anterior, el presente trabajo tiene la finalidad abordar algunas de las variables que influyen en el comportamiento mecánico de las capas de mortero utilizadas, además de su ingerencia en la determinación real de la resistencia a compresión del concreto hidráulico.

El planteamiento inicial de este trabajo partió de la idea de probar diversos materiales (arena andesítica, arena de basalto, etc.) que al combinarlos con el azufre se obtuvieran diversos morteros, mismos que serían probados a compresión de acuerdo a la norma **NMX- C-109 “CABECEO DE ESPECÍMENES DE CONCRETO”**, como se señala en el inciso 5.4.2 “Determinación de la Resistencia a la Compresión”.

Por otra parte, con el fin de revisar la influencia del tamaño de partícula del material “inerte” (sólo en arena) se elaboraron variados morteros en los cuales se utilizó el retenido de las principales mallas que son utilizadas en la granulometría de la arena.

También se tuvo la oportunidad de verificar algunas proporciones (en peso) de azufre con arena, esto con el objetivo de tratar de conocer la dificultad de su manejo en el vaciado y su posterior influencia en el esfuerzo obtenido en las probetas cúbicas.

En una última instancia se fabricaron diferentes probetas de mortero de azufre a las cuales se les variaron los espesores y se midieron sus deformaciones al aplicarles los incrementos de carga.

El presente trabajo, también está complementado con una parte donde se presentan las fallas o problemas que se tuvieron al elaborar los especímenes cúbicos de mortero de azufre.

GENERALIDADES

Para cabecear los cilindros de concreto hidráulico con azufre, según señala la norma NMX-C-109, depende de la resistencia del cilindro y se indica en la siguiente tabla:

| Resistencia a la compresión del cilindro de concreto | Resistencia mínima del material de cabeceo | Máximo espesor promedio de la cabeza | Máximo espesor en cualquier lugar |
|--|--|--------------------------------------|-----------------------------------|
| Menores de 500 kg/cm ² | 350 kg/cm ² ó la resistencia del cilindro, la que sea mayor | 6mm (1/4 pulg.) | 8mm (5/16 pulg.) |
| Mayores de 500 kg/cm ² | Resistencia a la compresión no menor que la resistencia del cilindro | 3mm (1/8 pulg.) | 5mm (3/16 pulg.) |

Por estas restricciones un mortero de azufre debe cumplir con el requisito de tener una resistencia mínima a la compresión de 350 kg/cm^2 al término de dos horas. Para determinar la resistencia a compresión del mortero de azufre es necesario fundirlo a una temperatura entre los 130 y $150 \text{ }^\circ \text{C}$, hasta obtenerlo totalmente líquido. Después se procede a vaciarlo en los cubos, previamente calentados a una temperatura de $25^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ y recubiertos con una capa delgada de aceite mineral, así son llenados por la parte alta del agujero de la placa; se debe tomar en cuenta que habrá una contracción debido al enfriado y solidificación, por lo que después de quince minutos se tendrá que rellenar el hueco producto de la contracción. El proceso de rellenado es necesario para evitar la formación de grandes huecos en el cuerpo del cubo, aunque a pesar de los cuidados que se tengan, estos defectos pueden ocurrir, por lo tanto es necesario revisar los restos del ensaye cuando se obtengan resistencias bajas.

- Se recomienda en la norma que el mortero de azufre sea fundido a la misma temperatura que se utiliza para ensayar los especímenes cilíndricos de concreto, además de que el azufre empleado sea nuevo y estar seco al introducirse a la jarra para evitar la generación de espuma. Por otra parte al proceder al cabeceo de los cilindros se tendrá el cuidado de secarlos totalmente en sus bases, para evitar la formación de burbujas o bolsas de espuma. Y también que en cada prueba de cilindros deberá de verificarse plenamente la resistencia del mortero, ya que con los subsecuentes usos se irá volatilizand el azufre del mortero, lo cual se manifiesta en un principio con una pérdida de trabajabilidad del mismo, así como la falla prematura de la probeta.
- Se recomienda también que para disminuir la velocidad de enfriamiento del espécimen de mortero de azufre se coloque una tapa plana de fenol formaldehído (baquelita) de 3 mm de espesor, provista de tres agujeros coincidentes con la placa metálica que cubre a los cubos.

HIPÓTESIS

- El azufre es un material que por si solo es resistente a la compresión, por lo tanto, si es empleado como un aglomerante deberá de tener una mayor resistencia mecánica debido a la cantidad del material que le fue adicionado.
- La resistencia de los morteros tendrá una variación de acuerdo a la calidad del material que se le adiciona, así como a la cantidad del mismo. Teniendo en cuenta que el material que sea empleado debe proporcionar una superficie lisa y tersa.

OBJETIVOS:

- 1º Revisar la resistencia mecánica a compresión de diversos morteros de azufre.
- 2º Estudiar la influencia del tamaño de partícula del material inerte en los morteros de azufre.
- 3º Determinar la influencia de la proporción azufre – material inerte.
- 4º Estudiar el comportamiento del espesor de capas de mortero.

METODOLOGÍA

- La metodología que se empleará en la elaboración de morteros, para encontrar resistencias adecuadas, y poderlo utilizar como el material de cabeceo en los cilindros. Es emplear la forma en que se elaboran los morteros puros de azufre, verificando que combinaciones proporcionan resistencias mayores para su posible empleo.
- Para valorar la mejor combinación en resistencia de mortero de azufre se proponen los siguientes materiales inertes que le continuaran dando al mortero la condición tersa y lisa propuesta:

| AGLOMERANTE | MATERIAL INERTE | NOMENCLATURA |
|-------------|------------------|--------------|
| AZUFRE | ARENA ANDESÍTICA | a-a.and |
| AZUFRE | ARCILLA RECOCIDA | a-ar |
| AZUFRE | MICROSÍLICA | a- micro |
| AZUFRE | CEMENTO | a-ce |
| AZUFRE | CALHIDRA | a-ca! |
| AZUFRE | CEROFINO | a-cero |
| AZUFRE | ARENA DE CALIZA | a- a.cali |

COMBINACIONES PROPUESTAS EN LA ELABORACIÓN DE MORTEROS

PROCEDIMIENTO Y RESULTADOS:

El orden de finura utilizada para **a-a.and**, **a-ar**, **a-cero** y **a-a-cali**, fue el retenido de la malla # 200 (figura 1). En todos los demás materiales se tomaron tal como venían en su empaque. Las proporciones utilizadas estuvieron entre el orden del 60 al 100 % de azufre y del 20 al 40 % de material inerte.



Figura 1

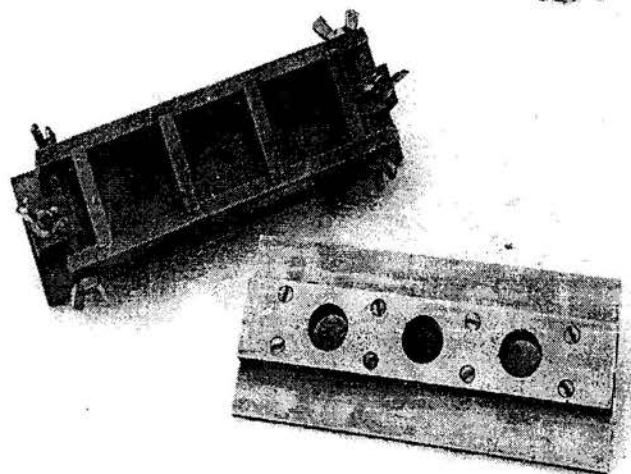


Figura 2

El tamaño de la muestra de cada uno de los morteros fue de nueve cubos, los cuales se fabricaron en moldes de tres compartimientos (figura 2) con su respectiva tapa. El fundido se llevo a cabo en una jarra (figura 3 y 4) provista de mango de madera para evitar quemaduras.

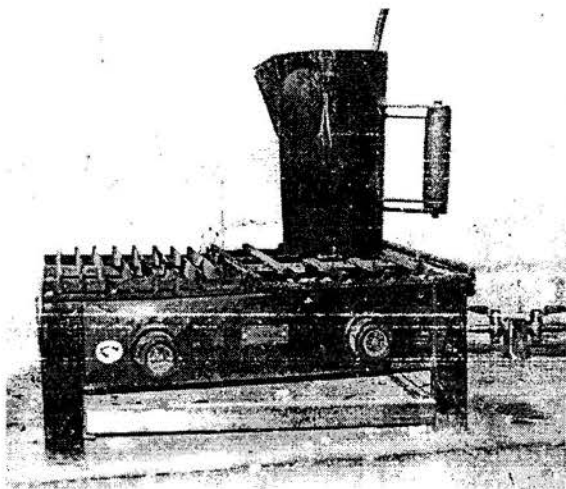


Figura 3

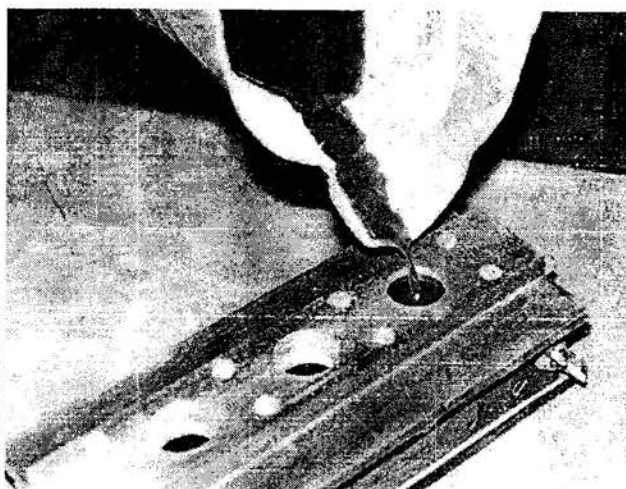


Figura 4

Para la aplicación de la carga se utilizó una prensa hidráulica (figura 5 y 6) de doble manómetro con una capacidad de 120 toneladas.

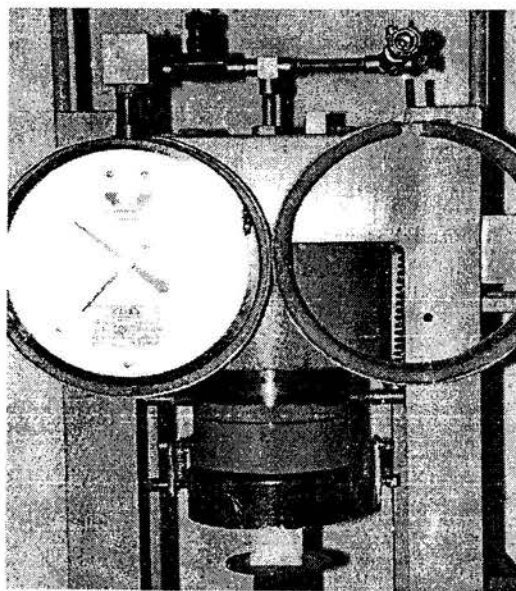


Figura 5

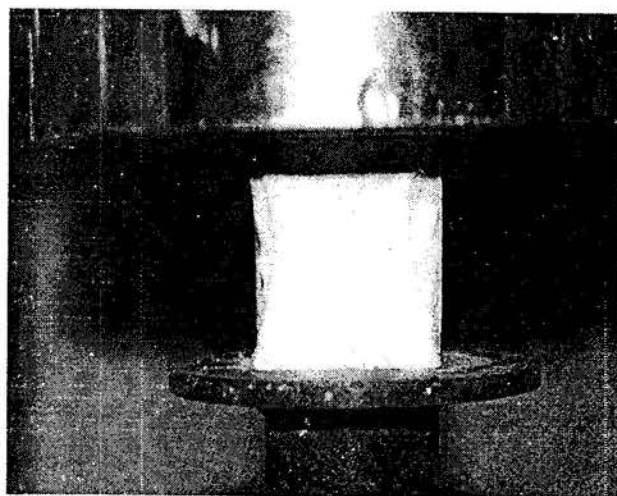


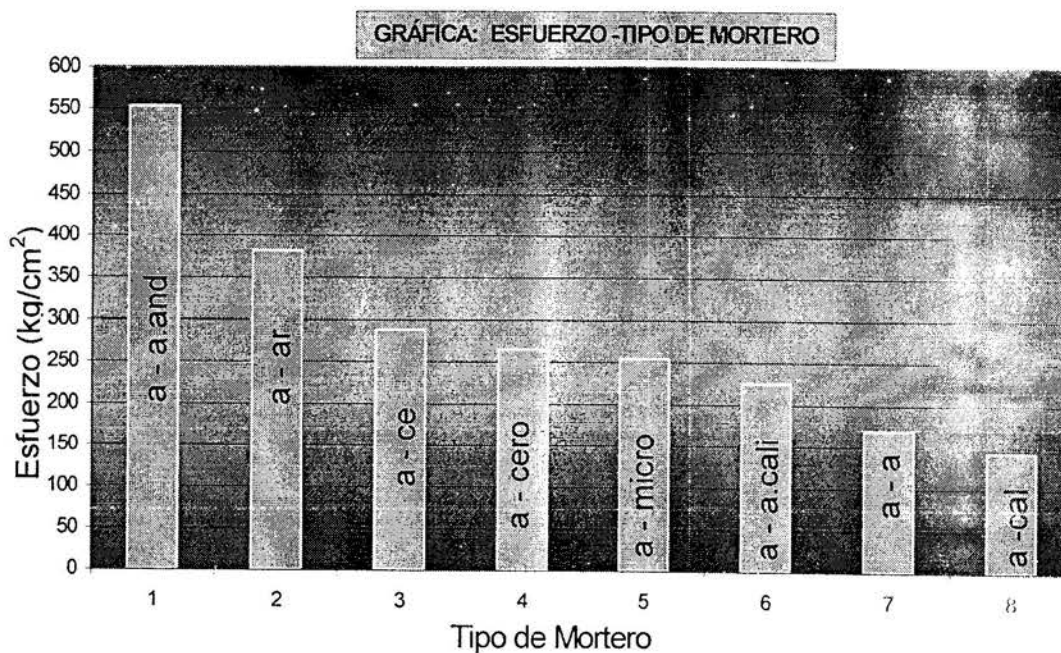
Figura 6

Los resultados de las cargas aplicadas (promedio de nueve especímenes) obtenidas hasta la falla se muestran en la tabla 1 y para su mejor visualización de éstos se obtuvo la gráfica 1.

| TIPO DE MORTERO | ESFUERZO (KG/CM ²) |
|----------------------------------|--------------------------------|
| AZUFRE-ARENA ANDESÍTICA (60-40%) | 553 |
| AZUFRE-ARCILLA COCIDA (74-26%) | 382 |
| AZUFRE-CEMENTO (60-40%) | 288 |
| AZUFRE-CEROFINO (63-37 %) | 265 |
| AZUFRE-MICROSÍLICA (60-40%) | 254 |
| AZUFRE-ARENA DE CALIZA (70-30%) | 226 |
| AZUFRE-AZUFRE (100%) | 167 |
| AZUFRE-CALIDRA (80-20%) | 143 |

TABLA 1

GRÁFICA 1



Como se observó el mortero elaborado con arena andesítica presento la más alta resistencia a compresión, por tanto lo hace ideal para la corrección de las superficies irregulares para el ensayo a compresión axial, pero hay que verificar su factibilidad para resistencias altas. Por lo tanto, más adelante se hará un planteamiento a este respecto. Ahora sólo nos limitamos a la identificación del mortero de mayor resistencia.

El siguiente objetivo que se abordará en este trabajo es el que respecta a la influencia del tamaño de las partículas del material inerte.

En el objetivo anterior, se observó que el mortero de mayor resistencia resulto ser el elaborado con una arena de origen andesítica, por lo tanto partimos de esta premisa para tratar de identificar el comportamiento de la siguiente variable importante que para nuestro juicio es, el efecto del tamaño de partícula en este caso el de la arena andesítica en el mortero de azufre.

PROCEDIMIENTO Y RESULTADOS:

Para el cumplimiento de este segundo objetivo se propuso separar la arena en sus diferentes tamaños de acuerdo a las mallas utilizadas para el análisis granulométrico (se añadió la malla # 200); dichos retenidos fueron combinados respectivamente en una proporción en peso del orden de 60% de azufre con un 40% de arena, haremos mención que no fue utilizado el retenido de la charola.

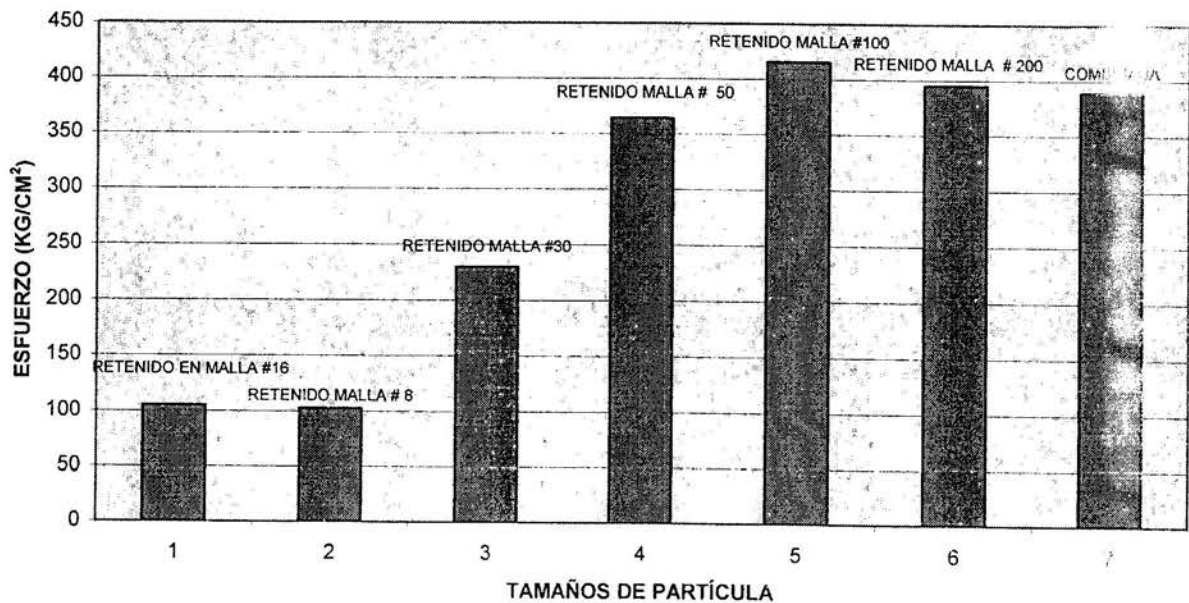
A continuación se muestran los resultados (tabla 2) de las pruebas a compresión de cada uno de los morteros. El esfuerzo obtenido es un promedio de seis probetas cúbicas las cuales fueron fabricadas y probadas de igual forma como lo señala la norma.

Por otra parte también se tienen los esfuerzos graficados (gráfica 2) en función de los diferentes tamaños de partícula, de los cuales podemos concluir que los morteros elaborados con arenas de retenido de las mallas # 100 y # 200 son los que presentaron las resistencias a compresión más altas.

| MORTERO DE AZUFRE | ESFUERZO (KG/CM ²) |
|---|--------------------------------|
| AZUFRE – ARENA (RETENIDO # 200) | 395 |
| AZUFRE – ARENA (RETENIDO # 100) | 416 |
| AZUFRE – ARENA (RETENIDO # 50) | 364 |
| AZUFRE – ARENA (RETENIDO # 30) | 230 |
| AZUFRE – ARENA (RETENIDO # 16) | 102 |
| AZUFRE – ARENA (RETENIDO # 8) | 105 |
| AZUFRE – ARENA (COMBINACIÓN DE TAMAÑOS) | 390 |

TABLA 2

RESISTENCIA DE MORTEROS CON DIVERSOS TAMAÑOS DE PARTICULA



GRÁFICA 2

Recapitulando lo anterior, hasta el momento hemos estudiado el comportamiento de las variables, que tienen que ver en primer instancia, con la más adecuada combinación de azufre-material inerte y por otro lado el tamaño óptimo de arena que se necesita para tener una mayor resistencia mecánica a la compresión en el mortero de azufre.

El tercer punto u objetivo que nos propusimos revisar, es el que tiene que ver con la mayor o menor cantidad de azufre en el mortero, para esto se retomaron los resultados anteriores, los cuales nos señalan el mejor mortero de azufre y por otra parte el mejor tamaño de partícula necesario para obtener un más alto esfuerzo en el material de cabeceo.

El azufre es el componente que aglomera a las partículas de arena; entonces la cantidad de este debe tener una influencia directa en las propiedades físicas y mecánicas del mortero, y que en consecuencia afectará el esfuerzo real que deberá tener el espécimen de concreto hidráulico. Por esta razón, se plantea hacer una revisión referente al contenido óptimo de cada uno de los componentes del mortero, tal que nos indique cuales proporciones son factibles de utilizar en el refrentado.

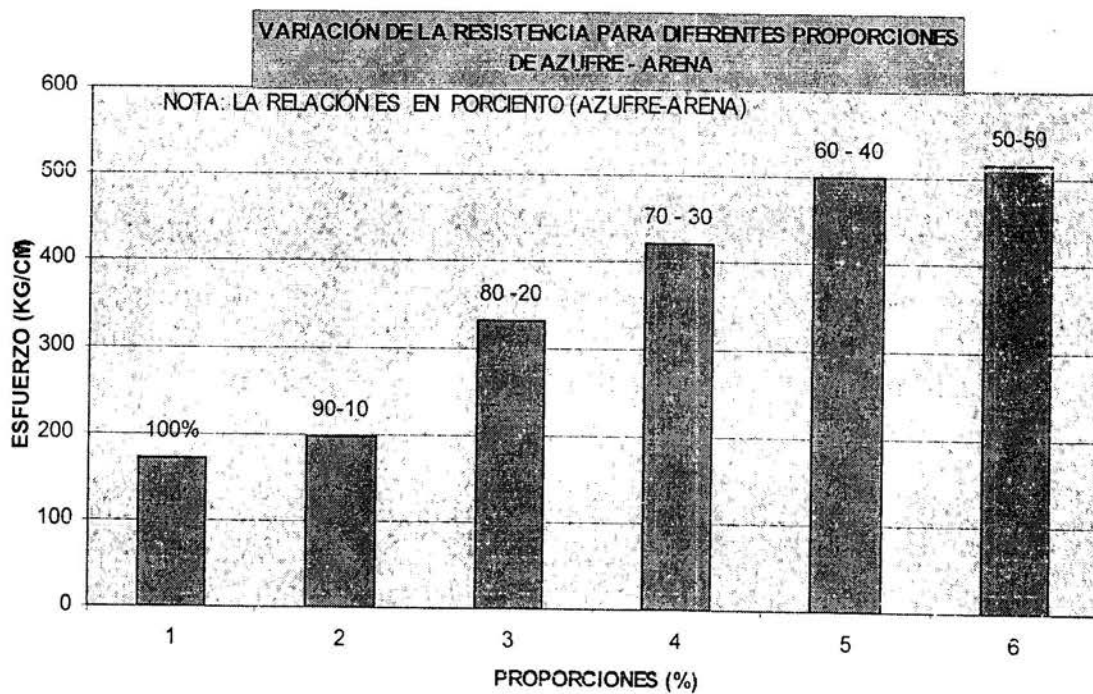
Para llevar a cabo lo anterior, se ha propuesto elaborar morteros de azufre en los cuales se varíen los contenidos de un 100 % hasta un 50 % de él con el objeto de tener como resultado un material que al suministro de calor se funda y tenga características adecuadas para efectuar el cabeceo del espécimen, completando lo que falta con el retenido de arena de la malla # 100. A continuación se muestra en la tabla 3 los resultados obtenidos y también su correspondiente gráfica (3).

Como se puede observar y de acuerdo a la norma **NMX-C-109**, que el contenido del material para el mortero es óptimo en el orden del 60 % de azufre con el 40 % de material inerte (arena) porque da cumplimiento con los requisitos

de la tabla de la norma, sin embargo, aun cuando se pueda obtener mayor resistencia con el mortero de relación 50 -50 %, este no es práctico, ya que en el momento de su elaboración no tiene la fluidez necesaria al momento de ser vaciado en el plato de refrentado.

| RELACION AZUFRE - ARENA (%) | ESFUERZO* (KG/CM ²) |
|-----------------------------|---------------------------------|
| 100% - 0 % | 172 |
| 90% - 10% | 197 |
| 80% - 20% | 331 |
| 70% - 30% | 422 |
| 60% - 40% | 499 |
| 50% - 50% | 516 |

TABLA 3



GRÁFICA 3

* NOTA: Los esfuerzos resultan de promedios de 6 cubos.

Como último objetivo de este trabajo, se decidió revisar la variación del espesor de las capas de algunos de los morteros. También se midieron deformaciones en ellos las cuales posiblemente podrían ser las responsables de la incertidumbre de los resultados obtenidos en las pruebas de compresión de dichos morteros y consecuentemente podrían tener el mismo efecto en los especímenes de concreto.

El planteamiento hecho para esta parte del trabajo, consistió en proponer primero diferentes morteros de azufre, los cuales fueron: azufre-azufre, azufre-microsílica, azufre-arena andesita, azufre-arena de basalto y azufre-arcilla cocida. De estos, se fabricaron las distintas probetas, de las cuales se partió de los cubos de 50 mm por lado, de estos se fueron obteniendo todos los demás espesores: 25, 10, 5 y 3 mm. Respectivamente para cada uno de los morteros propuestos (ver figura 7).

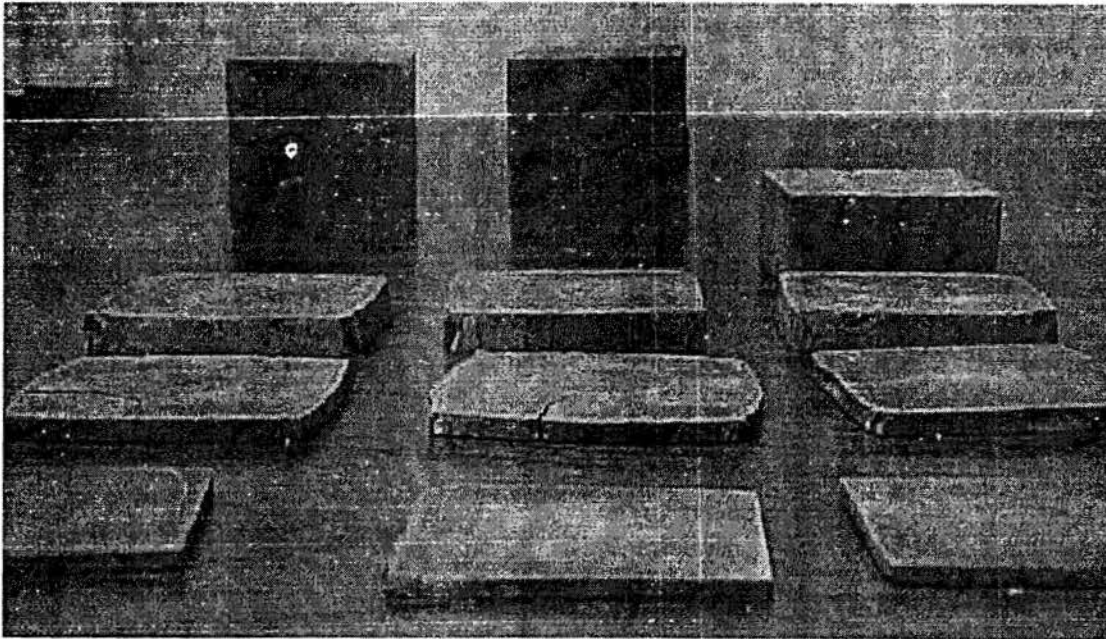
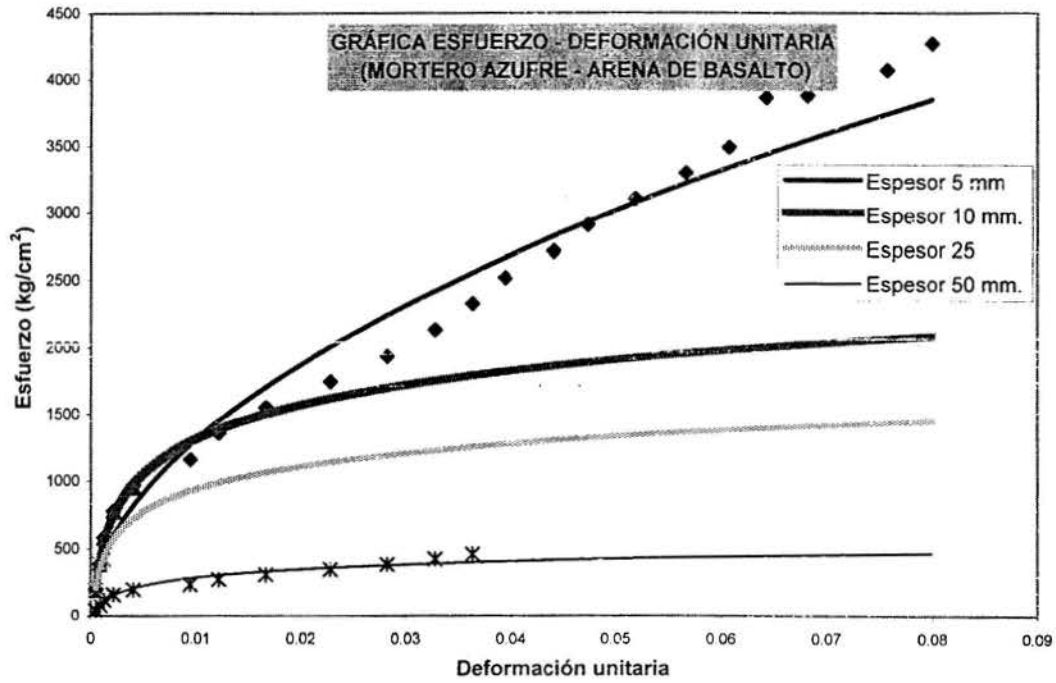
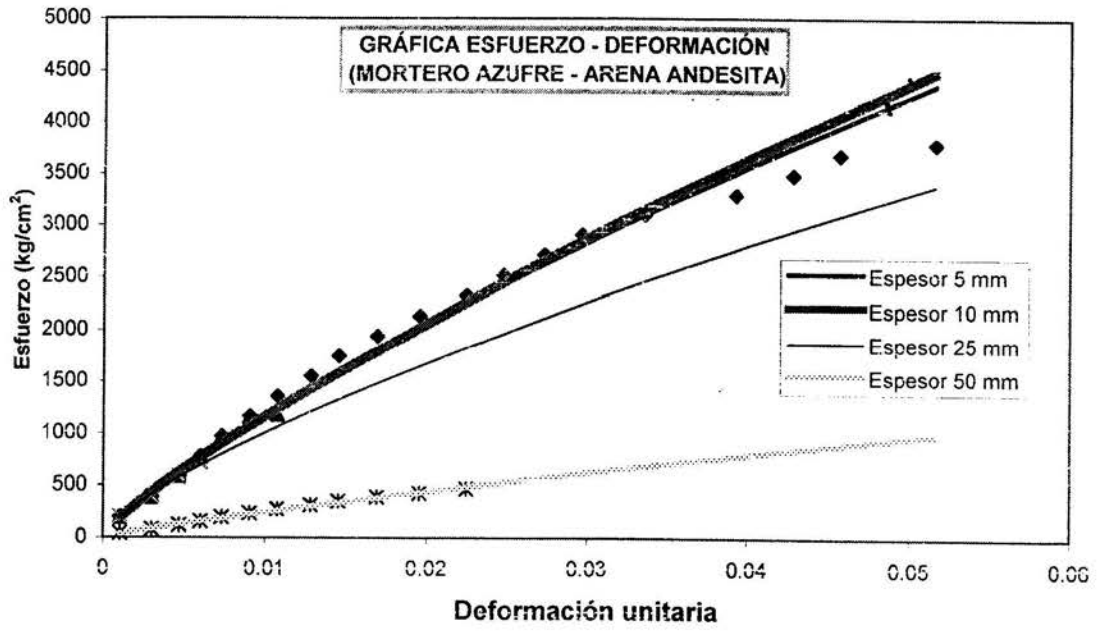


Figura 7

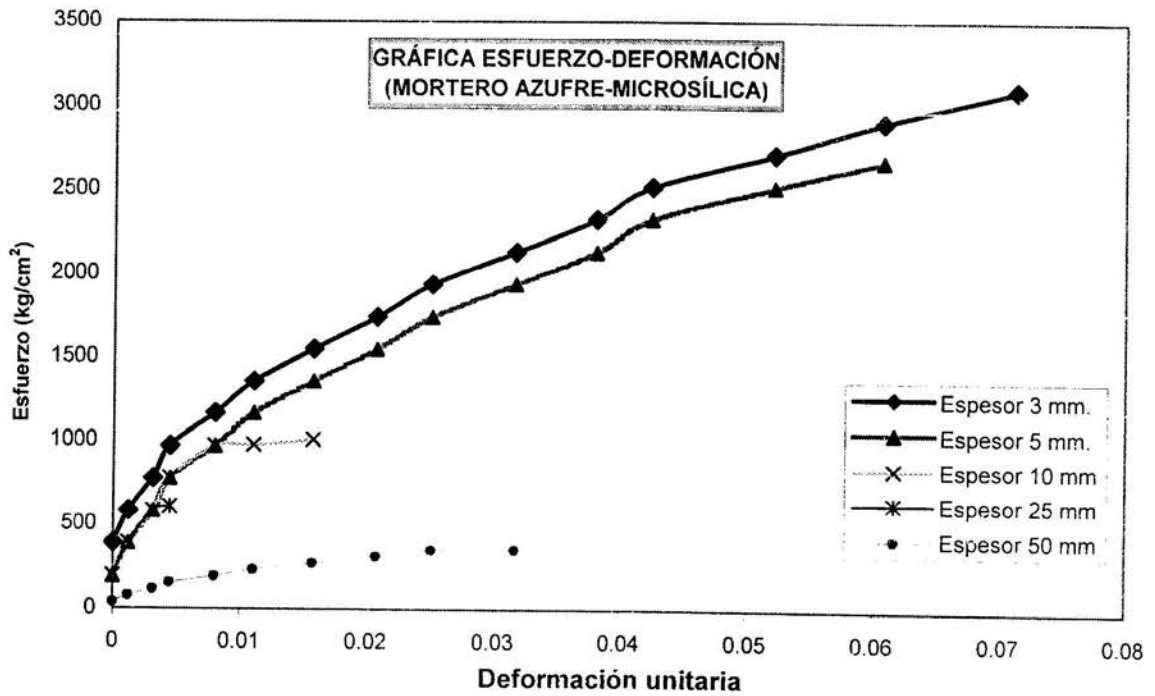
A continuación se presentan los datos obtenidos de esfuerzo y deformación unitaria de cada serie de morteros. Por facilidad, los valores obtenidos del ensaye se presentan en las gráficas (4, 5, 6, 7, y 8) para su mejor comprensión.



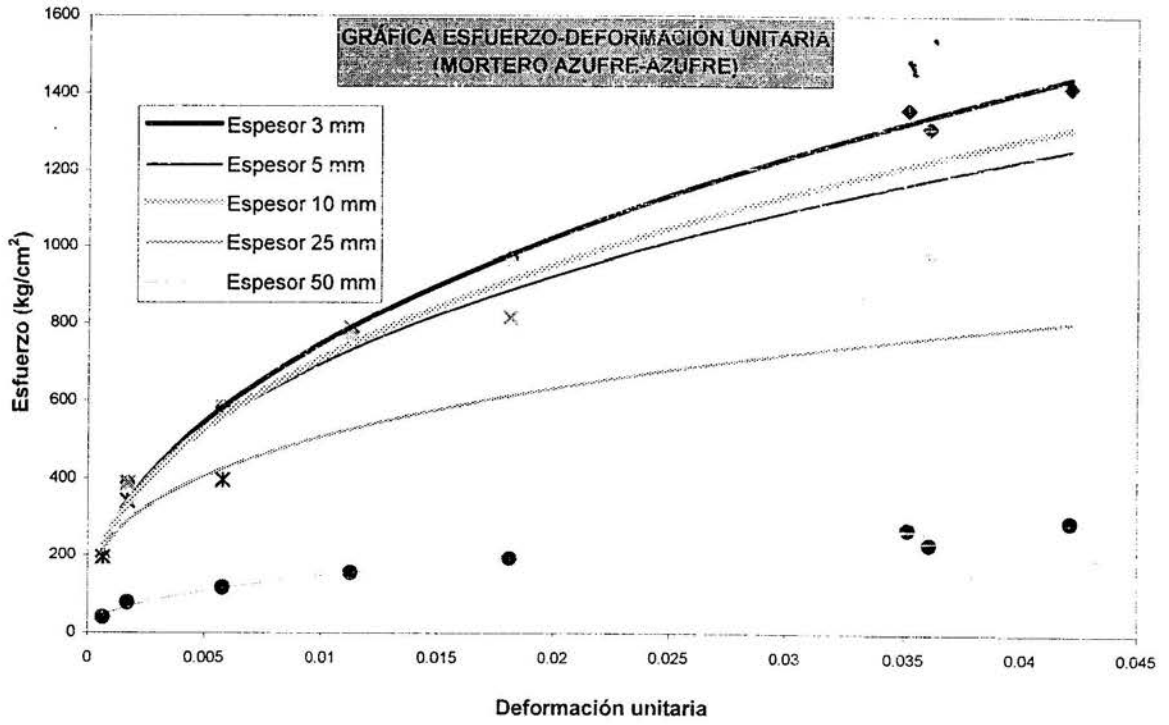
GRÁFICA 4



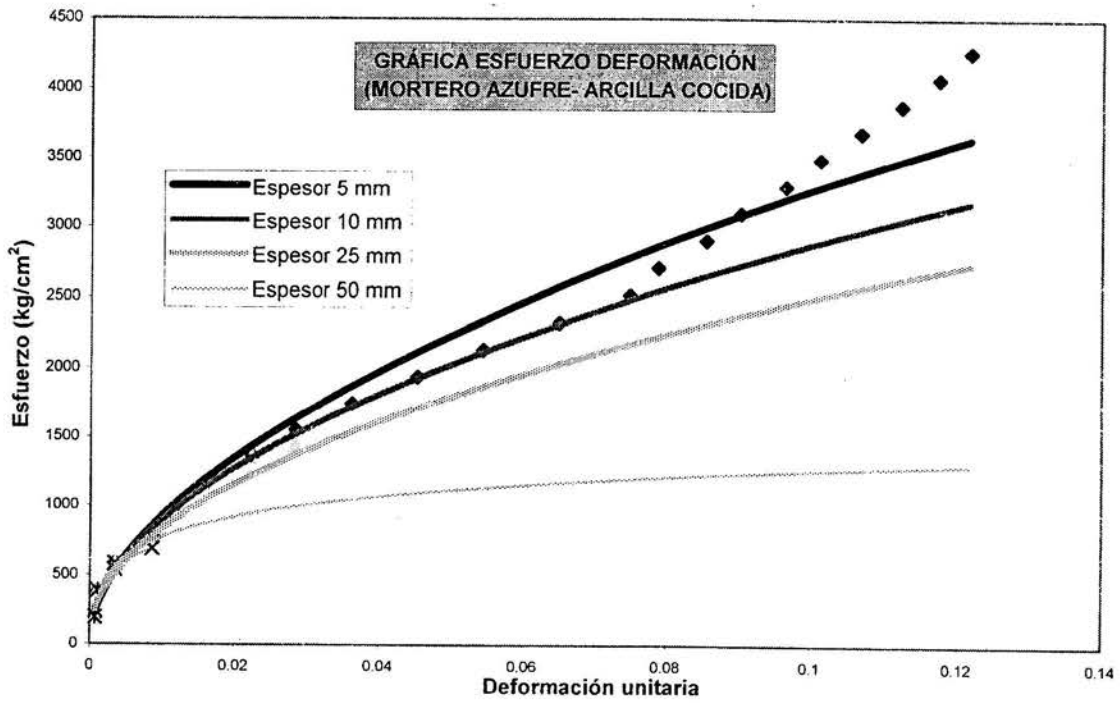
GRÁFICA 5



GRÁFICA 6



GRÁFICA 7



GRÁFICA 8

Cabe hacer mención que las curvas de tendencia obtenidas responden a un análisis de regresión, por lo tanto las ecuaciones (que no se escriben) encontradas son las que describen lo más cercano posible el comportamiento de los datos encontrados, esto se corroboró por medio del coeficiente de correlación (R^2) los cuales en su mayoría se encontraron mayores a 0.95

Por otra parte, para entender mejor el significado de las gráficas anteriores, es necesario recordar que, aproximadamente *el concreto hidráulico (normal) falla con una deformación unitaria del orden de 0.003 en compresión*. Si fijamos esta deformación unitaria, entonces podremos observar que los esfuerzos asociados son como los que se muestran en la siguiente tabla:

| MORTERO | ε | ESFUERZOS ASOCIADOS (KG/CM ²) ESPEORES CORRESPONDIENTES | | | | |
|-------------------------|-------|--|------|-------|-------|-------|
| | | 3 MM | 5 MM | 10 MM | 25 MM | 50 MM |
| AZUFRE – ARENA ANDESITA | 0.003 | ⁿ | 500 | 500 | 400 | 100 |
| AZUFRE – AZUFRE | 0.003 | 450 | 450 | 420 | 350 | 80 |
| AZUFRE – ARCILLA COCIDA | 0.003 | ⁿ | 580 | 550 | 500 | 480 |
| AZUFRE – ARENA BASALTO | 0.003 | ⁿ | 750 | 800 | 600 | 175 |
| AZUFRE – MICROSÍLICA | 0.003 | 750 | 600 | 600 | 600 | 125 |

De lo anterior, se observa que cuando el concreto falla, los esfuerzos que se alcanzan en el mortero son los que caen en el rango de 450 a 750 kg/cm², esto en la capa de mortero del orden de 5 mm. Cuando se prueban los cubos de 50 mm por lado, resulta que para la ε del concreto (de falla) estos alcanzan resistencias menores que las que posiblemente se puedan desarrollar en el concreto.

ⁿ Nota.- No se logro medir las deformaciones unitarias

Por último se trato de encontrar la relación que guardan los esfuerzos con cada uno de los espesores y morteros; como conclusión de esto, se agruparon en un solo gráfico (grafica 9) cada una de las curvas que se obtuvieron de los diferentes morteros. Si observamos someramente la gráfica, concluiríamos erróneamente que la resistencia aumenta conforme la placa de mortero disminuye, pero había que considerar las deformaciones de las placas las cuales son mayores que la deformación unitaria mínima con la cual fallan los cilindros de concreto (ver figura 8).

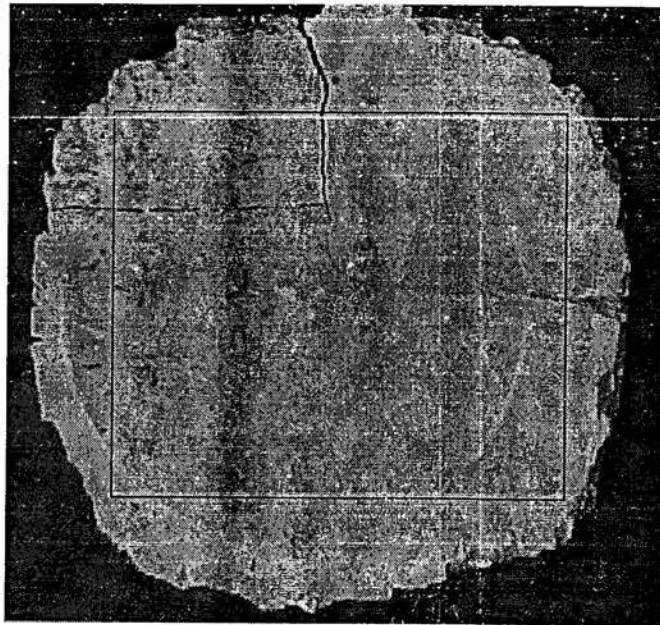
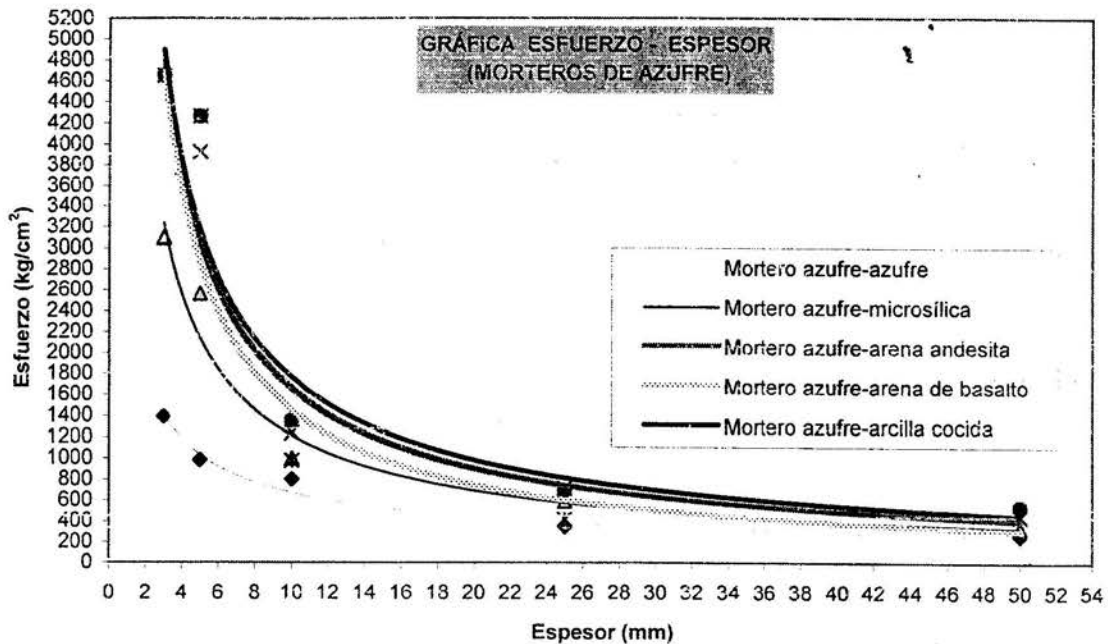


Figura 8



GRÁFICA 9

PROBLEMAS QUE SE PUEDEN PRESENTAR EN LA FABRICACIÓN DE LAS PROBETAS DE AZUFRE

Las propiedades físicas del azufre solidificado son alteradas por diferentes factores. De los cuales es importante identificarlos para evitar su aparición en pruebas consecuentes.

A pesar de que la norma MNX-C-109 no señala que tipo de azufre es el que se debe utilizar en el cabeceo de especímenes de concreto, se entiende que es recomendable el de mayor pureza y que esté libre de agua absorbida.

Uno de los problemas de mayor frecuencia en los cubos, son las oquedades que quedan al centro del cubo. Estas ocurren aún cuando los cuidados son extremos.

La causa que la genera es una deficiente relleno. Es importante diferenciarlos de las burbujas provocadas por el agua absorbida por el azufre. (figura 9).



Figura 9

Otro problema común que se presenta en los cubos es el producido por el enfriamiento rápido del mortero, el cual se identifica por la formación de dendritas (cristales que convergen al centro del cubo). La forma correcta de la cristalización del azufre es aquella donde el crecimiento de dichos cristales es en forma de capas, cosa que no es muy fácil identificar en el cubo, por lo tanto es importante controlar la velocidad de enfriamiento, como ya precisamente lo señala la norma correspondiente (figura 10).

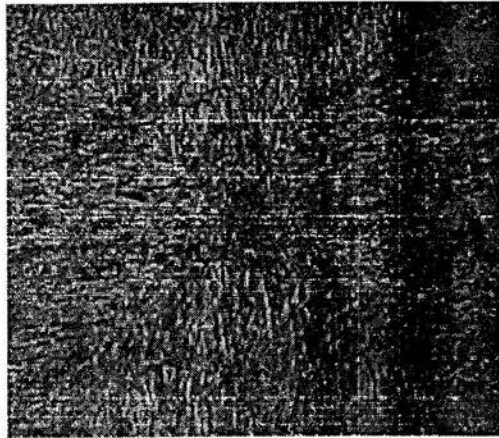


Figura 10

Otro problema que no es muy común de observar pero que sin embargo llega a ocurrir, es la formación de “bulbos”, los cuales son consecuencia de un relleno que no es hecho en su momento. Esto es generado principalmente por la diferencia de temperaturas entre el azufre anterior y posterior (figura 11).

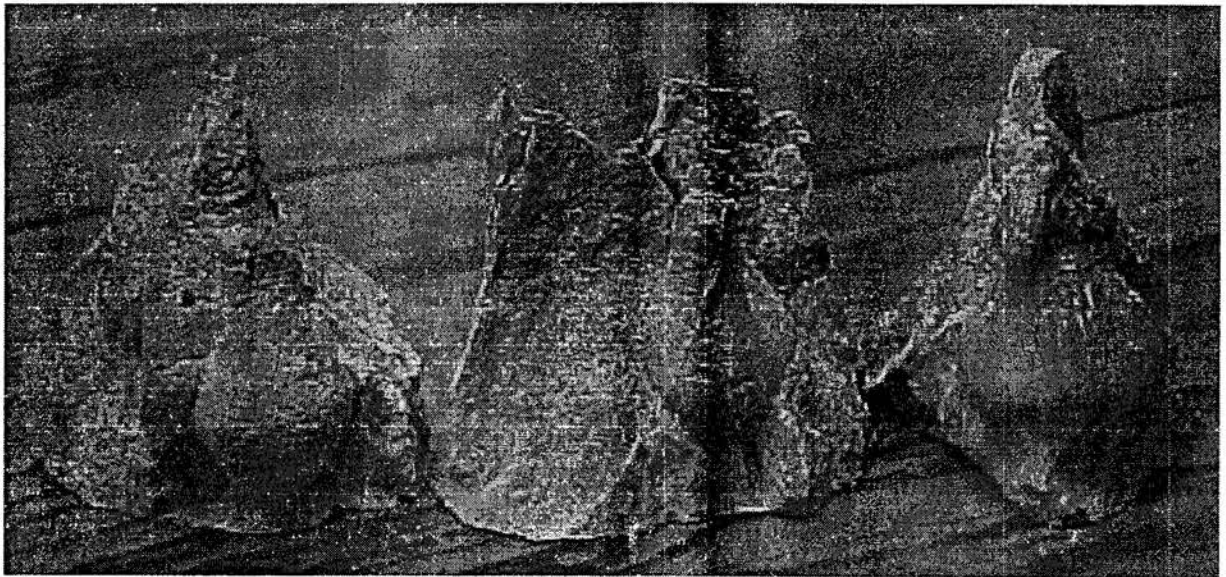


Figura 12

Por otra parte, una falla que suele ocurrir por errores de procedimiento, es cuando es insuficiente el mortero y al técnico no le alcanza para llenar los cubos, entonces por comodidad lo que hace es agregar mayor cantidad de azufre, cambiando la proporción del mortero, pero no sólo eso, si no que también el azufre recién añadido no alcanza la temperatura ni mucho menos a mezclarse con el ya contenido en la jarra o recipiente para refrentado. Es así como se observan dos fases contenidas en el cubo. En general ocurre que el azufre solo cristaliza en el centro y la parte de la fase del mortero en el perímetro (figura 13).

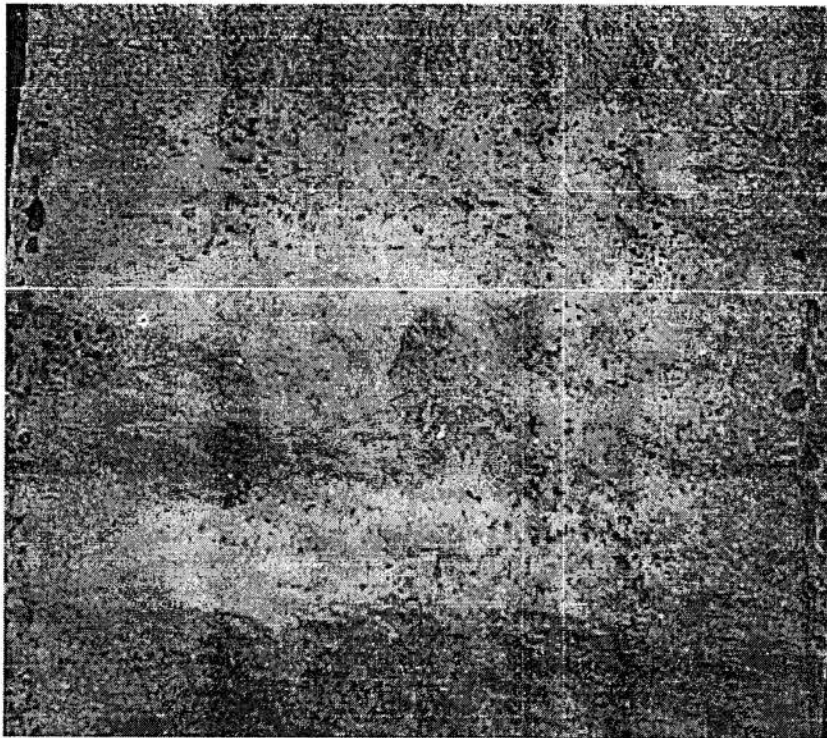


Figura 13

En última instancia mencionaremos un error, que también es de procedimiento. Este es característico porque ni siquiera el cubo se llega a formar. Hablamos del que es consecuencia del sobrecalentamiento del molde, mismo que se manifiesta

cuando al querer verter el mortero el azufre este se fuga por las pequeñísimas juntas entre las placas que componen el molde. Para este caso no tenemos fotografía alguna pero el error es inconfundible cuando llega a suceder.

CONCLUSIONES

Es importante señalar que las variables estudiadas en este reporte, tal vez no sean las únicas y más relevantes que influyan en las propiedades físicas de los morteros de azufre elaborados en laboratorio. Pero estamos convencidos de que servirán para confirmar y complementar los conocimientos ya adquiridos a este respecto.

De acuerdo a nuestro primer objetivo planteado, podemos concluir que el mortero fabricado con arena andesita es el que nos proporciona la mejor resistencia (550 kg/cm^2) en las probetas cúbicas, esto en comparación con los demás morteros.

Por lo que respecta a los tamaños de arena que fueron utilizados para elaborar los morteros, observamos que las mejores resistencias se obtuvieron con las combinaciones de azufre con retenido en la malla # 100 y # 200 respectivamente. A pesar de la similitud en resistencia de ambos morteros, se recomienda trabajar con el tamaño del retenido de la malla # 100 ya que es más fácil de obtenerlo en las arenas que se usan en la obra.

En relación a la proporción del material fundido con el material inerte, se corroboró el señalamiento de la norma NMX-C-109. Aunque hay que hacer mención, que existe la posibilidad de usar una relación uno a uno, la cual proporcionaría una mayor resistencia, sólo que se dificultaría su colocación en los moldes y en el plato de refrentado. Pero se ha observado que con un poco de práctica y habilidad se tienen resultados favorables.

En el estudio que se hizo para observar el efecto del espesor de la placa de mortero, se encontró que conforme esta es más delgada los esfuerzos que se obtienen son mayores. Pero también las deformaciones son considerables, de tal forma que podrían ser la causa, en algunos casos, como una variable adicional de la falla prematura del cilindro de concreto. En este sentido, cabe hacer la reflexión

del porque se ha tomado la resistencia de un cubo de 50 mm por lado como referencia, sí de los resultados del presente trabajo no existe una relación importante entre la resistencia del azufre colocado como una placa delgada en las probetas y la especificación de la norma.

Por último enlistaremos las fallas más frecuentes que se presentaron en las probetas cúbicas de los diferentes morteros de azufre:

- Presencia de huecos por deficiencia de llenado y contenido de vacíos por agua evaporada.
- Formación de dendritas por enfriamiento rápido.
- Formación de bulbos por: diferencias de temperaturas, falta de homogenización de la mezcla de mortero y relleno a destiempo.
- Cristalización en dos fases diferentes por agregar más cantidad de azufre, y no permitir que se mezcle y alcance la misma temperatura la mezcla.
- La no formación del cubo por sobrecalentamiento del molde.

Como una última reflexión vale la pena recordar que hasta el momento la técnica del mortero de azufre a resultado ser la forma más económica para el rectificado de los especímenes de prueba, pero en contraparte resulta ser la más peligrosa, por las quemaduras provocadas del descuido o mal manejo, así como también por la contaminación al ambiente por el bióxido de azufre desprendido durante el calentamiento. Por otra parte, además, requiere de muchos cuidados y experiencia para conseguir con éxito un buen refrentado. Por sobre todo lo anterior, mientras esta técnica sea la más utilizada, habrá que seguir estudiando este material para poder optimizar el proceso y retroalimentar con las experiencias de los laboratoristas.

REFERENCIAS

- "Industria de la construcción – Concreto – Cabeceo de especímenes cilíndricos NMX – C – 109 – 1997.
- "Industria de la construcción – Cemento – Determinación de la resistencia a la compresión de cementantes hidráulicos NMX – C – 61
- ASTM C – 617 – 94 Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens
- ADAM M. NEVILLE. Tecnología del Concreto. México, Edit . IMCYC, 1999.

ANEXO E

ENSAYE A COMPRESIÓN DE LOS ESPECÍMENES DE CONCRETO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERIA MAESTRIA EN CONSTRUCCION
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE INGENIERIA CIVIL
A N E X O E

RESULTADOS DE PRUEBAS A COMPRESIÓN EN ESPECÍMENES DE CONCRETO HIDRÁULICO

Fecha de fabricación: Sábado, 15 de Octubre de 2005
 Fecha de ensaye: Sábado, 12 de Noviembre de 2005
 No. total de especímenes elaborados: 60
 No. total de especímenes ensayados: 60

Tipo de cemento: Cemento CPC 30R
 Relaciones A/C utilizadas: 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8
 Número de especímenes por relación A/C: 10

Hoja 1 de 3

| No. de ensaye | Relación A/C | No. de muestra | ϕ_1 (cm) | ϕ_2 (cm) | ϕ prom (cm) | Área (cm ²) | Altura (cm) | Volumen (cm ³) | Peso (Kg) | Peso volumétrico (kg/ m ³) | Carga (Kg) | Carga corregida (kg) | Resistencia (Kg/cm ²) | Resistencia corregida por temperatura (Kg/cm ²) | Promedio aritmético |
|---------------|--------------|----------------|---------------|---------------|------------------|-------------------------|-------------|----------------------------|-----------|--|------------|----------------------|-----------------------------------|---|---|
| 1 | 0.3 | M-1 | 14.9 | 15.0 | 15.0 | 175.54 | 30.1 | 5283.7 | 11.724 | 2219 | 71200 | 69600 | 396 | 402 | Resistencia a compresión (Kg/ cm ²) 416 |
| 2 | | M-2 | 14.8 | 15.2 | 15.0 | 176.71 | 30.2 | 5327.9 | 11.756 | 2206 | 72400 | 70800 | 401 | 407 | |
| 3 | | M-3 | 14.9 | 15.1 | 15.0 | 176.71 | 30.1 | 5319.1 | 11.667 | 2193 | 77000 | 75400 | 427 | 434 | |
| 4 | | M-4 | 14.9 | 14.9 | 14.9 | 174.37 | 30.1 | 5248.4 | 11.764 | 2241 | 73800 | 72200 | 414 | 420 | |
| 5 | | M-5 | 14.9 | 15.1 | 15.0 | 176.71 | 30.2 | 5327.9 | 11.780 | 2211 | 78600 | 77000 | 436 | 443 | |
| 6 | | M-6 | 15.0 | 15.0 | 15.0 | 176.71 | 30.2 | 5336.8 | 11.607 | 2175 | 74800 | 73200 | 414 | 420 | Peso volumétrico (Kg/ m ³) 2201 |
| 7 | | M-7 | 15.2 | 14.9 | 15.1 | 177.89 | 30.2 | 5372.4 | 11.731 | 2184 | 69200 | 67800 | 381 | 387 | |
| 8 | | M-8 | 15.1 | 14.9 | 15.0 | 176.71 | 30.1 | 5319.1 | 11.742 | 2208 | 68600 | 67200 | 380 | 386 | |
| 9 | | M-9 | 15.0 | 15.2 | 15.1 | 179.08 | 30.1 | 5390.3 | 11.703 | 2171 | 79000 | 77400 | 432 | 439 | |
| 10 | | M-10 | 15.0 | 15.1 | 15.1 | 177.89 | 30.0 | 5336.8 | 11.771 | 2206 | 74800 | 73200 | 411 | 417 | |
| 11 | 0.4 | M-1 | 15.0 | 15.0 | 15.0 | 176.71 | 30.2 | 5336.8 | 11.677 | 2188 | 58400 | 57200 | 324 | 329 | Resistencia a compresión (Kg/ cm ²) 342 |
| 12 | | M-2 | 14.9 | 15.2 | 15.1 | 177.89 | 29.9 | 5319.0 | 11.699 | 2199 | 60600 | 59200 | 333 | 338 | |
| 13 | | M-3 | 14.9 | 15.2 | 15.1 | 177.89 | 30.1 | 5354.6 | 11.691 | 2183 | 60400 | 59000 | 332 | 337 | |
| 14 | | M-4 | 15.0 | 14.9 | 15.0 | 175.54 | 30.0 | 5266.2 | 11.621 | 2207 | 61600 | 60200 | 343 | 348 | |
| 15 | | M-5 | 15.0 | 15.0 | 15.0 | 176.71 | 30.1 | 5319.1 | 11.641 | 2189 | 61200 | 59800 | 338 | 343 | |
| 16 | | M-6 | 14.9 | 15.1 | 15.0 | 176.71 | 30.2 | 5336.8 | 11.755 | 2203 | 61400 | 60000 | 340 | 345 | Peso volumétrico (Kg/ m ³) 2193 |
| 17 | | M-7 | 15.0 | 15.0 | 15.0 | 176.71 | 29.9 | 5283.8 | 11.633 | 2202 | 59600 | 58400 | 330 | 335 | |
| 18 | | M-8 | 15.0 | 15.0 | 15.0 | 176.71 | 30.0 | 5301.4 | 11.652 | 2198 | 64600 | 63200 | 358 | 364 | |
| 19 | | M-9 | 14.9 | 15.3 | 15.1 | 179.08 | 30.0 | 5372.4 | 11.692 | 2176 | 63200 | 61800 | 345 | 350 | |
| 20 | | M-10 | 15.0 | 15.1 | 15.1 | 177.89 | 30.0 | 5336.8 | 11.688 | 2190 | 58400 | 57200 | 322 | 327 | |

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERIA MAESTRIA EN CONSTRUCCION
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE INGENIERIA CIVIL
A N E X O E

RESULTADOS DE PRUEBAS A COMPRESIÓN EN ESPECÍMENES DE CONCRETO HIDRÁULICO

Fecha de fabricación: Sábado, 15 de Octubre de 2005
 Fecha de ensaye: Sábado, 12 de Noviembre de 2005
 No. total de especímenes elaborados: 60
 No. total de especímenes ensayados: 60

Tipo de cemento: Cemento CPC 30R
 Relaciones A/C utilizadas: 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8
 Número de especímenes por relación A/C: 10

Hoja 2 de 3

| No. de ensaye | Relación A/C | No. de muestra | ϕ_1 (cm) | ϕ_2 (cm) | ϕ prom (cm) | Área (cm ²) | Altura (cm) | Volumen (cm ³) | Peso (Kg) | Peso volumétrico (kg/ m ³) | Carga (Kg) | Carga corregida (kg) | Resistencia (Kg/cm ²) | Resistencia corregida por temperatura (Kg/cm ²) | Promedio aritmético |
|---------------|--------------|----------------|---------------|---------------|------------------|-------------------------|-------------|----------------------------|-----------|--|------------|----------------------|-----------------------------------|---|---|
| 21 | 0.5 | M-1 | 14.9 | 15.2 | 15.1 | 177.89 | 29.9 | 5319.0 | 11.660 | 2192 | 45000 | 44000 | 247 | 251 | Resistencia a compresión (Kg/ cm ²) |
| 22 | | M-2 | 15.0 | 15.0 | 15.0 | 176.71 | 30.0 | 5301.4 | 11.622 | 2192 | 47200 | 46200 | 261 | 265 | |
| 23 | | M-3 | 15.3 | 15.1 | 15.2 | 181.46 | 30.2 | 5480.0 | 12.110 | 2210 | 49000 | 48000 | 265 | 269 | |
| 24 | | M-4 | 15.3 | 14.9 | 15.1 | 179.08 | 30.0 | 5372.4 | 11.640 | 2167 | 48400 | 47400 | 265 | 269 | |
| 25 | | M-5 | 15.1 | 15.1 | 15.1 | 179.08 | 30.2 | 5408.2 | 11.610 | 2147 | 45000 | 44000 | 246 | 250 | |
| 26 | | M-6 | 15.1 | 15.2 | 15.2 | 180.27 | 30.4 | 5480.1 | 11.783 | 2150 | 47000 | 46000 | 255 | 259 | Peso volumétrico (Kg/ m ³) |
| 27 | | M-7 | 15.2 | 15.0 | 15.1 | 179.08 | 30.2 | 5408.2 | 11.576 | 2140 | 46800 | 45800 | 256 | 260 | |
| 28 | | M-8 | 15.2 | 15.6 | 15.4 | 186.27 | 30.7 | 5718.3 | 12.129 | 2121 | 48200 | 47200 | 253 | 257 | |
| 29 | | M-9 | 15.1 | 15.1 | 15.1 | 179.08 | 30.1 | 5390.3 | 11.531 | 2139 | 46600 | 45600 | 255 | 259 | |
| 30 | | M-10 | 15.1 | 15.2 | 15.2 | 180.27 | 30.1 | 5426.0 | 11.598 | 2137 | 44600 | 43600 | 242 | 246 | |
| 31 | 0.6 | M-1 | 15.1 | 15.0 | 15.1 | 177.89 | 30.2 | 5372.4 | 11.562 | 2152 | 37600 | 36800 | 207 | 210 | Resistencia a compresión (Kg/ cm ²) |
| 32 | | M-2 | 15.0 | 15.2 | 15.1 | 179.08 | 30.3 | 5426.1 | 11.644 | 2146 | 37400 | 36600 | 204 | 207 | |
| 33 | | M-3 | 15.0 | 15.2 | 15.1 | 179.08 | 30.1 | 5390.3 | 11.601 | 2152 | 36800 | 36000 | 201 | 204 | |
| 34 | | M-4 | 15.1 | 15.1 | 15.1 | 179.08 | 30.2 | 5408.2 | 11.533 | 2133 | 44200 | 43200 | 241 | 245 | |
| 35 | | M-5 | 15.1 | 15.1 | 15.1 | 179.08 | 30.0 | 5372.4 | 11.580 | 2155 | 40000 | 39000 | 218 | 221 | |
| 36 | | M-6 | 15.0 | 15.1 | 15.1 | 177.89 | 30.2 | 5372.4 | 11.603 | 2160 | 40600 | 39600 | 223 | 226 | Peso volumétrico (Kg/ m ³) |
| 37 | | M-7 | 15.2 | 15.0 | 15.1 | 179.08 | 30.4 | 5444.0 | 11.595 | 2130 | 40400 | 39400 | 220 | 223 | |
| 38 | | M-8 | 15.0 | 15.3 | 15.2 | 180.27 | 30.2 | 5444.0 | 11.523 | 2117 | 39600 | 38600 | 214 | 217 | |
| 39 | | M-9 | 15.0 | 15.1 | 15.1 | 177.89 | 30.2 | 5372.4 | 11.572 | 2154 | 40200 | 39200 | 220 | 223 | |
| 40 | | M-10 | 15.1 | 15.3 | 15.2 | 181.46 | 30.2 | 5480.0 | 11.628 | 2122 | 37200 | 36400 | 201 | 204 | |

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERIA MAESTRIA EN CONSTRUCCION
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE INGENIERIA CIVIL
A N E X O E

RESULTADOS DE PRUEBAS A COMPRESIÓN EN ESPECÍMENES DE CONCRETO HIDRÁULICO

Fecha de fabricación: Sábado, 15 de Octubre de 2005
 Fecha de ensaye: Sábado, 12 de Noviembre de 2005
 No. total de especímenes elaborados: 60
 No. total de especímenes ensayados: 60

Tipo de cemento: Cemento CPC 30R
 Relaciones A/C utilizadas: 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8
 Número de especímenes por relación A/C: 10

Hoja 3 de 3

| No. de ensaye | Relación A/C | No. de muestra | ϕ_1 (cm) | ϕ_2 (cm) | ϕ prom (cm) | Área (cm ²) | Altura (cm) | Volumen (cm ³) | Peso (Kg) | Peso volumétrico (kg/ m ³) | Carga (Kg) | Carga corregida (kg) | Resistencia (Kg/cm ²) | Resistencia corregida por temperatura (Kg/cm ²) | Promedio aritmético |
|---------------|--------------|----------------|---------------|---------------|------------------|-------------------------|-------------|----------------------------|-----------|--|------------|----------------------|-----------------------------------|---|---|
| 41 | 0.7 | M-1 | 14.9 | 15.0 | 15.0 | 175.54 | 30.0 | 5266.2 | 11.417 | 2168 | 27200 | 26600 | 152 | 154 | Resistencia a compresión (Kg/ cm ²) |
| 42 | | M-2 | 15.3 | 14.9 | 15.1 | 179.08 | 30.2 | 5408.2 | 11.645 | 2153 | 28000 | 27400 | 153 | 155 | |
| 43 | | M-3 | 15.1 | 15.1 | 15.1 | 179.08 | 30.1 | 5390.3 | 11.548 | 2142 | 27800 | 27200 | 152 | 154 | |
| 44 | | M-4 | 15.2 | 15.1 | 15.2 | 180.27 | 30.3 | 5462.1 | 11.548 | 2114 | 26200 | 25600 | 142 | 144 | |
| 45 | | M-5 | 15.0 | 15.3 | 15.2 | 180.27 | 30.2 | 5444.0 | 11.572 | 2126 | 28400 | 27800 | 154 | 156 | |
| 46 | | M-6 | 15.3 | 14.9 | 15.1 | 179.08 | 30.2 | 5408.2 | 11.521 | 2130 | 28000 | 27400 | 153 | 155 | Peso volumétrico (Kg/ m ³) |
| 47 | | M-7 | 15.0 | 15.2 | 15.1 | 179.08 | 30.1 | 5390.3 | 11.575 | 2147 | 29600 | 29000 | 162 | 165 | |
| 48 | | M-8 | 15.2 | 15.2 | 15.2 | 181.46 | 30.1 | 5461.9 | 11.517 | 2109 | 28000 | 27400 | 151 | 153 | |
| 49 | | M-9 | 15.3 | 14.9 | 15.1 | 179.08 | 30.1 | 5390.3 | 11.547 | 2142 | 28000 | 27400 | 153 | 155 | |
| 50 | | M-10 | 15.2 | 15.1 | 15.2 | 180.27 | 30.2 | 5444.0 | 11.541 | 2120 | 28400 | 27800 | 154 | 156 | |
| 51 | 0.8 | M-1 | 15.0 | 15.0 | 15.0 | 176.71 | 30.1 | 5319.1 | 11.435 | 2150 | 15600 | 15200 | 86 | 87 | Resistencia a compresión (Kg/ cm ²) |
| 52 | | M-2 | 15.0 | 15.0 | 15.0 | 176.71 | 29.9 | 5283.8 | 11.264 | 2132 | 20400 | 20000 | 113 | 115 | |
| 53 | | M-3 | 15.1 | 15.0 | 15.1 | 177.89 | 30.0 | 5336.8 | 11.355 | 2128 | 19600 | 19200 | 108 | 110 | |
| 54 | | M-4 | 15.1 | 15.1 | 15.1 | 179.08 | 30.1 | 5390.3 | 11.358 | 2107 | 17000 | 16600 | 93 | 94 | |
| 55 | | M-5 | 15.1 | 15.1 | 15.1 | 179.08 | 29.9 | 5354.5 | 11.419 | 2133 | 20400 | 20000 | 112 | 114 | |
| 56 | | M-6 | 15.3 | 15.1 | 15.2 | 181.46 | 30.1 | 5461.9 | 11.398 | 2087 | 16800 | 16400 | 90 | 91 | Peso volumétrico (Kg/ m ³) |
| 57 | | M-7 | 14.9 | 15.1 | 15.0 | 176.71 | 29.5 | 5213.1 | 11.498 | 2206 | 19600 | 19200 | 109 | 111 | |
| 58 | | M-8 | 15.1 | 15.2 | 15.2 | 180.27 | 30.2 | 5444.0 | 11.492 | 2111 | 15200 | 14800 | 82 | 83 | |
| 59 | | M-9 | 15.2 | 15.0 | 15.1 | 179.08 | 30.0 | 5372.4 | 11.395 | 2121 | 19600 | 19200 | 107 | 109 | |
| 60 | | M-10 | 15.1 | 15.2 | 15.2 | 180.27 | 30.0 | 5408.0 | 11.438 | 2115 | 14000 | 13600 | 75 | 76 | |



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA MAESTRIA EN CONSTRUCCIÓN
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE INGENIERÍA CIVIL
A N E X O E

RESULTADOS DE PRUEBAS A COMPRESIÓN EN ESPECÍMENES DE CONCRETO HIDRÁULICO

Fecha de fabricación: Sábado, 22 de Octubre de 2005
 Fecha de ensaye: Sábado, 19 de Noviembre de 2005
 No. total de especímenes elaborados: 50
 No. total de especímenes ensayados: 50

Tipo de cemento: Cemento CPP 30R
 Relaciones A/C utilizadas: 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7.
 Número de especímenes por relación A/C: 10

Hoja 1 de 3

| No. de ensaye | Relación A/C | No. de muestra | ϕ_1 (cm) | ϕ_2 (cm) | ϕ prom (cm) | Área (cm ²) | Altura (cm) | Volumen (cm ³) | Peso (Kg) | Peso volumétrico (kg/ m ³) | Carga (Kg) | Carga corregida (kg) | Resistencia (Kg/cm ²) | Resistencia corregida por temperatura (Kg/cm ²) | Promedio aritmético |
|---------------|--------------|----------------|---------------|---------------|------------------|-------------------------|-------------|----------------------------|-----------|--|------------|----------------------|-----------------------------------|---|---|
| 1 | 0.3 | M-1 | 15.0 | 15.2 | 15.1 | 179.08 | 30.2 | 5408 | 11.923 | 2205 | 80400 | 78600 | 439 | 446 | Resistencia a compresión (Kg/ cm ²) |
| 2 | | M-2 | 15.0 | 15.1 | 15.1 | 179.08 | 30.1 | 5390 | 11.892 | 2206 | 82400 | 80600 | 450 | 457 | |
| 3 | | M-3 | 15.1 | 15.1 | 15.1 | 179.08 | 30.2 | 5408 | 11.887 | 2198 | 82200 | 80400 | 449 | 456 | |
| 4 | | M-4 | 15.4 | 15.3 | 15.4 | 186.27 | 30.5 | 5681 | 12.286 | 2163 | 87400 | 85600 | 460 | 467 | |
| 5 | | M-5 | 15.0 | 15.2 | 15.1 | 179.08 | 30.1 | 5390 | 11.858 | 2200 | 81400 | 79600 | 444 | 451 | |
| 6 | | M-6 | 15.0 | 15.0 | 15.0 | 176.71 | 30.0 | 5301 | 11.638 | 2195 | 83200 | 81400 | 461 | 468 | Peso volumétrico (Kg/ m ³) |
| 7 | | M-7 | 15.0 | 15.0 | 15.0 | 176.71 | 30.2 | 5337 | 11.784 | 2208 | 82200 | 80400 | 455 | 462 | |
| 8 | | M-8 | 14.9 | 15.3 | 15.1 | 179.08 | 30.3 | 5426 | 11.921 | 2197 | 83800 | 82000 | 458 | 465 | |
| 9 | | M-9 | 14.9 | 15.2 | 15.1 | 179.08 | 30.3 | 5426 | 11.930 | 2199 | 84000 | 82200 | 459 | 466 | |
| 10 | | M-10 | 15.0 | 15.0 | 15.0 | 176.71 | 30.3 | 5354 | 11.897 | 2222 | 83200 | 81400 | 461 | 468 | |
| 11 | 0.4 | M-1 | 15.2 | 15.1 | 15.2 | 181.46 | 30.1 | 5462 | 11.749 | 2151 | 64300 | 63000 | 347 | 352 | Resistencia a compresión (Kg/ cm ²) |
| 12 | | M-2 | 15.0 | 15.3 | 15.2 | 181.46 | 30.2 | 5480 | 11.695 | 2134 | 63400 | 62000 | 342 | 347 | |
| 13 | | M-3 | 15.4 | 15.0 | 15.2 | 181.46 | 30.1 | 5462 | 11.697 | 2142 | 67600 | 66200 | 365 | 371 | |
| 14 | | M-4 | 14.9 | 15.2 | 15.1 | 179.08 | 30.2 | 5408 | 11.694 | 2162 | 64400 | 63000 | 352 | 358 | |
| 15 | | M-5 | 15.1 | 15.2 | 15.2 | 181.46 | 30.1 | 5462 | 11.787 | 2158 | 67000 | 65600 | 362 | 368 | |
| 16 | | M-6 | 14.9 | 15.1 | 15.0 | 176.71 | 30.2 | 5337 | 11.700 | 2192 | 66400 | 65000 | 368 | 374 | Peso volumétrico (Kg/ m ³) |
| 17 | | M-7 | 15.2 | 15.1 | 15.2 | 181.46 | 30.2 | 5480 | 11.747 | 2144 | 62800 | 61400 | 338 | 343 | |
| 18 | | M-8 | 15.0 | 15.1 | 15.1 | 179.08 | 30.2 | 5408 | 11.605 | 2146 | 65600 | 64200 | 358 | 364 | |
| 19 | | M-9 | 15.0 | 15.3 | 15.2 | 181.46 | 30.1 | 5462 | 11.721 | 2146 | 62800 | 61400 | 338 | 343 | |
| 20 | | M-10 | 15.3 | 15.0 | 15.2 | 181.46 | 30.0 | 5444 | 11.697 | 2149 | 65600 | 64200 | 354 | 360 | |



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA MAESTRIA EN CONSTRUCCIÓN
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE INGENIERÍA CIVIL

A N E X O E

RESULTADOS DE PRUEBAS A COMPRESIÓN EN ESPECÍMENES DE CONCRETO HIDRÁULICO

Fecha de fabricación: Sábado, 22 de Octubre de 2005
 Fecha de ensaye: Sábado, 19 de Noviembre de 2005
 No. total de especímenes elaborados: 50
 No. total de especímenes ensayados: 50

Tipo de cemento: Cemento CPP 30R
 Relaciones A/C utilizadas: 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7.
 Número de especímenes por relación A/C: 10

Hoja 2 de 3

| No. de ensaye | Relación A/C | No. de muestra | ϕ_1 (cm) | ϕ_2 (cm) | ϕ prom (cm) | Área (cm ²) | Altura (cm) | Volumen (cm ³) | Peso (Kg) | Peso volumétrico (kg/ m ³) | Carga (Kg) | Carga corregida (kg) | Resistencia (Kg/cm ²) | Resistencia corregida por temperatura (Kg/cm ²) | Promedio aritmético |
|---------------|--------------|----------------|---------------|---------------|------------------|-------------------------|-------------|----------------------------|-----------|--|------------|----------------------|-----------------------------------|---|---|
| 21 | 0.5 | M-1 | 15.2 | 15.1 | 15.2 | 180.27 | 30.2 | 5444 | 11.608 | 2132 | 48800 | 47800 | 265 | 269 | Resistencia a compresión (Kg/ cm ²) 266 |
| 22 | | M-2 | 15.0 | 15.2 | 15.1 | 179.08 | 30.1 | 5390 | 11.688 | 2168 | 46400 | 45400 | 254 | 258 | |
| 23 | | M-3 | 15.2 | 15.0 | 15.1 | 179.08 | 30.2 | 5408 | 11.660 | 2156 | 44400 | 43400 | 242 | 246 | |
| 24 | | M-4 | 15.1 | 15.1 | 15.1 | 179.08 | 30.1 | 5390 | 11.728 | 2176 | 47200 | 46200 | 258 | 262 | |
| 25 | | M-5 | 15.1 | 15.1 | 15.1 | 179.08 | 30.2 | 5408 | 11.651 | 2154 | 46800 | 45800 | 256 | 260 | |
| 26 | | M-6 | 15.1 | 15.1 | 15.1 | 179.08 | 30.1 | 5390 | 11.670 | 2165 | 52600 | 51400 | 287 | 291 | Peso volumétrico (Kg/ m ³) 2158 |
| 27 | | M-7 | 15.1 | 15.0 | 15.1 | 177.89 | 30.4 | 5408 | 11.665 | 2157 | 50600 | 49400 | 278 | 282 | |
| 28 | | M-8 | 15.1 | 15.1 | 15.1 | 179.08 | 30.3 | 5426 | 11.655 | 2148 | 46600 | 45600 | 255 | 259 | |
| 29 | | M-9 | 15.2 | 15.0 | 15.1 | 179.08 | 30.1 | 5390 | 11.674 | 2166 | 47000 | 46000 | 257 | 261 | |
| 30 | | M-10 | 15.0 | 15.1 | 15.1 | 177.89 | 30.2 | 5372 | 11.609 | 2161 | 47800 | 46800 | 263 | 267 | |
| 31 | 0.6 | M-1 | 15.2 | 15.1 | 15.2 | 180.27 | 30.1 | 5426 | 11.714 | 2159 | 42400 | 41400 | 230 | 234 | Resistencia a compresión (Kg/ cm ²) 222 |
| 32 | | M-2 | 15.0 | 15.2 | 15.1 | 179.08 | 30.1 | 5390 | 11.659 | 2163 | 43200 | 42200 | 236 | 240 | |
| 33 | | M-3 | 15.1 | 15.0 | 15.1 | 177.89 | 30.2 | 5372 | 11.710 | 2180 | 39000 | 38200 | 215 | 218 | |
| 34 | | M-4 | 15.3 | 15.1 | 15.2 | 181.46 | 30.2 | 5480 | 11.711 | 2137 | 41400 | 40400 | 223 | 226 | |
| 35 | | M-5 | 15.2 | 15.0 | 15.1 | 179.08 | 30.2 | 5408 | 11.622 | 2149 | 38800 | 38000 | 212 | 215 | |
| 36 | | M-6 | 15.2 | 15.1 | 15.2 | 180.27 | 30.1 | 5426 | 11.631 | 2144 | 42000 | 41000 | 227 | 231 | Peso volumétrico (Kg/ m ³) 2158 |
| 37 | | M-7 | 15.0 | 15.2 | 15.1 | 179.08 | 30.1 | 5390 | 11.642 | 2160 | 38600 | 37800 | 211 | 214 | |
| 38 | | M-8 | 15.2 | 15.0 | 15.1 | 179.08 | 30.1 | 5390 | 11.667 | 2164 | 39200 | 38400 | 214 | 217 | |
| 39 | | M-9 | 15.0 | 15.2 | 15.1 | 179.08 | 30.1 | 5390 | 11.676 | 2166 | 38800 | 38000 | 212 | 215 | |
| 40 | | M-10 | 15.1 | 15.1 | 15.1 | 179.08 | 30.1 | 5390 | 11.629 | 2157 | 37200 | 36400 | 203 | 206 | |



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA MAESTRIA EN CONSTRUCCIÓN
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE INGENIERÍA CIVIL

A N E X O E

RESULTADOS DE PRUEBAS A COMPRESIÓN EN ESPECÍMENES DE CONCRETO HIDRÁULICO

Fecha de fabricación: Sábado, 22 de Octubre de 2005
 Fecha de ensaye: Sábado, 19 de Noviembre de 2005

Tipo de cemento: Cemento CPP 30R
 Relaciones A/C utilizadas: 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7.

No. total de especímenes elaborados: 50
 No. total de especímenes ensayados: 50

Número de especímenes por relación A/C: 10

Hoja 3 de 3

| No. de ensaye | Relación A/C | No. de muestra | ϕ_1 (cm) | ϕ_2 (cm) | ϕ prom (cm) | Área (cm ²) | Altura (cm) | Volumen (cm ³) | Peso (Kg) | Peso volumétrico (kg/ m ³) | Carga (Kg) | Carga corregida (kg) | Resistencia (Kg/cm ²) | Resistencia corregida por temperatura (Kg/cm ²) | Promedio aritmético |
|---------------|--------------|----------------|---------------|---------------|------------------|-------------------------|-------------|----------------------------|-----------|--|------------|----------------------|-----------------------------------|---|---|
| 41 | 0.7 | M-1 | 15.1 | 15.0 | 15.1 | 177.89 | 30.1 | 5355 | 11.474 | 2143 | 25400 | 24800 | 139 | 141 | Resistencia a compresión (Kg/ cm ²) |
| 42 | | M-2 | 14.9 | 15.0 | 15.0 | 175.54 | 30.0 | 5266 | 11.315 | 2149 | 24800 | 24200 | 138 | 140 | |
| 43 | | M-3 | 15.1 | 15.2 | 15.2 | 180.27 | 30.1 | 5426 | 11.538 | 2126 | 24800 | 24200 | 134 | 136 | |
| 44 | | M-4 | 14.9 | 15.3 | 15.1 | 179.08 | 30.0 | 5372 | 11.460 | 2133 | 25600 | 25000 | 140 | 142 | |
| 45 | | M-5 | 15.2 | 14.9 | 15.1 | 177.89 | 30.3 | 5390 | 11.494 | 2132 | 24600 | 24000 | 135 | 137 | |
| 46 | | M-6 | 15.2 | 14.9 | 15.1 | 177.89 | 30.1 | 5355 | 11.460 | 2140 | 24200 | 23600 | 133 | 135 | Peso volumétrico (Kg/ m ³) |
| 47 | | M-7 | 14.9 | 15.2 | 15.1 | 177.89 | 30.3 | 5390 | 11.584 | 2149 | 22200 | 21600 | 121 | 123 | |
| 48 | | M-8 | 15.1 | 15.1 | 15.1 | 179.08 | 30.1 | 5390 | 11.469 | 2128 | 24600 | 24000 | 134 | 136 | |
| 49 | | M-9 | 15.1 | 15.2 | 15.2 | 180.27 | 30.0 | 5408 | 11.505 | 2127 | 24400 | 23800 | 132 | 134 | |
| 50 | | M-10 | 15.1 | 15.1 | 15.1 | 179.08 | 30.2 | 5408 | 11.469 | 2121 | 24200 | 23600 | 132 | 134 | |



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA MAESTRIA EN CONSTRUCCIÓN
DIVISION DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE INGENIERÍA CIVIL
A N E X O E

RESULTADOS DE PRUEBAS A COMPRESIÓN EN ESPECÍMENES DE CONCRETO HIDRÁULICO

Fecha de fabricación: Sábado, 29 de Octubre de 2005
 Fecha de ensaye: Sábado, 26 de Noviembre de 2005
 No. total de especímenes elaborados: 50
 No. total de especímenes ensayados: 50

Tipo de cemento: Cemento CPO 40R/ B
 Relaciones A/C utilizadas: 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7.
 Número de especímenes por relación A/C: 10

Hoja 1 de 3

| No. de ensaye | Relación A/C | No. de muestra | ϕ_1 (cm) | ϕ_2 (cm) | ϕ prom (cm) | Área (cm ²) | Altura (cm) | Volumen (cm ³) | Peso (Kg) | Peso volumétrico (kg/ m ³) | Carga (Kg) | Carga corregida (kg) | Resistencia (Kg/cm ²) | Resistencia corregida por temperatura (Kg/cm ²) | Promedio aritmético |
|---------------|--------------|----------------|---------------|---------------|------------------|-------------------------|-------------|----------------------------|-----------|--|------------|----------------------|-----------------------------------|---|---|
| 1 | 0.3 | M-1 | 15.0 | 15.1 | 15.1 | 177.89 | 30.1 | 5354.6 | 11.844 | 2212 | 84800 | 83000 | 467 | 474 | Resistencia a compresión (Kg/ cm ²) 479 |
| 2 | | M-2 | 15.2 | 15.1 | 15.2 | 180.27 | 30.2 | 5444.0 | 11.781 | 2164 | 85600 | 83800 | 465 | 472 | |
| 3 | | M-3 | 15.1 | 15.1 | 15.1 | 179.08 | 30.2 | 5408.2 | 11.802 | 2182 | 89400 | 87400 | 488 | 496 | |
| 4 | | M-4 | 15.1 | 15.1 | 15.1 | 179.08 | 30.1 | 5390.3 | 11.769 | 2183 | 83800 | 82000 | 458 | 465 | |
| 5 | | M-5 | 15.2 | 15.0 | 15.1 | 179.08 | 30.2 | 5408.2 | 11.808 | 2183 | 87800 | 86000 | 480 | 488 | |
| 6 | | M-6 | 15.1 | 15.2 | 15.2 | 180.27 | 30.3 | 5462.1 | 11.802 | 2161 | 82000 | 80200 | 445 | 452 | Peso volumétrico (Kg/ m ³) 2177 |
| 7 | | M-7 | 15.2 | 15.1 | 15.2 | 180.27 | 30.1 | 5426.0 | 11.814 | 2177 | 90000 | 88000 | 488 | 496 | |
| 8 | | M-8 | 15.2 | 15.1 | 15.2 | 180.27 | 30.2 | 5444.0 | 11.725 | 2154 | 86200 | 84400 | 468 | 475 | |
| 9 | | M-9 | 15.0 | 15.2 | 15.1 | 179.08 | 30.3 | 5426.1 | 11.831 | 2180 | 86400 | 84600 | 472 | 479 | |
| 10 | | M-10 | 15.1 | 15.0 | 15.1 | 177.89 | 30.1 | 5354.6 | 11.628 | 2172 | 87200 | 85400 | 480 | 488 | |
| 11 | 0.4 | M-1 | 15.0 | 15.2 | 15.1 | 179.08 | 30.1 | 5390.3 | 11.694 | 2169 | 75600 | 74000 | 413 | 419 | Resistencia a compresión (Kg/ cm ²) 413 |
| 12 | | M-2 | 15.4 | 15.0 | 15.2 | 181.46 | 30.1 | 5461.9 | 11.714 | 2145 | 74600 | 73000 | 402 | 408 | |
| 13 | | M-3 | 15.1 | 15.2 | 15.2 | 180.27 | 30.2 | 5444.0 | 11.696 | 2148 | 79600 | 77800 | 432 | 439 | |
| 14 | | M-4 | 15.2 | 15.1 | 15.2 | 180.27 | 30.1 | 5426.0 | 11.743 | 2164 | 73200 | 71600 | 397 | 403 | |
| 15 | | M-5 | 15.2 | 15.1 | 15.2 | 180.27 | 30.1 | 5426.0 | 11.693 | 2155 | 74600 | 73000 | 405 | 411 | |
| 16 | | M-6 | 15.4 | 15.2 | 15.3 | 183.85 | 30.7 | 5644.3 | 12.255 | 2171 | 72000 | 70400 | 383 | 389 | Peso volumétrico (Kg/ m ³) 2164 |
| 17 | | M-7 | 15.0 | 15.0 | 15.0 | 176.71 | 30.3 | 5358.0 | 11.764 | 2196 | 74000 | 72400 | 410 | 416 | |
| 18 | | M-8 | 15.2 | 15.1 | 15.2 | 180.27 | 30.2 | 5444.0 | 11.693 | 2148 | 75400 | 73800 | 409 | 415 | |
| 19 | | M-9 | 15.2 | 14.8 | 15.0 | 176.71 | 30.2 | 5336.8 | 11.717 | 2196 | 72400 | 70800 | 401 | 407 | |
| 20 | | M-10 | 15.2 | 15.1 | 15.2 | 180.27 | 30.1 | 5426.0 | 11.677 | 2152 | 75800 | 74200 | 412 | 418 | |



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA MAESTRIA EN CONSTRUCCIÓN
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE INGENIERÍA CIVIL
A N E X O E

RESULTADOS DE PRUEBAS A COMPRESIÓN EN ESPECÍMENES DE CONCRETO HIDRÁULICO

Fecha de fabricación: Sábado, 29 de Octubre de 2005
 Fecha de ensaye: Sábado, 26 de Noviembre de 2005
 No. total de especímenes elaborados: 50
 No. total de especímenes ensayados: 50

Tipo de cemento: Cemento CPO 40R/ B
 Relaciones A/C utilizadas: 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7.
 Número de especímenes por relación A/C: 10

Hoja 2 de 3

| No. de ensaye | Relación A/C | No. de muestra | ϕ_1 (cm) | ϕ_2 (cm) | ϕ prom (cm) | Área (cm ²) | Altura (cm) | Volumen (cm ³) | Peso (Kg) | Peso volumétrico (kg/ m ³) | Carga (Kg) | Carga corregida (kg) | Resistencia (Kg/cm ²) | Resistencia corregida por temperatura (Kg/cm ²) | Promedio aritmético |
|---------------|--------------|----------------|---------------|---------------|------------------|-------------------------|-------------|----------------------------|-----------|--|------------|----------------------|-----------------------------------|---|---|
| 21 | 0.5 | M-1 | 15.3 | 15.1 | 15.2 | 181.46 | 30.1 | 5461.9 | 11.623 | 2128 | 58600 | 57400 | 316 | 321 | Resistencia a compresión (Kg/ cm ²) 344 |
| 22 | | M-2 | 15.5 | 15.0 | 15.3 | 182.65 | 30.3 | 5534.4 | 11.748 | 2123 | 63000 | 61600 | 337 | 342 | |
| 23 | | M-3 | 15.2 | 15.2 | 15.2 | 181.46 | 30.1 | 5461.9 | 11.700 | 2142 | 60800 | 59400 | 327 | 332 | |
| 24 | | M-4 | 15.2 | 15.1 | 15.2 | 180.27 | 30.2 | 5444.0 | 11.669 | 2143 | 64600 | 63200 | 351 | 356 | |
| 25 | | M-5 | 15.0 | 15.3 | 15.2 | 180.27 | 30.2 | 5444.0 | 11.701 | 2149 | 67200 | 65800 | 365 | 371 | |
| 26 | | M-6 | 15.0 | 15.2 | 15.1 | 179.08 | 30.1 | 5390.3 | 11.704 | 2171 | 61800 | 60400 | 337 | 342 | Peso volumétrico (Kg/ m ³) 2143 |
| 27 | | M-7 | 15.1 | 15.2 | 15.2 | 180.27 | 30.2 | 5444.0 | 11.640 | 2138 | 61800 | 60400 | 335 | 340 | |
| 28 | | M-8 | 15.2 | 15.1 | 15.2 | 180.27 | 30.4 | 5480.1 | 11.686 | 2132 | 64000 | 62600 | 347 | 352 | |
| 29 | | M-9 | 15.1 | 15.1 | 15.1 | 179.08 | 30.2 | 5408.2 | 11.673 | 2158 | 60800 | 59400 | 332 | 337 | |
| 30 | | M-10 | 15.2 | 15.1 | 15.2 | 180.27 | 30.2 | 5444.0 | 11.676 | 2145 | 63600 | 62200 | 345 | 350 | |
| 31 | 0.6 | M-1 | 15.0 | 15.1 | 15.1 | 177.89 | 30.0 | 5336.8 | 11.352 | 2127 | 47000 | 46000 | 259 | 263 | Resistencia a compresión (Kg/ cm ²) 265 |
| 32 | | M-2 | 15.1 | 15.4 | 15.3 | 182.65 | 30.6 | 5589.2 | 11.138 | 1993 | 53600 | 52400 | 287 | 291 | |
| 33 | | M-3 | 15.1 | 15.0 | 15.1 | 177.89 | 30.0 | 5336.8 | 11.628 | 2179 | 48000 | 47000 | 264 | 268 | |
| 34 | | M-4 | 15.2 | 15.1 | 15.2 | 180.27 | 30.1 | 5426.0 | 11.643 | 2146 | 51400 | 50200 | 278 | 282 | |
| 35 | | M-5 | 15.3 | 15.1 | 15.2 | 181.46 | 30.2 | 5480.0 | 11.642 | 2124 | 48600 | 47400 | 261 | 265 | |
| 36 | | M-6 | 15.2 | 15.2 | 15.2 | 181.46 | 30.3 | 5498.2 | 11.645 | 2118 | 43200 | 42200 | 233 | 237 | Peso volumétrico (Kg/ m ³) 2125 |
| 37 | | M-7 | 15.2 | 15.1 | 15.2 | 180.27 | 30.0 | 5408.0 | 11.448 | 2117 | 46600 | 45600 | 253 | 257 | |
| 38 | | M-8 | 15.1 | 15.1 | 15.1 | 179.08 | 30.0 | 5372.4 | 11.620 | 2163 | 45200 | 44200 | 247 | 251 | |
| 39 | | M-9 | 15.1 | 15.1 | 15.1 | 179.08 | 30.3 | 5426.1 | 11.602 | 2138 | 49000 | 47800 | 267 | 271 | |
| 40 | | M-10 | 15.1 | 15.0 | 15.1 | 177.89 | 30.0 | 5336.8 | 11.435 | 2143 | 47000 | 46000 | 259 | 263 | |



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA MAESTRIA EN CONSTRUCCIÓN
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE INGENIERÍA CIVIL
A N E X O E

RESULTADOS DE PRUEBAS A COMPRESIÓN EN ESPECÍMENES DE CONCRETO HIDRÁULICO

Fecha de fabricación: Sábado, 29 de Octubre de 2005
 Fecha de ensaye: Sábado, 26 de Noviembre de 2005
 No. total de especímenes elaborados: 50
 No. total de especímenes ensayados: 50

Tipo de cemento: Cemento CPO 40R/ B
 Relaciones A/C utilizadas: 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7.
 Número de especímenes por relación A/C: 10

Hoja 3 de 3

| No. de ensaye | Relación A/C | No. de muestra | ϕ_1 (cm) | ϕ_2 (cm) | ϕ prom (cm) | Área (cm ²) | Altura (cm) | Volumen (cm ³) | Peso (Kg) | Peso volumétrico (kg/ m ³) | Carga (Kg) | Carga corregida (kg) | Resistencia (Kg/cm ²) | Resistencia corregida por temperatura (Kg/cm ²) | Promedio aritmético |
|---------------|--------------|----------------|---------------|---------------|------------------|-------------------------|-------------|----------------------------|-----------|--|------------|----------------------|-----------------------------------|---|---|
| 41 | 0.7 | M-1 | 14.7 | 15.3 | 15.0 | 176.71 | 30.1 | 5319.1 | 11.522 | 2166 | 38600 | 37800 | 214 | 217 | Resistencia a compresión (Kg/ cm ²) |
| 42 | | M-2 | 15.0 | 15.1 | 15.1 | 177.89 | 30.1 | 5354.6 | 11.543 | 2156 | 37600 | 36800 | 207 | 210 | |
| 43 | | M-3 | 15.1 | 15.1 | 15.1 | 179.08 | 30.2 | 5408.2 | 11.484 | 2123 | 37600 | 36800 | 205 | 208 | |
| 44 | | M-4 | 15.1 | 15.0 | 15.1 | 177.89 | 30.1 | 5354.6 | 11.506 | 2149 | 41000 | 40000 | 225 | 229 | |
| 45 | | M-5 | 15.1 | 15.1 | 15.1 | 179.08 | 30.2 | 5408.2 | 11.567 | 2139 | 38200 | 37400 | 209 | 212 | |
| 46 | | M-6 | 15.1 | 15.2 | 15.2 | 180.27 | 30.1 | 5426.0 | 11.595 | 2137 | 37600 | 36800 | 204 | 207 | Peso volumétrico (Kg/ m ³) |
| 47 | | M-7 | 15.6 | 15.3 | 15.5 | 187.48 | 30.8 | 5774.3 | 12.080 | 2092 | 40000 | 39200 | 209 | 212 | |
| 48 | | M-8 | 15.2 | 15.1 | 15.2 | 180.27 | 30.2 | 5444.0 | 11.608 | 2132 | 37200 | 36400 | 202 | 205 | |
| 49 | | M-9 | 15.2 | 15.1 | 15.2 | 180.27 | 30.2 | 5444.0 | 11.642 | 2138 | 38600 | 37800 | 210 | 213 | |
| 50 | | M-10 | 15.2 | 15.2 | 15.2 | 181.46 | 30.5 | 5534.5 | 11.933 | 2156 | 37800 | 37000 | 204 | 207 | |
| | | | | | | | | | | | | | | 212 | |
| | | | | | | | | | | | | | | 2139 | |

ANEXO F

CALIBRACIÓN DEL EQUIPO DE ENSAYE (PRENSA HIDRÁULICA)

ANEXO F.

CALIBRACIÓN DEL MANÓMETRO DE LA PRENSA HIDRÁULICA

Capacidad del manómetro: 120 000 kg
Aproximación del manómetro: 200 kg

Capacidad de celda de carga: 44 000 kg
Aproximación de celda de carga: 25 kg

| Serie No. | Lectura celda de carga | | | | Carga aplicada según celda de carga | | | | CARGA APLICADA EN KG | | | Desviación en kg |
|---|------------------------|-----------|-----------|-----------|-------------------------------------|-------|-------|-------|----------------------|------------------------|---|------------------|
| | Lectura 1 | | Lectura 2 | | (kg) | | | | Manómetro prensa | Según regresión lineal | Corregida, según aproximación del manómetro | |
| | Persona 1 | Persona 2 | Persona 1 | Persona 2 | Constante de carga: 25 kg | | | | | | | |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | -59 | 0 | 0 |
| 1 | 37 | 38 | 42 | 42 | 925 | 950 | 1050 | 1050 | 1000 | 920 | 1000 | 0 |
| 2 | 76 | 78 | 83 | 80 | 1900 | 1950 | 2075 | 2000 | 2000 | 1899 | 1800 | 200 |
| 3 | 118 | 118 | 114 | 114 | 2950 | 2950 | 2850 | 2850 | 3000 | 2879 | 2800 | |
| 4 | 156 | 156 | 156 | 152 | 3900 | 3900 | 3900 | 3800 | 4000 | 3858 | 3800 | |
| 5 | 197 | 195 | 197 | 195 | 4925 | 4925 | 4875 | 4875 | 5000 | 4837 | 4800 | |
| 6 | 237 | 239 | 234 | 234 | 5925 | 5975 | 5850 | 5850 | 6000 | 5817 | 5800 | |
| 7 | 274 | 274 | 274 | 274 | 6850 | 6850 | 6850 | 6850 | 7000 | 6796 | 6800 | |
| 8 | 316 | 316 | 312 | 312 | 7900 | 7900 | 7800 | 7800 | 8000 | 7775 | 7800 | |
| 9 | 355 | 355 | 345 | 352 | 8875 | 8875 | 8625 | 8600 | 9000 | 8755 | 8800 | |
| 10 | 388 | 390 | 390 | 393 | 9700 | 9750 | 9750 | 9625 | 10000 | 9734 | 9800 | |
| 11 | 427 | 429 | 426 | 430 | 10675 | 10725 | 10650 | 10750 | 11000 | 10713 | 10800 | |
| 12 | 469 | 469 | 466 | 466 | 11725 | 11725 | 11650 | 11650 | 12000 | 11692 | 11600 | |
| 13 | 509 | 509 | 509 | 508 | 12725 | 12725 | 12725 | 12700 | 13000 | 12672 | 12600 | |
| 14 | 551 | 549 | 548 | 548 | 13775 | 13775 | 13700 | 13700 | 14000 | 13651 | 13600 | |
| 15 | 586 | 586 | 587 | 585 | 14650 | 14650 | 14675 | 14625 | 15000 | 14630 | 14600 | |
| 16 | 625 | 625 | 628 | 630 | 15625 | 15625 | 15700 | 15700 | 16000 | 15610 | 15600 | |
| 17 | 661 | 661 | 664 | 664 | 16525 | 16525 | 16600 | 16600 | 17000 | 16589 | 16600 | |
| 18 | 703 | 703 | 703 | 703 | 17575 | 0 | 17575 | 17575 | 18000 | 17568 | 17600 | |
| 19 | 736 | 739 | 740 | 740 | 18400 | 18475 | 18500 | 18500 | 19000 | 18548 | 18600 | |
| 20 | 778 | 778 | 784 | 782 | 19450 | 19450 | 19600 | 19550 | 20000 | 19527 | 19600 | |
| 21 | 815 | 815 | 824 | 822 | 20375 | 20375 | 20600 | 20550 | 21000 | 20506 | 20600 | |
| 22 | 860 | 855 | 860 | 860 | 21500 | 21375 | 21500 | 21500 | 22000 | 21485 | 21400 | |
| 23 | 892 | 891 | 899 | 899 | 22300 | 22275 | 22475 | 22475 | 23000 | 22465 | 22400 | |
| 24 | 935 | 935 | 897 | 935 | 23375 | 23375 | 22425 | 23375 | 24000 | 23444 | 23400 | |
| 25 | 972 | 971 | 979 | 976 | 24300 | 24275 | 24475 | 24400 | 25000 | 24423 | 24400 | |
| 26 | 1012 | 1012 | 1018 | 1016 | 25300 | 25300 | 25450 | 25400 | 26000 | 25403 | 25400 | |
| 27 | 1049 | 1049 | 1055 | 1053 | 26225 | 26225 | 26375 | 26325 | 27000 | 26382 | 26400 | |
| 28 | 1087 | 1087 | 1094 | 1092 | 27175 | 27175 | 27350 | 27300 | 28000 | 27361 | 27400 | |
| 29 | 1125 | 1125 | 1130 | 1133 | 28125 | 28125 | 28250 | 28225 | 29000 | 28341 | 28400 | |
| 30 | 1166 | 1164 | 1174 | 1169 | 29150 | 29100 | 29350 | 29225 | 30000 | 29320 | 29400 | |
| 31 | 1203 | 1203 | 1214 | 1214 | 30075 | 30075 | 30350 | 30350 | 31000 | 30299 | 30200 | |
| 32 | 1242 | 1241 | 1256 | 1249 | 31050 | 31025 | 31400 | 31225 | 32000 | 31278 | 31200 | |
| 33 | 1277 | 1277 | 1287 | 1286 | 31925 | 31925 | 32175 | 32150 | 33000 | 32258 | 32200 | |
| 34 | 1316 | 1318 | 1326 | 1323 | 32900 | 32950 | 33150 | 33075 | 34000 | 33237 | 33200 | |
| 35 | 1356 | 1356 | 1369 | 1369 | 33900 | 33900 | 34225 | 34225 | 35000 | 34216 | 34200 | |
| 36 | 1394 | 1394 | 1402 | 1401 | 34850 | 34850 | 35050 | 35025 | 36000 | 35196 | 35200 | |
| 37 | 1440 | 1442 | 1444 | 1442 | 36000 | 36050 | 36100 | 36050 | 37000 | 36175 | 36200 | |
| 38 | 1487 | 1485 | 1483 | 1481 | 37175 | 37125 | 37075 | 37025 | 38000 | 37154 | 37200 | |
| 39 | 1532 | 1532 | 1530 | 1530 | 38300 | 38300 | 38250 | 38250 | 39000 | 38134 | 38200 | |
| 40 | 1586 | 1585 | 1587 | 1582 | 39650 | 39625 | 39675 | 39550 | 40000 | 39113 | 39200 | |
| 41 | | | 1621 | | 0 | 0 | 40525 | 0 | 41000 | 40092 | 40000 | |
| 42 | | | 1664 | 1662 | 0 | 0 | 41600 | 41550 | 42000 | 41071 | 41000 | |
| 43 | | | 1701 | 1701 | 0 | 0 | 42525 | 42525 | 43000 | 42051 | 42000 | |
| 44 | | | 1749 | 1742 | 0 | 0 | 43725 | 43550 | 44000 | 43030 | 43000 | |
| LA CAPACIDAD MÁXIMA DE LA CELDA DE CARGA ES DE 50 000 KG; SIN EMBARGO, SE LLEVÓ HASTA 44 000 KG PARA EVITAR UN POSIBLE DAÑO A LA MISMA. | | | | | | | | | 45000 | 44009 | 44000 | 1000 |
| | | | | | | | | | 46000 | 44989 | 45000 | |
| | | | | | | | | | 47000 | 45968 | 46000 | |
| | | | | | | | | | 48000 | 46947 | 47000 | |
| | | | | | | | | | 49000 | 47927 | 48000 | |
| | | | | | | | | | 50000 | 48906 | 49000 | |
| | | | | | | | | | 51000 | 49885 | 49800 | |
| | | | | | | | | | 52000 | 50864 | 50800 | |
| | | | | | | | | | 53000 | 51844 | 51800 | |
| | | | | | | | | | 54000 | 52823 | 52800 | |
| | | | | | | | | | 55000 | 53802 | 53800 | |
| | | | | | | | | | 56000 | 54782 | 54800 | |
| | | | | | | | | | 57000 | 55761 | 55800 | |
| | | | | | | | | | 58000 | 56740 | 56800 | |
| | | | | | | | | | 59000 | 57720 | 57800 | |
| | | | | | | | | | 60000 | 58699 | 58600 | |
| | | | | | | | | | 61000 | 59678 | 59600 | |
| | | | | | | | | | 62000 | 60657 | 60600 | |
| | | | | | | | | | 63000 | 61637 | 61600 | |
| | | | | | | | | | 64000 | 62616 | 62600 | |
| | | | | | | | | | 65000 | 63595 | 63600 | |
| | | | | | | | | | 66000 | 64575 | 64600 | |
| | | | | | | | | | 67000 | 65554 | 65600 | |
| | | | | | | | | | 68000 | 66533 | 66600 | |
| | | | | | | | | | 69000 | 67513 | 67600 | |
| | | | | | | | | | 70000 | 68492 | 68400 | |
| | | | | | | | | | 71000 | 69471 | 69400 | |
| | | | | | | | | | 72000 | 70450 | 70400 | |
| | | | | | | | | | 73000 | 71430 | 71400 | |
| | | | | | | | | | 74000 | 72409 | 72400 | |
| | | | | | | | | | 75000 | 73388 | 73400 | |
| | | | | | | | | | 76000 | 74368 | 74400 | |
| | | | | | | | | | 77000 | 75347 | 75400 | |
| | | | | | | | | | 78000 | 76326 | 76400 | |
| | | | | | | | | | 79000 | 77306 | 77400 | |
| | | | | | | | | | 80000 | 78285 | 78200 | |
| | | | | | | | | | 81000 | 79264 | 79200 | |
| | | | | | | | | | 82000 | 80243 | 80200 | |
| | | | | | | | | | 83000 | 81223 | 81200 | |
| | | | | | | | | | 84000 | 82202 | 82200 | |
| | | | | | | | | | 85000 | 83181 | 83200 | |
| | | | | | | | | | 86000 | 84161 | 84200 | |
| | | | | | | | | | 87000 | 85140 | 85200 | |
| | | | | | | | | | 88000 | 86119 | 86200 | |
| | | | | | | | | | 89000 | 87099 | 87000 | |
| | | | | | | | | | 90000 | 88078 | 88000 | |
| | | | | | | | | | 91000 | 89057 | 89000 | |
| | | | | | | | | | 92000 | 90036 | 90000 | |
| | | | | | | | | | 93000 | 91015 | 91000 | |
| | | | | | | | | | 94000 | 91994 | 92000 | |
| | | | | | | | | | 95000 | 92973 | 93000 | |
| | | | | | | | | | 96000 | 93952 | 94000 | |
| | | | | | | | | | 97000 | 94931 | 95000 | |
| | | | | | | | | | 98000 | 95910 | 96000 | |
| | | | | | | | | | 99000 | 96889 | 97000 | |
| | | | | | | | | | 100000 | 97868 | 98000 | |
| | | | | | | | | | 101000 | 98847 | 99000 | |
| | | | | | | | | | 102000 | 99826 | 100000 | |
| | | | | | | | | | 103000 | 100805 | 101000 | |
| | | | | | | | | | 104000 | 101784 | 102000 | |
| | | | | | | | | | 105000 | 102763 | 103000 | |
| | | | | | | | | | 106000 | 103742 | 104000 | |
| | | | | | | | | | 107000 | 104721 | 105000 | |
| | | | | | | | | | 108000 | 105700 | 106000 | |
| | | | | | | | | | 109000 | 106679 | 107000 | |
| | | | | | | | | | 110000 | 107658 | 108000 | |
| | | | | | | | | | 111000 | 108637 | 109000 | |
| | | | | | | | | | 112000 | 109616 | 110000 | |
| | | | | | | | | | 113000 | 110595 | 111000 | |
| | | | | | | | | | 114000 | 111574 | 112000 | |
| | | | | | | | | | 115000 | 112553 | 113000 | |
| | | | | | | | | | 116000 | 113532 | 114000 | |
| | | | | | | | | | 117000 | 114511 | 115000 | |
| | | | | | | | | | 118000 | 115490 | 116000 | |
| | | | | | | | | | 119000 | 116469 | 117000 | |
| | | | | | | | | | 120000 | 117448 | 118000 | |
| | | | | | | | | | 121000 | 118427 | 119000 | |
| | | | | | | | | | 122000 | 119406 | 120000 | |
| | | | | | | | | | 123000 | 120385 | 121000 | |
| | | | | | | | | | 124000 | 121364 | 122000 | |
| | | | | | | | | | 125000 | 122343 | 123000 | |
| | | | | | | | | | 126000 | 123322 | 124000 | |
| | | | | | | | | | 127000 | 124301 | 125000 | |
| | | | | | | | | | 128000 | 125280 | 126000 | |
| | | | | | | | | | 129000 | 126259 | 127000 | |
| | | | | | | | | | 130000 | 127238 | 128000 | |
| | | | | | | | | | 131000 | 128217 | 129000 | |
| | | | | | | | | | 132000 | 129196 | 130000 | |
| | | | | | | | | | 133000 | 130175 | 131000 | |
| | | | | | | | | | 134000 | 131154 | 132000 | |
| | | | | | | | | | 135000 | 132133 | 133000 | |
| | | | | | | | | | 136000 | 133112 | 134000 | |
| | | | | | | | | | 137000 | 134091 | 135000 | |
| | | | | | | | | | 138000 | 135070 | 136000 | |
| | | | | | | | | | 139000 | 136049 | 137000 | |
| | | | | | | | | | 140000 | 137028 | 138000 | |
| | | | | | | | | | 141000 | 138007 | 139000 | |
| | | | | | | | | | 142000 | 138986 | 140000 | |
| | | | | | | | | | 143000 | 139965 | 141000 | |
| | | | | | | | | | 144000 | 140944 | 142000 | |
| | | | | | | | | | 145000 | 141923 | 143000 | |
| | | | | | | | | | 146000 | 142902 | 144000 | |
| | | | | | | | | | 147000 | 143881 | 145000 | |
| | | | | | | | | | 148000 | 144860 | 146000 | |
| | | | | | | | | | 149000 | 145839 | 147000 | |
| | | | | | | | | | 150000 | 146818 | 148000 | |
| | | | | | | | | | 151000 | 147797 | 149000 | |
| | | | | | | | | | 152000 | 148776 | 150000 | |
| | | | | | | | | | 153000 | 149755 | 151000 | |
| | | | | | | | | | 154000 | 150734 | 152000 | |
| | | | | | | | | | 155000 | 151713 | 153000 | |
| | | | | | | | | | 156000 | 152692 | 154000 | |
| | | | | | | | | | 157000 | 153671 | 155000 | |
| | | | | | | | | | 158000 | 154650 | 156000 | |
| | | | | | | | | | 159000 | 155629 | 157000 | |
| | | | | | | | | | 160000 | 156608 | 158000 | |
| | | | | | | | | | 161000 | 157587 | 159000 | |
| | | | | | | | | | 162000 | 158566 | 160000 | |
| | | | | | | | | | 163000 | 159545 | 161000 | |
| | | | | | | | | | 164000 | 160524 | 162000 | |
| | | | | | | | | | 165000 | 161503 | 163000 | |
| | | | | | | | | | 166000 | 162482 | 164000 | |
| | | | | | | | | | 167000 | 163461 | 165000 | |
| | | | | | | | | | 168000 | 164440 | 166000 | |
| | | | | | | | | | 169000 | 165419 | 167000 | |
| | | | | | | | | | 170000 | 166398 | 168000 | |
| | | | | | | | | | 171000 | 167377 | 169000 | |
| | | | | | | | | | 172000 | 168356 | 170000 | |
| | | | | | | | | | 173000 | 169335 | 171000 | |
| | | | | | | | | | 174000 | 170314 | 172000 | |
| | | | | | | | | | 175000 | 171293 | 173000 | |
| | | | | | | | | | 176000 | 172272 | 174000 | |
| | | | | | | | | | 177000 | 173251 | 175000 | |
| | | | | | | | | | 178000 | 174230 | 176000 | |
| | | | | | | | | | 179000 | 175209 | 177000 | |
| | | | | | | | | | 180000 | 176188 | 178000 | |
| | | | | | | | | | 181000 | 177167 | 179000 | |
| | | | | | | | | | 182000 | 178146 | 180000 | |
| | | | | | | | | | 183000 | 179125 | 181000 | |
| | | | | | | | | | 184000 | 180104 | 182000 | |
| | | | | | | | | | 185000 | 181083 | 183000 | |
| | | | | | | | | | 186000 | 182062 | 184000 | |
| | | | | | | | | | 187000 | 183041 | 185000 | |
| | | | | | | | | | 188000 | 184020 | 186000 | |
| | | | | | | | | | 189000 | 185000 | 187000 | |
| | | | | | | | | | 190000 | 185979 | 188000 | |
| | | | | | | | | | 191000 | 186958 | 189000 | |
| | | | | | | | | | 192000 | 187937 | 190000 | |
| | | | | | | | | | 193000 | 188916 | 191000 | |
| | | | | | | | | | 194000 | 189895 | 192000 | |
| | | | | | | | | | 195000 | 190874 | 193000 | |
| | | | | | | | | | 196000 | 191853 | 194000 | |
| | | | | | | | | | 197000 | 192832 | 195000 | |
| | | | | | | | | | 198000 | 193811 | 196000 | |
| | | | | | | | | | 199000 | | | |

ANEXO G

CORRECCIÓN POR TEMPERATURA DE CURADO



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA MAESTRIA EN CONSTRUCCIÓN
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO DE INGENIERÍA CIVIL

A N E X O G

RESULTADOS DE PRUEBAS A COMPRESIÓN POR VARIACIÓN EN LA TEMPERATURA DE CURADO POR INMERSIÓN

Fecha de fabricación: Sábado, 12 de Noviembre de 2005
 Fecha de ensaye: Miércoles, 14 de Diciembre de 2005

No. total de especímenes elaborados: seis
 No. total de especímenes ensayados: seis

| No. de ensaye | Temperatura del agua de curado °C | No. de muestra | ϕ_1 (cm) | ϕ_2 (cm) | ϕ prom (cm) | Área (cm ²) | Altura (cm) | Volumen (cm ³) | Peso (Kg) | Peso volumétrico (kg/ m ³) | Carga (Kg) | Resistencia (Kg/cm ²) | Promedio aritmético |
|---------------|-----------------------------------|----------------|---------------|---------------|------------------|-------------------------|-------------|----------------------------|-----------|--|------------|-----------------------------------|---------------------|
| 1 | 24 | P1 | 14.8 | 15.0 | 14.9 | 174.37 | 30.2 | 5266.0 | 11.697 | 2221 | 44686 | 256 | 256 |
| 2 | | P2 | 15.0 | 15.1 | 15.1 | 179.08 | 30.2 | 5408.2 | 11.617 | 2148 | 43996 | 246 | |
| 3 | | P3 | 15.1 | 15.0 | 15.1 | 179.08 | 30.3 | 5426.1 | 11.675 | 2152 | 47518 | 265 | |
| 4 | 18 | T1 | 15.1 | 15.2 | 15.2 | 181.46 | 30.1 | 5461.9 | 11.600 | 2124 | 45726 | 252 | 252 |
| 5 | | T2 | 14.8 | 15.0 | 14.9 | 174.37 | 30.2 | 5266.0 | 11.606 | 2204 | 46272 | 265 | |
| 6 | | T3 | 15.1 | 15.2 | 15.2 | 181.46 | 30.2 | 5480.1 | 11.649 | 2126 | 43257 | 238 | |

$$\text{Corrección} = 1 - \frac{\text{resistencia promedio a } 18^{\circ}\text{C}}{\text{resistencia promedio a } 24^{\circ}\text{C}} \times 100\% = 1 - \frac{252 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}}{256 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}} \times 100\% = 1.5625\%$$

Por lo tanto, el factor de corrección por temperatura será: 1.015625

BIBLIOGRAFÍA

- Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, A.C.
Tecnología del Concreto.
3ª. Edición, IMCyC, México, 1992. Págs. 401.
- A.M. Neville
Tecnología del Concreto.
IMCyC, México, 1ª. Edición 1977, tomo 1 y 2.
- Comisión Federal de Electricidad e Instituto de Ingeniería de la UNAM
Manual de Tecnología del Concreto, Tomo 1, 2 y 3
Editorial Limusa, México, 1997
- Fernández Orozco León
El Cemento y el Concreto, Construcción I, tomo 2.
Universidad Autónoma Metropolitana,
Tercera Edición, México, 2000. Págs. 101.
- Kumar Mehta, P. & Monteiro Paulo.
Concrete, structure, properties and materials.
Segunda Edición, Editorial Prentice Hall
Estados Unidos, 1992. Págs. 548.
- Publicaciones periódicas recientes:
 - **ACI Journal Concrete (ACI)**
 - **Concrete Internacional (CI)**
 - **Cement Association Canada (CAC)**
 - **Pórtland Cement Association (PCA)**