



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**“CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES DE ALTO
DESEMPEÑO”**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

I N G E N I E R O C I V I L

P R E S E N T A:

CASTRO FERNÁNDEZ CARLOS
DAMASCO

DIRECTOR DE TESIS:

M. I. CARLOS JAVIER MENDOZA ESCOBEDO

MÉXICO, D.F. CIUDAD UNIVERSITARIA 2007.





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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



UNIVERSIDAD NACIONAL
AVENIDA DE
MEXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCIÓN
FING/DCTG/SEAC/UTIT/048/07

Señor
CARLOS DAMASCO CASTRO FERNÁNDEZ
Presente

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor M.I. CARLOS JAVIER MENDOZA ESCOBEDO, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de INGENIERO CIVIL.

CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES DE ALTO DESEMPEÑO

INTRODUCCIÓN

- I. MATERIALES PARA EL CONCRETO
- II. CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS
- III. CARACTERÍSTICAS Y ENSAYES DEL CONCRETO FRESCO
- IV. CARACTERÍSTICAS Y ENSAYES DEL CONCRETO ENDURECIDO
- V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES
- VI. REFERENCIAS

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el Título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"
Cd. Universitaria a 9 de Mayo del 2007.
EL DIRECTOR

MTRO. JOSÉ GONZALO GUERRERO ZEPEDA

GGZ/RSU*erc

AGRADECIMIENTOS:

- ❖ **A La Universidad Nacional Autónoma De México, A La Facultad De Ingeniería Y Al Instituto De Ingeniería Por La Preparación Y Los Conocimientos Que Me Brindaron Y Las Amistades Y Los Valores Que En Ellas Encontré.**
- ❖ **A Todos Los Profesores De La Facultad De Ingeniería Por Los Conocimientos Transmitidos.**
- ❖ **Al M. I. Carlos Javier Mendoza Escobedo, Por Sus Enseñanzas Y El Apoyo Brindado En La Elaboración De Esta Tesis.**
- ❖ **A los honorables miembros del jurado:**

**Ing. Carlos Manuel Chávarri Maldonado
M. I. Agustín Deméneghi Colina
M. I. Luis Manuel Salmones Hernández
M. I. Gerardo Rodríguez Gutiérrez**

Por Ser Parte De Mi Formación, Y Por Sus Comentarios Y Sugerencias En La Elaboración De Esta Tesis.

DEDICATORIAS:

- ✓ **A MIS PADRES Y A MIS HERMANOS, POR TODO SU AMOR Y EL APOYO BRINDADO EN TODOS ESTOS AÑOS.**
- ✓ **A EILEEN QUETZALLÍ POR QUIEN SIENTO EL MOTIVO PARA TRATAR DE DAR MI MAYOR ESFUERZO EN TODO LO QUE HAGO.**
- ✓ **A TODA MI FAMILIA POR EL APOYO BRINDADO.**

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
Antecedentes	2
Definición de concreto autocompactable	4
Concreto autocompactable en estado fresco	5
Concreto autocompactable en estado endurecido	6
Beneficios	7
Aplicaciones	8
Objetivo	10
Alcance	10

I MATERIALES PARA EL CONCRETO	11
I.1 Cemento	11
I.2 Gravas	13
I.2.1 Grava con un TMA de 19 mm (3/4")	14
I.2.2 Grava con un TMA de 9.5 mm (3/8")	16
I.3 Arena	18
I.4 Aditivos químicos	21

II CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE MEZCLAS	23
II.1 Evaluación de la pasta	26
II.2 Diseño y evaluación de morteros	28
II.3 Proporcionamientos de concretos	29
II.3.1 Proporcionamientos con agregado grueso de 9.5 mm (3/8")	30
II.3.2 Proporcionamientos con agregado grueso de 19 mm (3/4")	36

CARACTERÍSTICAS Y ENSAYES DEL CONCRETO FRESCO		40
III		
III.1	Revenimiento	40
III.2	Peso volumétrico	41
III.3	Aire atrapado	42
III.4	Extensión de flujo	46
III.5	Caja L	51
III.6	Ensaye de Orimet	57
III.7	Embudo V	61

CARACTERÍSTICAS Y ENSAYES DEL CONCRETO ENDURECIDO		66
IV		
IV.1	Resistencia a compresión	66
IV.2	Módulo de elasticidad en compresión	76
IV.3	Resistencia a tensión	86
IV.3.1	Flexión	87
IV.3.2	Tensión indirecta	91
IV.4	Permeabilidad a los cloruros	95

V	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	100
----------	---------------------------------------	------------

VI	REFERENCIAS	109
-----------	--------------------	------------

Introducción.

Casi todos los concretos convencionales dependen de una buena compactación durante la colocación final para obtener la resistencia y durabilidad requeridas. Una mala compactación afecta de forma muy negativa el desempeño del concreto, sin importar qué tan bien fue producido en la planta o qué tan bien fue diseñada la mezcla.

El concreto normalmente es compactado por dispositivos mecánicos conocidos como “vibradores” que en muchas ocasiones son manejados deficientemente por individuos poco capacitados y como la mayoría de las veces la compactación se realiza por vibración interna, resulta sumamente difícil supervisar que la compactación haya sido hecha satisfactoriamente. Los efectos negativos por una mala compactación del concreto afectan de diversas formas a las construcciones:

- Modifica el comportamiento estructural del elemento fabricado con concreto, provocando un cambio en su desempeño al variar las propiedades mecánicas en diferentes secciones estructurales tales como columnas, trabes y losas.
- Las oquedades por mala compactación, generan cambios en la sección, menor adherencia con el acero de refuerzo y exposición del mismo, así como mayor permeabilidad.

Pero no solo las estructuras resultan afectadas por deficiencias en las prácticas constructivas, sino que también los trabajadores, ya que hacer un mal uso de los vibradores puede generar efectos perjudiciales en el medio ambiente y en su salud debido al excesivo ruido que estos aparatos generan.

Debido a todos estos factores, diversos organismos de investigación alrededor del mundo, pero principalmente de Japón, han estado experimentado con mezclas de concreto que sea capaz de compactarse por sí mismo, incrementando la calidad del concreto y mejorando las condiciones de trabajo en las obras de construcción.

Antecedentes.

Antes de la aparición de los superfluidificantes y otros adicionantes, ya se trabajaba con concretos que tenían que ser colados en lugares donde la compactación por medios mecánicos era muy complicada.

La realización de obras de construcción bajo el agua en donde existían lugares estrechos e inaccesibles requería de un concreto que tuviera buen desempeño en estado fresco y que no requiriera de mucha compactación. Estos concretos trabajaban bien en lugares con poco acero de refuerzo, pero en lugares donde el refuerzo era más abundante no fluían bien por el armado, presentando problemas de bloqueo. Además, el contenido de cemento de estas primeras mezclas autocompactables generalmente superaba los 450 kg/m^3 que los hacían más caros y al mismo tiempo, limitaban de sobremana sus aplicaciones comerciales. Esto motivó que el concreto autocompactable solo fuera empleado para proyectos muy específicos.

Tiempo después, aparecieron los primeros superfluidificantes en el mercado lo que permitió la elaboración de mezclas muy trabajables, con buena resistencia en estado endurecido y sin una excesiva cantidad de cemento. Sin embargo, la alta trabajabilidad fue lograda a expensas de una reducción en la resistencia a la segregación y sangrado afectando la calidad de las estructuras y reduciendo una vez más sus aplicaciones prácticas.

Posteriormente fueron desarrollados adicionantes que mejoraban la trabajabilidad de los concretos y que lograban un cierto equilibrio con sus otras propiedades, pero que aún requerían un poco de compactación adicional.

La etapa final en el desarrollo de los concretos autocompactables de alto rendimiento comenzó con las investigaciones del profesor Okamura, de la universidad de Tokio, del comportamiento de mezclas coladas bajo el agua, llevadas a cabo a mediados de los años 80's en Japón. Estas investigaciones dieron lugar a la creación de mezclas con buen desempeño tanto en estado fresco como en estado endurecido.

El buen comportamiento de estas mezclas fue logrado gracias a la adición controlada de varios tipos de agentes modificadores de viscosidad. La meta de utilizar agentes modificadores de viscosidad era incrementar la cohesión interna de la mezcla lo suficiente para lograr una aceptable resistencia a la segregación impactando lo mínimo posible la trabajabilidad.

Por lo tanto, es correcto afirmar que el concreto autocompactable evolucionó a partir de los experimentos y tecnologías empleadas por el Profesor Okamura, en la Universidad de Tokio.



Figura 1. Puente Akashikaiko.

En la figura 1 se puede apreciar una foto del puente Akashikaiko, actualmente uno de los puentes colgantes más largos del mundo, en cuyos cimientos fue empleado el concreto autocompactable en forma masiva. Fue una de las primeras estructuras importantes en las que se usó esta tecnología.

Definición de concreto autocompactable.

Es un concreto muy fluido, y sin embargo estable, que tiene la propiedad de consolidarse bajo su propio peso sin necesidad de vibrado, aún en elementos estrechos y densamente armados.

Los tres componentes principales del concreto autocompactable incluyen una mezcla de concreto bien proporcionada y controlada diseñada para la aplicación específica, un reductor de agua sintético de alto rango o superfluidificante, y a veces un aditivo modificador de viscosidad para combatir la segregación, esto debido a que el autocompactable es un concreto muy sensible a pequeños cambios en su composición, sobre todo en la cantidad de agua.



Figura 2. Concreto autocompactable en estado fresco.

Concreto autocompactable en estado fresco.

En comparación con el concreto ordinario, las mezclas de concreto autocompactable deben ser diseñadas de tal forma que en estado fresco puedan desarrollar las siguientes propiedades:

- **Habilidad de llenado:** El concreto debe ser capaz de fluir en todo los espacios de la cimbra por la acción de su propio peso.
- **Habilidad para pasar:** El concreto autocompactable debe fluir por su propio peso a través de aberturas estrechas, tales como espacios entre barras de refuerzo. El agregado grueso no debe bloquearse durante la colocación.
- **Resistencia a la segregación:** La habilidad que debe de tener la mezcla de concreto para permanecer homogénea en su composición mientras se encuentra en estado fresco.

Estas propiedades son fundamentales para que un concreto se defina como autocompactable.



Figura 3. Concreto autocompactable en estado fresco.

Concreto autocompactable en estado endurecido.

Dependiendo de los materiales disponibles es muy factible producir mezclas de concreto autocompactable en un rango extenso de resistencias a la compresión que no difieren mucho de las resistencias alcanzadas por concretos vibrados mecánicamente con la misma relación agua/cemento.

Otros aspectos a destacar de las mezclas de concreto autocompactable sobre los concretos regulares, es que presentan una menor permeabilidad a los gases, cloruros y otros agentes agresivos, tienen una mejor adherencia entre el concreto y el acero de refuerzo, la homogeneidad del concreto autocompactable se mantiene en toda la estructura colada y tienen un mejor acabado superficial.

Por otra parte, el alto contenido de material fino en las mezclas autocompactables llevaría pensar en la afectación negativa que esto podría tener sobre el comportamiento de la contracción. Sin embargo, los bajos contenidos de agua más el uso de reductores de agua de alto rango permiten atenuar este fenómeno satisfactoriamente.



Figura 4. Probetas de concreto autocompactable.

Beneficios.

Una de las ventajas más importante de este concreto es la uniformidad estructural que puede lograrse sin que el proceso de colocación tenga un efecto negativo como sucede con el concreto convencional, en el que a pesar de un alto revenimiento no se puede garantizar que fluya por el armado si no se asegura la consolidación por medios mecánicos. Otros beneficios que pueden obtenerse al trabajar con este concreto son:

Ventajas para los productores de concreto premezclado.

- La percepción de que se ofrece una mezcla de concreto innovadora, de alta calidad y con valor agregado.
- Incrementa sus ganancias.
- Proporciona más rapidez para la operación de los camiones.
- Hace un uso más eficiente de su equipo de mezclado/flota de entrega.
- Expande su oferta de productos de concreto como superficies planas o muros con mejor estética.

Ventajas para el constructor:

- Buen desempeño mecánico y de durabilidad de los elementos y las estructuras.
- Elementos de concreto sin oquedades internas, ni agrietamientos que permitan el acceso de agentes nocivos para el concreto y el acero de refuerzo como son los cloruros y los sulfatos.
- Se evita la concentración del agregado grueso en zonas mal vibradas.
- Reducción de costos y tiempos asociados con la colocación y el vibrado.
- Reducción de herramientas y equipo necesario para la colocación.
- Eliminación del ruido provocado por el uso de vibradores durante el proceso de compactación.
- Reducción de los tiempos de ejecución de la obra.

Ventajas para el trabajador de la construcción.

- Disminución de los problemas auditivos.
- Reducción del riesgo de caídas al eliminar la necesidad del vibrado.
- Mayor facilidad y, por ende, menor esfuerzo para trabajarlo.

Ventajas para el dueño

- Reducción de los costos de mantenimiento y reparaciones.
- Garantía de comportamiento estructural y de durabilidad de su edificación.
- Mejores acabados.
- Reducción de costos de ejecución.

Algunas desventajas al trabajar con este concreto pueden ser:

- El cimbrado debe diseñarse para manejar una gran carga de líquido, y no debe haber aberturas en donde el concreto pueda fugarse durante el colado.
- El tiempo para su colocación es reducido.
- Es propenso a la segregación.
- Si se quiere sustituir una cierta cantidad de cemento por polvos (partículas menores que 0.125 mm) es posible que el concreto requiera más tiempo para ganar resistencia.

Aplicaciones.

Las propiedades innovadoras del concreto autocompactables permiten el diseño y colado de estructuras que antes no hubiera sido posible. Actualmente se pueden concebir una gran variedad de aplicaciones como zapatas y cajones de cimentación, elementos prefabricados, pisos y lozas armadas, vigas, columnas, revestimiento de túneles, etc.

Otra aplicación interesante es su utilización en muros de concreto en donde pueden fluir a largas distancias y proporciona buen contacto con el refuerzo. La precaución, sin embargo, es que el cimbrado debe diseñarse para manejar una gran carga de líquido, y no debe haber aberturas por donde el concreto pueda fugarse durante el colado.

La tecnología del concreto autocompactable ha tenido un gran desarrollo en Japón en donde ha sido utilizado en obras de Ingeniería civil de suma importancia como anclajes para puentes suspendidos, tanques de almacenamiento, túneles carreteros, etc. En México también se ha utilizado aunque en menor medida. Se tiene la experiencia de la utilización de concreto autocompactable para la construcción de almacenes de composta en Mexicaltzingo, Edo. De México.

Dichos almacenes estaban compuestos por muros de 6m de altura por 0.20 m de ancho y colados en tramos de 15 m. Los dueños de la obra indican que al trabajar con este tipo de concreto obtuvieron varios beneficios como una mejora en el acabado, baja porosidad del concreto, ahorro significativo en mano de obra y reducción considerable en tiempos de ejecución de obra.

En Xalapa, en el estado de Veracruz, el concreto autocompactable fue utilizado para la elaboración de vigas prefabricadas de 15 m de largo con una resistencia a las 24 horas de 280 kg/cm^2 . Los beneficios obtenidos fueron la eliminación de vibrado, mejoras en el acabado de los elementos, incrementos en la productividad por rotación de cimbra y reducción en el costo de la mano de obra.



Figura 5. Construcción de almacenes con concreto autocompactable.

Objetivo.

Dar recomendaciones sobre las características requeridas para los materiales componentes del concreto autocompactable así como sobre el diseño de mezclas de este tipo de concreto. Adicionalmente, mostrar el desempeño de este material en estado fresco y endurecido, mediante pruebas especialmente diseñadas para este fin y pruebas estándar.

Alcance.

Esta investigación muestra uno de los procedimientos para el diseño de mezclas de concreto autocompactable así como algunas de las pruebas sugeridas para determinar la autocompactabilidad de dicho material, los resultados son propios de los materiales componentes y equipos utilizados.

Así mismo, este trabajo se enfoca a la caracterización de concretos autocompactables fabricados con agregados gruesos calizos de dos tamaños máximos (19 y 9.5 mm), arena andesítica con exceso de finos, cemento Pórtland (CPO 30R) y un aditivo superfluidificante.

I. Materiales para el concreto.

Los materiales componentes del concreto autocompactable son los mismos que se emplean en el concreto convencional y deben cumplir con las normas ASTM o NMX sobre concreto y agregados minerales.

Debido a las características especiales del concreto autocompactable se requiere de un adecuado control de los materiales constituyentes para que no haya variaciones entre una revoltura y otra que afecten la calidad del concreto.

I.1 Cemento.

Según la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE “el cemento hidráulico es un material inorgánico finamente pulverizado que al agregarle agua ya sea solo o mezclado con arena, grava u otros materiales similares, tiene la propiedad de fraguar y endurecer, incluso bajo el agua, en virtud de reacciones químicas durante la hidratación y que, una vez endurecido, conservará su resistencia y estabilidad”.

Actualmente existe una diversa gama de cementos en el mercado, algunos con características especiales, como el desarrollo de resistencias a agentes agresivos como los sulfatos, otros presentan la ventaja de tener un bajo calor de hidratación, etc. Es por ello que la selección del tipo de cemento dependerá de los requisitos requeridos para el concreto. Sin embargo, para la fabricación de concreto autocompactable y desde el punto de vista económico siempre será recomendable optar por cualquier cemento de uso general que cumpla con la norma ASTM C-150 o NMX-C-414-ONNCCE.

Es importante determinar desde un principio cuál va a ser el contenido de cemento de la mezcla. El rango ideal va desde los 350 kg/m³ hasta los 450 kg/m³. Más de 500 kg/m³ puede ser perjudicial e incrementar la contracción. Menos de 350 kg/m³ sólo puede ser apropiado con la inclusión de otros materiales finos de relleno, como ceniza volante, puzolanas, etc.

Para este proyecto fue utilizado un cemento CPO 30R, muy común en el mercado, además cumple con los lineamientos de la norma ASTM C-150 y la norma NMX-C-414-ONNCCE.

Agregados pétreos.

Los agregados pétreos son productos granulares minerales en estado natural, procesados o artificiales que se mezclan con un cementante o aglutinante hidráulico para fabricar morteros o concretos.

Los agregados se pueden clasificar en:

- Agregados gruesos (gravas).
- Agregados finos (arenas).



Figura 1.1 Banco de agregados finos.

I.2 Gravas.

Las gravas pueden ser naturales u obtenidas a partir de la trituración de rocas, estas últimas pueden mejorar la resistencia ya que sus estructuras angulares tienden a acomodarse mejor en la mezcla. Por otra parte, las gravas con forma esférica incrementan la fluidez y tienen menos probabilidades de bloquearse en el acero de refuerzo.

Uno de los principales factores para determinar el tamaño máximo del agregado es el espacio que hay entre el acero de refuerzo. Es de primordial importancia que el agregado grueso no se bloquee en el refuerzo cuando el concreto esta siendo colocado en la cimbra, por lo que se recomienda utilizar un tamaño máximo de agregado comprendido dentro del intervalo de 12 a 20 mm. Aunque se han llegado a usar gravas más grandes, su uso es poco común en los concretos autocompactables.

También se han llegado a utilizar exitosamente gravas ligeras en mezclas de concreto autocompactable pero se ha observado que en algunos casos migran a la superficie.

Es necesario prestar atención al contenido de humedad de las gravas ya que puede alterar el contenido de agua de la mezcla y repercutir en la calidad del concreto. Otro factor a considerar son las partículas menores que 0.125mm presentes en las gravas, ya que contribuyen al contenido de polvos de la mezcla.

En esta investigación se decidió utilizar dos tipos de gravas para los colados. Una con un TMA de 19 mm (3/4”) y otra con un TMA de 9.5 mm (3/8”).



Figura 1.2 Agregados empleados en la fabricación de concretos autocompactables.

I.2.1 Grava con un TMA de 19 mm (3/4”).

Se trata de una grava caliza de origen natural triturada, originaria de San Carlos, Morelos.

Se le realizaron pruebas físicas con el fin de determinar si sus propiedades cumplían con la norma ASTM C 33 y utilizarlas en la fabricación de las mezclas de concreto.

Esta grava tiene las siguientes propiedades físicas:

- Densidad: 2.70 gr/cm³.
- Densidad en estado seco: 2.69 gr/cm³.
- Absorción: 0.44 %.
- Pérdida por lavado (malla 120): 0.51 %.
- Peso volumétrico seco y suelto: 1437 kg/m³.
- Peso volumétrico seco y compacto: 1536 kg/m³.



Figura 1.3 Grava caliza de 19 mm (3/4”).

En la curva granulométrica que se muestra en la figura 1.4 se puede observar que este agregado está dentro de los límites que marca la norma ASTM C 33.

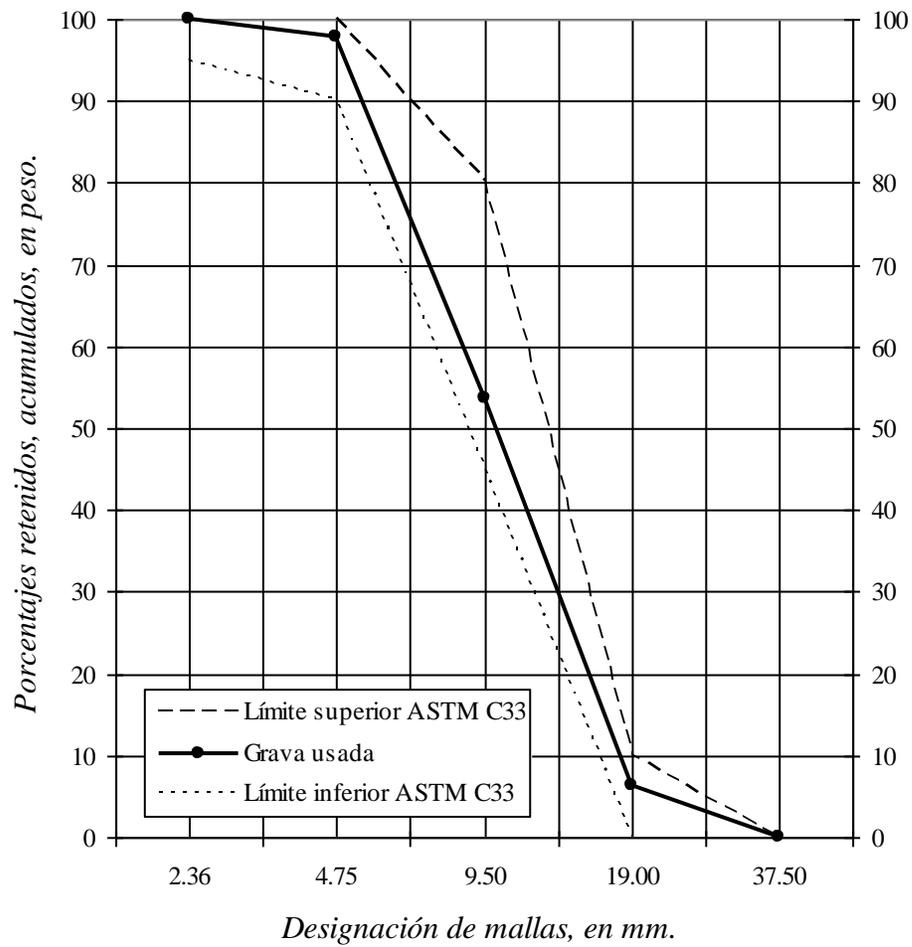


Fig. 1.4 Curva granulométrica de grava caliza
TMA 19 mm (3/4")

I.2.2 Grava con un TMA de 9.5 mm (3/8”).

Esta grava, al igual que la anterior, también es de origen calizo, contribuye en mayor medida al contenido de polvos de la mezcla ya que posee más partículas menores de 0.125 mm en comparación con la grava de 19 mm.

Sus propiedades físicas se indican a continuación:

- Densidad: 2.69 gr/cm³.
- Densidad en estado seco: 2.67 gr/cm³.
- Absorción: 0.70 %.
- Pérdida por lavado (malla 120): 0.68 %.
- Peso volumétrico seco y suelto: 1403 kg/m³.
- Peso volumétrico seco y compacto: 1496 kg/m³.



Figura 1.5 Grava caliza de 9.5 mm (3/8”).

La figura 1.6 muestra la curva granulométrica de la grava de 9.5 mm. En ella se puede apreciar que se encuentra dentro de los límites marcados por la norma ASTM C 33 por lo que es recomendable para trabajar con este tipo de concretos.

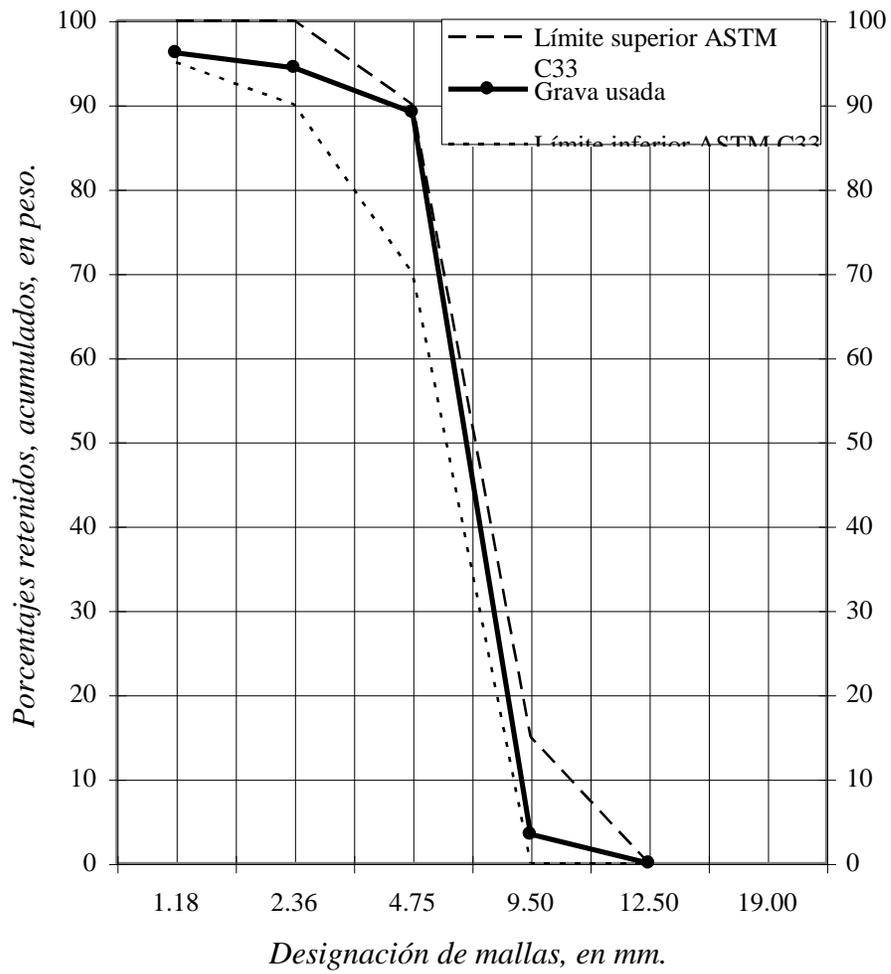


Fig. 1.6 Curva granulométrica de grava caliza TMA 9.5 mm (3/8").

I.3 Arena.

En general, todas las arenas usadas en los concretos convencionales son adecuadas para el concreto autocompactable.

El alto volumen de pasta en las mezclas autocompactables ayuda a reducir la fricción interna entre las partículas de arena, aunque, una buena distribución de los granos de arena sigue siendo muy importante. Muchos métodos de diseños de mezclas autocompactables usan arenas mezcladas para lograr una curva granulométrica óptima.

Los polvos (partículas finas menores que 0.125mm) tienen una influencia muy significativa en la reología del concreto autocompactable. Su inclusión en las mezclas es muy importante ya que generan efectos benéficos en el concreto, sobre todo cuando se encuentra en estado fresco. Algunos beneficios a destacar son:

- Aumentan la capacidad de retener agua de la mezcla debido a su elevada superficie específica.
- Aumentan la tixotropía de la mezcla.
- Reducen el calor de hidratación.
- Dan una mayor cohesividad a la mezcla.

Se debe asegurar una cantidad mínima de finos provenientes de la arena y otros adicionantes para lograr una adecuada resistencia a la segregación. Como recomendación, se sugiere un contenido mínimo del 10 %. Estos finos, a su vez, deben ser incluidos en el contenido de polvos de la pasta y deben ser considerados al calcular la relación agua/polvos de la mezcla.

Este proyecto utilizó una arena andesítica de origen natural proveniente de Texcoco. La andesita es un material de origen ígneo extrusivo de composición intermedia a básica, que se puede depositar en forma de piroclastos y/o flujos de lava, con buena calidad física y química para funcionar como agregado para concreto.

La arena presenta las siguientes propiedades:

- Módulo de finura: 2.70
- Peso específico: 2.40 gr/cm^3 .
- Peso específico seco: 2.25 gr/cm^3 .
- Absorción: 6.42 %.
- Peso volumétrico suelto y seco: 1504 kg/m^3 .
- Peso volumétrico seco y compacto: 1641 kg/m^3 .
- Finos que pasan la malla 200 ($74 \mu\text{m}$): 20.55 %.
- Finos que pasan la malla 120 (0.125 mm): 23.45 %.



Figura 1.7 Arena andesítica.

La curva granulométrica correspondiente a la arena se muestra en la figura 1.8. Se puede observar que la granulometría se encuentra ligeramente fuera de los límites establecidos por la norma ASTM C 33, aun así sus propiedades permiten que sea utilizada como agregado fino para las mezclas de concreto.

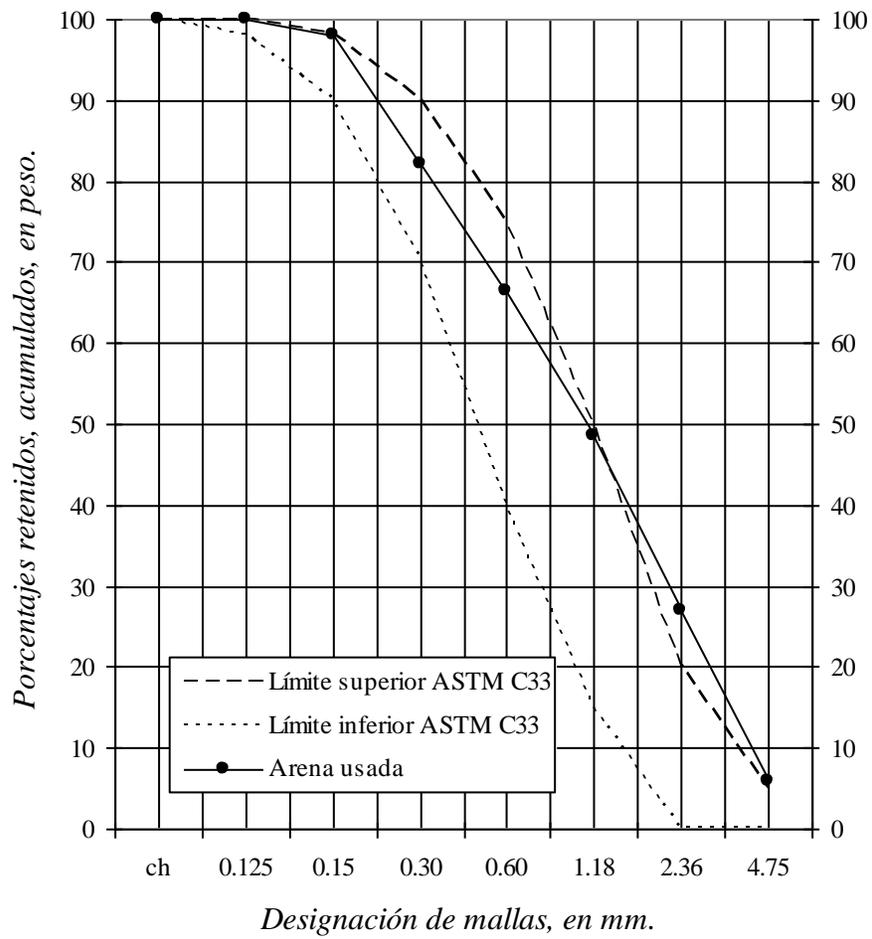


Fig. 1.8 Curva granulométrica de la arena de Texcoco

I.4 Aditivos químicos.

Son materiales diferentes del agua, de los agregados y del cemento, que se pueden emplear como componentes del concreto y que se agregan en pequeñas cantidades a la mezcla inmediatamente antes o durante el mezclado y que modifican una o más de las propiedades del concreto o mortero en sus etapas: fresco, fraguado, endureciéndose, y endurecido.

Los aditivos químicos para el concreto actúan directamente sobre el cemento en la mezcla de concreto y se dosifican comúnmente en mililitros por kilogramo de cemento.

Aunque los aditivos, a diferencia del cemento, los agregados y el agua, no son componentes esenciales de la mezcla de concreto, son importantes y su uso se extiende cada vez más, por la aportación que hacen a la economía de la mezcla, por la necesidad de modificar las características del concreto de tal forma que éstas se adapten a las condiciones de la obra y a los requerimientos del constructor; y otras veces, su utilización como único medio factible para lograr las características deseadas en el concreto, como baja permeabilidad, alta resistencia a temprana edad, alta fluidez para compactarse por su propio peso, facilidad de bombeo a distancias largas o alturas grandes, entre otras.

Los superfluidificantes o reductores de agua de alto rango son componentes esenciales del concreto autocompactable y son los que proporcionan la alta fluidez de las mezclas. Aunque los reductores de agua de alto rango han estado en el mercado por más de 30 años, una nueva generación basada en la química del policarboxilato está emergiendo como el superfluidificador líder. Los reductores de agua sintéticos de alto rango están concebidos técnicamente en el nivel molecular para proporcionar las propiedades deseables, en tanto minimizan las propiedades indeseables. Los superfluidificadores basados en policarboxilato son poderosos dispersadores de cemento que requieren menos agua de mezclado, al tiempo que incrementan de manera significativa las características de fluidez. También, proporcionan mejor y más completa hidratación de las partículas de cemento, produciendo características incrementadas en la rapidez del fraguado.

En lo que respecta a este proyecto, se decidió utilizar el superfluidificante Glenium 3030 NS, desarrollado a base de policarboxilatos, el cual es un aditivo muy efectivo que permite producir concreto con diferentes niveles de trabajabilidad, incluyendo aplicaciones que requieran el uso de concreto autocompactante. Glenium 3030 NS cumple con la norma ASTM C 494 para requerimientos tipo A, reductores de agua, y tipo F, aditivos reductores de agua de alto rango.

Comportamiento en estado endurecido.

Glenium 3030 NS está formulado para producir concreto con características de fraguado de normales a aceleradas, dentro del rango de dosificación recomendado proporciona una retención mejorada de trabajabilidad.

El tiempo de fraguado del concreto está influenciado por la composición química y física de los ingredientes básicos del concreto, la temperatura del concreto, y las condiciones climáticas. Se deberán hacer mezclas de prueba para determinar la dosificación requerida para el tiempo de fraguado y los requisitos de resistencia especificados.

Dosificación.

El rango de dosificación recomendada del aditivo reductor de agua de alto rango Glenium 3030 NS es de 390 a 1170 ml por 100 kg de cemento para la mayoría de las mezclas. El rango de dosificación se aplica a la mayoría de las mezclas que utilizan ingredientes promedio.



Fig. 1.9 Aditivo Glenium 3030 Ns.

II. Criterios para el diseño de mezclas.

La dosificación del concreto implica el equilibrio entre una economía razonable y los requisitos especificados de colado, resistencia, durabilidad, densidad y apariencia.

Las características requeridas se rigen por el empleo que se va a dar al concreto y por las condiciones que se espera encontrar en el momento del colado. A menudo, pero no siempre, estas se consideran en las especificaciones para la obra.

Principios para el diseño de mezclas.

- La fluidez y la viscosidad de la pasta se pueden ajustar mediante un buen proporcionamiento del cemento y una buena selección de los adicionantes, también mediante la limitación de la relación agua/polvos y la inclusión de un superfluidificante y, en algunos casos, un aditivo modificador de viscosidad. El correcto control de estos componentes es clave para lograr una buena habilidad de llenado, de paso y una adecuada resistencia a la segregación.
- Un contenido aceptable de cemento y polvos es muy importante para controlar las temperaturas altas y evitar el agrietamiento por contracción térmica.
- La pasta es el medio de transporte de los agregados; por lo tanto es necesario que el volumen de pasta sea mayor que el del vacío de tal manera que todas las partículas de los agregados estén perfectamente cubiertas y lubricadas por una capa de pasta. Esto incrementa la fluidez y reduce la fricción del agregado.
- La relación arena/grava debe ser reducida, con el objeto de que las gravas estén perfectamente envueltas por una capa de mortero. Esto reduce la probabilidad de que el agregado grueso se trabe cuando el concreto pasa a través de espacios estrechos o aberturas pequeñas del acero de refuerzo, incrementando la habilidad de paso de la mezcla.

- La relación agua/cemento requerida se determina no sólo por los requisitos de resistencia, si no también por otros factores como la durabilidad y las propiedades del acabado. Puesto que diferentes agregados y cementos producen, generalmente, distintas resistencias empleando la misma relación agua/cemento, es muy deseable establecer una relación entre la resistencia y la relación agua/cemento para los materiales que de hecho van a emplearse. La menor relación agua/cemento para obtener una hidratación completa del cemento se considera igual a 0.3.

La aplicación correcta de estos principios implica que, comparado con el concreto vibrado mecánicamente, el concreto autocompactable contenga:

- Un contenido de agregado grueso más bajo.
- Una mayor cantidad de pasta.
- Una relación agua/polvos baja.
- Un volumen mayor de superfluidificante.
- La inclusión, en ocasiones, de un aditivo modificador de viscosidad.



Fig. 2.1 Fabricación de concreto.

Basado en estos principios, Okazawa desarrolló un procedimiento eficiente para el diseño de mezclas de concreto autocompactable, el cuál se muestra a continuación:

- A) *Selección del contenido de aire deseado.* Usualmente se establece en un 2 %, sin embargo, se puede seleccionar un valor más alto cuando se diseña un concreto resistente a la congelación y deshielo.
- B) *Determinación del volumen del agregado grueso.* El volumen del agregado grueso está definido por la densidad de la masa. Usualmente el contenido de agregado grueso ($D > 4\text{mm}$) debe estar entre el 50 y 60 por ciento del volumen de los agregados.

Cuando el volumen del agregado grueso en el concreto excede un cierto límite, la probabilidad de colisión o contacto entre partículas de agregado grueso aumenta rápidamente y hay un incremento en el riesgo de bloqueo cuando el concreto pasa entre los espacios que hay entre las barras de refuerzo.

El contenido óptimo de agregado grueso depende de los siguientes parámetros:

- *Tamaño máximo de agregado.* A medida que sea menor el tamaño máximo de agregado, mayor es la proporción del agregado grueso.
- *Agregados triturados o redondeados.* Para agregados redondeados puede usarse un contenido mayor que para agregados triturados.

- C) *Determinación del contenido de arena.* La arena, en el contexto de este procedimiento de composición de la mezcla está definida como las partículas mayores que 0.125 mm y menores que 4 mm.

El contenido de arena está definido por la densidad. El contenido volumétrico óptimo de arena en el mortero varía entre 40-50 %, dependiendo de las propiedades de la pasta.

D) *Diseño de la composición de la pasta.* En este inciso se describe la forma como debe de ser evaluada la pasta y la manera de obtener el parámetro “ Bp ”, esencial para lograr un buen proporcionamiento de la mezcla.

A continuación se hablará más a profundidad de este importante proceso.

II.1 Evaluación de la pasta.

Se comenzó a trabajar con 12 mezclas, con contenidos de cemento de 350, 400 y 450 kg/m^3 . Todas las mezclas con una cantidad variable de finos. Se calculó el agua de cada mezcla para relaciones agua/polvo por volumen en proporción a 1.1, 1.2, 1.3 y 1.4.

Posteriormente, se probaron las mezclas con el cono de fluidez, mostrado en la figura 2.2, midiéndose las respectivas extensiones de cada mezcla en centímetros. Se obtuvo un promedio de dichas extensiones y se sustituyó en la ecuación de la figura 2.2 para obtener la fluidez relativa ($\Gamma_{p/m}$).

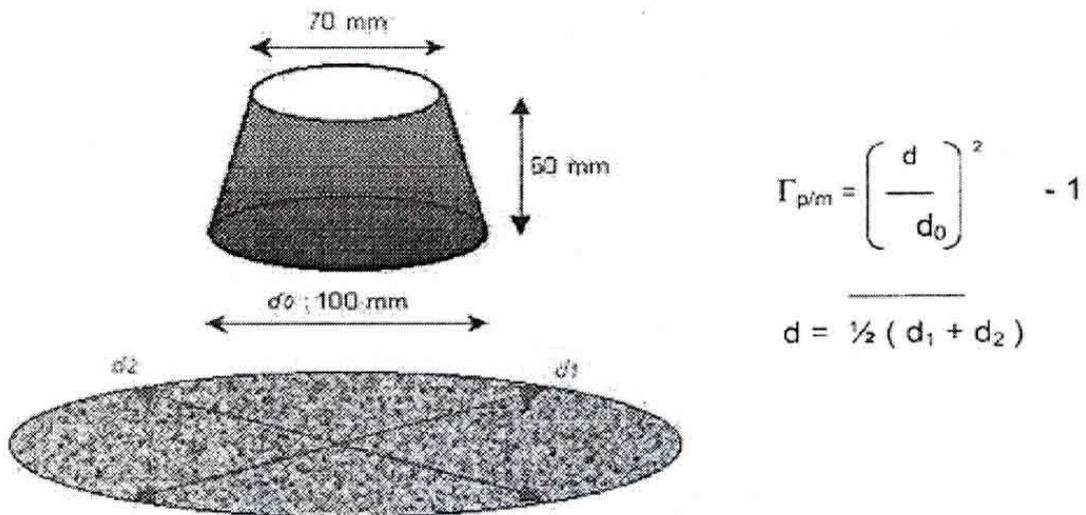


Figura 2.2 Cono de fluidez y ecuación para obtener la fluidez relativa.

Después de obtener la fluidez relativa (Γ_p/m) para cada una de las cuatro proporciones mencionadas anteriormente (1.1, 1.2, 1.3 y 1.4), se realizó una grafica con los valores de fluidez relativa en el eje de las abscisas y las relaciones agua/polvo ubicadas en el eje de las ordenadas. Luego, se trazó una recta que pasara por los cuatro puntos. El punto de intersección de esta recta con el eje de las ordenadas es denominado “Bp” que representa la relación agua/polvos para una extensión cero.

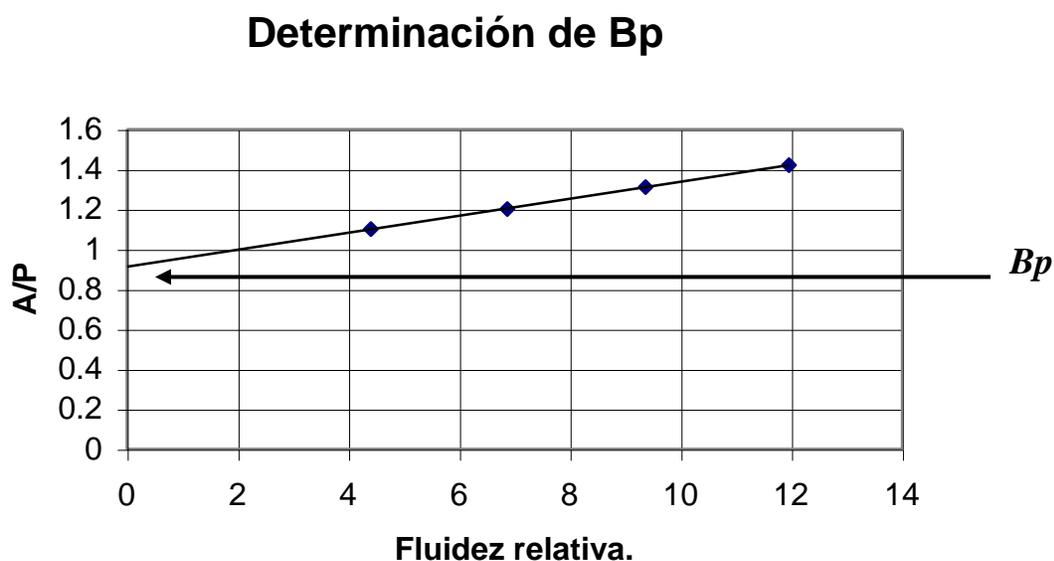


Figura 2.3 Procedimiento para determinar el valor de “Bp”.

Mediante un gráfico se realizó un comparativo de los doce valores de “Bp” obtenidos durante las pruebas y se seleccionaron los óptimos de acuerdo al cuadro mostrado a continuación:

Tabla II.1 Valores de Bp para los distintos consumos de cemento.

CEMENTO [kg/m ³]	Bp
350	0.9492
400	0.9575
450	0.9628

II.2 Diseño y evaluación de morteros.

Una vez obtenidos los valores de “Bp” adecuados y continuando con el método de Okazawa, se procedió a realizar los proporcionamientos de ingredientes para la elaboración de morteros.

Estos morteros debían tener contenidos de arena de 40, 45 y 50 % del volumen total del mortero y contenidos de agua de 80, 85 y 90 % del parámetro Bp correspondiente a cada relación óptima cemento-finos. Los morteros fueron ensayados mediante dos pruebas. En la primera, se elaboró la mezcla y se le fueron agregando pequeñas dosificaciones de superfluidificante. Luego, utilizando el cono de fluidez, se midieron las extensiones alcanzadas, con el objeto de que estuvieran ubicadas entre 24 y 26 centímetros.

Para la segunda prueba fue utilizado el dispositivo mostrado en la figura 2.4, el objetivo era medir el tiempo de fluidez del mortero, es decir, el tiempo que tarda la mezcla en ser desalojada del embudo “V”. Se buscó que estos tiempos estuvieran dentro de un intervalo de 7 a 11 segundos.

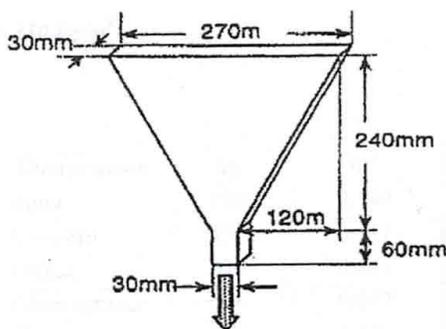


Figura 2.4 Embudo “V”.

Cabe aclarar que debido a que los morteros correspondientes al contenido de cemento de 450 kg/m^3 no tuvieron un buen desempeño en estas pruebas, probablemente debido a la excesiva cantidad de material fino de la mezcla, se decidió reducir el contenido de cemento de 450 a 425 kg/m^3 , obteniéndose muy buenos resultados en los morteros que se ensayaron posteriormente.

Con los datos obtenidos de estas pruebas fue posible determinar la composición final del concreto y la dosificación correcta de superfluidificante.

II.3 Proporcionamientos de concretos.

Al momento de definir la composición final de las mezclas de concreto autocompactable, se tomaron en cuenta las siguientes proporciones y cantidades, las cuales son comunes de este tipo de concretos pero que no son estrictamente definitivas y, de hecho, algunos ingredientes constituyentes pueden estar fuera de estos rangos.

Tabla II.2 Rangos típicos de componentes para el concreto.

Componente	Rango típico por masa [kg/m ³]	Rango típico por volumen [litros/m ³]
Polvo	380-600	
Pasta		300-380
Agua	150-210	150-210
Grava	750-1000	270-360
Relación agua/polvos		0.80-1.10

Como se había mencionado en el capítulo anterior, en esta investigación se realizaron seis mezclas para ser trabajadas con un agregado grueso de 9.5 mm (3/8”).

Estas mezclas son:

350 kg/m³ (0.85,0.45) Los 350, 400 y 450 kg/m³ indican el consumo de cemento de la mezcla por metro cúbico de concreto. Dentro del paréntesis hay dos valores. El primero corresponde al porcentaje de contenido de agua de la mezcla. Este porcentaje se obtuvo a partir del contenido de finos y del parámetro Bp.
350 kg/m³ (0.9,0.45)
400 kg/m³ (0.9,0.4)
400 kg/m³ (0.9,0.45)
425 kg/m³ (0.85,0.4) El segundo valor dentro del paréntesis indica el porcentaje de arena del volumen total de mortero.
425 kg/m³ (0.9,0.4)

Para la grava de 19 mm (3/4”) se realizaron cuatro mezclas:

350 kg/m³ (0.85,0.45)
400 kg/m³ (0.83,0.43)
425 kg/m³ (0.82,0.42) La misma nomenclatura usada para diferenciar a las mezclas de 9.5
450 kg/m³ (0.83,0.41)

II.3.1 Proporcionamientos con agregado grueso de 9.5 mm (3/8”).

Mezcla: 350 kg/m³ (0.85,0.45) Grava: 9.5 mm

Componente	kg/m ³	m ³
Agua	172	0.172
Cemento	350	0.113
Arena	708.75	0.315
Finos (arena)	216	0.096
Aire	0	0.03
Aditivo	5.8	0.0058
Grava	716.094	0.2682
Finos (grava)	5.34	0.002
Σ =	2168.64	1.000

	Cemento (l)	Finos (arena) (l)	Finos (grava) (l)	Finos adicionales (l)	<i>l</i>
Polvo	0.113	0.096	0.002	0	0.211

	Polvo (l)	Agua (l)	Aire (l)	<i>l</i>
Pasta	0.211	0.172	0.03	0.413

	Pasta (l)	Arena (l)	<i>l</i>
Mortero	0.413	0.315	0.728

Las condiciones que presentó esta mezcla fueron:

Relaciones	Resultados	Condiciones
Grava	26.62 %	< 50 %
Agua/polvos	0.82	0.8 - 1.10
Contenido total polvos	571.34 kg/m ³	380 - 600 kg/m ³
Arena/mortero	43.27 %	> 40 %
Arena/pasta	76.27 %	< 50 %
Arena/agregados	54.20 %	> 50 %
Agua libre	172 l	< 210 l
Pasta/Vol. Mezcla	41.30 %	> 40 %

Mezcla: 350 kg/m³ (0.9,0.45) Grava: 9.5 mm

Componente	kg/m³	m³
Agua	182	0.182
Cemento	350	0.113
Arena	726.75	0.323
Finos (arena)	222.75	0.099
Aire	0	0.03
Aditivo	5.5	0.0055
Grava	660.83	0.2475
Finos (grava)	5.34	0.002
Σ =	2147.83	1.000

	Cemento (l)	Finos (arena) (l)	Finos (grava) (l)	Finos adicionales (l)	<i>l</i>
Polvo	0.113	0.099	0.002	0	0.214

	Polvo (l)	Agua (l)	Aire (l)	<i>l</i>
Pasta	0.214	0.182	0.03	0.426

	Pasta (l)	Arena (l)	<i>l</i>
Mortero	0.426	0.323	0.749

Las condiciones que presentó esta mezcla fueron:

Relaciones	Resultados	Condiciones
Grava	24.55 %	< 50 %
Agua/polvos	0.85	0.8 - 1.10
Contenido total polvos	578.09 kg/m ³	380 - 600 kg/m ³
Arena/mortero	43.12 %	> 40 %
Arena/pasta	75.82 %	< 50 %
Arena/agregados	56.82 %	> 50 %
Agua libre	182 l	< 210 l
Pasta/Vol. Mezcla	42.60 %	> 40 %

Mezcla: 400 kg/m³ (0.9,0.4) Grava: 9.5 mm

Componente	kg/m³	m³
Agua	194	0.194
Cemento	400	0.129
Arena	627.75	0.279
Finos (arena)	191.25	0.085
Aire	0	0.03
Aditivo	5	0.005
Grava	742.26	0.278
Finos (grava)	5.34	0.002
Σ =	2160.26	1.000

	Cemento (l)	Finos (arena) (l)	Finos (grava) (l)	Finos adicionales (l)	<i>l</i>
Polvo	0.129	0.085	0.002	0	0.216

	Polvo (l)	Agua (l)	Aire (l)	<i>l</i>
Pasta	0.216	0.194	0.03	0.44

	Pasta (l)	Arena (l)	<i>l</i>
Mortero	0.44	0.279	0.719

Las condiciones que presentó esta mezcla fueron:

Relaciones	Resultados	Condiciones
Grava	27.6 %	< 50 %
Agua/polvos	0.90	0.8 - 1.10
Contenido total polvos	596.59 kg/m ³	380 - 600 kg/m ³
Arena/mortero	38.80 %	> 40 %
Arena/pasta	63.41 %	< 50 %
Arena/agregados	50.27 %	> 50 %
Agua libre	194 l	< 210 l
Pasta/Vol. Mezcla	44.00 %	> 40 %

Mezcla: 400 kg/m³ (0.9,0.45) Grava: 9.5 mm

Componente	kg/m³	m³
Agua	194	0.194
Cemento	400	0.129
Arena	771.75	0.343
Finos (arena)	236.25	0.105
Aire	0	0.03
Aditivo	6.1	0.0061
Grava	515.04	0.1929
Finos (grava)	2.67	0.001
Σ =	2123.14	1.000

	Cemento (l)	Finos (arena) (l)	Finos (grava) (l)	Finos adicionales (l)	<i>l</i>
Polvo	0.129	0.105	0.001	0	0.235

	Polvo (l)	Agua (l)	Aire (l)	<i>l</i>
Pasta	0.235	0.194	0.03	0.459

	Pasta (l)	Arena (l)	<i>l</i>
Mortero	0.459	0.343	0.802

Las condiciones que presentó esta mezcla fueron:

Relaciones	Resultados	Condiciones
Grava	19.19 %	< 50 %
Agua/polvos	0.83	0.8 - 1.10
Contenido total polvos	638.92 kg/m ³	380 - 600 kg/m ³
Arena/mortero	42.77 %	> 40 %
Arena/pasta	74.73 %	< 50 %
Arena/agregados	64.12 %	> 50 %
Agua libre	194 l	< 210 l
Pasta/Vol. Mezcla	45.90 %	> 40 %

Mezcla: 425 kg/m³ (0.85,0.4) Grava: 9.5 mm

Componente	kg/m³	m³
Agua	187	0.187
Cemento	425	0.137
Arena	625.5	0.278
Finos (arena)	191.25	0.085
Aire	0	0.03
Aditivo	5	0.005
Grava	742.26	0.278
Finos (grava)	5.34	0.002
Σ =	2176.01	1.000

	Cemento (l)	Finos (arena) (l)	Finos (grava) (l)	Finos adicionales (l)	<i>l</i>
Polvo	0.137	0.085	0.002	0	0.224

	Polvo (l)	Agua (l)	Aire (l)	<i>l</i>
Pasta	0.224	0.187	0.03	0.441

	Pasta (l)	Arena (l)	<i>l</i>
Mortero	0.441	0.278	0.719

Las condiciones que presentó esta mezcla fueron:

Relaciones	Resultados	Condiciones
Grava	27.6 %	< 50 %
Agua/polvos	0.83	0.8 - 1.10
Contenido total polvos	621.59 kg/m ³	380 - 600 kg/m ³
Arena/mortero	38.66 %	> 40 %
Arena/pasta	63.04 %	< 50 %
Arena/agregados	50.18 %	> 50 %
Agua libre	187 l	< 210 l
Pasta/Vol. Mezcla	44.10 %	> 40 %

Mezcla: 425 kg/m³ (0.9,0.4) Grava: 9.5 mm

Componente	kg/m ³	m ³
Agua	198	0.198
Cemento	425	0.137
Arena	641.25	0.285
Finos (arena)	195.75	0.087
Aire	0	0.03
Aditivo	5	0.005
Grava	688.86	0.258
Finos (grava)	5.34	0.002
Σ =	2153.86	1.000

	Cemento (l)	Finos (arena) (l)	Finos (grava) (l)	Finos adicionales (l)	<i>l</i>
Polvo	0.137	0.087	0.002	0	0.226

	Polvo (l)	Agua (l)	Aire (l)	<i>l</i>
Pasta	0.226	0.198	0.03	0.454

	Pasta (l)	Arena (l)	<i>l</i>
Mortero	0.454	0.285	0.739

Las condiciones que presentó esta mezcla fueron:

Relaciones	Resultados	Condiciones
Grava	25.6 %	< 50 %
Agua/polvos	0.88	0.8 - 1.10
Contenido total polvos	626.09 kg/m ³	380 - 600 kg/m ³
Arena/mortero	38.57 %	> 40 %
Arena/pasta	62.78 %	< 50 %
Arena/agregados	52.68 %	> 50 %
Agua libre	198 l	< 210 l
Pasta/Vol. Mezcla	45.40 %	> 40 %

II.3.2 Proporcionamientos con agregado grueso de 19 mm (3/4”).

Mezcla: 350 kg/m³ (0.85,0.45) Grava: 19 mm

Componente	kg/m³	m³
Agua	172	0.172
Cemento	350	0.113
Arena	708.75	0.315
Finos (arena)	216	0.096
Aire	0	0.03
Aditivo	5.8	0.0058
Grava	721.46	0.2682
Finos (grava)	2.69	0.001
Σ =	2174.01	1.000

	Cemento (l)	Finos (arena) (l)	Finos (grava) (l)	Finos adicionales (l)	<i>l</i>
Polvo	0.113	0.096	0.001	0	0.21

	Polvo (l)	Agua (l)	Aire (l)	<i>l</i>
Pasta	0.21	0.172	0.03	0.412

	Pasta (l)	Arena (l)	<i>l</i>
Mortero	0.412	0.315	0.727

Las condiciones que presentó esta mezcla fueron:

Relaciones	Resultados	Condiciones
Grava	26.72 %	< 50 %
Agua/polvos	0.82	0.8 - 1.10
Contenido total polvos	568.69 kg/m ³	380 - 600 kg/m ³
Arena/mortero	43.33 %	> 40 %
Arena/pasta	76.46 %	< 50 %
Arena/agregados	54.11 %	> 50 %
Agua libre	172 l	< 210 l
Pasta/Vol. Mezcla	41.20 %	> 40 %

Mezcla: 400 kg/m³ (0.83,0.43) Grava: 19 mm

Componente	kg/m³	m³
Agua	179	0.179
Cemento	400	0.129
Arena	686.25	0.305
Finos (arena)	209.25	0.093
Aire	0	0.03
Aditivo	5.8	0.0058
Grava	694.56	0.2582
Finos (grava)	2.69	0.001
Σ =	2174.86	1.000

	Cemento (l)	Finos (arena) (l)	Finos (grava) (l)	Finos adicionales (l)	<i>l</i>
Polvo	0.129	0.093	0.001	0	0.223

	Polvo (l)	Agua (l)	Aire (l)	<i>l</i>
Pasta	0.223	0.179	0.03	0.432

	Pasta (l)	Arena (l)	<i>l</i>
Mortero	0.432	0.305	0.737

Las condiciones que presentó esta mezcla fueron:

Relaciones	Resultados	Condiciones
Grava	25.72 %	< 50 %
Agua/polvos	0.80	0.8 - 1.10
Contenido total polvos	611.94 kg/m ³	380 - 600 kg/m ³
Arena/mortero	41.38 %	> 40 %
Arena/pasta	70.60 %	< 50 %
Arena/agregados	54.25 %	> 50 %
Agua libre	179 l	< 210 l
Pasta/Vol. Mezcla	43.20 %	> 40 %

Mezcla: 425 kg/m³ (0.82,0.42) Grava: 19 mm

Componente	kg/m³	m³
Agua	181	0.181
Cemento	425	0.137
Arena	668.25	0.297
Finos (arena)	204.75	0.091
Aire	0	0.03
Aditivo	6	0.006
Grava	694.02	0.258
Finos (grava)	2.69	0.001
Σ =	2179.02	1.000

	Cemento (l)	Finos (arena) (l)	Finos (grava) (l)	Finos adicionales (l)	l
Polvo	0.137	0.091	0.001	0	0.229

	Polvo (l)	Agua (l)	Aire (l)	l
Pasta	0.229	0.181	0.03	0.44

	Pasta (l)	Arena (l)	l
Mortero	0.44	0.297	0.737

Las condiciones que presentó esta mezcla fueron:

Relaciones	Resultados	Condiciones
Grava	25.7 %	< 50 %
Agua/polvos	0.79	0.8 - 1.10
Contenido total polvos	632.44 kg/m ³	380 - 600 kg/m ³
Arena/mortero	40.30 %	> 40 %
Arena/pasta	67.50 %	< 50 %
Arena/agregados	53.61 %	> 50 %
Agua libre	181 l	< 210 l
Pasta/Vol. Mezcla	44.00 %	> 40 %

Mezcla: 450 kg/m³ (0.83,0.41)

Grava: 19 mm

Componente	kg/m³	m³
Agua	189	0.189
Cemento	450	0.145
Arena	666	0.296
Finos (arena)	204.75	0.091
Aire	0	0.03
Aditivo	6	0.006
Grava	653.67	0.243
Finos (grava)	2.69	0.001
Σ =	2169.42	1.000

	Cemento (l)	Finos (arena) (l)	Finos (grava) (l)	Finos adicionales (l)	<i>l</i>
Polvo	0.145	0.091	0.001	0	0.237

	Polvo (l)	Agua (l)	Aire (l)	<i>l</i>
Pasta	0.237	0.189	0.03	0.456

	Pasta (l)	Arena (l)	<i>l</i>
Mortero	0.456	0.296	0.752

Las condiciones que presentó esta mezcla fueron:

Relaciones	Resultados	Condiciones
Grava	24.2 %	< 50 %
Agua/polvos	0.80	0.8 - 1.10
Contenido total polvos	657.44 kg/m ³	380 - 600 kg/m ³
Arena/mortero	39.36 %	> 40 %
Arena/pasta	64.91 %	< 50 %
Arena/agregados	55.02 %	> 50 %
Agua libre	189 l	< 210 l
Pasta/Vol. Mezcla	45.60 %	> 40 %

III. Características y ensayos del concreto fresco.

Con el objeto de conocer el comportamiento en estado fresco de las mezclas diseñadas, fueron aplicadas una serie de pruebas y ensayos, entre las que destacan: revenimiento, peso volumétrico y contenido de aire. También se realizaron pruebas de autocompactabilidad recomendadas para este tipo de concreto de las cuales se hablará más adelante.

III.1 Revenimiento.

El revenimiento es una medida de la consistencia del concreto fresco en términos de disminución de su altura. Es útil para que a partir del valor alcanzado, determinar la cantidad de aditivo que debe agregarse a las mezclas.

Los valores de revenimiento obtenidos, antes de agregar el aditivo, en este proyecto van de los 2 a los 7 centímetros, que pueden considerarse bajos, pero para mezclas con relaciones agua/cemento reducidas como es en este caso, esos valores son esperados y normales.



Fig. 3.1 Medición del revenimiento.

III.2 Peso volumétrico.

Este método de ensaye permite determinar el peso por metro cúbico de concreto recién mezclado. Se obtiene al dividir el peso en estado fresco del concreto entre el volumen determinado de este y puede variar por la cantidad de aire atrapado y las alteraciones que pudieran tener los materiales componentes como el agua, cemento o los agregados pétreos. En la tabla III.1 se muestran los valores obtenidos de peso volumétrico para las diferentes mezclas realizadas.

Tabla III.1 Valores de peso volumétrico de las mezclas ensayadas.

<i>TMA</i>	<i>Mezcla</i>	<i>Peso volumétrico</i>
<i>[mm]</i>		<i>[kg/m³]</i>
9.5	350 (0.85,0.45)	2225
	350 (0.9,0.45)	2223
	400 (0.9,0.4)	2216
	400 (0.9,0.45)	2166
	425 (0.85,0.4)	2257
	425 (0.9,0.4)	2228
19	350 (0.85,0.45)	2291
	400 (0.83,0.43)	2235
	425 (0.82,0.42)	2243
	450 (0.83,0.41)	2271

Los datos mostrados en el cuadro indican que las mezclas tuvieron un buen desempeño, ya que el peso volumétrico de la mayoría de las mezclas, estuvo dentro del intervalo del concreto convencional el cual es de 2200 a 2400 kg/m³.



Fig. 3.2 Obtención del peso volumétrico.

III.3 Aire atrapado.

El aire atrapado es una característica común de las mezclas de concreto, aunque puede ser adicionada artificialmente mediante aditivos químicos. En cantidades controladas, puede beneficiar al concreto de distintas maneras, como por ejemplo:

- Es capaz de crear un sistema de espacios o huecos que protege al concreto contra el daño que causan los ciclos de congelamiento y deshielo.
- El concreto se vuelve más resistente a las sales descongelantes, al ataque de sulfatos y al agua corrosiva.
- Reduce la segregación y la contracción del concreto.
- Puede reducir la cantidad de agua de mezclado, mejorando la trabajabilidad del concreto.

Actualmente se dispone de muchos métodos para determinar el contenido de aire de las mezclas de concreto. En esta investigación fue empleado el “método de presión”, que determina el contenido de aire en concreto fresco mediante la observación de la variación del volumen producida por un cambio de presión. Este método es aplicable para el ensaye en el campo de todos los concretos exceptuando los hechos con agregados ligeros y sumamente porosos. Está especificado en la norma ASTM C 231.



Fig. 3.3 Dispositivo empleado para determinar el contenido de aire.

Los resultados obtenidos de contenido de aire para cada una de las mezclas realizadas fueron los siguientes:

Tabla III.2 Valores de contenido de aire de las mezclas ensayadas.

TMA	Mezcla	Contenido de aire
[mm]		[%]
9.5	350 (0.85,0.45)	4.0
	350 (0.9,0.45)	2.6
	400 (0.9,0.4)	2.5
	400 (0.9,0.45)	3.3
	425 (0.85,0.4)	2.9
	425 (0.9,0.4)	2.6
19	350 (0.85,0.45)	1.9
	400 (0.83,0.43)	3.5
	425 (0.82,0.42)	1.9
	450 (0.83,0.41)	2.0

Los valores en el cuadro indican que el contenido de aire atrapado de las mezclas, en su mayoría, son ligeramente superiores al 2%, valor que usualmente es tomado para los concretos normales.

La gráfica de la figura 3.4 nos muestra la variación del contenido de aire con respecto al peso volumétrico.

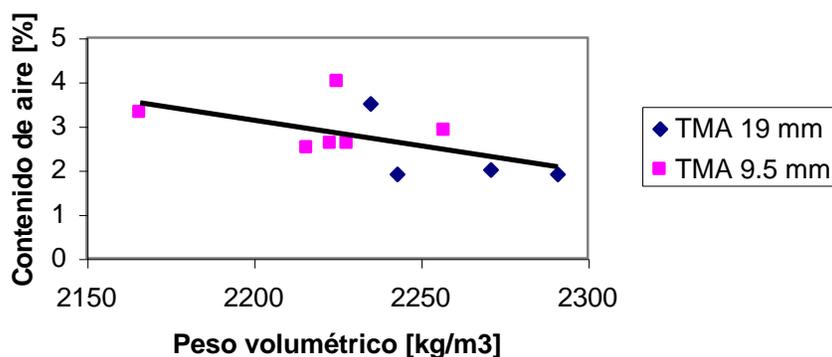


Figura 3.4 Variación del contenido de aire con respecto al peso volumétrico.

Pruebas de autocompactabilidad.

A diferencia del concreto común, las propiedades en estado fresco del concreto autocompactable son esenciales para determinar si es posible colocarlo en las cimbras satisfactoriamente. Es necesario que todos los aspectos referentes a la trabajabilidad del concreto autocompactable como lo son sus habilidades de llenado, de paso y su resistencia a la segregación sean cuidadosamente controladas para asegurar que su autocompactabilidad permanece aceptable durante su colocación.

Para este fin, se han desarrollado una extensa gama de métodos de ensaye que permiten determinar sus propiedades en estado fresco. En la tabla III.3 se enlistan los métodos más comunes, aunque cabe aclarar, que ninguno de ellos ha sido estandarizado o aceptado universalmente. Además, el hecho de que ningún método sea capaz de caracterizar por si mismo los 3 aspectos más relevantes de trabajabilidad de las mezclas, obliga a usar una combinación de métodos si se quiere tener una caracterización más precisa de la mezcla.

Tabla III.3 Diferentes ensayos para el concreto autocompactable.

No.	Método	Propiedad.
1	Extensión de flujo por el cono de Abrams	Fluidez/Habilidad de llenado
2	Caja Kajima	
3	Extensión de flujo	Fluidez/Viscosidad
4	Embudo-V	
5	Embudo-O	
6	Orimet	
7	Caja L	Habilidad de paso
8	Caja U	
9	Anillo J	
10	Caja Kajima	
11	Penetración	Resistencia a la segregación
12	Tamiz de segregación	
13	Arreglo de columnas	

En la tabla III.4 se muestran los métodos de ensaye y los requerimientos de aceptación utilizados en este proyecto.

Tabla III.4 Métodos de ensaye y requerimientos de aceptación utilizados en este proyecto.

<i>Método</i>	<i>Unidad</i>	<i>Intervalo de valores</i>	
		Mínimo	Máximo
Extensión de flujo por el cono Abrams	cm	65	80
Extensión de flujo T_{50}	seg	2	5
Embudo-V	seg	8	12
Embudo-V a $T_{5\text{min}}$	Seg	0	+ 3
Caja L	h2/h1	0.8	1
Orimet	seg	0	5



Fig. 3.5 Concreto autocompactable en estado fresco.

III.4 Extensión de flujo.

Introducción.

La extensión de flujo y el parámetro T_{50cm} conforman una prueba usada para evaluar el flujo libre horizontal del concreto autocompactable sin ningún tipo de obstrucción. El resultado es una referencia de la fluidez y capacidad de llenado del concreto. El registro de tiempo T_{50cm} nos proporciona la velocidad de flujo de la mezcla, así como su consistencia y cohesividad.

Descripción general de la prueba.

El concreto fresco es colocado en un cono de Abrams, como el mostrado en la figura 3.6, hasta llenarlo, se enraza y se levanta verticalmente para que el concreto pueda fluir. Al momento que se levanta el cono se inicia el cronómetro para registrar el tiempo que tarda la mezcla en llegar a la marca de los 50 cm. Ese es el tiempo T_{50cm} .

Cuando el concreto ha detenido su movimiento se mide la extensión total que alcanzó la mezcla.

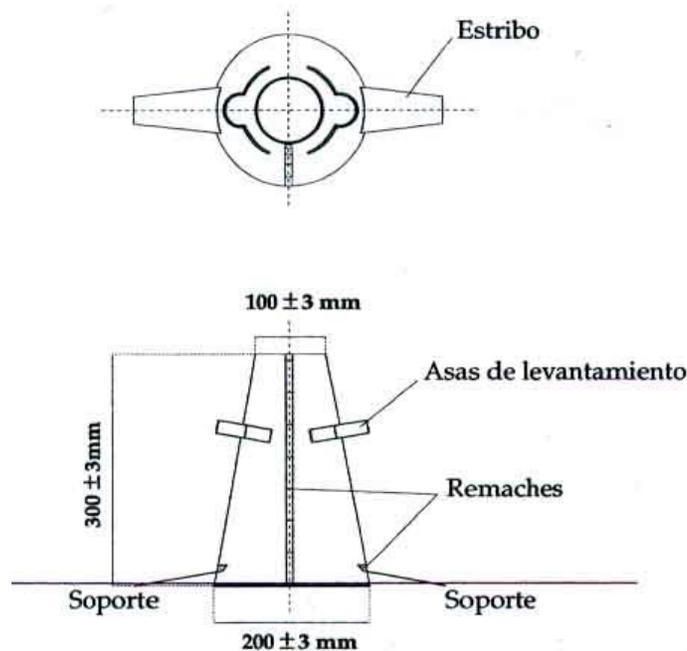


Fig. 3.6 Dimensiones del cono de Abrams

Equipo.

1. Cono de Abrams.
2. Base metálica de 1m x 1m, la cuál deberá tener marcados dos círculos concéntricos de 30 y 50 cm de diámetro (el primero puede ser marcado ligeramente ya que solo sirve de referencia para colocar el cono).
3. Barra metálica.
4. Cucharón.
5. Extensómetro.
6. Cronómetro.

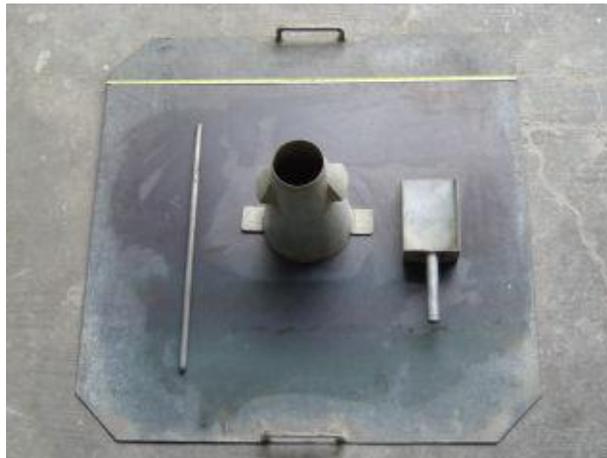


Fig. 3.7 Equipo para la prueba de extensión de flujo.

Procedimiento.

1. Tomar una muestra de aproximadamente 8 litros de la mezcla de concreto recién fabricada.
2. Colocar la base, previamente humedecida, sobre una superficie completamente horizontal. Sobre la base se coloca el cono de Abrams, asegurándose de que encaje perfectamente en el círculo de referencia de 30 cm. Es recomendable humedecer el cono antes de ser usado.
3. Llenar el cono con la mezcla sujetándolo firmemente, después de enrazar se quita la mezcla que haya caído alrededor del cono para que no obstruya el libre flujo del concreto.

4. Se levanta el cono verticalmente permitiendo que el concreto fluya. Simultáneamente se inicia el cronómetro para registrar el tiempo que tarda el concreto en llegar al círculo de 50 cm (este es el tiempo T_{50cm}).



Fig. 3.8 Levantamiento del cono de Abrams.

5. Medir el diámetro final del concreto en dos direcciones perpendiculares y el promedio de estas mediciones será la extensión de flujo de la mezcla.



Fig. 3.9 Medición del diámetro final del concreto.

En la tabla III.5 se muestran los resultados de extensión de flujo y T_{50cm} para todas las mezclas.

Tabla III.5 Resultados de extensión de flujo y T_{50cm} para todas las mezclas.

<i>TMA</i>	<i>Mezcla</i>	<i>Extensión de flujo</i>	<i>T_{50cm}</i>
[mm]		[cm]	[seg]
9.5	350 (0.85,0.45)	74	1
	350 (0.9,0.45)	75	1
	400 (0.9,0.4)	76.5	1
	400 (0.9,0.45)	79.5	sin registro
	425 (0.85,0.4)	76.5	1.15
	425 (0.9,0.4)	78	1
19	350 (0.85,0.45)	76.5	0.9
	400 (0.83,0.43)	81.75	1
	425 (0.82,0.42)	77.5	0.91
	450 (0.83,0.41)	75	0.86

Interpretación de resultados.

En los concretos autocompactables se requiere de un valor de al menos 60 y hasta 80 cm de extensión. Aunque, como se menciona antes, no existe un rango de valores aceptados en general, por lo que es tolerable una diferencia de +/-50 mm. Se observa en la tabla III.5 de resultados que todas las mezclas, sin importar que agregado grueso fue usado, rebasaron los 70 cm de extensión, lo que indica que tuvieron una buena fluidez y trabajabilidad.

Se considera al tiempo T_{50cm} como un parámetro secundario de flujo. Un tiempo bajo indica mayor fluidez. Se recomienda un rango de T_{50cm} de 3 a 7 segundos para aplicaciones de ingeniería civil, y un rango de 2 a 5 segundos para aplicaciones menores.

Todas las mezclas de este proyecto tuvieron un T_{50cm} de alrededor de 1 segundo, lo cuál constata la buena fluidez que presentaron las mezclas. En la figuras 3.10 y 3.11 se puede observar la relación que guarda la cantidad de aditivo con la extensión de flujo.

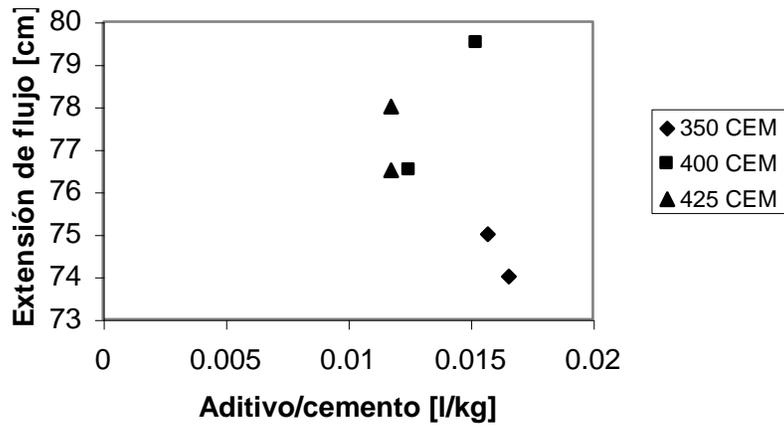


Figura 3.10 Variación de la extensión de flujo con la cantidad de aditivo usada en las mezclas para un TMA de 9.5 mm.

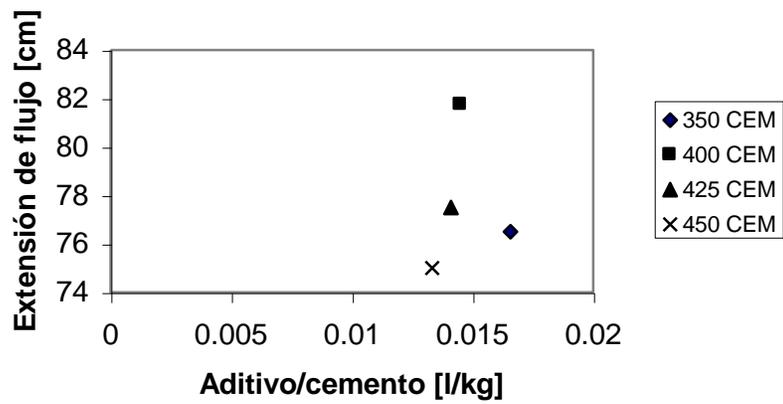


Figura 3.11 Variación de la extensión de flujo con la cantidad de aditivo usada en las mezclas para un TMA de 19 mm.

III.5 Caja L.

Introducción.

Este método se emplea para evaluar la capacidad de fluir del concreto autocompactable a través de aberturas estrechas, como los espacios formados entre las barras de refuerzo y otras obstrucciones, sin segregación o bloqueo.

Existen dos variaciones de este experimento; la caja “L” con dos barras de refuerzo y la caja “L” con tres barras de acero de refuerzo. En esta investigación se usó este último ya que simula mejor un refuerzo congestionado.



Fig. 3.12 Caja L con tres barras de refuerzo.

Descripción general de la prueba.

Una cantidad de 14 litros de concreto fresco es vertida en la sección vertical del aparato. Después, mediante una compuerta se permite al concreto fluir horizontalmente a través del acero de refuerzo. Cuando el flujo se haya detenido, la altura del concreto al final de la sección horizontal (h_2) se expresa como una proporción del remanente en la sección vertical (h_2/h_1). Esta relación indica el desnivel del concreto con respecto a la horizontal cuando está en reposo.

Características del aparato.

El aparato consiste en una caja de sección rectangular en forma de “L”, con una sección horizontal y una vertical, separadas por una compuerta deslizable, frente a la cual se encuentran 3 tramos de barra de refuerzo colocados verticalmente.

La caja debe ser construida con las dimensiones que se muestran en la figura 3.13, de un material rígido, no absorbente. El interior debe ser liso, plano y fácil de lavar. La sección vertical puede ser removible para facilitar la limpieza del aparato.

La sección horizontal puede marcarse a 20 y a 40 cm de la compuerta, para registrar el tiempo en que la mezcla alcanza esos puntos. Estos tiempos son conocidos como T_{20cm} y T_{40cm} y son un índice de la capacidad de llenado.

Las barras pueden ser de diferentes diámetros y colocadas a diferentes intervalos, de acuerdo con las consideraciones respecto al refuerzo, tres veces el tamaño máximo de agregado puede considerarse apropiado.

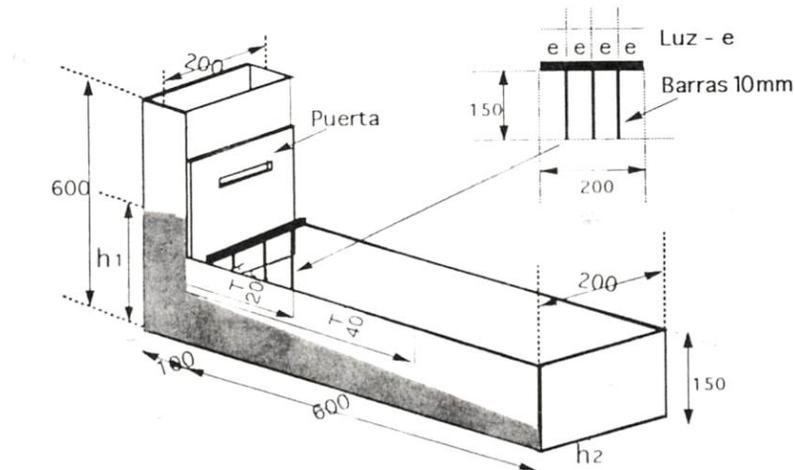


Fig. 3.13 Dimensiones de la caja L.

Equipo:

- Caja “L”
- Barra metálica
- Cucharón
- Cronómetro.

Procedimiento.

1. Humedecer el interior del aparato y colocarlo en una base horizontal.
2. Tomar 14 litros de la mezcla recién fabricada y verterla en la sección vertical del aparato.



Fig. 3.14 Caja L siendo llenada con concreto.

3. Enraazar y dejar reposar por 1 minuto.
4. Sujetar firmemente el aparato para evitar que se mueva durante las maniobras. Abrir la compuerta y dejar fluir la mezcla.
5. Simultáneamente, se inicia el cronómetro y se registran los tiempos que tarda la mezcla en llegar a las marcas de 20 y 40 cm (T_{20cm} y T_{40cm}).



Fig. 3.15 Caja L con concreto.

6. Cuando el concreto llegue al reposo se miden las alturas al final de la sección horizontal, en tres posiciones igualmente separadas sobre el ancho del aparato. Se saca un promedio de las alturas y se registra como h_2 . El mismo procedimiento es usado para calcular la profundidad del concreto inmediatamente después de las barras de refuerzo. Este valor será registrado como h_1 .



Fig. 3.16 Medición de alturas en la caja L.

7. Se calcula la relación de bloqueo (h_2/h_1).
8. La prueba tiene que ser completada en un máximo de 5 minutos.



Fig. 3.17 Caja L.

En el siguiente cuadro son mostrados las relaciones de bloqueo (h_2/h_1) y los tiempos T_{40cm} de todas las mezclas. Se decidió no considerar el T_{20cm} por la dificultad que representa tomar los dos tiempos con la precisión adecuada.

Tabla III.6 Relación de bloqueo y parámetro T_{40cm} de las mezclas.

<i>TMA</i>	<i>Mezcla</i>	<i>Relación de bloqueo (h2/h1)</i>	<i>T_{40cm}</i>
<i>[mm]</i>			<i>[seg]</i>
9.5	350 (0.85,0.45)	0.88	2
	350 (0.9,0.45)	1	1
	400 (0.9,0.4)	1	1
	400 (0.9,0.45)	0.96	1
	425 (0.85,0.4)	0.81	1.2
	425 (0.9,0.4)	0.99	1.5
19	350 (0.85,0.45)	0.83	2
	400 (0.83,0.43)	0.92	1.5
	425 (0.82,0.42)	0.80	1.84
	450 (0.83,0.41)	0.87	1.56

Interpretación de resultados.

Para que el agregado grueso tenga pocas posibilidades de bloquearse se recomienda una relación de bloqueo (h2/h1) de 0.8 a 1.0.

Los resultados obtenidos muestran que todas las mezclas realizadas en esta investigación tuvieron relaciones de bloqueo muy cercanas a la unidad, lo que indica la alta fluidez que tuvo el concreto en esta prueba.

Los tiempos T_{40cm} resultantes dan muestra de una buena velocidad de flujo. Desafortunadamente, no hay un acuerdo general acerca de un rango de valores adecuado para esta prueba, por lo tanto los datos obtenidos no son comparables.

En la figura 3.18 se puede apreciar la relación entre los valores obtenidos de (h_2/h_1) y la extensión de flujo.

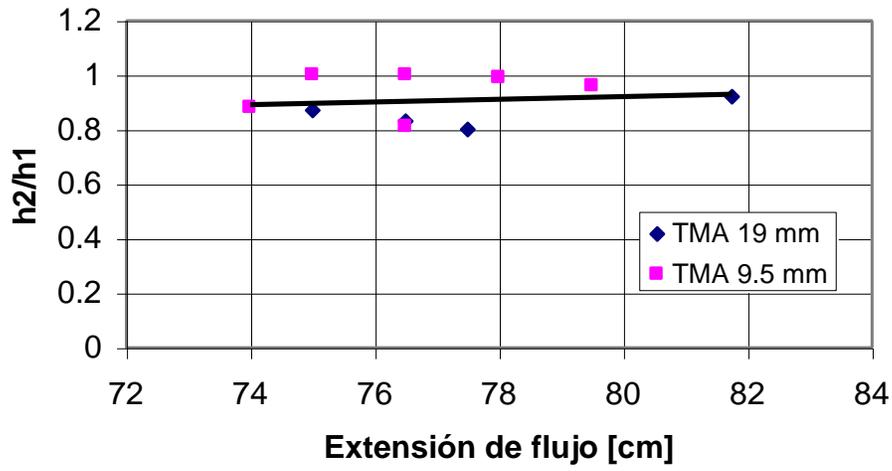


Figura 3.18 Variación de la relación h_2/h_1 con la extensión de flujo.

III.6 Ensaye de Orimet.

Introducción.

Desarrollado en la Universidad de Paisley, este método permite evaluar la alta trabajabilidad y fluidez del concreto en estado fresco.

El Orimet consiste en un tubo vertical que tiene una reducción en el diámetro en la parte inferior, es decir, en la parte de descarga y con una tapa en dicho orificio. Generalmente, el orificio de descarga es de 80 mm de diámetro interno, apropiado para evaluar mezclas de concreto con TMA de 20 mm; aunque puede ser de 70-90 mm de diámetro.

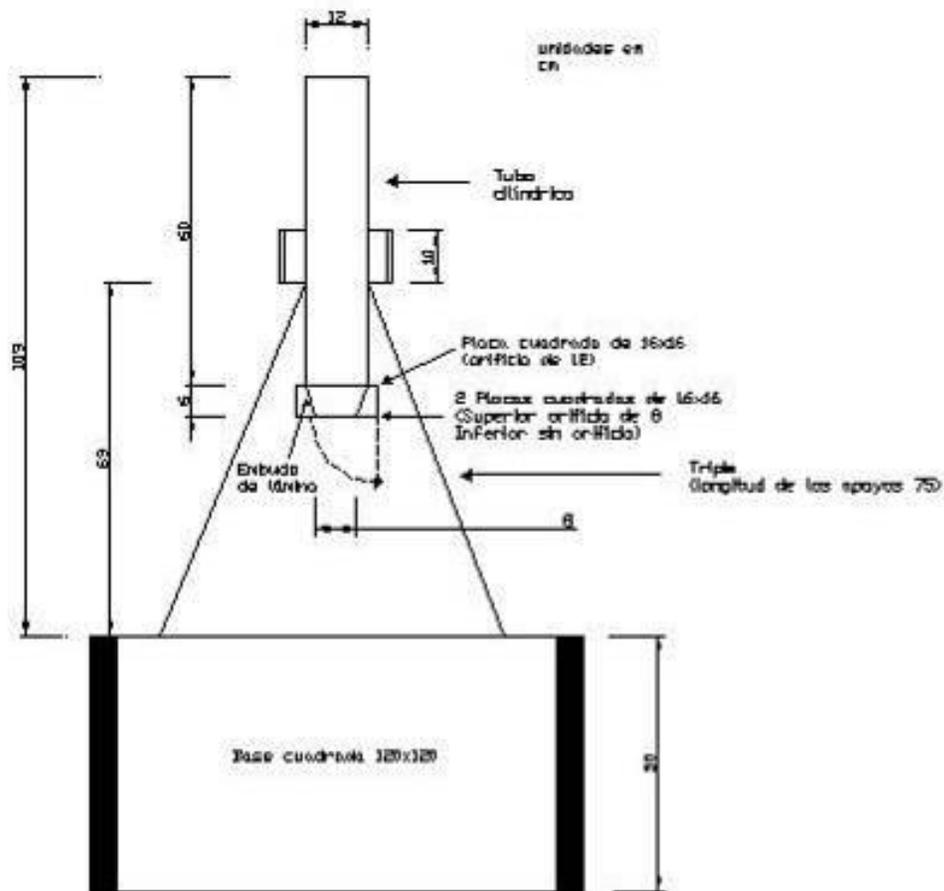


Fig. 3.19 Dimensiones del modelo de Orimet.

Descripción general de la prueba.

Esta prueba es relativamente sencilla, consiste en llenar con concreto fresco el Orimet, se enraza y se abre la tapa que se encuentra en la parte inferior, midiendo el tiempo que tarda la mezcla en desalojar el aparato.

Equipo.

- Tubo de Orimet con las dimensiones mostradas en la figura 3.19.
- Cubeta pequeña.
- Barra metálica
- Cucharón
- Cronómetro.

Procedimiento.

1. Colocar el aparato en una base horizontal y firme.
2. Nivelar el aparato.
3. Tomar una muestra de 10 litros del concreto fresco.
4. Llenar el tubo con mezcla y enrazarlo sin intentar ningún tipo de compactación.
5. Colocar la cubeta pequeña abajo del aparato para recibir la descarga.
6. Abrir la compuerta para que el concreto caiga bajo su propio peso. El cronómetro tiene que comenzar a registrar el tiempo de descarga a partir de que se abre la compuerta y hasta que la mezcla evacua el aparato.



Fig. 3.20 El modelo de Orimet se llena de concreto.

Los resultados de este experimento se muestran en la tabla III.7

Tabla III.7 Resultados del ensaye de Orimet.

<i>TMA</i>	<i>Mezcla</i>	<i>Tiempo de flujo</i>
<i>[mm]</i>		<i>[seg]</i>
9.5	350 (0.85,0.45)	5
	350 (0.9,0.45)	2.3
	400 (0.9,0.4)	4
	400 (0.9,0.45)	2
	425 (0.85,0.4)	6
	425 (0.9,0.4)	3
19	350 (0.85,0.45)	4
	400 (0.83,0.43)	4
	425 (0.82,0.42)	4.3
	450 (0.83,0.41)	3.1

Interpretación de resultados.

Tiempos de flujo prolongados en esta prueba pueden dar alguna señal de la susceptibilidad de la mezcla al bloqueo o segregación.

Para el concreto autocompactable un tiempo de flujo de 5 segundos o menos se considera aceptable. La tabla III.7 muestra que la mayoría de las mezclas tuvieron tiempos aceptables al situarse por debajo de los 5 segundos.

La figura 3.21 nos permite observar la relación del tiempo de flujo de las mezclas y la extensión de flujo.

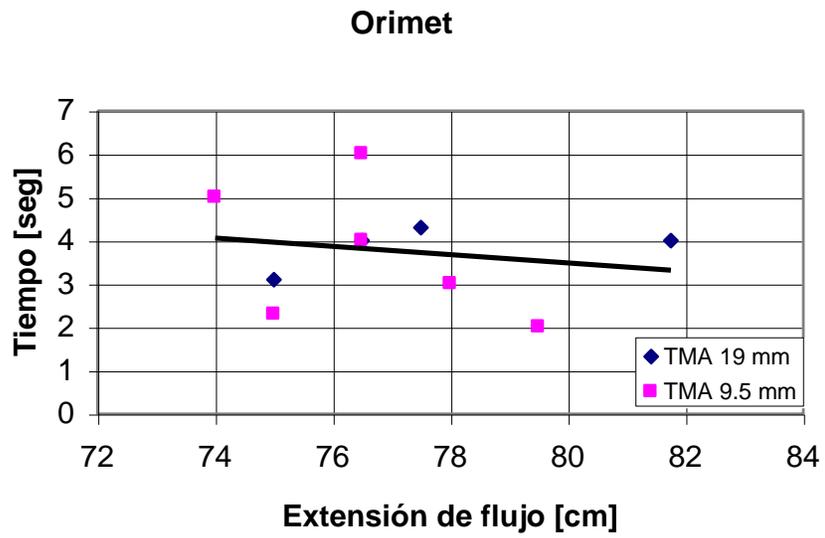


Figura 3.21 Variación del tiempo de flujo (ensaye de Orimet) con la extensión de flujo.

III.7 Embudo V.

Introducción.

El embudo V es una prueba usada para comprobar la viscosidad y la habilidad de llenado del concreto autocompactable a través de un área restringida. También nos permite revisar que no haya segregación o sangrado en la mezcla. Trabaja con un tamaño máximo de agregado de 20 mm.

Descripción general de la prueba.

El embudo V es llenado con 12 litros de mezcla aproximadamente y se registra el tiempo en que este descarga el concreto. Después, el embudo vuelve a llenarse con el concreto producto de la descarga y se deja que se asiente por 5 minutos. Si hay segregación o sangrado el tiempo de descarga se incrementará considerablemente.

Características del aparato.

El embudo V se fabrica con las dimensiones de la figura 3.22, acondicionado con una compuerta para la evacuación del concreto. El aparato debe estar apoyado en una base que le permita estar perfectamente nivelado. Se recomienda que el embudo sea construido de metal con superficies lisas, fácil de lavar y que no sea propenso a oxidarse.

Equipo.

- Embudo V
- Cubeta
- Barra metálica
- Cucharón
- Cronómetro.

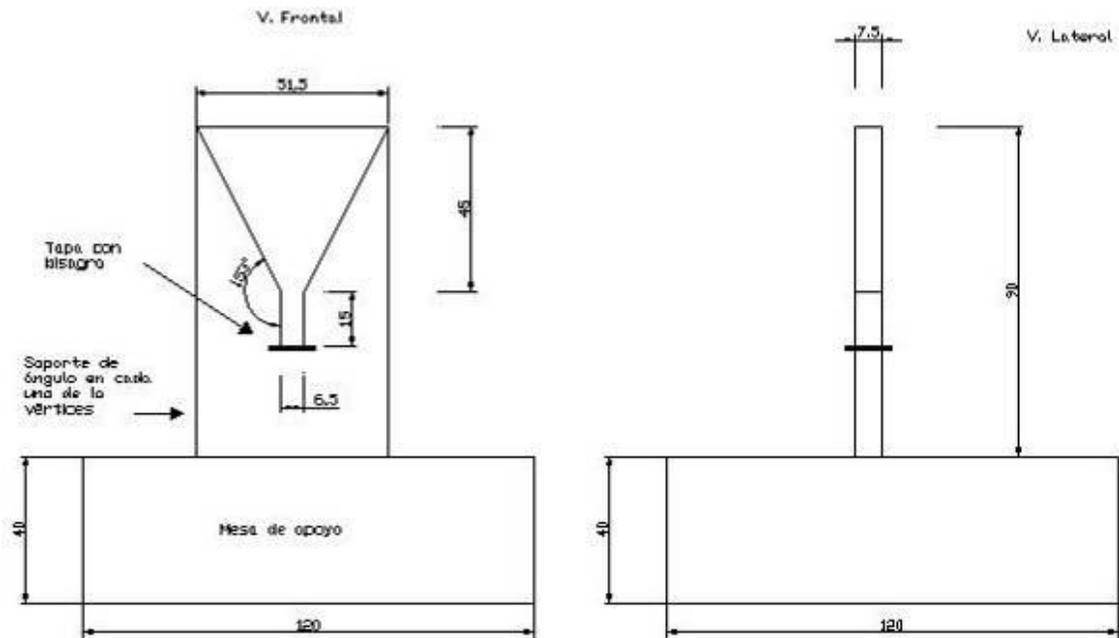


Fig. 3.22 Dimensiones del embudo V.

Procedimiento.

1. Colocar el equipo en una base horizontal y nivelarlo (horizontal y verticalmente).
2. Humedecer las paredes internas del equipo.
3. Tomar 12 litros de la mezcla recién hecha.
4. Llenar el aparato completamente con concreto sin compactar, enrazar ligeramente.



Fig. 3.23 Embudo V siendo llenado con concreto.

5. Abrir la compuerta de la base y al mismo tiempo iniciar el cronómetro, registrando el tiempo que tarda en descargar (tiempo de flujo). Este tiempo se toma al alcanzarse a ver luz por el orificio de fondo.
6. Cerrar la compuerta del embudo y con el concreto que fue descargado volver a llenar el aparato. Es importante que no se limpie el interior del aparato después de la primera descarga.
7. Se enraza y se permite al concreto reposar por 5 minutos.
8. Al momento de abrir la compuerta se inicia el cronómetro para registrar el tiempo que tarda la mezcla en evacuar el aparato (este es el tiempo $T_{5\text{min}}$). Este tiempo debe registrarse cuando se alcanza a ver luz por el orificio del fondo.



Fig. 3.24 Concreto desalojado por el embudo V.

La tabla III.8 muestra los resultados obtenidos en esta prueba.

Tabla III.8 Resultados de tiempo de flujo y $T_{5\text{min}}$.

<i>TMA</i>	<i>Mezcla</i>	<i>Tiempo de flujo</i>	$T_{5\text{min}}$
[mm]		[seg]	[seg]
9.5	350 (0.85,0.45)	7.5	10
	350 (0.9,0.45)	12	8
	400 (0.9,0.4)	3	4
	400 (0.9,0.45)	3	4
	425 (0.85,0.4)	7	8
	425 (0.9,0.4)	6	7
19	350 (0.85,0.45)	8.68	8.69
	400 (0.83,0.43)	12	11
	425 (0.82,0.42)	6.22	8.20
	450 (0.83,0.41)	5.13	5.82

Interpretación de resultados.

Esta prueba mide la facilidad con que fluye el concreto, tiempos pequeños indican una gran fluidez. Para concreto autocompactable se recomienda que los tiempos estén situados en un intervalo de 8 a 12 segundos. El cono invertido provoca que el flujo se restrinja y un tiempo prolongado de descarga indica que la mezcla tiene susceptibilidad al bloqueo. Después de 5 minutos de reposo, la segregación en el concreto puede incrementar el tiempo de descarga en gran medida.

Los datos mostrados en el cuadro de resultados muestran que los tiempos de flujo de la mayoría de las mezclas no están dentro de los límites sugeridos, debido principalmente a la gran fluidez que alcanzaron. Aún así, es fácil darse cuenta de que no están muy alejados y

los tiempos $T_{5\min}$ indican que no hubo presencia de segregación por lo que se considera que las mezclas tuvieron un desempeño aceptable en esta prueba.

La figura 3.25 muestra la relación entre los tiempos de flujo de esta prueba y la extensión de flujo.

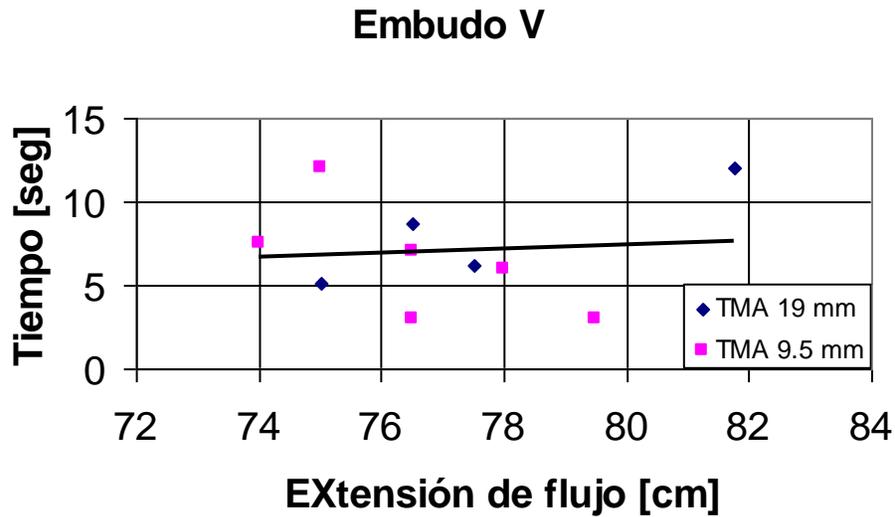


Figura 3.25 Relación entre la extensión de flujo y los tiempos de flujo.

IV. Características y ensayos del concreto endurecido.

El concreto depende en gran medida de sus características y propiedades en estado endurecido para resistir satisfactoriamente y por un lapso de tiempo considerable los efectos de las sollicitaciones mecánicas y las acciones perjudiciales que pudieran presentarse durante el funcionamiento de la estructura.

En este capítulo se revisarán aspectos importantes del comportamiento del concreto en estado endurecido como la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad, así como resistencia a tensión y permeabilidad a los cloruros. Se hará referencia a los resultados obtenidos en un proyecto paralelo, también de concretos autocompactables con el objeto de comparar datos y tener una información más completa.

IV.1 Resistencia a compresión.

La resistencia a compresión es una de las características más importantes en lo referente a resistencia mecánica. Su importancia radica en que representa la condición de carga en que el concreto exhibe mayor capacidad para soportar esfuerzos. Por otra parte, debido a la sencillez y confiabilidad para determinarla, la mayoría de los elementos estructurales se diseñan con el fin de utilizar esta propiedad del concreto.

La resistencia a compresión se puede definir como la máxima resistencia medida de un espécimen de concreto a carga axial. Generalmente se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado (kg/cm^2), se determina a la edad de 28 días y se le designa con el símbolo $f'c$. El concreto de uso común tiene una resistencia a la compresión entre 200 y 350 kg/cm^2 . Una resistencia de cuando menos 400 kg/cm^2 indica que se trata de un concreto de alta resistencia.

Los valores de resistencia a compresión se obtuvieron tomando como base el uso de probetas en forma de cilindros de 15 x 30 cm y se presentan a continuación:

Tabla IV.1 Resultados de resistencia a compresión.		TMA 9.5 mm (3/8")		
Mezcla	Cilindro	Edad de ensaye (días)	$f'c$ (kg/cm ²)	Peso volumétrico (kg/m ³)
350 kg/m ³ (0.9,0.45)	M1	28	388	2226
	M2	28	335	2243
	M4	28	354	2224
		Promedio	359	2231
350 kg/m ³ (0.85,0.45)	C1	28	434	2232
	C2	28	434	2214
	C3	28	435	2229
	C4	28	399	2233
		Promedio	426	2227
400 kg/m ³ (0.9,0.4)	M1	28	444	2175
	M2	28	439	2192
	M3	28	443	2213
		Promedio	442	2193
400 kg/m ³ (0.9,0.45)	M1	28	453	2155
	M2	28	376	2208
	M3	28	395	2197
	M4	28	430	2164
		Promedio	414	2181
425 kg/m ³ (0.9,0.4)	M1	28	407	2225
	M2	28	457	2175
	M3	28	419	2225
	M4	28	434	2217
		Promedio	429	2211
425 kg/m ³ (0.85,0.4)	C1	28	487	2234
	C2	28	480	2224
	C3	28	476	2241
	C4	28	431	2176
		Promedio	469	2219

La tabla de resultados IV.1 muestra que todas las mezclas, no importando que tuvieran el mismo contenido de cemento, tuvieron diferentes resistencias a la compresión. Esto es porque, como sucede con los concretos normales, el contenido de agua influye de manera directa en la resistencia a la compresión.

Las mezclas de 400 kg/m^3 de contenido de cemento no tuvieron diferencias muy significativas de resistencia a la compresión. Estas mezclas fueron conformadas con una proporción similar de ingredientes, por lo que era previsible que tuvieran características similares. En lo que se refiere al peso volumétrico del concreto, los valores son muy próximos para todos los contenidos de cemento.

En la tesis “Desempeño del concreto autocompactable en estado plástico y endurecido”, (Referencia 1) elaborada en el Instituto de Ingeniería, se obtuvieron resultados de pruebas de resistencia a compresión a 7, 28 y 90 días. La tabla IV.2 muestra dichos resultados.



Figura 4.1 Cilindro de concreto después de ser ensayado.

Tabla IV.2 Resultados de resistencia a compresión (Referencia 1).

TMA 9.5 mm (3/8")						
Revoltura	Cilindro	Contenido de cemento (kg/m ³)	Edad de ensaye (días)	f' _c (kg/cm ²)	Peso Volumétrico (kg/m ³)	Aditivo
2	6	350	28	347	2,277	SF
1	7	350	28	350	2,226	SF
3	5	350	28	367	2,250	SF
PROMEDIO				355	2,251	
2	3	400	28	399	2,231	SF
3	7	400	28	317*	2,226	SF
2	9	400	28	401	2,222	SF
PROMEDIO				372	2,226	
1	5	450	28	421	2,189	SF
2	4	450	28	481	2,240	SF
3	1	450	28	478	2,213	SF
PROMEDIO				460	2,214	

* Datos no confiables no promedian.

Al comparar los resultados de ambos proyectos se puede concluir que las resistencias a compresión de esta tesis superan ligeramente a las obtenidas en la referencia 1. Esto se debe muy probablemente a que en las mezclas de este estudio se buscó la combinación óptima de todos los materiales para alcanzar la consistencia requerida para que los concretos sean autocompactables.

En lo referente al peso volumétrico, en términos generales los resultados de ambos proyectos son muy similares.

La figura 4.2 (tomada de la referencia 1) muestra los resultados de pruebas de resistencia a compresión a 7, 28 y 90 días para este mismo TMA.

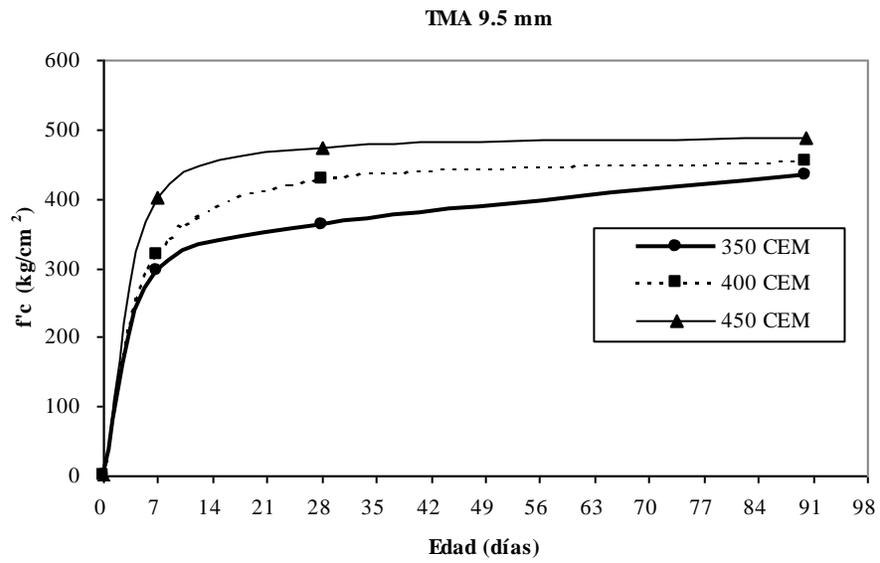


Fig 4.2 Variación de la relación resistencia a compresión con la edad.

En la tabla IV.3 se muestran los resultados de resistencia a la compresión para un TMA de 19 mm (3/4”).

Tabla IV.3 Resultados de resistencia a compresión.			TMA 19 mm (3/4”)	
Mezcla	Cilindro	Edad de ensaye (días)	$f'c$ (kg/cm ²)	Peso volumétrico (kg/m ³)
350 kg/m ³ (0.85,0.45)	C1	28	414	2226
	C2	28	412	2251
	C3	28	369	2190
	C4	28	419	2253
		Promedio	404	2230
400 kg/m ³ (0.83,0.43)	C1	28	403	2172
	C2	28	431	2237
	C3	28	425	2243
	C4	28	432	2235
		Promedio	423	2222
425 kg/m ³ (0.82,0.42)	C1	28	492	2238
	C2	28	468	2206
	C3	28	473	2223
	C4	28	396	2277
		Promedio	457	2236
450 kg/m ³ (0.83,0.41)	C1	28	349	2227
	C2	28	395	2251
	C3	28	450	2216
	C4	28	406	2226
		Promedio	400	2230

Se puede observar que, en general, los resultados de resistencia a compresión están de acuerdo con el contenido de cemento con excepción de la resistencia del contenido de cemento de 450 kg/m³ que fue inesperadamente baja.

A continuación se presentan los resultados de resistencia a la compresión obtenidos en la referencia 1 para un TMA de 19mm a los 28 días.

Tabla IV.4 Resultados de resistencia a compresión (Referencia 1).

TMA 19 mm (3/4")						
Revoltura	Cilindro	Contenido de cemento (kg/m ³)	Edad de ensaye (días)	f' _c (kg/cm ²)	Peso Volumétrico (kg/m ³)	Aditivo
1	2	350	28	336	2,233	SF-AMV
2	2	350	28	344	2,198	SF-AMV
3	6	350	28	340	2,279	SF-AMV
PROMEDIO				340	2,237	
1	7	400	28	339	2,284	SF-AMV
2	7	400	28	365	2,194	SF-AMV
3	6	400	28	352	2,179	SF-AMV
PROMEDIO				352	2,219	
1	6	450	28	417	2,228	SF-AMV
2	1	450	28	423	2,217	SF-AMV
3	1	450	28	432	2,213	SF-AMV
PROMEDIO				424	2219	

Es muy probable que la diferencia en resistencia a compresión que existe entre ambos proyectos se deba a la inclusión de un aditivo modificador de viscosidad en las mezclas de la referencia 1 y además, a que en ese estudio no se buscó la combinación óptima de los materiales componentes.



Fig. 4.3 Probeta de concreto después de ser ensayada.

La Figura 4.4 (tomada de la referencia 1) muestra los resultados obtenidos de resistencia a la compresión para 7, 28 y 90 días para un TMA de 19 mm.

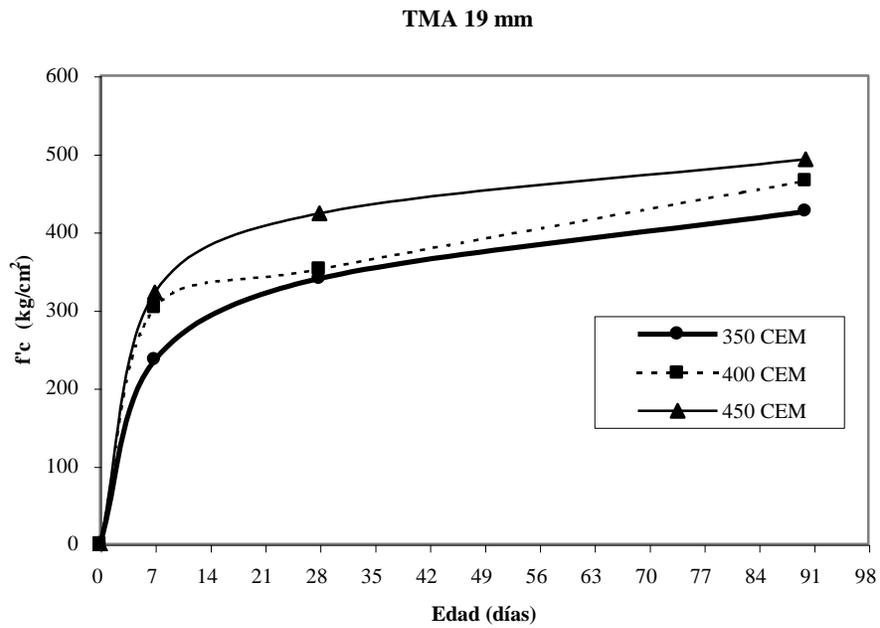


Fig. 4.4 Variación de la relación de resistencia a compresión con la edad.

En la figura 4.5 se muestra la variación de la resistencia a compresión con respecto a la relación agua/cemento. Se observa que para ambos tamaños de agregado el comportamiento es el esperado, es decir, cuando aumenta la relación agua/cemento, la resistencia a la compresión disminuye, aunque esta variación resultó más pronunciada para los concretos con TMA de 9.5 mm.

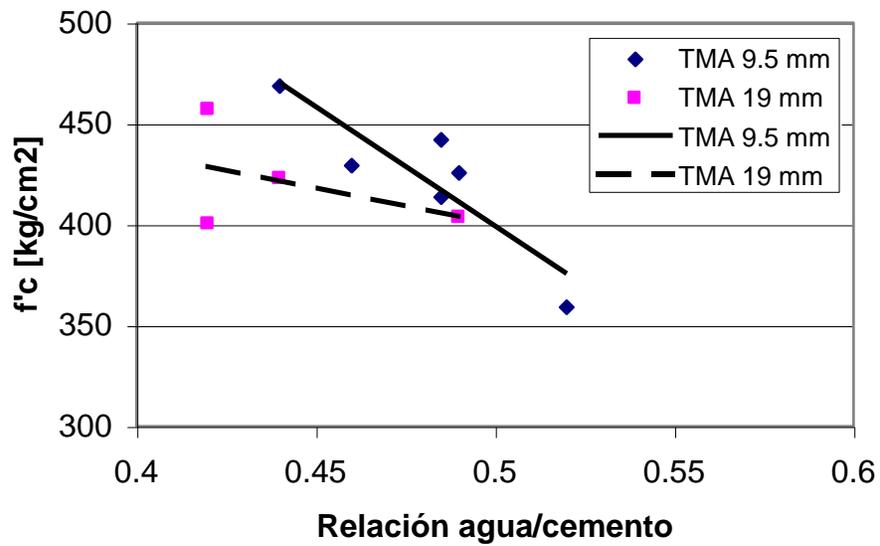


Fig. 4.5 Variación de la resistencia a compresión con la relación agua/cemento.

La figura 4.6 muestra la variación de la eficiencia del cemento con la relación agua/cemento, en la que se ve que las mezclas con agregados de TMA de 9.5 mm mantienen su eficiencia constante para las relaciones agua/cemento estudiadas, en tanto que las mezclas con TMA de 19 mm muestran un aumento en su eficiencia al incrementarse la relación agua/cemento.

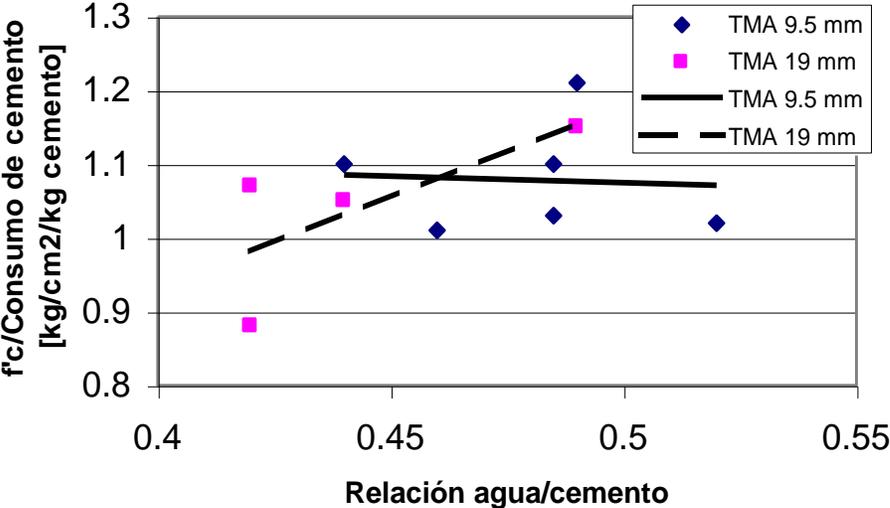


Fig. 4.6 Variación de la eficiencia del cemento con la relación agua/cemento.

IV.2 Módulo de elasticidad en compresión.

El módulo de elasticidad o módulo de Young es la relación que existe entre el esfuerzo y la deformación unitaria axial, al estar sometido el concreto a esfuerzos de compresión dentro del comportamiento elástico. Se le conoce también como una medida de la rigidez de un material.

Esta importante característica del concreto, denotado por el símbolo E , puede variar en función de diversos factores tales como el estado de humedad y de compactación del concreto, la relación agua/cemento, edad de la pasta y las características de los agregados, principalmente. Para concretos de peso normal, el E fluctúa entre 120,000 y 422,000 kg/cm^2 .

En este capítulo se expondrán, además de los resultados obtenidos en los ensayos de módulo de elasticidad, los resultados obtenidos de otra importante propiedad de deformación bajo carga: La relación de Poisson.

La relación de Poisson se puede definir como la relación que existe entre las deformaciones transversal y longitudinal al estar sometido el concreto a esfuerzos de compresión dentro del comportamiento elástico.



Fig. 4.7 Ensayo de módulo de elasticidad.

En la tabla IV.5 están registrados los resultados obtenidos de módulo de elasticidad y relación de Poisson para un TMA de 9.5 mm.

Tabla IV.5 Resultados de módulo de elasticidad y relación de Poisson. TMA 9.5 mm (3/8")

<i>Mezcla</i>	<i>Cilindro</i>	<i>f 'c</i> (<i>kg/cm²</i>)	<i>Módulo de elasticidad</i> (<i>kg/cm²</i>)	<i>Relación de Poisson</i>
350 kg/m ³ (0.9,0.45)	M1	388	248,920	0.32
	M2	335	248,516	0.32
	M4	354	241,287	0.32
	Promedio	359	246,241	0.32
350 kg/m ³ (0.85,0.45)	M1	427	259,449	0.35
	M2	433	247,862	0.30
	M3	444	247,831	0.33
	M4	440	250,020	0.32
	Promedio	436	251,291	0.33
400 kg/m ³ (0.9,0.4)	M1	444	254,380	0.30
	M2	439	254,229	0.27
	M3	443	267,598	0.32
	Promedio	442	258,736	0.30
400 kg/m ³ (0.9,0.45)	M1	453	223,174	0.27
	M2	376	255,765	0.30
	M3	395	259,792	0.31
	M4	430	247,539	0.29
	Promedio	414	246,568	0.29
425 kg/m ³ (0.9,0.4)	M1	407	268,885	0.30
	M2	457	249,007	0.30
	M3	419	262,473	0.28
	M4	434	259,520	0.30
	Promedio	429	259,971	0.30
425 kg/m ³ (0.85,0.4)	M1	487	257,062	0.30
	M2	480	250,313	0.29
	M3	476	249,023	0.30
	M4	431	251,756	0.29
	Promedio	469	252,039	0.30

Los valores de módulo de elasticidad y de relación de Poisson de todas las mezclas se ubican dentro de los intervalos esperados, por lo que se considera que tuvieron un desempeño aceptable. En lo referente a la resistencia a la compresión las variaciones se deben principalmente a los diferentes contenidos de agua.

En la tabla IV.6 se presentan los resultados de la referencia 1 de módulo de elasticidad y relación de Poisson a los 28 días

Tabla IV.6 Resultados de módulo de elasticidad y relación de Poisson (Referencia 1).

TMA 9.5 mm					
Cilindro	Revoltura	Contenido de cemento (kg/m³)	Módulo de Elasticidad (kg/cm²)	Relación de Poisson	f'c (kg/cm²)
3	1	350	251,292	0.306	366
7	2	350	247,701	0.281	357
2	3	350	247,144	0.325	364
Prom			248,712	0.304	362
8	3	400	264,282	0.318	438
4	3	400	262,644	0.319	426
1	2	400	250,703	0.325	416
Prom			259,210	0.321	427
7	1	450	259,018	0.293	468.0
3	3	450	218,161*	0.270	475.0
3	2	450	211,063*	0.261	475.0
Prom			229,414	0.275	473

Los resultados de módulo de elasticidad y relación de Poisson son muy similares en ambos proyectos. Donde se nota una cierta variación es en la resistencia a compresión debido a los diferentes contenidos de agua y ,en algunos casos, consumos de cemento.

En la tabla IV.7 están registrados los resultados obtenidos de módulo de elasticidad y relación de Poisson para un TMA de 19 mm.

Tabla IV.7 Resultados de módulo de elasticidad y relación de Poisson. TMA 19 mm (3/4")				
<i>Mezcla</i>	<i>Cilindro</i>	<i>f'c</i> (kg/cm ²)	<i>Módulo de elasticidad</i> (kg/cm ²)	<i>Relación de Poisson</i>
350 kg/m ³ (0.85,0.45)	M1	414	272,913	0.31
	M2	402	247,053	0.26
	M3	416	255,544	0.29
	M4	419	259,553	0.28
	Promedio	413	258,766	0.29
400 kg/m ³ (0.83,0.43)	M1	448	264,488	0.32
	M2	437	276,716	0.32
	M3	438	267,322	0.29
	M4	404	269,392	0.30
	Promedio	432	269,480	0.31
425 kg/m ³ (0.82,0.42)	M1	492	264,250	0.31
	M2	468	262,849	0.30
	M3	473	278,549	0.31
	M4	396	269,318	0.31
	Promedio	457	268,742	0.31
450 kg/m ³ (0.83,0.41)	M1	452	272,585	0.28
	M2	391	271,787	0.29
	M3	353	283,207	0.29
	M4	469	273,137	0.30
	Promedio	416	275,179	0.29

La resistencia a la compresión para estas mezclas se incrementa en proporción al contenido de cemento, excepto para 450 kg/m³. El módulo de elasticidad y relación de Poisson de las mezclas tuvieron un desempeño aceptable.

Los resultados de módulo de elasticidad y relación de Poisson de la referencia 1 para este mismo TMA se presentan en la tabla IV.8.

Tabla IV.8 Resultados de módulo de elasticidad y relación de Poisson (Referencia 1).

TMA 19 mm					
Cilindro	Revoltura	Contenido de cemento (kg/m³)	Módulo de Elasticidad (kg/cm²)	Relación de Poisson	f'c (kg/cm²)
5	1	350	252,872	0.273	349
5	2	350	244,468	0.259	347
1	3	350	259,864	0.304	343
Prom			252,401	0.279	346
1	1	400	253,033	0.260	372
6	2	400	246,585	0.316	395
3	3	400	230,988	0.281	357
Prom			243,535	0.286	375
1	1	450	257,601	0.290	417
4	2	450	280,603	0.301	425
6	3	450	258,242	0.299	441
Prom			265,482	0.297	428

Al igual que con el TMA de 9.5 mm, los resultados de módulo de elasticidad y relación de Poisson de ambos proyectos fueron muy similares sin variaciones muy significativas. Respecto a la resistencia a la compresión, las resistencias de la referencia 1 fueron ligeramente inferiores a las de este proyecto.

Con los resultados de las pruebas, se obtuvieron las siguientes ecuaciones que expresan el módulo de elasticidad en función de la resistencia a la compresión.

$$\text{TMA 9.5 mm} \quad E = 12251 \sqrt{f'c} \quad (\text{kg/cm}^2)$$

$$\text{TMA 19 mm} \quad E = 12936 \sqrt{f'c} \quad (\text{kg/cm}^2)$$

Donde: E es el módulo de elasticidad del concreto, en kg/cm^2

$f'c$ es la resistencia a compresión del concreto a la edad del ensaye, en kg/cm^2

En el siguiente figura (4.8) se muestra la variación del módulo de elasticidad con la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión.

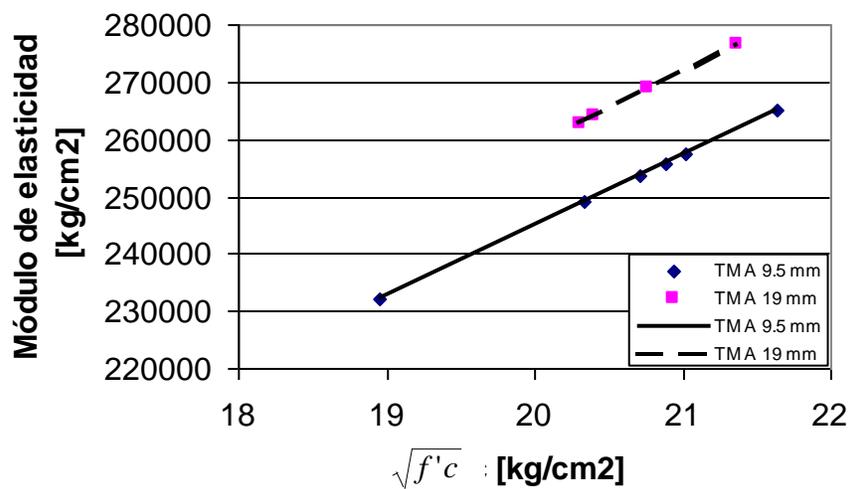


Figura 4.8 variación del módulo de elasticidad con la raíz cuadrada de la resistencia a la compresión.

Algunos resultados de la prueba de módulo de elasticidad y relación de Poisson se muestran a continuación.

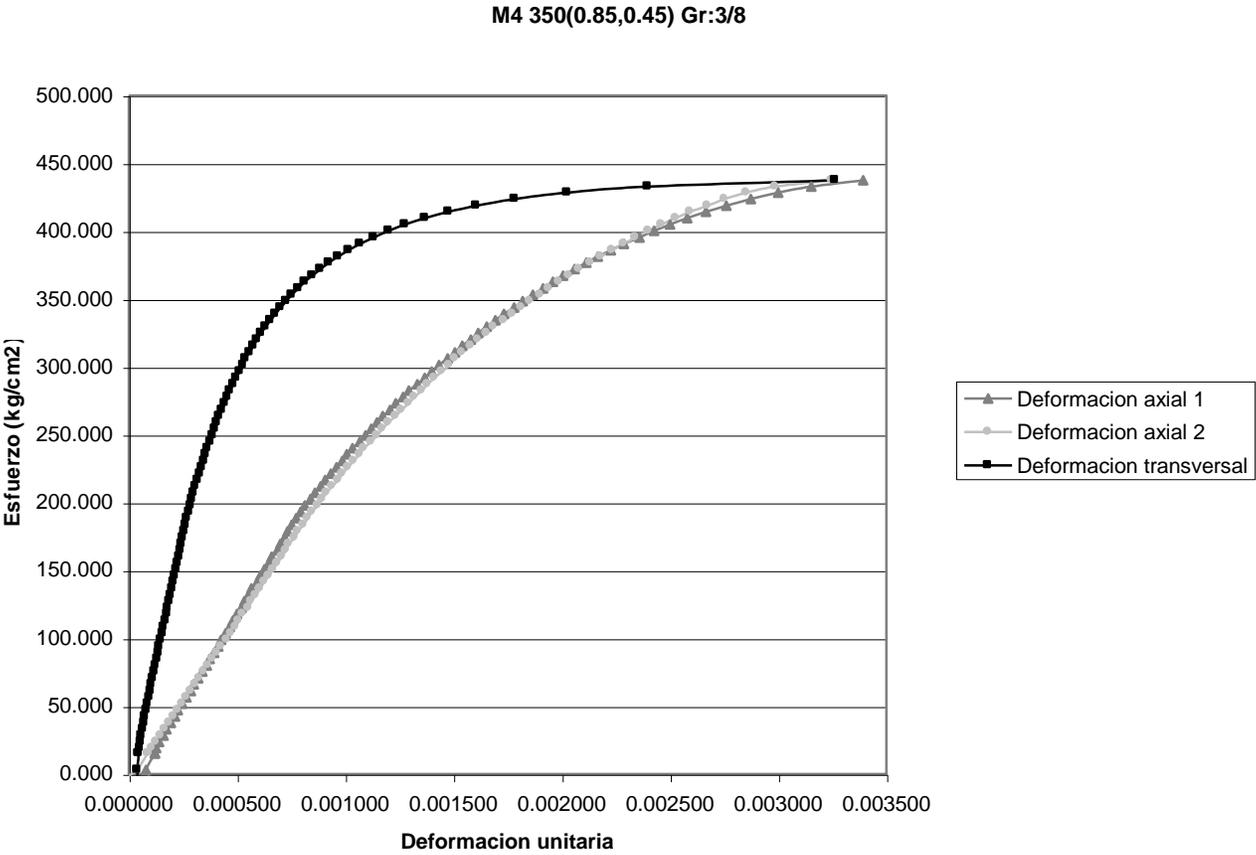


Fig. 4.9 Variación del esfuerzo con la deformación unitaria.

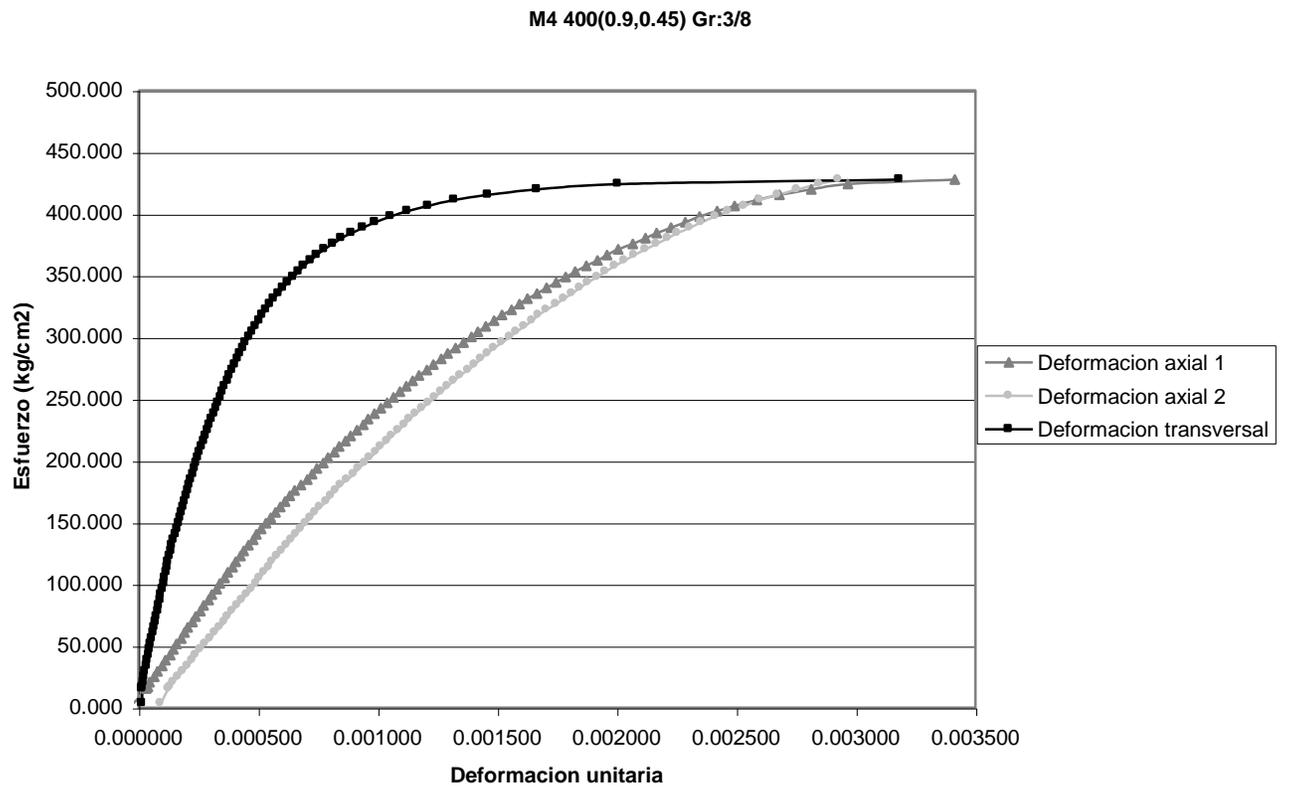


Fig. 4.10 Variación del esfuerzo con la deformación unitaria.

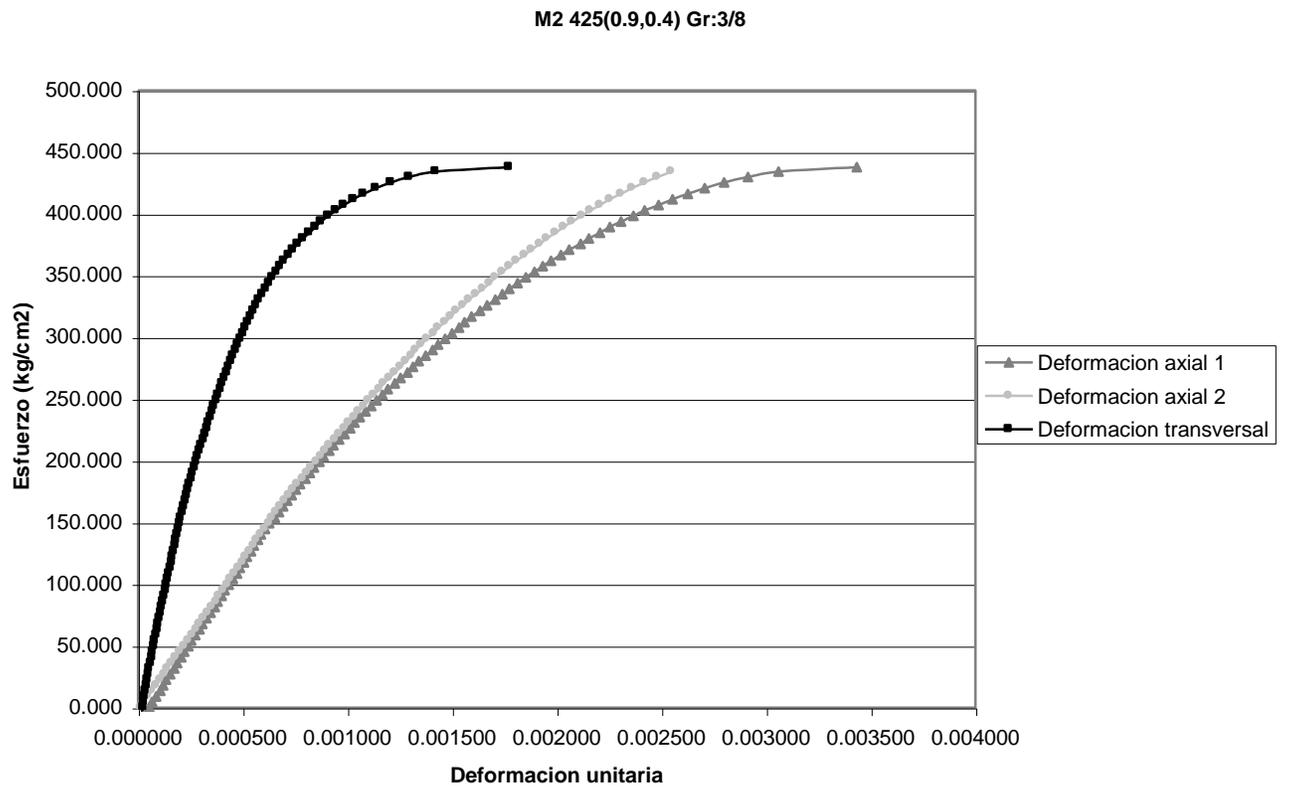


Fig. 4.11 Variación del esfuerzo con la deformación unitaria.

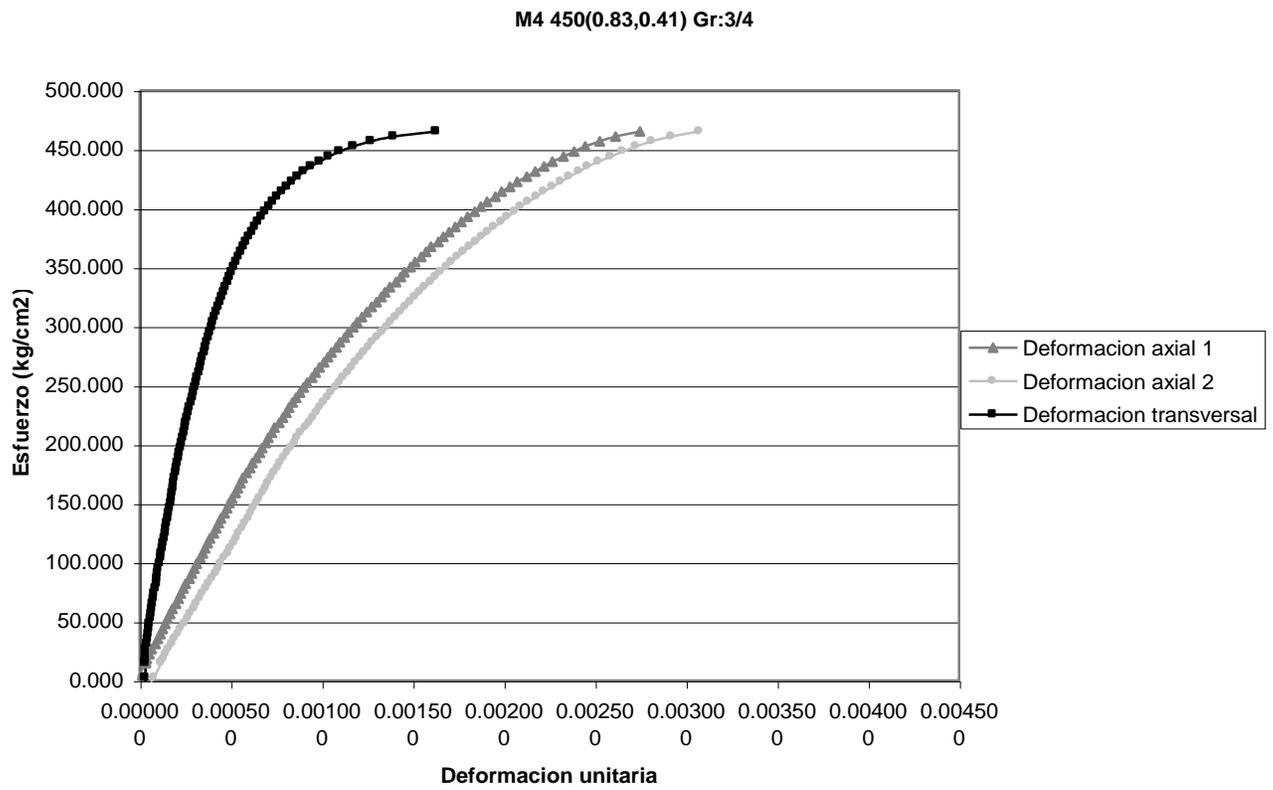


Fig. 4.12 Variación del esfuerzo con la deformación unitaria.

IV.3 Resistencia a tensión.

La resistencia del concreto a tensión es una propiedad que requiere consideración específica en el diseño de las estructuras, debido a que el concreto endurecido es un material de comportamiento frágil y poco resistente bajo esfuerzos de tensión en comparación con su desempeño a compresión, que resulta más resistente y deformable.

Como resultado de esta limitación, se procura que al diseñar las estructuras de concreto, estas no trabajen a tensión directa; sin embargo, a veces esto no es posible e inevitablemente el concreto en la estructura deberá soportar, en ocasiones, ciertos esfuerzos a tensión producto de determinadas condiciones de carga que involucran esfuerzos de flexión y cortante.

En este apartado se mostrarán los resultados de resistencia a tensión obtenidos en la referencia 1, en la cuál se utilizaron los siguientes procedimientos:

1. Prueba de tensión indirecta, por medio del ensaye de especímenes cilíndricos, sujetos a la aplicación de una carga de compresión diametral.
2. Prueba de tensión por flexión en especímenes prismáticos (vigas), ensayados con cargas concentradas a los tercios del claro.



Fig. 4.13 Prueba de tensión por flexión en vigas.

IV.3.1 Flexión.

La tensión por flexión se calculó por medio del ensaye de vigas de 15 x 15 x 60 cm obteniéndose los resultados mostrados en la tabla IV.9.

Tabla IV.9 Resistencia a tensión por flexión a 28 días

TMA 19 mm					
Revoltura	Viga	Contenido de cemento (kg)	f'_{f} (kg/cm²)	Peso Volumétrico (kg/m³)	Aditivo
1	1	350	40.36	2,296	SF-AMV
2	2	350	42.73	2,232	SF-AMV
3	3	350	37.66	2,225	SF-AMV
Promedio			40.25	2,251	
1	1	400	46.61	2,208	SF-AMV
2	2	400	43.57	2,197	SF-AMV
3	3	400	46.61	2,204	SF-AMV
Promedio			45.60	2,203	
1	1	450	45.77	2,211	SF-AMV
2	2	450	44.59	2,211	SF-AMV
3	3	450	44.59	2,224	SF-AMV
Promedio			44.98	2,215	

Se observa que los valores de flexión de todas las mezclas fueron muy parecidos. Es de llamar la atención que los valores de flexión para el contenido de cemento de 450 kg/m^3 fueron algo bajos en comparación con los de 400 kg. Esto se puede deber a que se alcanzó la resistencia del agregado dejando en segundo término al contenido de cemento. La similitud en los resultados del peso volumétrico indica uniformidad en las mezclas.

Tabla IV.10 Resistencia a tensión por flexión a 28 días

TMA 9.5 mm					
Revoltura	Viga	Contenido de cemento (kg)	f'_f (kg/cm ²)	Peso Volumétrico (kg/m ³)	Aditivo
1	1	350	45.72	2,233	SF
2	2	350	44.92	2,235	SF
3	3	350	49.61	2,221	SF
Promedio			46.75	2,229	
1	1	400	45.18	2,232	SF
2	2	400	47.49	2,225	SF
3	3	400	43.64	2,230	SF
Promedio			45.44	2,229	
1	1	450	45.38	2,216	SF
2	2	450	44.66	2,202	SF
3	3	450	49.09	2,202	SF
Promedio			46.38	2,206	

Los resultados de resistencia a la flexión para este TMA fueron semejantes a los del caso anterior alcanzando resistencias similares independientemente del consumo de cemento, debido probablemente a que la capacidad está limitada por la resistencia del agregado. Los valores de peso volumétrico obtenidos volvieron a ser muy uniformes.



Fig. 4.14 Prueba de tensión por flexión en vigas.

Por medio de estos resultados se logró establecer las siguientes relaciones entre la resistencia a tensión y la resistencia a compresión.

$$\text{TMA 19 mm} \quad f_f = 2.26\sqrt{f'_c} \quad (\text{kg/cm}^2)$$

$$\text{TMA 9.5 mm} \quad f_f = 2.32\sqrt{f'_c} \quad (\text{kg/cm}^2)$$

donde:

f_f es la resistencia a tensión por flexión del concreto, en kg/cm^2 .

f'_c es la resistencia a compresión del concreto a 28 días, en kg/cm^2 .



Fig. 4.15 Prueba de tensión por flexión en vigas.

La figura 4.16 muestra la variación de la resistencia a tensión por flexión con la raíz cuadrada de la resistencia a compresión.

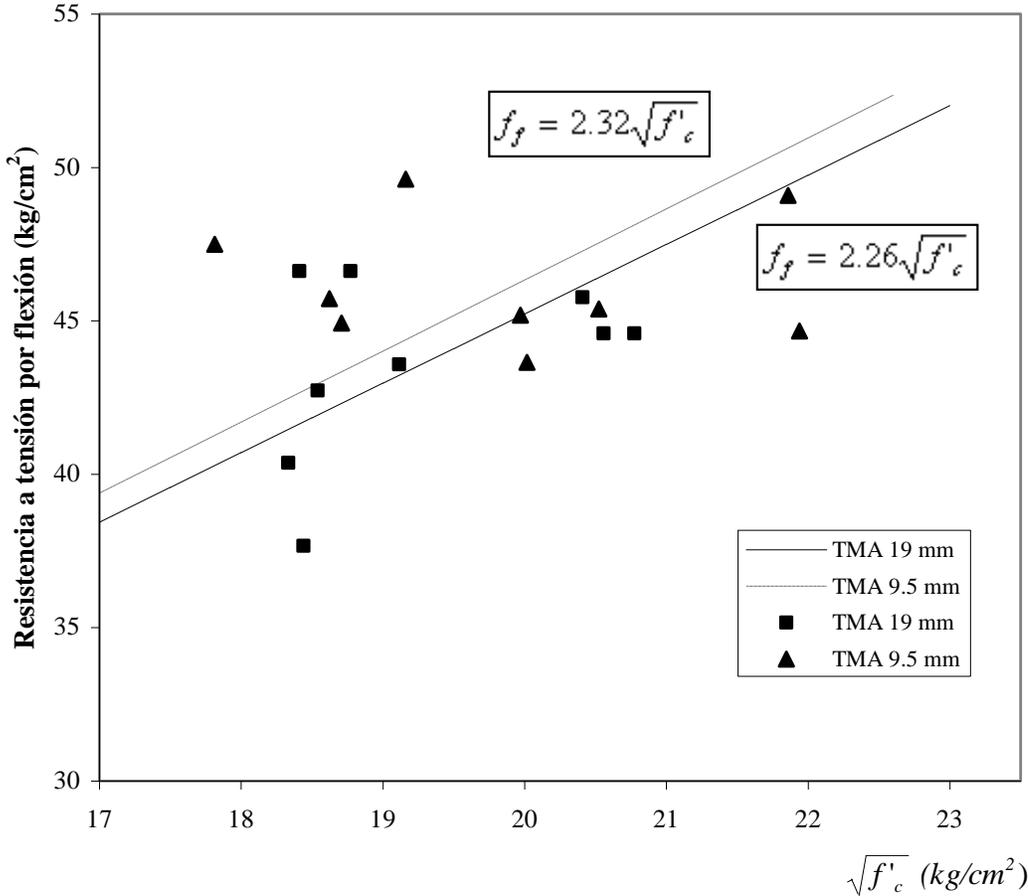


Fig. 4.16 Variación de la resistencia a tensión por flexión con la raíz cuadrada de la resistencia a compresión.

IV.3.2 Tensión indirecta.

En este ensaye, que también se le conoce como prueba brasileña, fueron utilizados cilindros de concreto de 15 x 30 cm, los cuales fueron sometidos a una carga de compresión diametral.

En la tabla IV.11 se presentan los resultados de este ensaye a 28 días.

Tabla IV.11 Resultados de tensión indirecta.

TMA 19 mm					
Revoltura	Cilindro	Contenido de cemento (kg/m³)	f'_{tb} (kg/cm²)	Peso Volumétrico (kg/m³)	Aditivo
1	3	350	27.83	2,288	SF-AMV
2	7	350	27.64	2,320	SF-AMV
3	4	350	32.44	2,263	SF-AMV
Promedio			29.30	2,290	
1	8	400	35.15	2,213	SF-AMV
3	5	400	30.21	2,215	SF-AMV
3	7	400	25.70	2,203	SF-AMV
Promedio			30.35	2,210	
1	2	450	32.88	2,278	SF-AMV
2	2	450	33.87	2,244	SF-AMV
3	3	450	34.05	2,229	SF-AMV
Promedio			33.60	2,251	

Los resultados arrojados para este TMA muestran que la resistencia a tensión indirecta aumenta ligeramente con el contenido de cemento.

El peso volumétrico de las mezclas sigue siendo uniforme.

La tabla IV.12 muestra los resultados de resistencia a tensión indirecta para un TMA de 9.5 mm.

Tabla IV.12 Resultados de tensión indirecta.

TMA 9.5 mm					
Revoltura	Cilindro	Contenido de cemento (kg/m³)	f' _{tb} (kg/cm²)	Peso Volumétrico (kg/m³)	Aditivo
1	6	350	33.60	2,225	SF
2	2	350	34.42	2,267	SF
3	1	350	35.47	2,264	SF
Promedio			34.50	2,252	
1	5	400	35.08	2,251	SF
2	4	400	34.50	2,280	SF
3	2	400	37.86	2,278	SF
Promedio			35.82	2,270	
1	1	450	43.30	2,260	SF
2	5	450	28.23	2,269	SF
3	2	450	39.52	2,259	SF
Promedio			37.02	2,263	

Para este TMA se obtuvieron resultados de resistencia a tensión indirecta superiores a los de las mezclas de 19 mm de TMA.



Fig. 4.17 Prueba brasileña.

Las siguientes expresiones, producto de los resultados obtenidos, permiten relacionar la resistencia a tensión indirecta con la raíz cuadrada de la resistencia a compresión.

$$\text{TMA 19 mm} \quad f_t = 1.61\sqrt{f'_c} \quad (\text{kg/cm}^2)$$

$$\text{TMA 9.5 mm} \quad f_t = 1.80\sqrt{f'_c} \quad (\text{kg/cm}^2)$$

donde:

f_t es la resistencia a tensión indirecta del concreto, en kg/cm^2 .

f'_c es la resistencia a compresión del concreto a 28 días, en kg/cm^2 .



Fig. 4.20 Cilindro de concreto después de la prueba.

La figura 4.21 muestra la variación de la resistencia a tensión indirecta con la raíz cuadrada de la resistencia a compresión.

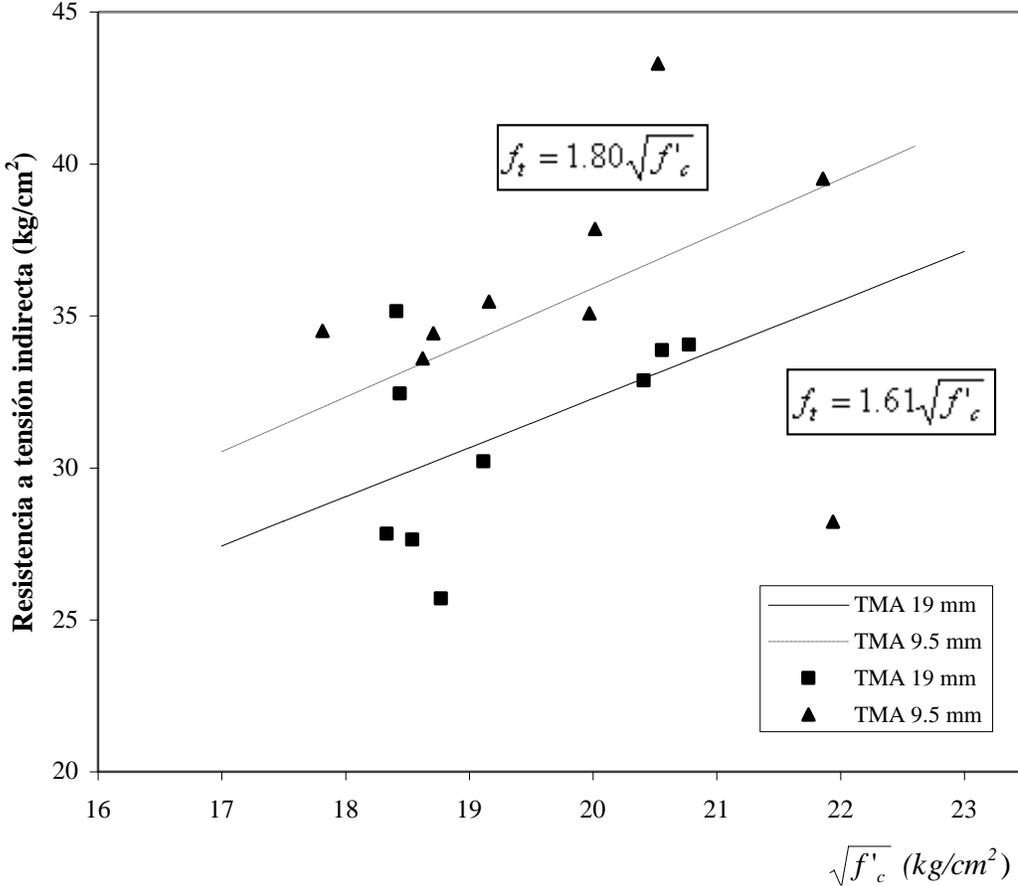


Fig. 4.21 Variación de la resistencia a tensión indirecta con la raíz cuadrada de la resistencia a compresión.

IV.4 Permeabilidad a los cloruros.

El deterioro anticipado del concreto, operando en condiciones ordinarias, puede ser propiciado por factores estructurales, tales como las sobrecargas o esfuerzos excesivos de cualquier procedencia, y no estructurales, como las condiciones ambientales y el ataque de sustancias nocivas.

Los cloruros son sales inorgánicas que abundan en la naturaleza, y por ello suelen hallarse presentes en los componentes del concreto y en las aguas y suelos que tienen contacto con las estructuras, e incluso en ciertos ambientes atmosféricos. Este tipo de sal tiene efectos perjudiciales al propiciar la corrosión del acero de refuerzo y esta a su vez origina el deterioro del concreto.

En esta sección se presentarán los resultados que se obtuvieron en la referencia 1 de permeabilidad a los cloruros en mezclas de concreto autocompactable. El método utilizado para medir la permeabilidad de los cloruros consistió en aplicar corriente eléctrica a probetas de concreto durante un periodo de 6 horas. La carga eléctrica (coulombs) que atraviesa la probeta permite clasificar al concreto de acuerdo con la tabla IV.13.

Tabla IV.13 Permeabilidad del concreto al ion cloruro.

Coulombs	Permeabilidad al ion cloruro	Típico de:
>4,000	Alta	Alta rel. a/c
4,000-2,000	Moderada	Rel. a/c 0.4 - 0.5
2,000-1,000	Baja	Rel. a/c < 0.4
1,000-100	Muy baja	Concreto modificado con látex
<100	Insignificante	Concreto modificado con polímeros

Esta prueba se realizó de acuerdo con la norma ASTM C 1202-97. Los resultados obtenidos se muestran en las siguientes tablas de acuerdo con el tamaño de agregado, contenido de cemento y edad de ensaye.

Tabla IV.14 Resultados de permeabilidad a los cloruros a los 28 días de edad para un TMA de 9.5 mm.

<i>TMA (mm)</i>	<i>Cilindro</i>	<i>Revoltura</i>	<i>Contenido de cemento (kg/m³)</i>	<i>Carga filtrada (Coulombs)</i>	<i>Tipo de Permeabilidad</i>
9.5	1	1	350	3084	Moderada
	2	1	350	2646	Moderada
	1	3	350	3184	Moderada
	2	3	350	2887	Moderada
	3	3	350	2765	Moderada
	1	2	400	3188	Moderada
	2	2	400	2811	Moderada
	1	2	400	3459	Moderada
	2	2	450	2608	Moderada
	1	3	450	3166	Moderada
	2	3	450	2945	Moderada
	3	3	450	2242	Moderada



Fig. 4.22 Especímenes para la prueba de permeabilidad a los cloruros.

Tabla IV.15 Resultados de permeabilidad a los cloruros a los 90 días de edad para un TMA de 9.5 mm.

<i>TMA (mm)</i>	<i>Cilindro</i>	<i>Revoltura</i>	<i>Contenido de cemento (kg/m³)</i>	<i>Carga filtrada (Coulombs)</i>	<i>Tipo de Permeabilidad</i>
9.5	1	1	350	1251	Baja
	2	1	350	1154	Baja
	3	1	350	1338	Baja
	1	3	350	1439	Baja
	2	3	350	1366	Baja
	3	3	350	1533	Baja
	1	1	400	1202	Baja
	2	1	400	1467	Baja
	1	2	400	1899	Baja
	2	2	400	1756	Baja
	3	2	400	1229	Baja
	1	2	450	1537	Baja
	2	2	450	1181	Baja
	3	2	450	1327	Baja
	1	3	450	1410	Baja
	3	3	450	1303	Baja



Fig. 4.23 Dispositivo utilizado en la prueba de permeabilidad a los cloruros.

Tabla IV.16 Resultados de permeabilidad a los cloruros a los 28 días de edad para un TMA de 19 mm.

<i>TMA (mm)</i>	<i>Cilindro</i>	<i>Revoltura</i>	<i>Contenido de cemento (kg/m³)</i>	<i>Carga filtrada (Coulombs)</i>	<i>Tipo de Permeabilidad</i>
19	1	1	350	3577	Moderada
	2	1	350	3267	Moderada
	1	2	350	5126	Alta
	2	2	350	3860	Moderada
	3	2	350	3413	Moderada
	1	1	400	4061	Alta
	2	1	400	3396	Moderada
	1	3	400	3949	Moderada
	2	3	400	2844	Moderada
	1	1	450	3845	Moderada
	2	1	450	3970	Moderada
	1	2	450	4676	Alta
	2	2	450	3384	Moderada
	3	2	450	3184	Moderada

Tabla IV.17 Resultados de permeabilidad a los cloruros a los 90 días de edad para un TMA de 19 mm.

<i>TMA (mm)</i>	<i>Cilindro</i>	<i>Revoltura</i>	<i>Contenido de cemento (kg/m³)</i>	<i>Carga filtrada (Coulombs)</i>	<i>Tipo de Permeabilidad</i>
19	1	3	350	1053	Baja
	2	3	350	976	Muy Baja
	3	3	350	972	Muy Baja
	4	3	350	794	Muy Baja
	1	1	400	1057	Baja
	2	1	400	933	Muy Baja
	3	1	400	891	Muy Baja
	4	1	400	1105	Baja
	1	2	450	978	Muy Baja
	2	2	450	1088	Baja
	3	2	450	1020	Baja
	4	2	450	1103	Baja

Los datos obtenidos para un TMA de 9.5 mm indican una tendencia de permeabilidad a los cloruros moderada a los 28 días y baja a los 90 días.

Para un TMA de 19 mm la tendencia es moderada – alta a los 28 días y baja - muy baja a los 90 días.

Como conclusión se puede destacar que la permeabilidad a los cloruros disminuye conforme pasa el tiempo para los diferentes tipos de concreto.

V. Conclusiones y recomendaciones.

Capítulo I. Materiales para el concreto.

En general, los materiales constituyentes del concreto autocompactable son los mismos que se emplean en el concreto convencional, aunque debido a las características especiales de ese concreto, sobre todo en estado fresco, se requiere de un adecuado control de los componentes y en las cantidades empleadas para que no haya variaciones entre una revoltura y otra que afecten la calidad del concreto producido.

Cemento

La selección del tipo de cemento dependerá de los requisitos requeridos para el concreto. Sin embargo, desde el punto de vista económico es recomendable optar por cualquier cemento de uso general.

Se recomienda un contenido de cemento en las mezclas comprendido dentro del intervalo de 350 kg/m^3 hasta los 450 kg/m^3 . Más de 500 kg/m^3 puede ser perjudicial e incrementar la contracción. Menos de 350 kg/m^3 sólo puede ser apropiado con la inclusión de otros materiales finos de relleno, como ceniza volante, puzolanas, etc.

Gravas.

Las granulometrías de los agregados desempeñan un papel muy importante en el proporcionamiento de las mezclas para el concreto autocompactable. Los agregados bien graduados hacen el mejor concreto autocompactable, pues requieren menos material cementante y menos agua de mezclado.

Es de primordial importancia que el agregado grueso que se está adicionando a las mezclas no se bloquee en el refuerzo cuando el concreto está siendo colocado, por lo que se

recomienda utilizar un tamaño máximo de agregado de acuerdo con la separación que se tenga entre las barras de refuerzo, usualmente 20 mm de tamaño máximo.

Es importante estar al pendiente del contenido de humedad de los agregados para evitar alteraciones en el contenido de agua de la mezcla.

El contenido de partículas menores de 0.125 mm presentes en las gravas debe ser tomado en cuenta en el contenido total de polvos de la mezcla.

Arena.

Cualquier arena utilizada en los concretos convencionales es adecuada para el concreto autocompactable, aunque al igual que con las gravas, es importante monitorear el contenido de partículas finas menores que 0.125 mm, ya que, aunque se requiere un contenido mínimo de estas partículas finas, un exceso de las mismas puede tener efectos negativos en el concreto.

En esta investigación se utilizó una arena andesítica de origen natural proveniente de Texcoco con un alto porcentaje de polvo (23.45%), lo cual no hizo necesario agregar ningún adionante (filler), aunque limito los consumos de cemento en algunos casos, para no excederse en la cantidad de finos.

Aditivos químicos.

Los superfluidificantes o reductores de agua de alto rango son componentes esenciales del concreto autocompactable ya que proporcionan la alta fluidez de las mezclas. Actúan directamente sobre el cemento en la mezcla de concreto y se dosifican comúnmente en mililitros por kilogramo de cemento.

El superfluidificante Glenium 3030 NS utilizado en este proyecto resultó muy efectivo produciendo concretos con diferentes niveles de trabajabilidad, además de que cumple con todas las especificaciones y requerimientos necesarios.

Quizás, el único aspecto negativo de este aditivo es que su efecto en el concreto no se sostiene por mucho tiempo, por lo que se sugiere la utilización de algún aditivo retardante.

Capítulo II. Criterios para el diseño de mezclas.

Las proporciones del concreto deben diseñarse de manera que sea posible obtener una buena trabajabilidad y consistencia, lo que incluye habilidad de llenado, resistencia a la segregación y capacidad de paso entre el acero de refuerzo. Para lograr estas propiedades es necesario cuidar la dosificación de cada uno de los materiales constituyentes del concreto.

Se recomienda trabajar en mezclas de distintos contenidos de cemento, para que mediante una serie de ensayos se puedan seleccionar las óptimas. Mediante el ensayo de morteros se puede obtener una dosificación aproximada de superfluidificante. Al momento de ensayar estos morteros se debe prestar atención al contenido de finos, ya que el exceso de estos puede ocasionar cambios en las propiedades de la mezcla.

Capítulo III. Características y ensayos del concreto fresco.

En la tabla V.1 se muestran los valores promedio de revenimiento, peso volumétrico y contenido de aire de los concretos autocompactables desarrollados en este proyecto y de concretos normales.

Tabla V.1 Resultados promedio de revenimiento, peso volumétrico y contenido de aire de concretos autocompactables y concretos normales.

Propiedad	Concreto autocompactable	Concreto normal
Revenimiento (cm)	2-7 *	0-8
Peso volumétrico (kg/m ³)	2236	2200-2400
Contenido de aire (%)	2.72	2-5

* Antes de adicionar aditivo.

De acuerdo con la tabla V.1 se destaca que los concretos autocompactables no tuvieron diferencias importantes en sus propiedades con respecto a los concretos normales.

En la tabla V.2 se muestran los valores promedio que se obtuvieron en las pruebas de autocompactabilidad que se realizan a este tipo de concretos para evaluar su trabajabilidad en estado fresco.

Tabla V.2 Resultados promedio de las pruebas de autocompactibilidad e intervalo típico de valores.

Prueba	Unidad	Resultados		Intervalo típico de valores	
		TMA 19 mm	TMA 9.5 mm	Mínimo	Máximo
Extensión de flujo por el cono Abrams	mm	777	766	650	800
Extensión de flujo T_{50}	seg.	0.91	1.03	2	5
Embudo V	seg.	8	6.41	8	12
Caja L	(h2/h1)	0.85	0.94	0.8	1
Orimet	seg.	3.85	3.71	0	5

Extensión de flujo por el cono Abrams. Los elevados valores que se obtuvieron en este ensaye dan una idea de la gran fluidez que presentaron las mezclas; sin embargo, los resultados se encuentran dentro del intervalo sugerido.

Por otra parte es importante mencionar que aunque no es el objetivo de esta prueba el evaluar la presencia de segregación en la mezcla, este aspecto negativo se puede observar al terminar de realizar la prueba de extensión. En caso de segregación, la mayoría del agregado grueso estará concentrado en el centro de la placa y el mortero o la pasta permanecerá en la periferia.

Extensión de flujo T_{50} . En esta prueba se obtuvieron valores por debajo del intervalo sugerido, esto se puede deber a que, como se mencionó antes, a la alta fluidez que alcanzaron las mezclas.

Embudo V. los tiempos registrados en promedio para un TMA de 19 mm se pueden considerar adecuados ya que se encuentran dentro del límite recomendado. Por otra parte los registros obtenidos para un TMA de 9.5 mm no lograron posicionarse dentro del

intervalo sugerido, aunque, como se puede observar en el cuadro de resultados los valores no están muy alejados de dicho intervalo, por lo que son aceptables.

Caja L. las mezclas ensayadas tuvieron un buen comportamiento en esta prueba ya que los resultados obtenidos para ambos tipos de grava se encuentran dentro de los límites sugeridos.

Orimet. Todos los registros obtenidos en esta prueba resultaron dentro de los tiempos sugeridos. Ninguna mezcla tuvo problemas para superar esta prueba.

Se puede concluir que, en general, todas las mezclas tuvieron un desempeño adecuado en todas las pruebas de trabajabilidad, bloqueo y resistencia a la segregación.

Debido a la gran sensibilidad que presentan este tipo de mezclas, se recomienda tener bien cuantificada la cantidad de superfluidificante que será adicionada ya que se ha observado en pruebas preliminares que una cantidad ligeramente superior provoca segregación y por el contrario si no se agrega la cantidad suficiente no se alcanza la extensión requerida. No es recomendable adicionar el aditivo por intervalos.

También se sugiere que una vez que se haya terminado de realizar las pruebas de trabajabilidad, todo el concreto se regrese a la revolvedora para que la mezcla se uniformice.

Capítulo IV. Características y ensayos del concreto endurecido.

Resistencia a compresión

La tabla V.3 muestra los resultados en promedio de resistencia a compresión de las mezclas elaboradas con un TMA de 9.5 mm.

Tabla V.3 Resultados promedio de resistencia a compresión y peso volumétrico para un TMA de 9.5 mm

Mezcla	Edad de ensaye (días)	$f'c$ (kg/cm^2)	Peso volumétrico (kg/m^3)
350 kg/m^3 (0.9,0.45)	28	359	2231
350 kg/m^3 (0.85,0.45)	28	426	2227
400 kg/m^3 (0.9,0.4)	28	442	2193
400 kg/m^3 (0.9,0.45)	28	414	2181
425 kg/m^3 (0.9,0.4)	28	429	2210
425 kg/m^3 (0.85,0.4)	28	469	2219

La diferencia de resistencia a compresión entre mezclas con un mismo consumo de cemento se debe a que tuvieron diferentes consumos de agua.

La tabla V.4 muestra los resultados en promedio de resistencia a compresión de las mezclas elaboradas con un TMA de 19 mm.

Tabla V.4 Resultados promedio de resistencia a compresión y peso volumétrico para un TMA de 19 mm.

Mezcla	Edad de ensaye (días)	$f'c$ (kg/cm^2)	Peso volumétrico (kg/m^3)
350 kg/m^3 (0.85,0.45)	28	403	2231
400 kg/m^3 (0.83,0.43)	28	423	2227
425 kg/m^3 (0.82,0.42)	28	457	2193
450 kg/m^3 (0.83,0.41)	28	400	2181

Los resultados de resistencia a compresión están de acuerdo con el contenido de cemento; con excepción de la resistencia de las mezclas de 450 kg/m^3 de contenido de cemento que fue un poco baja.

Módulo de elasticidad en compresión.

En la tabla V.5 están registrados los resultados promedio de módulo de elasticidad y relación de Poisson para un TMA de 9.5 mm.

Tabla V.5 Resultados promedio de resistencia a compresión, módulo de elasticidad y relación de Poisson para mezclas con TMA de 9.5 mm.

Mezcla	$f'c$ (kg/cm^2)	Módulo de elasticidad (kg/cm^2)	Relación de Poisson
350 kg/m^3 (0.9,0.45)	359	246,241	0.32
350 kg/m^3 (0.85,0.45)	436	251,291	0.33
400 kg/m^3 (0.9,0.4)	442	258,736	0.30
400 kg/m^3 (0.9,0.45)	414	246,568	0.29
425 kg/m^3 (0.9,0.4)	429	259,971	0.29
425 kg/m^3 (0.85,0.4)	469	252,039	0.30

Los valores de módulo de elasticidad y de relación de Poisson de todas las mezclas se ubican dentro de los intervalos esperados. En lo referente a la resistencia a la compresión las variaciones se deben principalmente a los diferentes contenidos de agua.

En la tabla V.6 se muestran los resultados promedio de módulo de elasticidad y relación de Poisson para un TMA de 19 mm.

Tabla V.6 Resultados promedio de resistencia a compresión, módulo de elasticidad y relación de Poisson para mezclas con TMA de 19 mm.

Mezcla	$f'c$ (kg/cm^2)	Módulo de elasticidad (kg/cm^2)	Relación de Poisson
350 kg/m^3 (0.85,0.45)	413	258,766	0.29
400 kg/m^3 (0.83,0.43)	432	269,480	0.31
425 kg/m^3 (0.82,0.42)	457	268,742	0.30
450 kg/m^3 (0.83,0.41)	416	275,179	0.29

La resistencia a la compresión para estas mezclas se incrementa en proporción al contenido de cemento, excepto para 450 kg/m^3 . El módulo de elasticidad y relación de Poisson de las mezclas tuvieron un desempeño aceptable.

Las ecuaciones que expresan el módulo de elasticidad en función de la resistencia a la compresión son las siguientes:

$$\text{TMA 9.5 mm} \quad E = 12251 \sqrt{f'c} \quad (kg/cm^2)$$

$$\text{TMA 19 mm} \quad E = 12936 \sqrt{f'c} \quad (kg/cm^2)$$

Donde: E es el módulo de elasticidad del concreto, en kg/cm^2

$f'c$ es la resistencia a compresión del concreto a la edad del ensaye, en kg/cm^2

Flexión.

Al observar los resultados obtenidos para este ensaye se concluye que los valores de flexión, independientemente del tamaño de agregado grueso que se haya utilizado, de todas las mezclas fueron muy parecidos. Las mezclas con contenido de cemento de 450 kg/m^3 tuvieron un desempeño inferior en comparación con las de 400 kg/m^3 debido a que la

capacidad está limitada por la resistencia del agregado. Los valores de peso volumétrico obtenidos fueron uniformes para todas las mezclas.

Tensión indirecta.

Los resultados arrojados en esta prueba indican que la resistencia a tensión indirecta aumenta ligeramente con el contenido de cemento para los dos tipos de TMA. Las mezclas ensayadas con grava de 9.5 mm tuvieron mejores resistencias que las mezclas de 19 mm.

El peso volumétrico de todas las mezclas fue uniforme sin grandes variaciones.

Permeabilidad a los cloruros.

Después de hacer un análisis de los resultados obtenidos se puede concluir que las mezclas, independientemente del TMA que se haya utilizado, alcanzan una permeabilidad moderada a los 28 días, pero conforme pasa el tiempo disminuye ésta, hasta alcanzar una permeabilidad de baja a muy baja.

Comentarios finales.

Las mezclas, en general, tuvieron un buen desempeño en las pruebas de trabajabilidad en estado fresco, el cual era uno de los objetivos primordiales de este proyecto. Sería conveniente que se siguiera trabajando con estas mezclas y lograr una mejor caracterización de sus propiedades en estado endurecido.

Una propuesta interesante sería el experimentar los concretos autocompactables con diferentes tipos de adicionantes como por ejemplo ceniza volante, puzolanas, fibras, etc. Ya que el uso de los concretos autocompactables se irá generalizando cada vez más debido, en gran medida, a todos los beneficios que aporta y genera.

VI. Referencias.

1. REYES A., 2006 "**DESEMPEÑO DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE EN ESTADO PLÁSTICO Y ENDURECIDO**", FACULTAD DE INGENIERÍA, UNAM.
2. EFNARC, 2001 "**SPECIFICATION AND GUIDELINES FOR SELF-COMPACTING CONCRETE**".
3. EPG, 2005 "**THE EUROPEAN GUIDELINES FOR SELF-COMPACTING CONCRETE**".
4. GRAVERS M. Y BARTOS P., 1999 "**SELF-COMPACTING CONCRETE**", CONCRETE, pp.9-14.
5. INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO (IMCYC), 1986 "**PRACTICA PARA DOSIFICAR CONCRETO NORMAL, CONCRETO PESADO Y CONCRETO MASIVO**",pp. 108, MÉXICO.
6. GARCÍA J., 2004 "**MANUAL TÉCNICO DE CONSTRUCCIÓN HOLCIM APASCO**", CEMENTOS APASCO, MÉXICO.
7. NELSON I. Y WALLCVIK H. O., "**SELF-COMPACTING CONCRETE – A RHEOLOGICAL APPROACH**", TECHNICAL SESSION: MATERIALS AND DESIGN.
8. INSTITUTO DE INGENIERÍA, 1994 "**MANUAL DE TECNOLOGÍA DEL CONCRETO**", UNAM, CFE, MÉXICO.