



UNIVERSIDAD NACIONAL  
AUTÓNOMA DE  
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

---

PROGRAMA DE MAESTRIA Y DOCTORADO EN  
INGENIERIA

FACULTAD DE INGENIERIA

*DESEMPEÑO DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE  
EN ESTADO PLASTICO Y ENDURECIDO*

**TESIS**

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

**MAESTRO EN INGENIERIA**

INGENIERIA CIVIL – CONSTRUCCION

PRESENTA:

**ADRIAN ALVAREZ REYES**

TUTOR:

**M. EN I. CARLOS JAVIER MENDOZA ESCOBEDO**



ENERO, 2007.

---

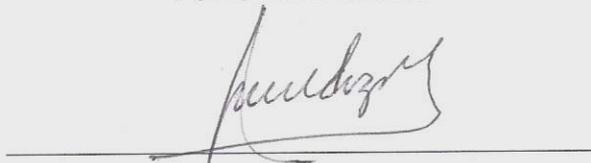
---

**JURADO ASIGNADO:**

**Presidente:** Dr. Roberto Meli Piralla  
**Secretario:** Ing. Juan Luís Cottier Caviedes  
**Vocal:** M. en I. Carlos Javier Mendoza Escobedo  
**1<sup>er</sup> Suplente:** Dr. Jesús Hugo Meza Puesto  
**2<sup>do</sup> Suplente:** M. en I. Jaime Antonio Martínez Mier

**México D.F.**

**TUTOR DE TESIS:**



M. EN I. CARLOS JAVIER MENDOZA ESCOBEDO

---

---



**A DIOS:**

Por todo lo que hasta ahora soy  
y por permitir que la gente que más quiero esté junto a mí  
en este momento tan importante de mi vida.

**A MIS PADRES:**

Por que nuevamente son la base para alcanzar mis metas,  
gracias por su apoyo, por su amor, realmente no existen palabras para  
agradecer todo lo que han hecho por mi, le doy gracias a DIOS por haberme  
bendecido con ustedes como PADRES,  
de todo corazón, éste logro es suyo.



---

---

**A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO:**

Por permitirme ser parte de ella  
y así mejorar mi calidad de vida  
para bien de la sociedad.

**AL ING. CARLOS JAVIER MENDOZA:**

Por su apoyo para la realización de este proyecto,  
por compartir todos sus conocimientos y,  
sobre todo, por su amistad.

---

---

---

---

DESEMPEÑO DEL  
CONCRETO  
AUTOCOMPACTABLE  
EN ESTADO PLÁSTICO  
Y ENDURECIDO

---

---

---

---

# ÍNDICE

|          |                     |          |
|----------|---------------------|----------|
| <b>I</b> | <b>INTRODUCCIÓN</b> | <b>1</b> |
| 1.1      | Antecedentes        | 2        |
| 1.2      | Objetivo            | 11       |
| 1.3      | Alcance             | 11       |

|           |  |           |
|-----------|--|-----------|
| <b>II</b> | <b>CARACTERÍSTICAS DESEABLES DE LOS MATERIALES COMPONENTES</b> | <b>12</b> |
| 2.1       | Características deseables para los materiales componentes      | 13        |
| 2.2       | Cemento  | 16        |
| 2.3       | Agregados pétreos  | 16        |
| 2.3.1     | Gravas   | 17        |
| 2.3.1.1   | Tamaño Máximo de Agregado 19 mm                                | 17        |
| 2.3.1.2   | Tamaño Máximo de Agregado 9.5 mm                               | 18        |
| 2.3.2     | Arena  | 20        |
| 2.4       | Aditivos químicos  | 22        |
| 2.4.1     | Superfluidificante   | 22        |
| 2.4.2     | Agente modificador de viscosidad                               | 24        |

|            |                               |           |
|------------|-------------------------------|-----------|
| <b>III</b> | <b>DISEÑO DE LAS MEZCLAS</b>  | <b>26</b> |
| 3.1        | Criterio de diseño            | 29        |
| 3.2        | Proporcionamientos requeridos | 33        |

---

---

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| <b>IV</b> | <b>REOLOGÍA DE LOS CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES</b> | <b>38</b> |
| 4.1       | Revenimiento                                      | <b>39</b> |
| 4.2       | Peso volumétrico                                  | <b>40</b> |
| 4.3       | Aire atrapado                                     | <b>42</b> |
| 4.4       | Pruebas de Autocompactabilidad                    | <b>44</b> |
| 4.4.1     | Métodos de ensaye                                 | <b>45</b> |
| 4.4.2     | Extensión de flujo                                | <b>48</b> |
| 4.4.3     | Caja L  | <b>54</b> |
| 4.4.4     | Ensayo de Orimet                                  | <b>57</b> |
| 4.4.5     | Embudo V  | <b>63</b> |
| 4.4.6     | Otras pruebas                                     | <b>68</b> |

|          |  |            |
|----------|--|------------|
| <b>V</b> | <b>CARACTERIZACIÓN DE LOS CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES</b> | <b>70</b>  |
| 5.1      | Resistencia a compresión                                 | <b>76</b>  |
| 5.2      | Resistencia a tensión                                    | <b>84</b>  |
| 5.2.1    | Flexión  | <b>84</b>  |
| 5.2.2    | Indirecta  | <b>89</b>  |
| 5.3      | Módulo de elasticidad en compresión                      | <b>95</b>  |
| 5.4      | Contracción por secado                                   | <b>107</b> |
| 5.5      | Deformación diferida                                     | <b>113</b> |
| 5.6      | Permeabilidad a los cloruros                             | <b>116</b> |

---

---

|           |  |            |
|-----------|--|------------|
| <b>VI</b> | <b>DESEMPEÑO DE LAS ESTRUCTURAS COLADAS CON<br/>CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES</b> | <b>125</b> |
| 6.1       | Vigas  | 127        |
| 6.2       | Columnas   | 134        |
| 6.3       | Otros elementos estructurales  | 139        |

|  |                                       |            |
|--|---------------------------------------|------------|
|  | <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> | <b>140</b> |
|  | Referencias                           | 152        |

---

---

---

---

# I. INTRODUCCIÓN

---

---

# **I . INTRODUCCIÓN**

## **1.1 ANTECEDENTES**

Para poder hablar de la necesidad de un concreto autocompactable debemos mencionar antes los hitos que han marcado la calidad del concreto en la obras de edificación, desde el comienzo del empleo de aditivos, partiendo del concreto con vibrado convencional, el concreto autonivelante y hasta el concreto en cuestión, el autocompactable.



## **CONCRETO CON VIBRADO CONVENCIONAL**

Durante los años 50 se empezaron a utilizar los fluidificantes basados en lignosulfonatos sin purificar procedentes de los residuos industriales de la fabricación del papel. Su rendimiento era aceptable (8 % de reducción de agua de mezclado) aunque con efectos secundarios negativos notables. En las obras se peleaba milímetro a milímetro la consistencia en el cono de Abrams. Más revenimiento, más agua, y evidentemente menos calidad. El revenimiento era el parámetro más llamativo e inmediatamente relacionado con la calidad del concreto. Dada su consistencia, normalmente seca, la calidad del concreto colocado en obra de forma lenta y laboriosa, dependía fundamentalmente de la ejecución. Consecuentemente, los errores de ejecución eran excesivos.

---

---

## CONCRETO AUTONIVELANTE

En la década de los 70 se comenzaron a utilizar en las obras civiles los primeros superfluidificantes así como también fue la entrada de los aditivos superplastificantes, con lo que se redujeron considerablemente los errores de ejecución y se mejoró enormemente la calidad del concreto. Dicha calidad ya no dependía de su consistencia, sino de la relación agua/cemento. En consecuencia, el revenimiento medido con el cono de Abrams comenzó a perder protagonismo y quedó solamente como medida de control en obra.

## CONCRETO AUTOCOMPACTABLE

Son conocidos ya los parámetros que influyen en la durabilidad del concreto, así como que las exigencias sobre la construcción de estructuras y elementos más durables aumentan progresivamente.

La durabilidad del concreto depende en primer grado de la formulación de éste; en este sentido, los parámetros básicos son la relación agua/cemento y la cantidad de cemento. Estos parámetros son controlables en el diseño de la mezcla y, por lo tanto, en cierta manera previsibles. En segundo plano aparece el factor colocación en obra. Sin duda, una perfecta formulación del concreto puede perder todas sus propiedades debido a una mala colocación en obra, desde la adición de agua extra en el camión hasta un defectuoso o incluso excesivo vibrado.



---

---

El problema de este aspecto es que, a diferencia del diseño de la mezcla, es un parámetro no controlable y mucho menos previsible. La ejecución queda en manos del constructor, que en la mayoría de las ocasiones no entiende o no conoce los parámetros que pueden afectar positiva o negativamente las propiedades del concreto que manipula. En resumen, la durabilidad del concreto se ve altamente afectada por las características de la colocación en obra.



En otro contexto, las exigencias de la mejora de las condiciones ambientales en obra también aumentan progresivamente. Eliminar los ruidos producidos por el vibrador es un aspecto a considerar, tanto para los operarios como para el entorno.



Reflejado el panorama anterior, la solución debería ser un concreto cuyas propiedades quedaran garantizadas única y exclusivamente en el momento del diseño de la mezcla, independientemente de su ejecución. Esto sería una garantía de calidad y de seguridad.

Así pues, los últimos desarrollos en la tecnología del concreto se han centrado en la elaboración de concretos autocompactables, que gracias al avance de la química implicada en la construcción han permitido el nacimiento de estos, los cuales permiten ser colocados en la obra sin necesidad de vibrado, eliminando definitivamente este factor que tanto afecta a la calidad y durabilidad como lo es la colocación en obra.

---

---

## *El inicio*

El concepto de concreto autocompactable fue introducido por el profesor Okamura de la Universidad de Tokio (Japón) en 1986 para promover la construcción más durable y fiable de estructuras.



Otros investigadores han seguido esta iniciativa, llegando a desarrollar una clase de concreto capaz de ser colocado sin vibración interna u otro modo de compactación. La experiencia japonesa durante los siguientes años ha posibilitado la identificación de una serie de ventajas importantes en el uso del concreto autocompactable:

- Menor dependencia de la formación y experiencia de los operarios para obtener estructuras durables.
- Se pueden evitar problemas ocasionados por una compactación inadecuada provocada por la falta de comunicación entre los proyectistas y los ingenieros en la obra.
- Se puede reducir considerablemente el plazo de ejecución de la construcción, especialmente en estructuras monolíticas.
- Facilita el diseño de elementos más complejos que serían difíciles o poco viables de construir mediante vibración convencional.
- Reduce el ruido debido a la eliminación de la vibración, especialmente en plantas de prefabricación y obras en entornos urbanos.
- Beneficio para el ambiente de trabajo y la salud laboral.

A partir de entonces se ha llevado a cabo una intensa investigación en diversas instituciones y empresas en todo el mundo que han permitido, desde hace varios años, la aplicación práctica en las obras de esta nueva tecnología que pretende convertirse en el futuro en un concreto estándar más que un concreto especial.

---

---

### *Definición de concreto autocompactable*

El concreto autocompactable es una mezcla que puede compactarse en todos los rincones de una cimbra únicamente por medio de su propio peso sin necesidad de compactación por vibración y que a pesar de su alta fluidez el agregado grueso no tiene segregación.

Las características fundamentales que deben definir un concreto autocompactable son las siguientes:

- Elevada fluidez: el concreto autocompactable se caracteriza por una elevada fluidez hasta el punto que los métodos tradicionales de ensayo, como por ejemplo el cono de Abrams, resultan obsoletos.
- Elevada resistencia a la segregación: la elevada fluidez no debe implicar segregación o sangrado. La mezcla debe mantener homogeneidad tanto de forma intrínseca como al someterse a la colocación en obra.
- Adecuada viscosidad plástica: el concreto autocompactable debe fluir por la acción de su propio peso. Esto requiere ciertas características de formulación para que el concreto no se bloquee en su paso a través del acero de refuerzo, con un perfecto relleno y que fluya a través de la cimbra, acomodándose a su forma.
- Deformabilidad en estado fresco: para obtener buenos acabados y un perfecto recubrimiento del armado.



---

---

Todas las características básicas deben mantener un equilibrio entre ellas a pesar de que en algunas, como fluidez y cohesión (resistencia a la segregación), se presente cierto antagonismo. Esto es, una adecuada formulación de concreto autocompactable implica que todas las propiedades citadas se mantengan en un equilibrio estable y óptimo durante todo el tiempo que implique el transporte y su colocación en obra.

Adicional a esto, para que el concreto autocompactable sea considerado de alto desempeño, debe cumplir con lo siguiente:

- Los efectos derivados de la generación de calor, endurecimiento o contracción por secado deben ser mínimos.
- La permeabilidad del concreto frente a la penetración del oxígeno, cloruros y agua debe ser mínima.

Aunque el concreto autocompactable tiene características reológicas significativamente diferentes a las de los concretos convencionales, ambos no difieren mucho en términos de su comportamiento en otros aspectos del estado fresco o en el estado endurecido. Sin embargo, se ha observado que en un concreto autocompactable, la micro estructura y la interfase agregado-pasta son más densas que en un concreto convencional con la misma relación agua/cemento, la permeabilidad a los gases y cloruros es menor, y la adherencia entre el concreto y el acero de refuerzo es mejor. Por otro lado, debido al mayor contenido de pasta, es de esperar un aumento en la sensibilidad a un curado no adecuado, que puede conducir a la fisuración por contracción plástica en elementos como losas y pavimentos.

### ***Aplicaciones***

Hasta la fecha, se han realizado un gran número de aplicaciones para una gran diversidad de estructuras y elementos de concreto, incluyendo: pisos y losas armadas, elementos modulares de sólo algunos centímetros de espesor, vigas y otros elementos pretensados, muros densamente armados en viviendas, edificios y estanques, revestimiento de túneles, puentes, rellenos de difícil acceso y especialidades arquitectónicas con superficies complejas. El concreto autocompactable es ideal para

---

---

formas complejas y donde es difícil obtener la fluidez y adecuada consolidación del concreto, permitiendo hacer aquello que en el pasado parecía imposible.



### *Control de calidad*

El concreto autocompactable se presenta como una mezcla de extrema fluidez. El ensayo tradicional de revenimiento con el cono de Abrams no puede aplicarse porque la fluidez es mayor al que puede medirse con este método.



---

---

En lugar de medir el asentamiento se usa el mismo cono pero se mide el diámetro alcanzado por el flujo sobre la base. De esta forma se obtienen hasta 65 centímetros de extensión.



También se utilizan otros equipos que permite observar las características de fluidez y cohesión de la mezcla así como la simulación del bloqueo, los cuales se mostrarán más adelante.

Para el control de calidad del concreto endurecido no se requieren medidas extraordinarias que difieran del concreto convencional.

### ***Obtención del concreto autocompactable***

Este revolucionario concreto se logra utilizando aditivos químicos de última generación que actúan por diferentes mecanismos. Mediante su absorción superficial y el efecto de separación espacial de las partículas de cemento, en paralelo al proceso de hidratación, se obtiene una alta fluidez con un fuerte comportamiento autocompactable en conjunto con una alta cohesión de la mezcla permitiendo el vaciado y flujo del concreto sin ninguna segregación o sangrado. Tampoco hay cambios significativos en el fraguado y endurecimiento de la mezcla.

La obtención de un concreto autocompactable requiere un estudio detallado en cada caso particular, para ello se requiere analizar los elementos a diseñar y los materiales disponibles, luego se ajusta la dosificación para conseguir la fluidez y cohesión requeridas.

---

---

## *El costo*

Pese al mayor costo directo del material (20% aprox.), el uso del concreto autocompactable permite notables ahorros en la obra, producto de la facilidad del acomodo, de la menor necesidad de personal, de la calidad de acabado y del menor desgaste del equipo y cimbra.



Los principales factores de reducción de costos son los siguientes:

- Alta velocidad de colocación del concreto lo que se traduce en una notable reducción de los plazos de construcción
- Ahorro en mano de obra
- Ahorros en equipo y maquinaria
- Alta calidad y durabilidad de la estructuras
- Superficies sin defectos
- Mayor flexibilidad en el diseño (elementos esbeltos)
- Reducción de ruido (trabajo continuo)

Por lo tanto, debido a todas las ventajas mencionadas anteriormente, surge la necesidad de profundizar en el conocimiento de los concretos autocompactables para caracterizarlos y hacerlos de uso común, y de esta manera, tener estructuras más durables y con un mejor desempeño.

---

---

## 1.2 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.

## 1.3 ALCANCE

Esta investigación describe uno de los procedimientos que se recomiendan 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 disponibles en el valle de México: agregados gruesos calizos de dos tamaños máximos (19 y 9.5 mm), arena andesítica con exceso de finos, cemento Pórtland (CPO 30R), un aditivo superfluidificante y un aditivo modificador de la viscosidad.

Se fabricaron mezclas con contenidos de cemento de 350, 400 y 450 kg/m<sup>3</sup>; cada una se hizo para ambos tamaños de agregado resultando un total de seis.

En cada una de las mezclas en estado fresco, se realizaron las siguientes pruebas: revenimiento (antes de agregar aditivos), peso volumétrico, contenido de aire, extensión de flujo, caja L, ensaye de Orimet y embudo en V.

En el concreto en estado endurecido, se realizaron las siguientes pruebas: resistencia a compresión simple (7, 28 y 90 días), flexión (28 días), tensión indirecta (28 días), módulo de elasticidad (28 y 90 días), relación de Poisson (28 y 90 días), contracción por secado, deformación diferida (sólo contenido de cemento de 400kg/m<sup>3</sup>, ambos tamaños de agregado) y permeabilidad a los cloruros (28 y 90 días).

---

---

# CAPÍTULO II

---

---

---

---

## **II. CARACTERÍSTICAS DESEABLES DE LOS** **MATERIALES COMPONENTES**

### *Aspectos generales*

Los materiales constituyentes usados para la producción de concreto autocompactable (CAC) deben de cumplir con la norma ASTM sobre Concreto y Agregados Minerales.

Los materiales deben ser apropiados para el uso deseado del concreto y no contener ingredientes dañinos en cantidades tales que puedan deteriorar la calidad o la durabilidad del concreto o causar corrosión al refuerzo.

### **2.1 CARACTERÍSTICAS DESEABLES PARA LOS MATERIALES COMPONENTES**

Algunos de los requisitos para los materiales constituyentes son:

□ ***Cemento.***

La selección del tipo de cemento dependerá de los requisitos requeridos para el concreto, como resistencia, durabilidad, etc.

La cantidad normal de cemento varía de 350-450 kg/m<sup>3</sup>. Más de 500 kg/m<sup>3</sup> puede ser peligroso e incrementar la contracción. Menos de 350 kg/m<sup>3</sup> sólo puede ser apropiado con la inclusión de otros materiales finos de relleno, como ceniza volante, puzolanas, etc.

□ ***Agregados***

*Arena.* Todas las arenas usadas para el concreto normal son adecuadas para el concreto autocompactable, tanto las que son producto de la trituración como las naturales, arenas sílicas o calcáreas pueden ser adecuadas.

---

---

La cantidad de finos menores que 0.125 mm es muy importante para la reología del concreto autocompactable. Debe tenerse una cantidad mínima de finos (proveniente de los cementantes y de la arena o adicionantes agregados expresamente) para evitar la segregación y sangrado, como recomendación general, la cantidad de finos debe ser al menos de 10% del volumen de la arena.



*Grava.* Todos los tipos de agregados son apropiados. El tamaño máximo normal es usualmente 10-20 mm, sin embargo, tamaño de partículas de hasta 40 mm o más se han usado en este tipo de concretos, dependiendo en forma importante de la separación entre las barras de refuerzo. Es de vital importancia tener consistencia en la granulometría.

En relación con las características de los diferentes tipos de agregado, los agregados triturados tienden a mejorar la resistencia debido a la trabazón de las partículas angulosas, mientras que los agregados redondeados mejoran la fluidez debido a la baja fricción interna.



Agregados con granulometría discontinua frecuentemente son mejores que aquellos con granulometría continua, los cuales pueden tener mayor fricción interna y alcanzar un flujo reducido.

---

---

□ ***Aditivos***

*Reductores de agua.* Los aditivos más importantes son los superfluidificantes (reductores de agua de alto rango), usados con una reducción de agua superior a 20%. El uso de superfluidificantes combinados con plastificantes ha probado ser muy efectivo.

*Modificadores de viscosidad (AMV).* Este aditivo ayuda a obtener muy buena homogeneidad y reduce la tendencia a la segregación. El uso de AMV da más posibilidades al control de la segregación, especialmente cuando la cantidad de finos o polvo es limitada.

□ ***Adicionantes***

Debido a la necesidad de partículas finas, se usan comúnmente materiales de relleno en los concretos autocompactables, tales como ceniza volante, puzolanas, etc. La dosificación más usual de los materiales de relleno es de 30-40% del cementante.

Pueden usarse otras cantidades de materiales de relleno tomando en cuenta la resistencia alcanzada.

Los finos pueden actuar de dos formas:

- ∇ Aumentando la capacidad de retener agua de la mezcla debido a su elevada superficie específica. Esto ocurre cuando se incorporan finos como bentonitas, humo de sílice condensado y materiales fibrosos como el asbesto molido.
- ∇ Aumentando la tixotropía de la mezcla. Entre los finos que causan este efecto destacan las cenizas volantes, cal hidratada, caolín, diatomeas y otros materiales puzolánicos calcinados, así como polvo de rocas.

A continuación se presentan las características de los materiales utilizados para esta investigación.

---

---

## 2.2 CEMENTO

Para esta investigación se utilizó un cemento CPO 30R, por la facilidad con la que se encuentra en el mercado, además éste cemento cumple con la norma ASTM C-150.

## 2.3 AGREGADOS PÉTREOS

Los agregados pétreos utilizados para la elaboración de las mezclas de concreto fueron grava caliza y arena andesítica, los cuales están disponibles en el área metropolitana del Distrito Federal.

Se realizaron pruebas físicas tanto en la grava como en la arena, con el fin de determinar sus propiedades y utilizarlas en el diseño de las mezclas de concreto; entre sus propiedades se determinaron: granulometría, densidad, absorción, peso volumétrico seco y suelto, peso volumétrico seco y compacto, pruebas de contaminación y también para el caso de la grava, factor de forma. Todo esto, verificando que cumplieran con la norma ASTM C 33.



Adicional a la norma, para el caso de los concretos autocompactables, el tamaño máximo de agregado (TMA) esta limitado a 20 mm, aunque depende de la aplicación particular que se le vaya a dar. Las partículas menores que 0.125 mm contribuyen al contenido de polvos. Además, el contenido de humedad debe ser monitoreado estrechamente y debe tomarse en cuenta con objeto de producir un concreto autocompactable (CAC) de calidad constante.

---

---

### 2.3.1 Gravas

Para realizar esta investigación se seleccionaron gravas de origen calizo de dos tamaños y con éstas se realizaron dos tipos de mezclas, una grava de 19 mm (3/4") y otra de 9.5 mm (3/8") como tamaño máximo de agregado (TMA).



Cabe mencionar que las gravas se utilizaron tal y como llegaron del banco de material sin realizarles un ajuste en su granulometría.

#### 2.3.1.1 Tamaño Máximo de Agregado 19 mm

En la primera parte de esta investigación se realizaron mezclas con grava caliza que tiene como TMA 19 mm (3/4") y es originaria de San Carlos, Morelos.



---

---

Esta grava tiene las siguientes propiedades físicas:

- Peso específico: 2.67
- Absorción: 0.9 %
- Peso volumétrico seco y suelto: 1415 kg/m<sup>3</sup>
- Peso volumétrico seco y compacto: 1475 kg/m<sup>3</sup>
- Factor de forma: 0.193

La curva granulométrica de esta grava se puede apreciar en la fig. 2.1. Cabe mencionar que este agregado esta ligeramente fuera de los límites que establece la norma ASTM C33, pero no se quiso alterar su granulometría dado que se deseaba observar el resultado con su graduación original.

### **2.3.1.2 Tamaño Máximo de Agregado 9.5 mm**

En la segunda parte de esta investigación se utilizó una grava del mismo origen que la anterior, pero con un tamaño máximo de 9.5 mm (3/8"), esto para comparar los resultados obtenidos en las mezclas realizadas con el otro tamaño y determinar cual tiene un mejor comportamiento tanto en el concreto en estado fresco como endurecido.



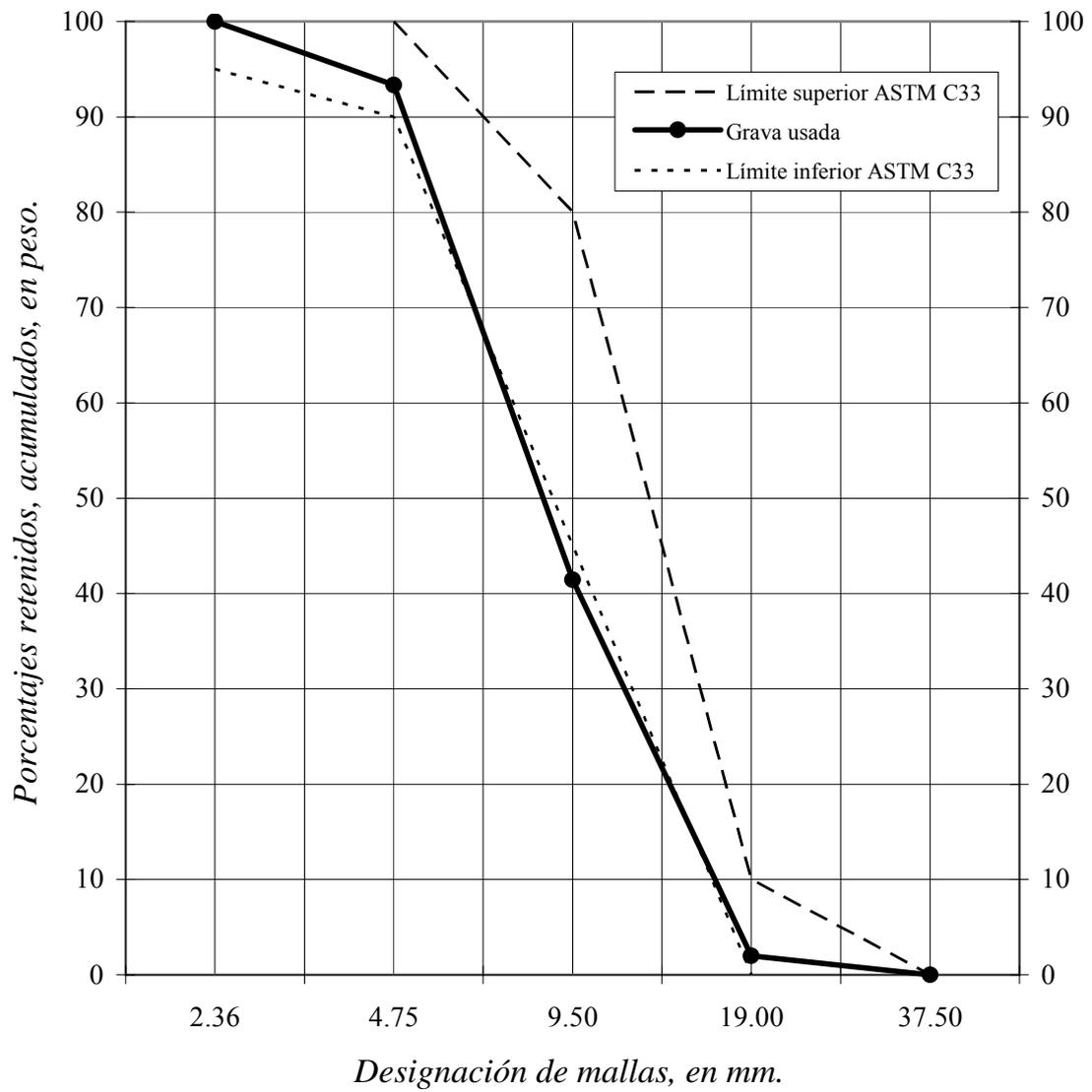


Fig. 2.1 Curva granulometrica de grava caliza

19 mm (3/4").

---

---

Las propiedades físicas correspondientes a esta grava son las siguientes:

- Peso específico: 2.67
- Absorción: 1.06 %
- Peso volumétrico seco y suelto: 1465 kg/m<sup>3</sup>
- Peso volumétrico seco y compacto: 1565 kg/m<sup>3</sup>
- Factor de forma: 0.189

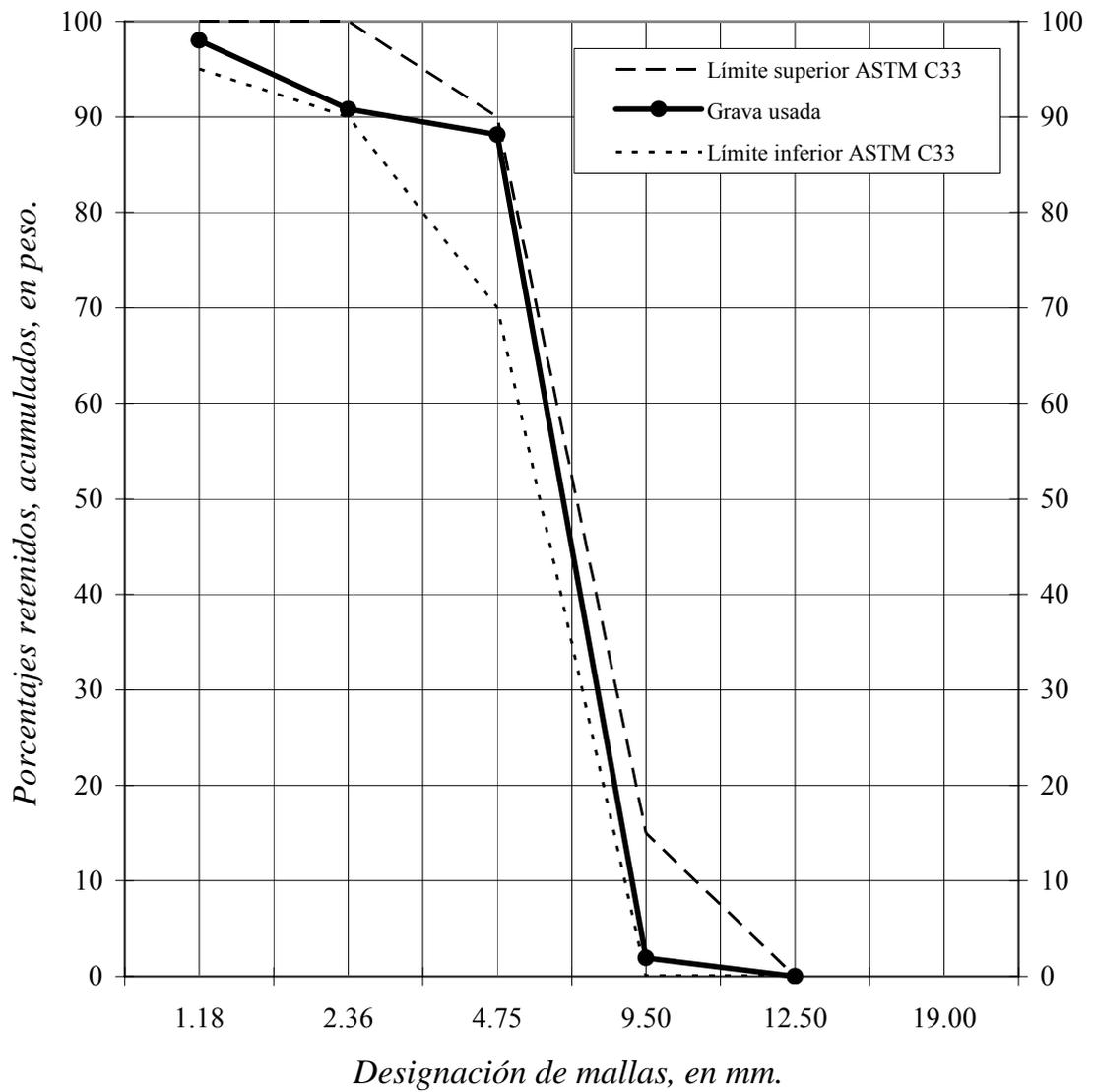


La curva granulométrica de esta grava se puede apreciar en la figura 2.2

### **2.3.2 Arena**

La arena utilizada en la investigación es de origen andesítico y se utilizó tal como llegó del banco de material. No obstante que la granulometría se encuentra ligeramente fuera de los límites establecidos por la norma ASTM C33, debido a la necesidad de finos en las mezclas, se utilizaron éstos para dar la consistencia requerida.





*Fig. 2.2 Curva granulometrica de grava caliza 9.5 mm (3/8")*

---

---

Las propiedades físicas correspondientes a esta arena son:

- Módulo de finura: 3.09
- Peso específico: 2.40
- Absorción: 6.38 %
- Peso volumétrico seco y suelto: 1,549 kg/m<sup>3</sup>
- Peso volumétrico seco y compacto: 1,669 kg/m<sup>3</sup>
- Finos que pasan la malla 200 (74 μm): 18 %
- Finos que pasan la malla 120 ( 0.125 mm): 21 %

La curva granulométrica correspondiente a este agregado se observa en la figura 2.3.

## 2.4 ADITIVOS QUÍMICOS

Para tener una mezcla de concreto que tenga buena fluidez pero a que su vez no tenga segregación ni sangrado, es necesario recurrir a los aditivos químicos. Es necesario realizar pruebas preliminares para determinar la dosificación óptima de cada uno de ellos individualmente y en conjunto.

### 2.4.1 Superfluidificante

En lo que respecta a fluidez, se recurrió a un superfluidificante Glenium 3030 NS, el cual da buenos resultados siempre y cuando no se exceda en la dosificación, el único inconveniente en el uso de este aditivo es que el tiempo en que mantiene su fluidez es corto (15 min), lo cual se puede mejorar mediante el uso de un aditivo retardante de fraguado. A continuación se muestran algunos datos técnicos de este aditivo.



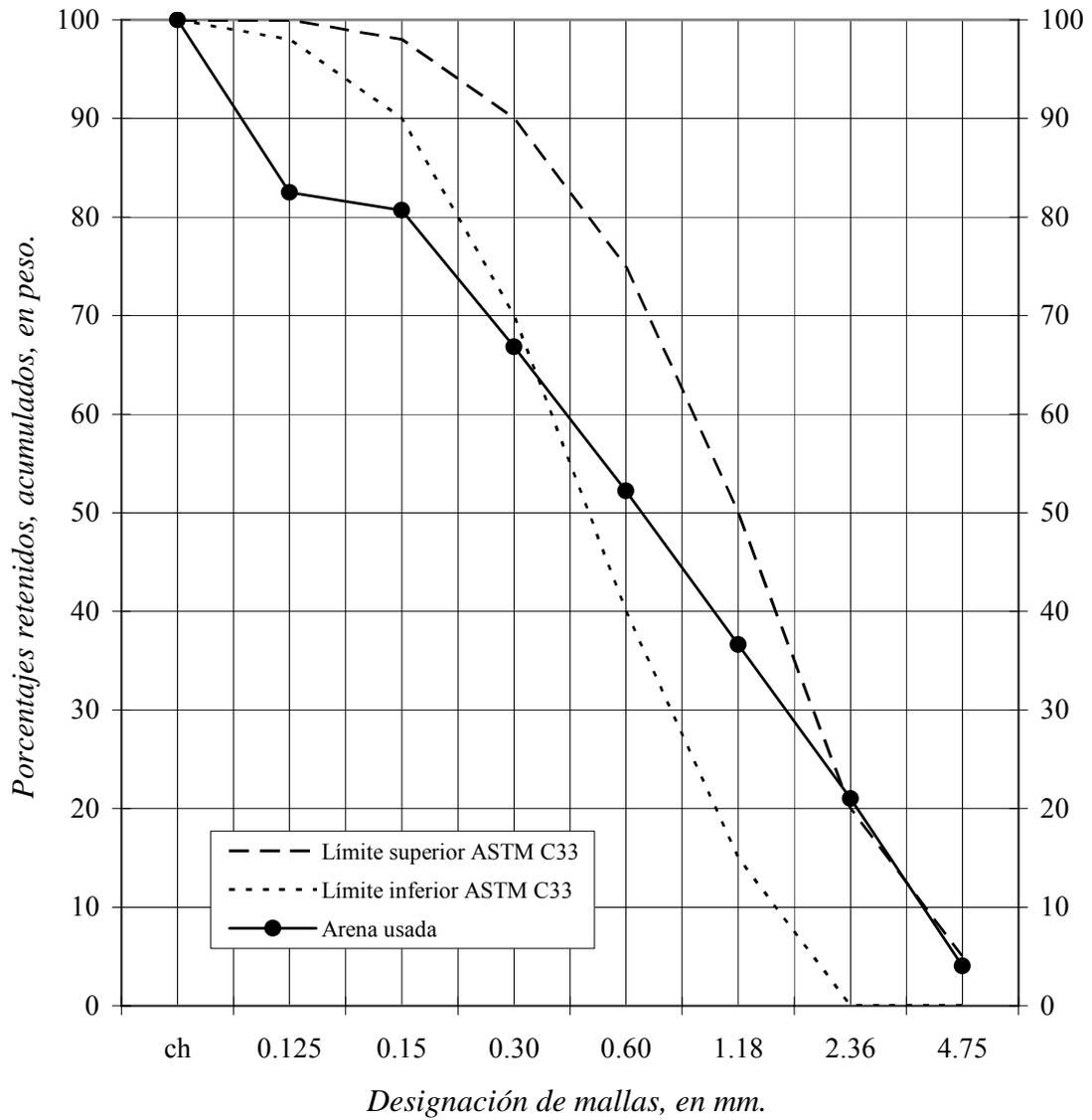


Fig 2.3 Curva granulometrica de arena de Texcoco.

---

---

### *Descripción*

Este aditivo reductor de agua de alto rango, es una nueva generación de aditivos basados en la tecnología del policarboxilato. Es un aditivo muy efectivo produciendo concreto con diferentes niveles de trabajabilidad. Cumple la norma ASTM C 494 para requerimientos Tipo A, reductores de agua, y Tipo F, aditivos reductores de agua de alto rango.

### *Endurecimiento*

Este aditivo está formulado para producir concreto con características de fraguado de normales a aceleradas, dentro del rango de dosificación recomendado proporciona una mejora 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.

### **2.4.2 Agente Modificador de Viscosidad (AMV)**

Los agentes modificadores de la viscosidad (AMV) son aditivos químicos que mejoran sustancialmente la cohesión del concreto y, por tanto, limitan la pérdida de agua por sangrado y minimizan la tendencia a la segregación del concreto. Desde el punto de vista reológico, estos aditivos inducen en el concreto una viscosidad moderada-alta junto con un comportamiento pseudoplástico. Esto da lugar a un concreto con una elevada estabilidad (mínima tendencia a la segregación y sangrado). Su empleo junto con superplastificantes de última generación permite obtener concretos estables a pesar de tener una gran fluidez, y por tanto, gran facilidad de mezclado, bombeo y colocación.

Los AMV se clasifican según su acción física en el concreto. De esta manera, se pueden distinguir los siguientes:

- ∇ Clase A: Polímeros orgánicos sintéticos o naturales de alto peso molecular solubles en agua que aumentan la viscosidad del agua de mezclado mediante enlaces con el hidrógeno del agua limitando su migración y formando un gel viscoso.

- 
- 
- ∇ Clase B: Floculantes orgánicos solubles en agua que se adsorben sobre las partículas de cemento aumentando la viscosidad mediante atracción entre partículas.
  - ∇ Clase C: Emulsiones de diferentes materiales orgánicos (emulsiones acrílicas o dispersiones acuosas de arcilla) que aumentan la atracción entre partículas y suministran partículas muy finas adicionales.

Dentro de los AMV destacan los éteres de celulosa y la goma welan de la clase A.

Para este trabajo en particular, se recurrió a un aditivo modificador de viscosidad cuando la fluidez y consistencia necesarias no se alcanzaba usando solamente el superfluidificante, es decir, que la excesiva cantidad de éste producía segregación en la mezcla y para mejorar la consistencia, era necesario agregar el AMV.

El aditivo modificador de viscosidad usado fue el Rheomac 206, el cual da muy buena consistencia a las mezclas pero hay que ser conservador en cuanto a su dosificación, dado que al excederse puede prácticamente secarla, por lo que es necesario realizar varias pruebas preliminares en conjunto con el superfluidificante antes de determinar su dosificación final.

#### *Descripción del Rheomac 206*

Es una solución acuosa constituida de polímeros sintéticos de alto peso molecular. Este aditivo sirve como agente modificador de viscosidad para limitar los efectos de segregación y sangrado del concreto de alto asentamiento.

---

---

# CAPÍTULO III

---

---

---

---

## III. DISEÑO DE LAS MEZCLAS

### *Aspectos generales*

La composición de la mezcla de un concreto autocompactable, al igual a la de un concreto normal, debe satisfacer todos los criterios de desempeño para este material en estado fresco y endurecido.

Adicional a lo anterior, para un concreto autocompactable se debe cumplir con tener una buena trabajabilidad, lo que incluye habilidad de llenado, acomodo por peso propio, alta fluidez con resistencia a la segregación y capacidad de paso entre el acero de refuerzo.



Por esto, se debe cuidar la dosificación de cada uno de los materiales componentes, en especial aquellos que contienen finos como la arena y el cemento ya que estos influyen en forma importante en la trabajabilidad de la mezcla.

Otro aspecto importante que se debe cuidar es el tiempo que la mezcla de concreto mantiene las propiedades reológicas deseadas para obtener buenos resultados a la hora de la colocación de este material.

### *Definiciones*

**Adicionantes.** Material inorgánico finamente dividido empleado en el concreto para mejorar ciertas propiedades o para alcanzar propiedades especiales.

---

---

**Aditivo.** Material agregado durante el proceso de mezclado del concreto en pequeñas cantidades en relación con la masa de cemento para modificar las propiedades del concreto fresco o endurecido.

**Cementante.** La combinación de cemento y adicionante hidráulico en un concreto autocompactable.

**Capacidad de llenado (fluidéz no confinada).** La capacidad del concreto autocompactable para fluir y llenar completamente todos los espacios dentro de la cimbra bajo su propio peso.

**Mortero.** La fracción del concreto que comprende la pasta más agregados menores que 4 mm.

**Pasta.** La fracción del concreto que comprende polvo más agua y aire.

**Capacidad de paso (fluidéz confinada).** La capacidad del concreto autocompactable para fluir a través de aberturas estrechas, tales como espacios entre las barras de acero de refuerzo sin segregación ni bloqueo.

**Polvo.** Material de tamaño de partículas menores que 0.125 mm.

**Concreto autocompactable (CAC).** Concreto que es capaz de fluir bajo su propio peso y llenar completamente la cimbra, aun en la presencia de congestionamiento de refuerzo, sin la necesidad de vibración, manteniendo su homogeneidad.

**Resistencia a la segregación (estabilidad).** La capacidad del CAC para permanecer homogénea su composición durante el transporte y colocación.

**Trabajabilidad.** Medida de la facilidad con la que el concreto fresco puede ser colocado y compactado, es una combinación compleja de aspectos de fluidéz, cohesividad, trabajabilidad, compactibilidad y viscosidad.

---

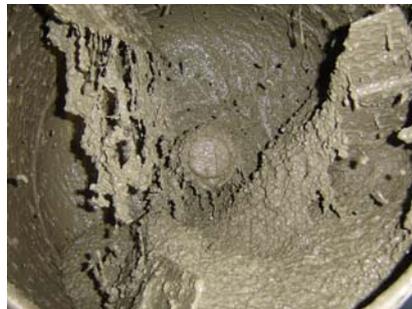
---

### 3.1 CRITERIO DE DISEÑO

Para diseñar un concreto autocompactable es importante tener en cuenta las siguientes proporciones y cantidades, las cuales son típicas en el proporcionamiento de estas mezclas:

- La relación agua/polvo por volumen debe ser de 0.80 a 1.00
- El contenido total de polvo debe ser de 160 a 240 litros (400-600 kg) por m<sup>3</sup>
- El contenido de arena debe constituir más del 38% del volumen del mortero
- El contenido del agregado grueso normalmente está entre el 28 y el 35% del volumen de la mezcla
- El contenido de agua en ningún caso debe exceder los 200 litros por m<sup>3</sup>

Para alcanzar resistencias y otros requisitos de desempeño se deben realizar las modificaciones posteriores que sean pertinentes.



Generalmente se recomienda diseñar en forma conservadora para asegurar que el concreto es capaz de mantener sus propiedades especificadas en estado fresco no obstante las variaciones que se prevén en la calidad de los materiales componentes.

Así mismo, se deben prever y admitir algunas variaciones en el contenido de humedad en los agregados en alguna etapa de diseño de la mezcla.



Normalmente, los aditivos modificadores de viscosidad son una herramienta útil para compensar las fluctuaciones debidas a las variaciones de la granulometría de la arena y el contenido de humedad de los agregados en general.

Un procedimiento eficiente para el diseño de mezclas de concreto autocompactable se muestra a continuación. Éste, está basado en un método desarrollado por Okasawa.

***Procedimiento para determinar la composición de la mezcla***

- A) Selección del contenido de aire (regularmente 2%)***
- B) Determinación del volumen del agregado grueso***
- C) Determinación del contenido de arena***
- D) Diseño de la composición de la pasta***
- E) Determinación de la proporción volumétrica óptima agua/polvo y superfluidificante en el mortero***
- F) Finalmente se revisan las propiedades del concreto con las pruebas estándar.***

A continuación se comenta más a detalle cada uno de los puntos anteriores.

- A) Selección del contenido de aire deseado.*** Usualmente se establece en un 2%, sin embargo, puede establecerse 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 ( $D > 4$  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.

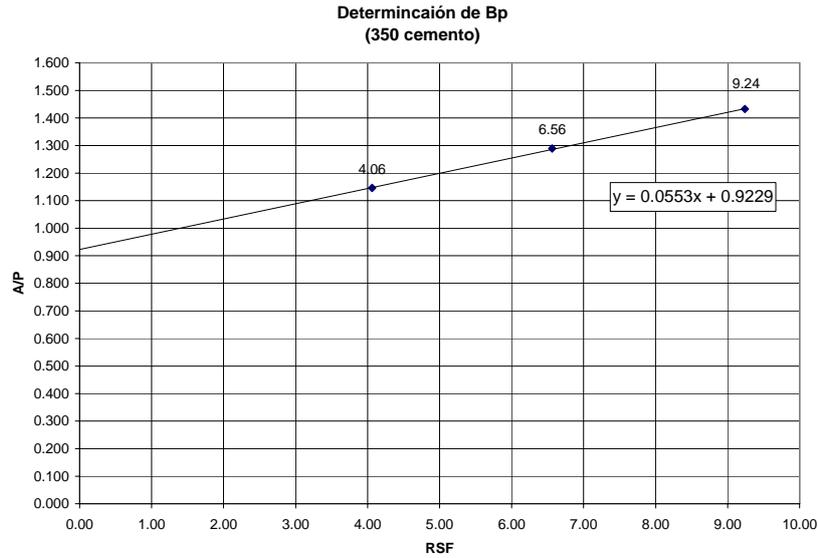
El contenido óptimo de agregado grueso depende de los siguientes parámetros:

- *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.

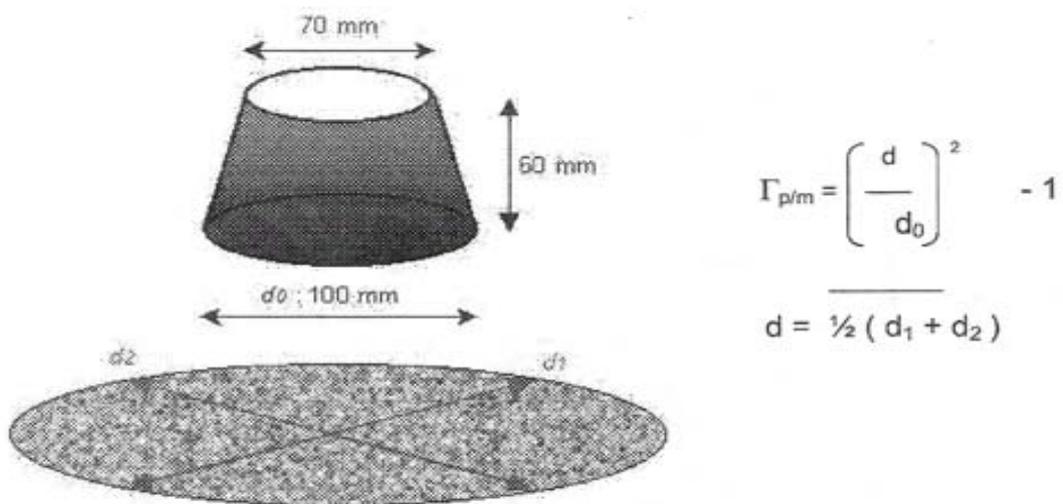
El contenido de arena está definido por la densidad. El contenido volumétrico óptimo de arena en el mortero varía entre 40-50%, dependiendo de las propiedades de la pasta.

**D) *Diseño de la composición de la pasta.*** Inicialmente se determina la relación agua/polvos para un flujo cero ( $\beta_p$ ) en la pasta, con la proporción escogida de cemento y adicionantes. Pruebas de flujo en cono con relaciones agua/polvo por volumen, p.e. 1.1, 1.2, 1.3 y 1.4 se llevan a cabo con la composición de polvo seleccionada (fig. 3.1). El punto de intersección con el eje Y es designado como el valor  $\beta_p$ .



**Figura 3.1 Determinación de la relación agua/polvo  $\beta_p$**

**E) Determinación de la proporción volumétrica óptima agua/polvo y superfluidificante en el mortero.** Se realizan con el cono de flujo y el embudo en V para mortero (fig. 3.2 y 3.3) variando las relaciones agua/polvo en el intervalo de  $\beta_p$  (0.8-0.9) y dosificaciones de superfluidificante. El superfluidificante se usa para balancear la reología de la pasta. El volumen del contenido de arena en el mortero permanece sin cambio, como se señaló anteriormente.

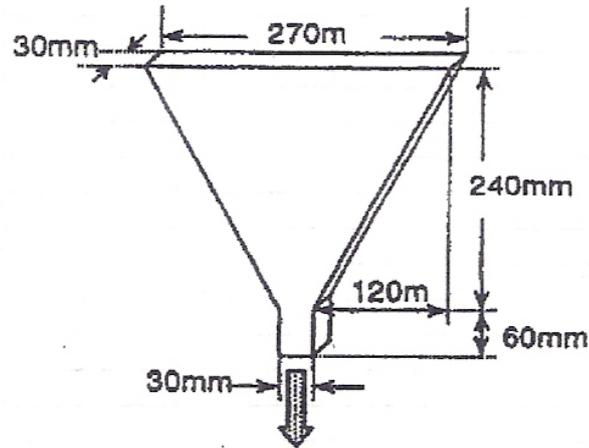


**Fig. 3.2 Cono de flujo y mesa para determinar el flujo de reventamiento relativo.**

---

---

Los valores a alcanzar son para el flujo del revenimiento de 24 a 26 cm y el tiempo para el embudo V de 7 a 11 segundos.



*Fig. 3.3 Embudo V para determinar el tiempo de flujo del mortero*

### 3.2 PROPORCIONAMIENTOS REQUERIDOS

Para este estudio se realizaron tres mezclas en las que se varió el contenido de cemento en cada una ( $350-450 \text{ kg/m}^3$ ), esto para un agregado grueso de tamaño máximo de 19 mm ( $3/4''$ ).

De igual manera se realizaron tres mezclas más, con iguales proporciones que las anteriores, pero con un tamaño máximo de 9.5 mm ( $3/8''$ ).



Las dosificaciones se realizaron siguiendo las recomendaciones y el método antes mencionados, llegando a las siguientes proporciones:

**Contenido de cemento 350 kg/m<sup>3</sup>**

| <b>Componente</b>    | <b>kg</b>   | <b>m<sup>3</sup></b> |
|----------------------|-------------|----------------------|
| <i>Agua</i>          | 190         | 0.190                |
| <i>Cemento</i>       | 350         | 0.111                |
| <i>Grava</i>         | 670         | 0.253                |
| <i>Finos (grava)</i> | 19          | 0.007                |
| <i>Aire</i>          | 0           | 0.020                |
| <i>Arena</i>         | 741         | 0.328                |
| <i>Finos (arena)</i> | 206         | 0.091                |
| <b>Suma</b>          | <b>2176</b> | <b>1.000</b>         |

Las condiciones que presentó esta mezcla fueron:

| <b>Condiciones</b>                                   | <b>Resultado</b> |
|--|------------------|
| Agregado grueso < 50 %                               | 28%              |
| Relación agua / polvo = 0.8 - 1.0                    | 0.84             |
| Contenido total de polvo 400 - 600 kg/m <sup>3</sup> | 575              |
| Contenido de arena > 40 % del mortero (volumen)      | 44%              |
| Arena < 50 % del volumen de la pasta                 | 55%              |
| Arena > del 50 % del peso total de los agregados     | 53%              |
| Agua libre < 200 litros                              | 190              |
| Pasta > del 40 % del volumen de la mezcla            | 41%              |

---

---

*Contenido de cemento 400 kg/m<sup>3</sup>*

| <b>Componente</b>    | <b>kg</b>   | <b>m<sup>3</sup></b> |
|----------------------|-------------|----------------------|
| <i>Agua</i>          | 190         | 0.190                |
| <i>Cemento</i>       | 400         | 0.127                |
| <i>Grava</i>         | 670         | 0.253                |
| <i>Finos (grava)</i> | 19          | 0.007                |
| <i>Aire</i>          | 0           | 0.020                |
| <i>Arena</i>         | 713         | 0.315                |
| <i>Finos (arena)</i> | 198         | 0.088                |
| <b>Suma</b>          | <b>2190</b> | <b>1.000</b>         |

Las condiciones que presentó esta mezcla fueron:

| <b>Condiciones</b>                                   | <b>Resultado</b> |
|--|------------------|
| Agregado grueso < 50 %                               | 28%              |
| Relación agua / polvo = 0.8 - 1.0                    | 0.88             |
| Contenido total de polvo 400 - 600 kg/m <sup>3</sup> | 617              |
| Contenido de arena > 40 % del mortero (volumen)      | 43%              |
| Arena < 50 % del volumen de la pasta                 | 53 %             |
| Arena > del 50 % del peso total de los agregados     | 52%              |
| Agua libre < 200 litros                              | 190              |
| Pasta > del 40 % del volumen de la mezcla            | 42%              |

---

---

*Contenido de cemento 450 kg/m<sup>3</sup>*

| <b>Componente</b>    | <b>kg</b>   | <b>m<sup>3</sup></b> |
|----------------------|-------------|----------------------|
| <i>Agua</i>          | 190         | 0.190                |
| <i>Cemento</i>       | 450         | 0.143                |
| <i>Grava</i>         | 670         | 0.253                |
| <i>Finos (grava)</i> | 19          | 0.007                |
| <i>Aire</i>          | 0           | 0.020                |
| <i>Arena</i>         | 685         | 0.303                |
| <i>Finos (arena)</i> | 190         | 0.084                |
| <b>Suma</b>          | <b>2204</b> | <b>1.000</b>         |

Las condiciones que presentó esta mezcla fueron:

| <b>Condiciones</b>                                   | <b>Resultado</b> |
|--|------------------|
| Agregado grueso < 50 %                               | 28%              |
| Relación agua / polvo = 0.8 - 1.0                    | 0.91             |
| Contenido total de polvo 400 - 600 kg/m <sup>3</sup> | 659              |
| Contenido de arena > 40 % del mortero (volumen)      | 41%              |
| Arena < 50 % del volumen de la pasta                 | 50%              |
| Arena > del 50 % del peso total de los agregados     | 51%              |
| Agua libre < 200 litros                              | 190              |
| Pasta > del 40 % del volumen de la mezcla            | 44%              |

Respecto a las dosificaciones de aditivos hubo variaciones debido al contenido de humedad de los agregados al momento de la realización de las mezclas, por lo que en algunas fue necesario agregar además del superfluidificante un aditivo modificador de viscosidad, quedando las proporciones de acuerdo al tamaño máximo de agregado, como sigue:

| TMA<br>(mm) | Contenido de<br>cemento | Superfluidificante     | Agente Modificador<br>de Viscosidad |
|-------------|-------------------------|------------------------|-------------------------------------|
|             | (kg/m <sup>3</sup> )    | (lt / m <sup>3</sup> ) | (lt / m <sup>3</sup> )              |
| 19          | 350                     | 6.50                   | 0.33                                |
|             | 400                     | 8.00                   | 0.60**                              |
|             | 450                     | 7.00                   | 0.33                                |
| 9.5         | 350                     | 4.46                   | N/R*                                |
|             | 400                     | 5.81                   | N/R*                                |
|             | 450                     | 5.08                   | N/R*                                |

\* N/R: No requirió.

\*\* La mayor cantidad de AMV se requirió por el exceso en la fluidez alcanzada por la cantidad de aditivo superfluidificante empleado.

Es importante mencionar que para cada uno de los proporcionamientos mostrados, se realizaron varias pruebas preliminares ajustando las cantidades de los materiales componentes hasta llegar a los resultados deseados de trabajabilidad de las mezclas.

---

---

# CAPÍTULO IV

---

---

---

---

## IV. REOLOGÍA DEL CONCRETO

### AUTOCOMPACTABLE

#### *Aspectos generales*

En esta investigación se realizaron las siguientes pruebas al concreto en estado fresco: revenimiento, peso volumétrico y contenido de aire. Además, se realizaron las pruebas de autocompactabilidad recomendadas para este tipo de concreto, las cuales sirven para medir la trabajabilidad de las mezclas.



#### **4.1 REVENIMIENTO**

La prueba de revenimiento sirve de base para juzgar la trabajabilidad de una mezcla. Sin embargo, para el caso del concreto autocompactable el revenimiento no tiene la misma importancia que para el caso de un concreto normal ya que se obtienen resultados muy bajos debido a la baja relación de agua/cemento que tienen sus mezclas.



Para esta investigación los valores de revenimiento fueron de 1 a 4 cm para las diferentes mezclas, siendo las de menor contenido de cemento las que presentaron los valores más altos. Los valores de revenimiento anteriores, fueron tomados antes de agregar el superfluidificante.

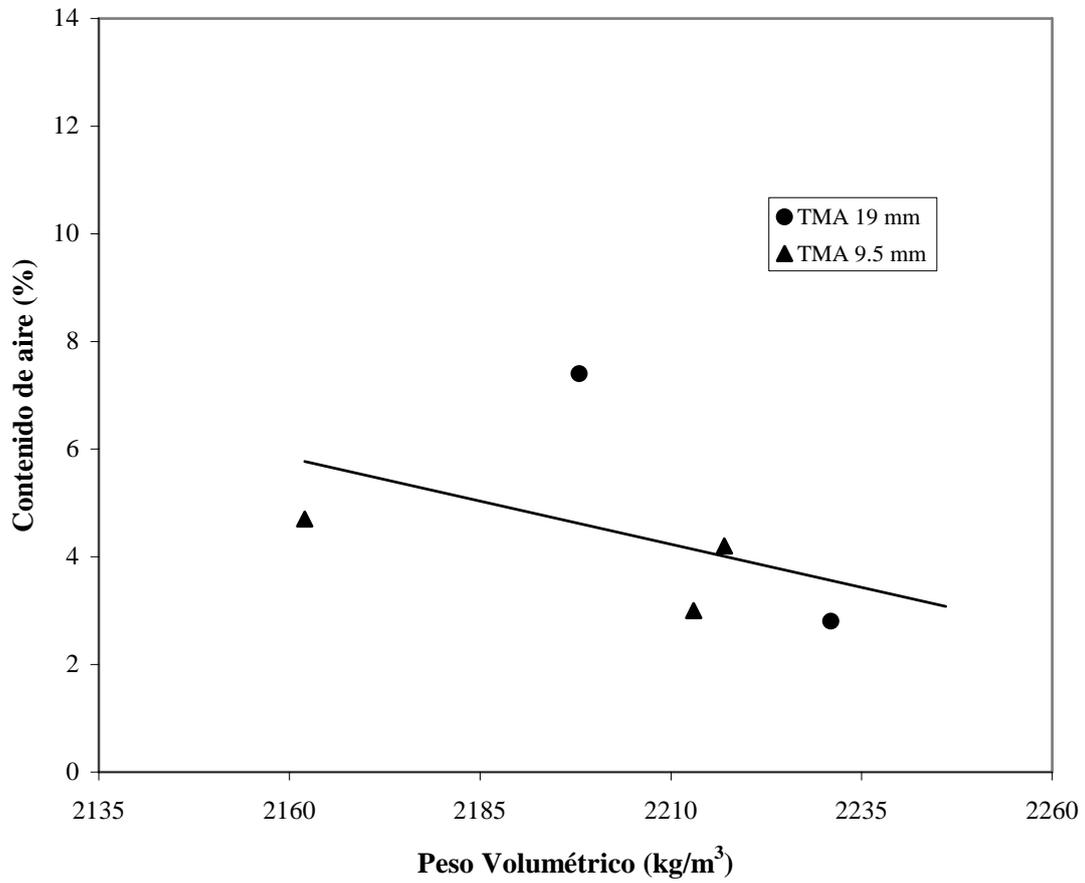


#### 4.2 PESO VOLUMÉTRICO

Este valor se obtiene del cociente del peso en estado fresco de la mezcla y el volumen determinado de esta, y varía dependiendo de la cantidad de aire atrapado o incluido intencionalmente y de los contenidos de agua y cemento, mismos que a su vez se ven influenciados por el tamaño máximo, granulometría del agregado y de la densidad de los materiales pétreos. El concreto convencional tiene un peso dentro del intervalo de 2200 a 2400 kg/m<sup>3</sup>. La relación entre peso volumétrico y contenido de aire puede observarse en la figura 4.1.

Los valores obtenidos en las diferentes mezclas realizadas fueron los siguientes:

| TMA (mm) | Contenido de cemento (kg/m <sup>3</sup> ) | Peso Volumétrico (kg/m <sup>3</sup> ) |
|----------|---|---------------------------------------|
| 19       | 350                                       | 2182                                  |
|          | 400                                       | 2198                                  |
|          | 450                                       | 2231                                  |
| 9.5      | 350                                       | 2213                                  |
|          | 400                                       | 2163                                  |
|          | 450                                       | 2217                                  |



*Fig 4.1 Variación del contenido de aire con el peso volumétrico .*



Como se puede observar en la tabla anterior, los valores de peso volumétrico son similares a los que se obtienen para un concreto normal, sin embargo, el contenido de aire atrapado es superior al 2%, valor que usualmente es tomado para los concretos normales.

#### **4.3 AIRE ATRAPADO**

La inclusión de aire se recomienda en casi todos los concretos, especialmente para mejorar su resistencia contra la congelación, cuando el concreto queda expuesto al agua y a los productos químicos descongelantes, además de otros importantes beneficios.



El aire incluido mejora la trabajabilidad del concreto, resulta efectivo particularmente en las mezclas pobres (de bajo contenido de cemento) que de otra manera serían ásperas y difíciles de trabajar, también se mejora la trabajabilidad de las mezclas con agregados granulares y pobremente graduados. Gracias a esta mejora en la trabajabilidad, el contenido de agua y de arena se puede reducir de manera muy notoria. Un volumen de concreto con aire incluido necesita menos agua que el mismo volumen de concreto sin aire incluido de igual consistencia y tamaño máximo de agregado. El concreto fresco que contiene aire incluido es cohesivo, se ve y se siente trabajable.

---

---

Sin embargo, para esta investigación no se agregó ningún aditivo inductor de aire a las mezclas realizadas, por lo que sólo se considera el aire atrapado en éstas.

Se dispone de cuatro métodos para determinar el contenido de aire:

- *Método de presión* (ASTM C 231), aplicable para el ensaye en el campo de todos los concretos exceptuando los hechos con agregados ligeros y sumamente porosos.
- *Método volumétrico* (ASTM C 173), aplicable para el ensaye en el campo de todos los concretos, y especialmente útil para los concretos hechos con agregados ligeros y porosos. Cuando se emplean agregados mayores de 5 cm, éstos se deberán remover manualmente y se deberá calcular el efecto de su remoción al determinar el contenido total de aire.
- *Método gravimétrico* (ASTM C 138), requiere del conocimiento exacto de la densidad relativa y de los volúmenes absolutos de los ingredientes del concreto, no es práctico para campo pero en el laboratorio se puede emplear satisfactoriamente.
- *Indicador de aire Chace* (AASHTO T 199), es una manera muy simple y económica para verificar el contenido aproximado de aire en un concreto fresco. Se efectúa por medio de un aparato de bolsillo que prueba una muestra de mortero del concreto. Sin embargo, esta prueba no sustituye a los métodos de mayor grado de exactitud como lo son los anteriores.

En este trabajo se utilizó el método de presión para determinar el contenido de aire.



---

---

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

| <b>TMA<br/>(mm)</b> | <b>Contenido de cemento<br/>(kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Contenido de aire<br/>(%)</b> |
|---------------------|--|----------------------------------|
| 19                  | 350  | N/D*                             |
|                     | 400  | 7.4**                            |
|                     | 450  | 2.8                              |
| 9.5                 | 350  | 3                                |
|                     | 400  | 4.7                              |
|                     | 450  | 4.2                              |

\*No se obtuvo ningún dato.

\*\* Es probable que exista un error debido a la calibración del equipo.

#### **4.4 PRUEBAS DE AUTOCOMPACTABILIDAD**

##### *Aspectos generales*

La trabajabilidad del concreto autocompactable es más alta que para una mezcla normal y puede ser caracterizada por las siguientes propiedades:

- Capacidad de llenado
- Capacidad de paso
- Resistencia a la segregación

Para que una mezcla pueda ser considerada como concreto autocompactable debe reunir los requisitos de las tres características anteriores.

A continuación se presentan los métodos de ensaye para determinar la trabajabilidad de las mezclas.

---

---

#### 4.4.1 Métodos de ensaye

Se han desarrollado muchos métodos de ensaye diferentes en su intento de caracterizar las propiedades del concreto autocompactable, sin embargo, ningún método o combinación de ellos ha tenido aprobación universal.

Se ha encontrado que ningún método caracteriza los aspectos relevantes de trabajabilidad, por lo que cada mezcla tiene que probarse separadamente para los diferentes parámetros de trabajabilidad.

En la tabla 1 y 2 se enlistan los métodos de ensaye alternativos para los diferentes parámetros.

**Tabla 1. Lista de métodos de ensaye para propiedades de trabajabilidad**

| No. | Método                                   | Propiedad                    |
|-----|--|------------------------------|
| 1   | Extensión de flujo por el cono de Abrams | Capacidad de llenado         |
| 2   | Extensión de flujo T <sub>50</sub>       | Capacidad de llenado         |
| 3   | Anillo J                                 | Capacidad de paso            |
| 4   | Embudo V                                 | Capacidad de llenado         |
| 5   | Embudo V a T <sub>5 min</sub>            | Resistencia a la segregación |
| 6   | Caja L                                   | Capacidad de paso            |
| 7   | Caja U                                   | Capacidad de paso            |
| 8   | Caja de Llenado                          | Capacidad de paso            |
| 9   | Ensaye GTM de estabilidad por tamiz      | Resistencia a la segregación |
| 10  | Orimet                                   | Capacidad de llenado         |

Para el diseño inicial de las mezclas de concreto autocompactable necesitan realizarse los tres parámetros de trabajabilidad para asegurarse que son satisfechos. Se debe realizar una prueba a escala completa para verificar las características de autocompactación del diseño escogido para una aplicación particular.

**Tabla 2. Propiedades de trabajabilidad de concreto autocompactable y métodos alternativos de ensaye.**

| Propiedad                    | Método de ensaye                        |   |   |
|------------------------------|---|---|---|
|                              | Laboratorio                             | Campo                                   | Modificación de ensaye de acuerdo al TMA  |
|                              | (Diseño de mezclas)                     | (Control de calidad)                    |   |
| Capacidad de llenado         | Extensión de flujo                      | Extensión de flujo                      | Ninguna                                   |
|                              | Extensión de flujo a T <sub>50 cm</sub> | Extensión de flujo a T <sub>50 cm</sub> |   |
|                              | Embudo V                                | Embudo V                                | Máximo 16 mm                              |
|                              | Orimet                                  | Orimet                                  |   |
| Capacidad de paso            | Caja L                                  | Anillo J                                | Diferentes aberturas en Caja L y Anillo J |
|                              | Caja de llenado                         |   |   |
| Resistencia a la segregación | Ensaye GTM                              | Ensaye GTM                              | Ninguna                                   |
|                              | Embudo V a T <sub>5min</sub>            | Embudo V a T <sub>5min</sub>            |   |

Para el control de calidad en sitio, usualmente son suficientes dos métodos de ensaye para monitorear la calidad de la producción. Las combinaciones típicas son Extensión de flujo y Embudo V o Extensión de flujo y Anillo J. Puede ser suficiente un sólo método de ensaye si es realizado por un técnico con experiencia.

En la tabla 3 se muestran los criterios de aceptación típicos para el concreto autocompactable.



**Tabla 3. Criterio de aceptación para el concreto autocompactable**

| Método                                   | Unidad                                  | Intervalo típico de valores |        |
|--|---|-----------------------------|--------|
|  |   | Mínimo                      | Máximo |
| Extensión de flujo por el cono de Abrams | mm                                      | 650                         | 800    |
| Extensión de flujo T <sub>50</sub>       | seg                                     | 2                           | 5      |
| Anillo J                                 | mm                                      | 0                           | 10     |
| Embudo V                                 | seg                                     | 8                           | 12     |
| Embudo V a T <sub>5 min</sub>            | seg                                     | 0                           | + 3    |
| Caja L                                   | (h <sub>2</sub> /h <sub>1</sub> )       | 0.8                         | 1      |
| Caja U                                   | (h <sub>2</sub> /h <sub>1</sub> )<br>mm | 0                           | 30     |
| Llenado de Caja                          | %                                       | 90                          | 100    |
| Ensaye GTM de estabilidad por tamiz      | %                                       | 0                           | 15     |
| Orimet                                   | seg                                     | 0                           | 5      |

En la tabla anterior se muestran los requisitos típicos de cada método de ensaye con base en el conocimiento y práctica actuales. Sin embargo, desarrollos futuros pueden conducir a adoptar requisitos diferentes. Siempre se deben tener cuidados especiales para asegurar que no existe segregación de la mezcla y, hasta el momento, no hay una sola prueba simple y confiable que de información sobre la resistencia a la segregación del concreto autocompactable en todas las situaciones prácticas.

Para esta investigación se seleccionaron los siguientes métodos de ensaye:

- Extensión de flujo
- Caja L
- Orimet
- Embudo V

Se realizaron las pruebas correspondientes a cada uno y se describen a continuación.

---

---

#### 4.4.2 Extensión de flujo

Esta prueba es usada para evaluar el flujo libre horizontal del concreto autocompactable sin ninguna obstrucción. Se utilizó por primera vez en Japón para evaluar el concreto colado bajo agua. El método esta basado en la prueba para determinar la extensión. El diámetro del círculo de concreto es una medida de la capacidad de llenado de la cimbra.



#### *Evaluación de la prueba*

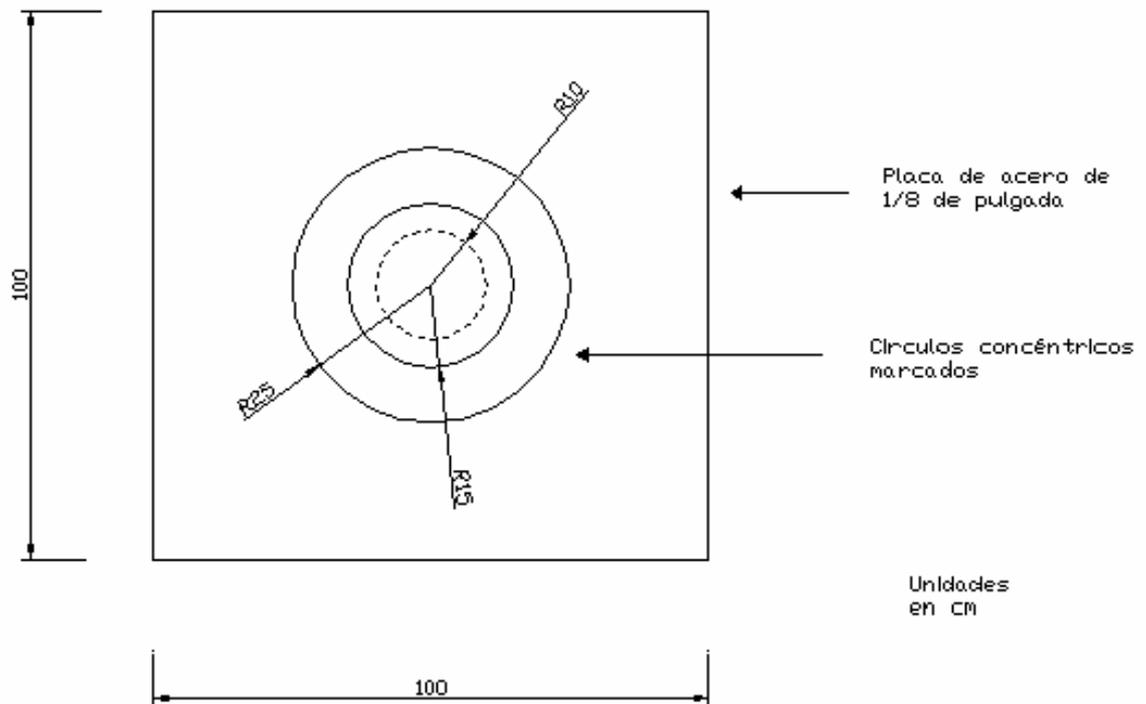
Esta es una prueba simple y rápida en la que se necesitan dos personas, si se requiere medir el tiempo de la extensión de flujo  $T_{50}$ . Se debe realizar en un sitio el cual garantice que la base quede completamente horizontal. Esta prueba evalúa de buena forma la capacidad de llenado de la mezcla, sin embargo, no da ninguna indicación sobre la capacidad del concreto de pasar entre las barras de refuerzo sin bloqueo, pero si da una idea sobre la resistencia a la segregación.



---

---

### *Placa para prueba de extensión de flujo*



### *Equipo*

El equipo necesario para esta prueba es el siguiente.

- ❑ Cono de Abrams
- ❑ Base metálica de 1m x 1m, la cual debe tener marcados dos círculos concéntricos de 30 y 50 cm de diámetro (el primero puede ser marcado ligeramente ya que solo sirve para indicar la posición donde se colocará el cono)
- ❑ Barra metálica
- ❑ Cucharón
- ❑ Extensómetro
- ❑ Cronómetro



### *Procedimiento*

El procedimiento a seguir para esta prueba es el siguiente.

1. Realizar una mezcla de concreto de la que se toma una muestra de 8 litros.
2. Colocar la base metálica sobre una superficie completamente horizontal y sobre ella se coloca el cono de Abrams, asegurándose que esté sobre el círculo marcado de 30 cm.
3. Llenar el cono con la mezcla sujetándolo firmemente, se enraza y se quita la mezcla que haya caído alrededor del cono.
4. Se levanta el cono verticalmente permitiendo que el concreto fluya. Simultáneamente se inicia el cronómetro para registrar el tiempo que tarda en llegar la mezcla al círculo de 500 mm (éste es el tiempo  $T_{50}$ ).
5. Medir el diámetro final del concreto en dos direcciones perpendiculares y el promedio será la extensión de flujo buscada.



---

---

### *Interpretación de los resultados*

Un valor más alto de la extensión de flujo indica una mayor capacidad de llenado bajo su propio peso. Se requiere un valor de al menos 600 mm para un concreto autocompactable. Sin embargo, no hay un valor aceptado generalmente, por lo que se acepta una tolerancia de  $\pm 50$  mm.

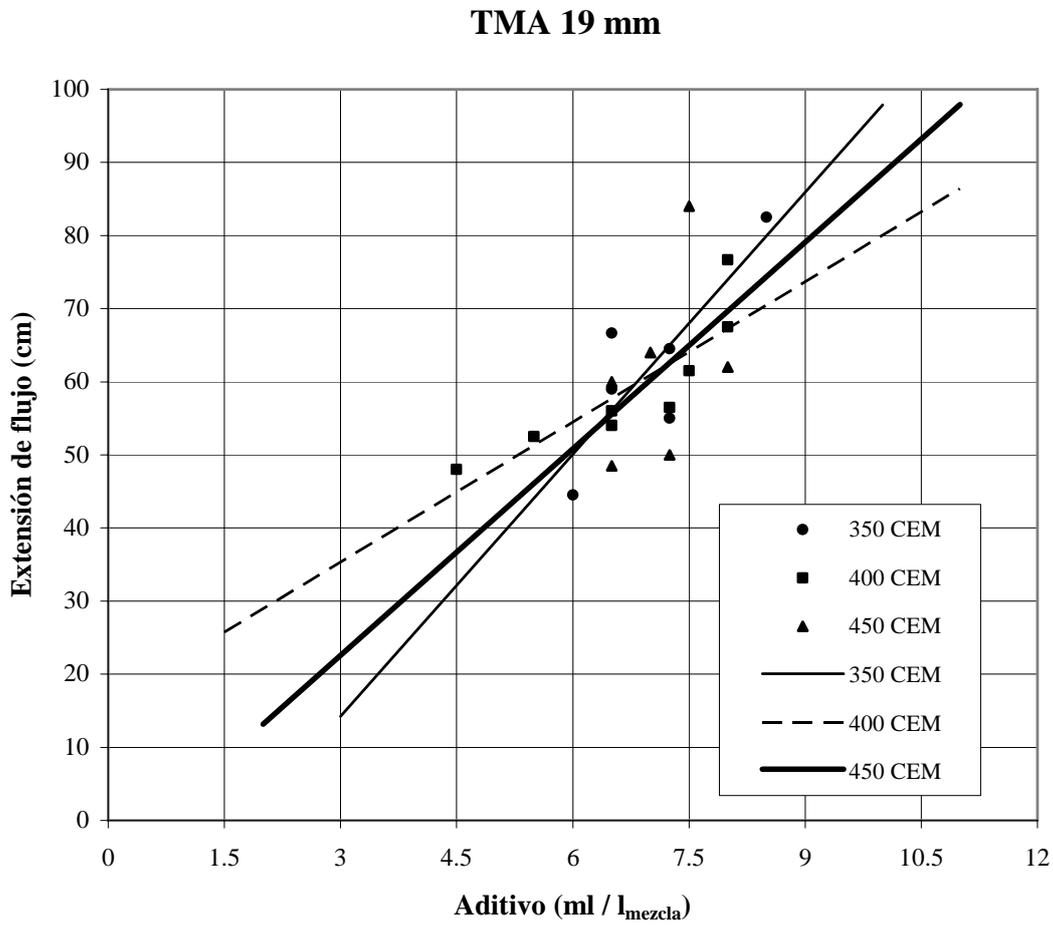
El tiempo  $T_{50}$  es un parámetro secundario del flujo. Un tiempo bajo indica mayor fluidez. Se recomienda que esté entre 2-5 seg.

Para esta investigación los valores promedio de las pruebas de extensión de flujo para las diferentes mezclas realizadas son los siguientes.

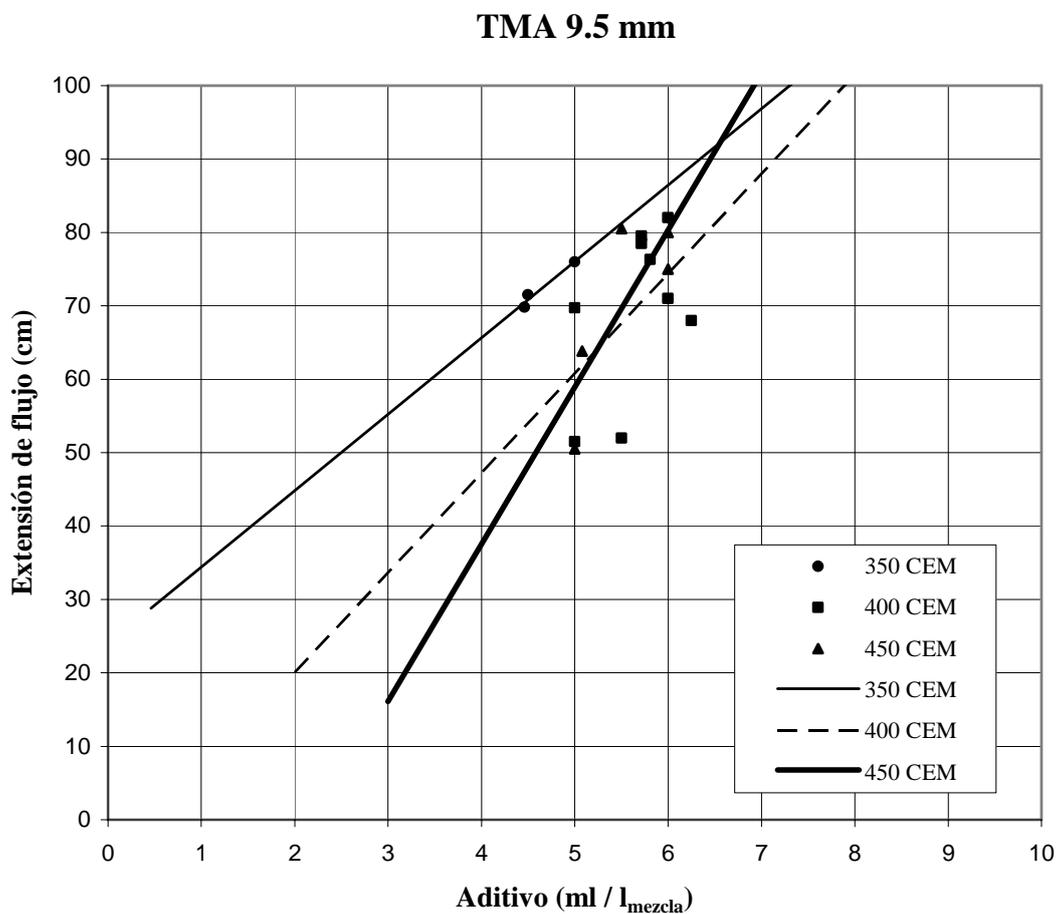
| <b>TMA<br/>(mm)</b> | <b>Contenido de cemento<br/>(kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Extensión de flujo<br/>(mm)</b> | <b>T<sub>50</sub><br/>(seg)</b> |
|---------------------|--|------------------------------------|---------------------------------|
| 19                  | 350  | 666                                | 2.0                             |
|                     | 400  | 766                                | 2.2                             |
|                     | 450  | 640                                | 1.5                             |
|                     |  |                                    |                                 |
| 9.5                 | 350  | 698                                | 1.3                             |
|                     | 400  | 763                                | 1.5                             |
|                     | 450  | 638                                | 1.8                             |

Es importante indicar la importancia del ajuste en el contenido de humedad de los agregados, ya que una ligera cantidad de agua adicional a la necesaria puede hacer que los resultados en la extensión de flujo aumenten considerablemente.

En la tabla anterior se puede observar que las mayores extensiones fueron las alcanzadas por las mezclas que tuvieron una mayor dosificación de superfluidificante, lo cual indica que hay que ser cuidadoso en el momento de calcular el aditivo pues puede conducir a la segregación del material, y entonces, es necesario hacer uso del aditivo modificador de viscosidad. En las figuras 4.2 y 4.3 se puede observar la relación de la cantidad de aditivo usada para cada una de las mezclas con la extensión de flujo.



*Fig 4.2 Variación de la extensión de flujo con la cantidad de aditivo usada en las mezclas, para los diferentes consumos de cemento .*



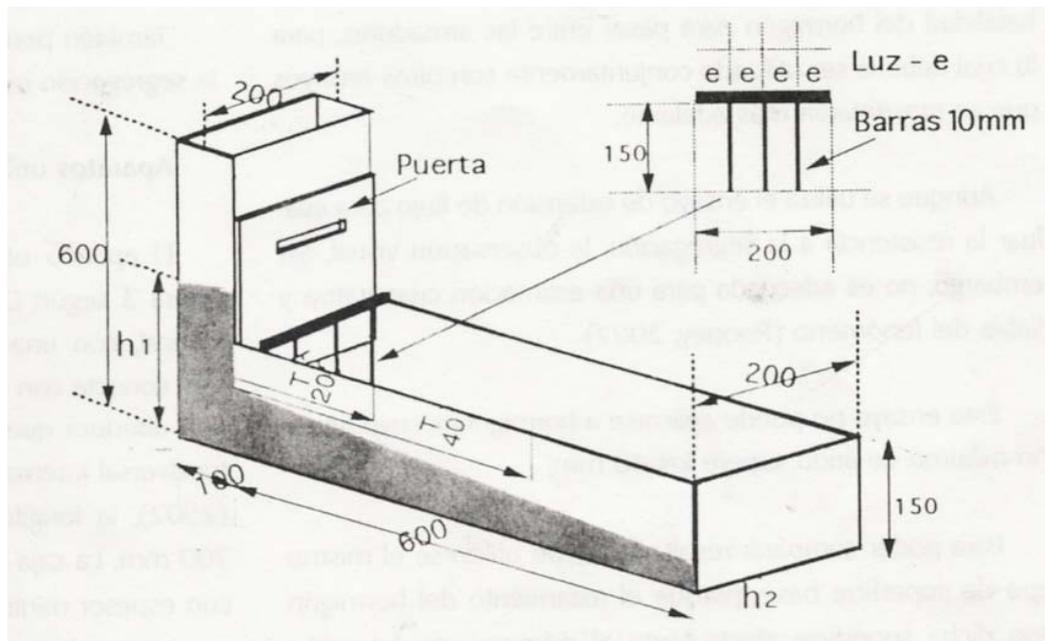
*Fig 4.3 Variación de la extensión de flujo con la cantidad de aditivo usada en las mezclas, para los diferentes consumos de cemento .*

---

---

### 4.4.3 Caja L

Esta prueba está basada en un diseño japonés para concreto submarino. La prueba evalúa el flujo del concreto cuando está sujeto a bloqueo por barras de refuerzo. El aparato se muestra en la siguiente figura.



*Fig. Caja L*

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

La sección vertical se llena con concreto autocompactable y después se abre la puerta dejando que la mezcla fluya a la sección horizontal.

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 la pendiente del concreto cuando está en reposo.

Este valor es un índice de la capacidad de paso o del grado en que el concreto puede pasar a través de las barras de refuerzo.

---

---

La sección horizontal puede marcarse a 200 y 400 mm de la puerta, puede registrarse el tiempo en que la mezcla alcanza esos puntos medidos (fig. Caja L). Estos tiempos son conocidos como  $T_{20}$  y  $T_{40}$  y son un índice de la capacidad de llenado.



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



---

---

### *Evaluación de la prueba*

Esta prueba evalúa la capacidad de paso y de llenado del concreto autocompactable, además, puede observarse directamente la segregación. Desafortunadamente, no hay un acuerdo sobre los materiales de construcción de éste modelo, dimensiones o arreglo de las barras, por lo que es difícil comparar resultados.

### *Equipo*

- ❑ Caja L
- ❑ Barra metálica
- ❑ Cucharón
- ❑ Cronómetro

### *Procedimiento*

1. Se realiza una mezcla de la que se toma una muestra de 14 litros aprox.
2. Colocar el aparato en una base horizontal, humedecer el interior previamente.
3. Llenar la sección vertical del aparato con la muestra de concreto.
4. Dejar reposar aproximadamente 1 minuto.
5. Se abre la puerta y se deja fluir la mezcla hasta que alcance el reposo. Simultáneamente, se inicia el cronómetro y se registra el tiempo en que tarda en llegar a las marcas de 200 y 400 mm ( $T_{20}$  y  $T_{40}$ ).
6. Cuando el concreto llegue al reposo se miden las alturas  $h_1$  y  $h_2$ .
7. Se calcula la Relación de Bloqueo ( $h_2/h_1$ ).



---

---

### *Interpretación de los resultados*

Cuando la Relación de Bloqueo  $h_2/h_1=1$ , o sea que la mezcla queda completamente horizontal, significa que el concreto es totalmente fluido. Se sugiere que el valor mínimo sea de 0.8. Los tiempos  $T_{20}$  y  $T_{40}$  pueden dar un índice de la facilidad con la que fluye, sin embargo, no hay un acuerdo respecto a los valores resultantes.

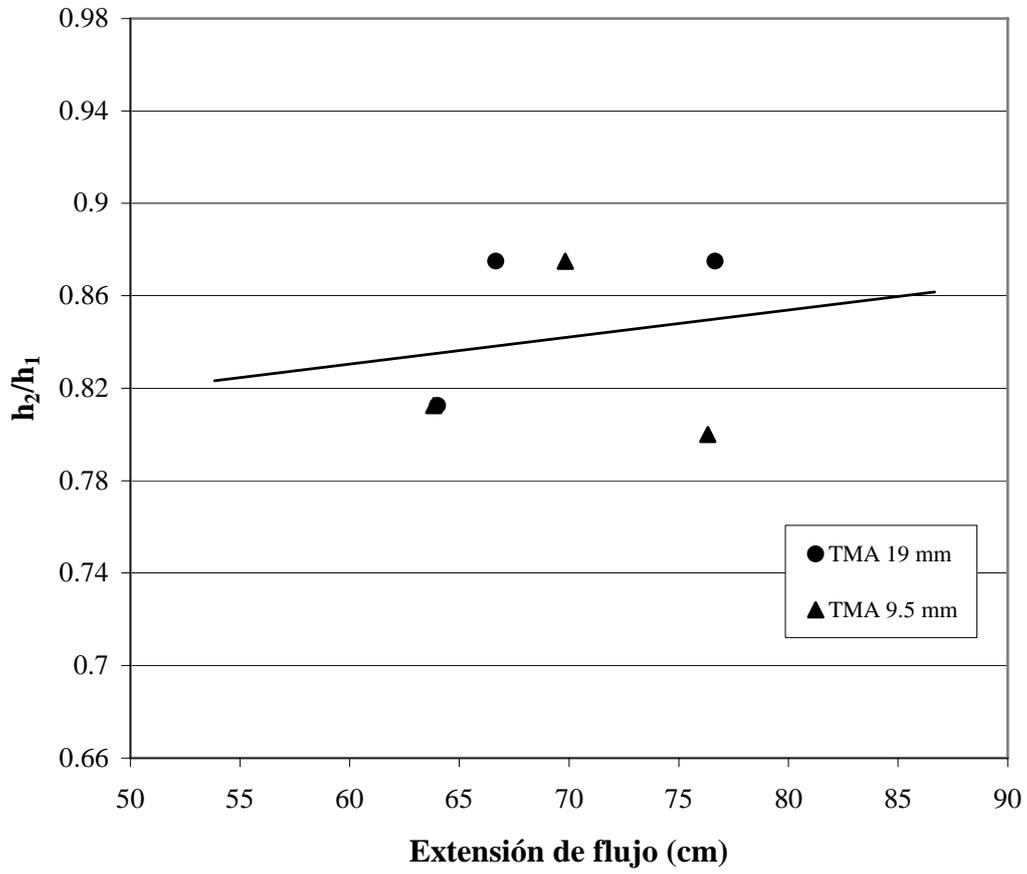
Los resultados obtenidos en esta investigación respecto a esta prueba son los siguientes.

| <b>TMA<br/>(mm)</b> | <b>Contenido de cemento<br/>(kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b><math>h_2/h_1</math></b> | <b><math>T_{40}</math><br/>(seg)</b> |
|---------------------|--|-----------------------------|--------------------------------------|
| 19                  | 350  | 0.875                       | 1.00                                 |
|                     | 400  | 0.875                       | 1.00                                 |
|                     | 450  | 0.813                       | 1.25                                 |
|                     |  |                             |                                      |
| 9.5                 | 350  | 0.880                       | 2.00                                 |
|                     | 400  | 0.800                       | 1.25                                 |
|                     | 450  | 0.810                       | 1.50                                 |

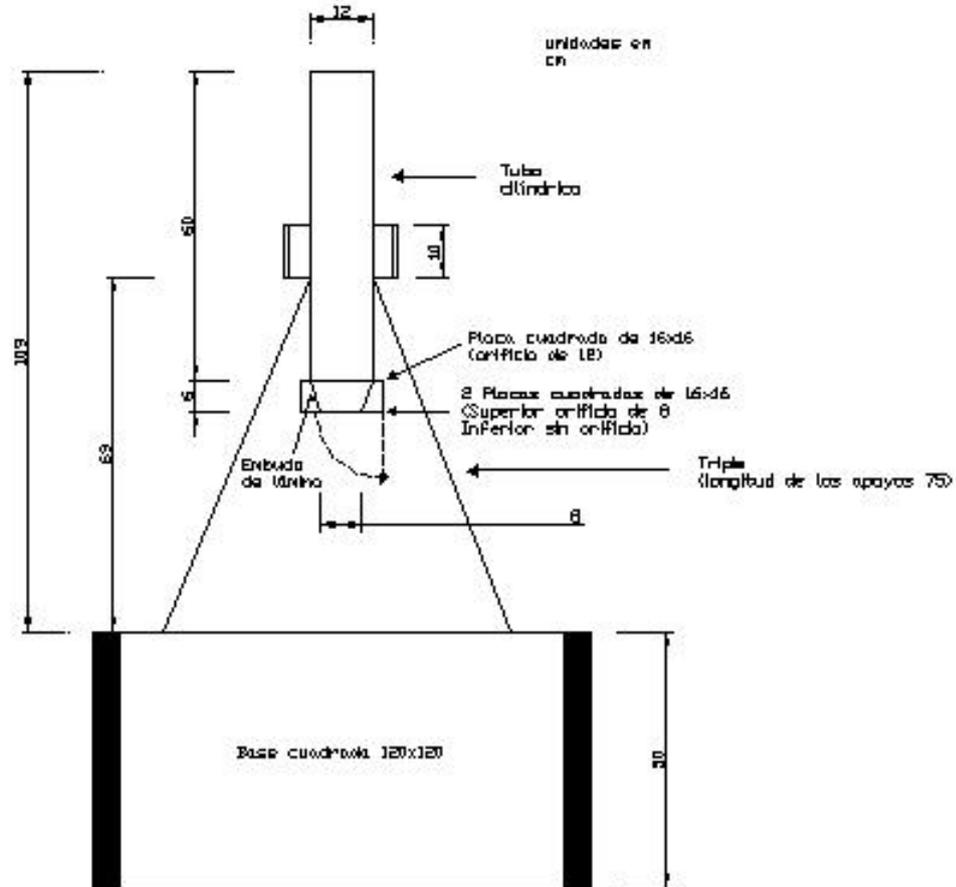
En este trabajo sólo se tomó en cuenta el tiempo  $T_{40}$  debido a que es complicado tomar los dos registros por la rapidez con que estos suceden. Las relaciones de bloqueo obtenidas se encuentran dentro de los límites sugeridos, lo cual indica una buena trabajabilidad. En la figura 4.4 se puede apreciar la relación entre los valores obtenidos de  $h_2/h_1$  y la extensión de flujo correspondiente.

#### **4.4.4 Ensayo de Orimet**

Este ensayo fue desarrollado en la Universidad de Paisley como un método para evaluar la alta trabajabilidad y fluidez del concreto en estado fresco en obra. La prueba está basada en el principio del reómetro. El Orimet consiste en un tubo vertical que tiene una reducción en el diámetro en la parte inferior, o sea, en la parte de descarga y con una tapa en dicho orificio. Regularmente el orificio de descarga es de 80 mm de radio interno, el cual es apropiado para evaluar mezclas de concreto con TMA de 20 mm. Sin embargo, pueden ser de 70 a 90 mm de diámetro.



*Fig 4.4 Variación de la relación  $h_2/h_1$  (caja L) con la extensión de flujo.*



### *Aparato del ensayo de Orimet*

La operación consiste simplemente en llenar el Orimet con concreto y abrir la tapa que se encuentra en la parte inferior y medir el tiempo en que aparece la luz en el fondo (viendo el tubo desde la parte superior).

### *Evaluación de la prueba*

Esta prueba es propia para simular el flujo del concreto fresco durante su colocación en obra. La prueba es rápida y el equipo es simple y de mantenimiento fácil. La prueba es capaz de determinar la alta trabajabilidad de mezclas de concreto en obra. Sin embargo, el procedimiento de tomar el tiempo, puede estar sujeto a errores, idealmente requiere de dos personas.

---

---

### *Equipo*

- ❑ Tubo de Orimet hecho de un material no absorbente
- ❑ Cubeta
- ❑ Barra metálica
- ❑ Cucharón
- ❑ Cronómetro

### *Procedimiento*

1. Realizar una mezcla de concreto de la que se toma una muestra de 10 litros aprox.
2. Colocar el aparato en una base horizontal y firme.
3. Humedecer las paredes internas del tubo.
4. Llenar el tubo con mezcla y enzararlo sin ninguna compactación.
5. Abrir la puerta en la base y dejar que caiga bajo peso propio, simultáneamente iniciar el cronómetro al abrir y registrar el tiempo en que descarga por completo (tiempo de flujo). Este registro se toma al alcanzarse a ver luz por el orificio del fondo.



---

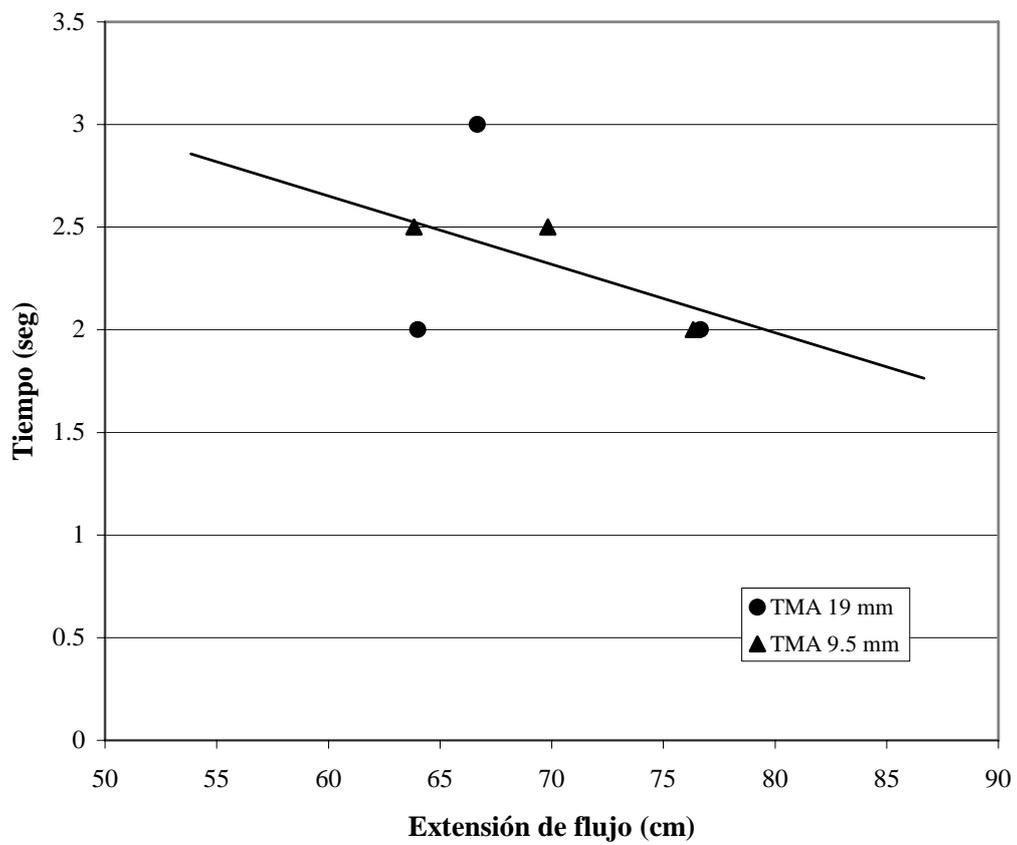
---

### *Interpretación de los resultados*

Esta es una medida de la facilidad con la que fluye el concreto, tiempos pequeños indican una mayor fluidez. Para el concreto autocompactable un tiempo de flujo ( $T_f$ ) de 5 segundos o menos se considera apropiado. El cono invertido en el orificio restringe el flujo, tiempos de flujo prolongados pueden dar alguna señal de la susceptibilidad de la mezcla al bloqueo y/o segregación. Los resultados obtenidos en esta investigación se muestran en la siguiente tabla.

| <b>TMA<br/>(mm)</b> | <b>Contenido de cemento<br/>(kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>T<sub>f</sub><br/>(seg)</b> |
|---------------------|--|--------------------------------|
| 19                  | 350  | 3                              |
|                     | 400  | 2                              |
|                     | 450  | 2                              |
|                     |  |                                |
| 9.5                 | 350  | 2.5                            |
|                     | 400  | 3                              |
|                     | 450  | 2.5                            |

Los resultados anteriores muestran que las mezclas tenían una gran fluidez, descargando el material en máximo 3 segundos, lo cual está dentro de los valores sugeridos para esta prueba. La relación de los valores obtenidos de  $T_f$  y los correspondientes a la extensión de flujo se pueden ver en la figura 4.5.



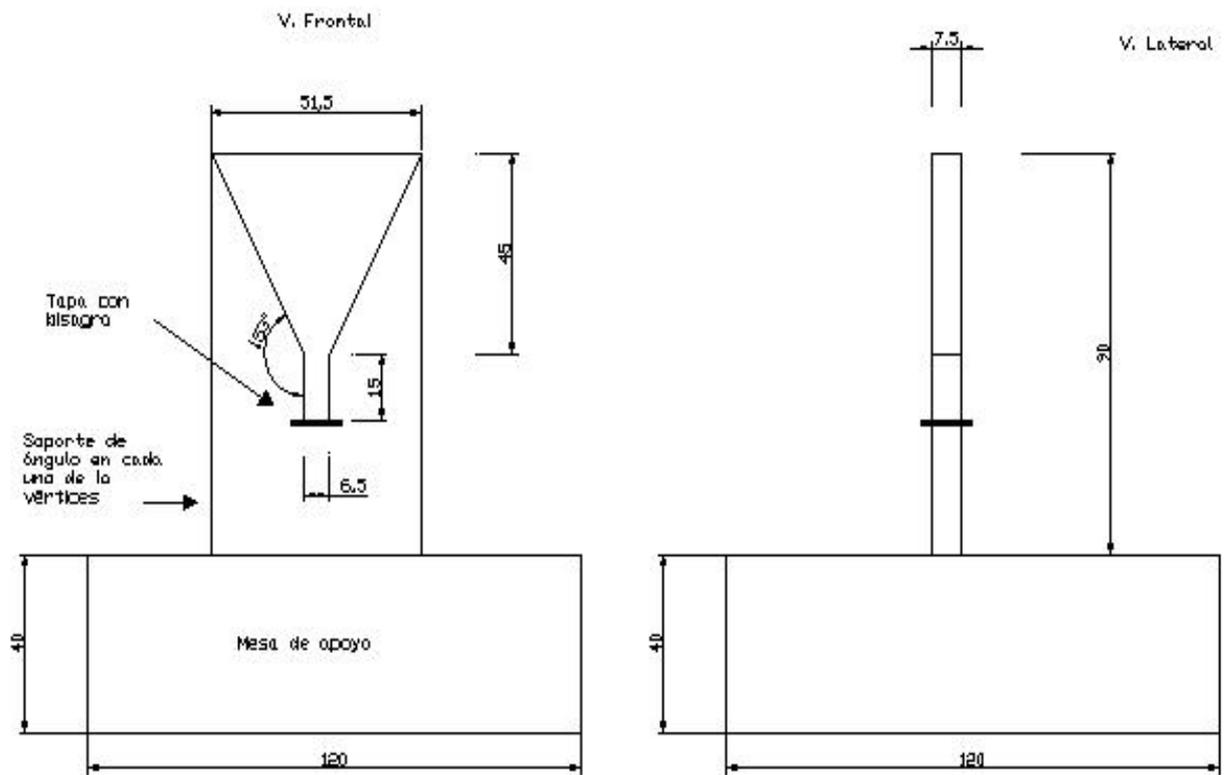
*Fig 4.5 Variación del tiempo (Ensaye de Orimet) con la extensión de flujo.*

---

---

#### 4.4.5 Embudo V

La prueba fue desarrollada en Japón y usada por Ozawa. El equipo consiste en un embudo en forma de “V”. Existen otras alternativas en forma de “O” usadas en Japón.



*Dimensiones del Embudo V*

Esta prueba es usada para determinar la capacidad de llenado (fluidez) del concreto con un TMA de 20 mm. El embudo se llena con 12 litros de mezcla aproximadamente y se registra el tiempo en que este descarga.

Después el embudo puede rellenarse y dejar que el concreto se asiente durante 5 minutos. Si presenta segregación el tiempo de descarga se puede incrementar significativamente.

---

---

### *Evaluación de la prueba*

A pesar de que la prueba esta diseñada para medir la fluidez, los resultados son afectados por otras propiedades del concreto más que por el flujo. La forma de cono invertido puede causar el bloqueo de la mezcla afectando los resultados, por ejemplo si hay demasiado agregado grueso. Un tiempo alto de flujo puede estar asociado a una deformabilidad baja, o bien, a una alta viscosidad de la pasta e incluso a una alta fricción inter-partículas. A pesar de que el aparato es simple, el efecto del ángulo del embudo y el efecto de las paredes no es muy claro.



### *Equipo*

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

### *Procedimiento*

1. Realizar una mezcla de la que se toma una muestra de 12 litros aprox.
2. Colocar el equipo en una base horizontal.
3. Humedecer las paredes internas del equipo.

- 
- 
4. Llenar el aparato completamente con concreto sin compactar, enrazar ligeramente.
  5. Abrir la puerta de la base y simultáneamente iniciar el cronómetro, registrando el tiempo en que tarda en descargar (tiempo de flujo). Este registro se toma al alcanzarse a ver luz por el orificio del fondo.



### *Interpretación de los resultados*

Esta prueba mide la facilidad con que fluye el concreto, tiempos pequeños indican una gran fluidez. Para concreto autocompactable un tiempo de flujo ( $T_f$ ) de 10 segundos se considera apropiado. 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 causar que el tiempo de flujo se incremente considerablemente.

---

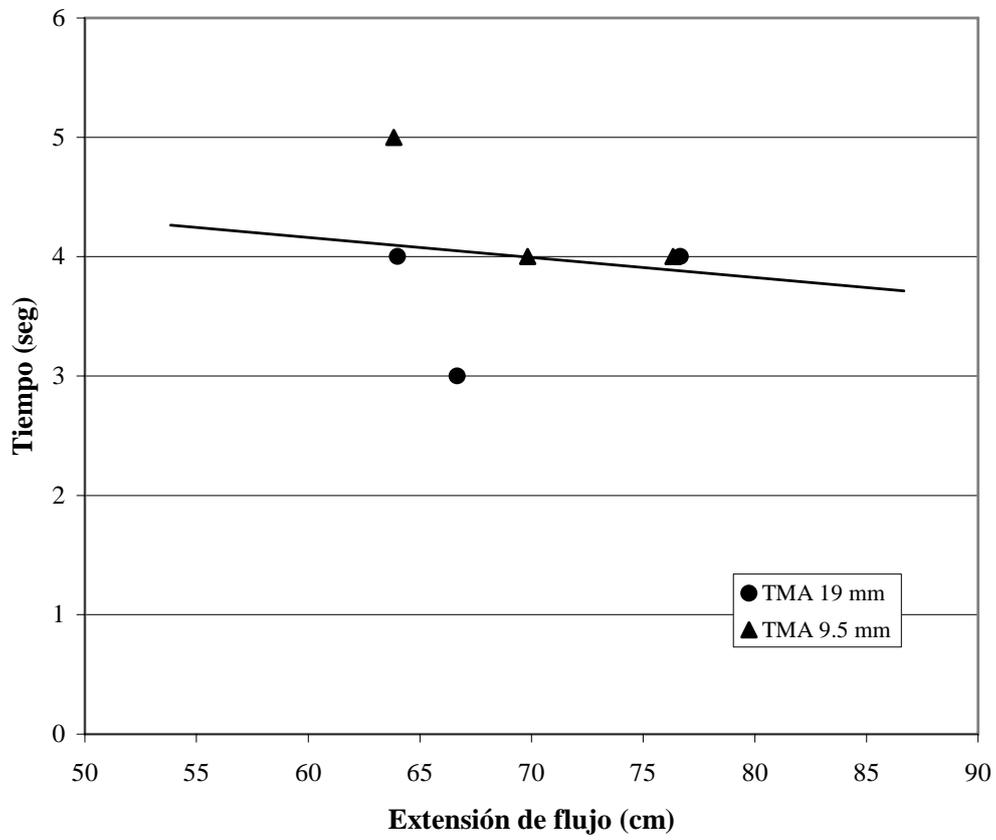
---

Los resultados obtenidos en la investigación para esta prueba son los siguientes.

| <b>TMA<br/>(mm)</b> | <b>Contenido de cemento<br/>(kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>T<sub>f</sub><br/>(seg)</b> |
|---------------------|--|--------------------------------|
| 19                  | 350  | 3                              |
|                     | 400  | 4                              |
|                     | 450  | 4                              |
|                     |  |                                |
| 9.5                 | 350  | 4                              |
|                     | 400  | 4                              |
|                     | 450  | 5                              |

Los valores obtenidos en esta prueba no están dentro de los límites sugeridos y se debe a la alta fluidez que presentaron las mezclas. En la investigación nunca se alcanzaron valores más altos de T<sub>f</sub> a los mostrados en la tabla anterior, ni en las mezclas preliminares ni en las definitivas, lo que hace ver la importancia que tienen los materiales de construcción del equipo y las condiciones particulares de las mezclas realizadas. La relación entre los valores de T<sub>f</sub> obtenidos en esta prueba y los correspondientes a la extensión de flujo se pueden apreciar en la figura 4.6.





*Fig 4.6 Variación del tiempo (Embudo V) con la extensión de flujo.*

---

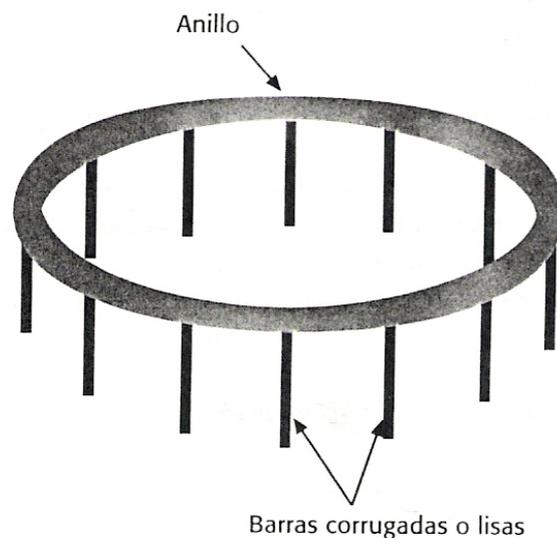
---

#### 4.4.6 Otras pruebas

Existen otras pruebas sugeridas para medir la trabajabilidad de las mezclas de concreto autocompactable, a continuación se presentan algunas de ellas.

□ *Anillo J*

Esta prueba es usada para medir la capacidad de paso del concreto. El equipo consiste en una sección rectangular abierta (30 mm x 25 mm) en forma de anillo de acero, con perforaciones para insertar tramos de barras de refuerzo. Las barras pueden tener diferentes diámetros y espaciadas a diferentes intervalos, de acuerdo con las consideraciones normales de refuerzo, tres veces el TMA puede ser apropiado. El diámetro del anillo es de 300 mm y la altura de las barras de 100 mm.



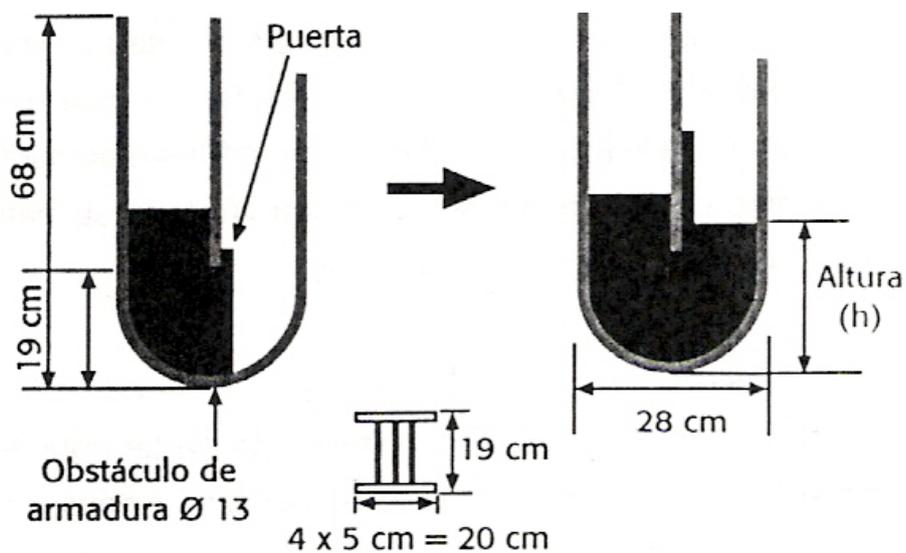
Este anillo puede ser usado en conjunto con el ensayo de Orimet. Esta combinación prueba la capacidad de llenado (Orimet) y la capacidad de paso (Anillo). La combinación de pruebas parece tener gran potencial, sin embargo no hay un acuerdo general de cómo interpretar los resultados.

---

---

□ *Caja U*

La prueba es usada para medir la capacidad de llenado del concreto autocompactable. El aparato consiste en un recipiente en forma de “U” que está dividido por la mitad en dos compartimentos por una compuerta deslizable. Se instalan barras de refuerzo en la puerta deslizable, con diámetro nominal de 13 mm y espaciamiento de 50 mm. Esto crea un claro de 37 mm entre barras. La sección izquierda del recipiente se llena con aproximadamente 20 litros de concreto y se abre la compuerta para que el material fluya hacia la otra sección. Se mide la altura alcanzada por la mezcla en la otra sección.



*Caja U*

---

---

# CAPÍTULO V

---

---

---

---

## **V. CARACTERIZACIÓN DE LOS CONCRETOS**

### **AUTOCOMPACTABLES**

#### *Aspectos generales*

Las propiedades del concreto en estado endurecido son muy importantes en el desempeño de las estructuras durante su vida útil. Para que alcance ese estado de manera eficiente, el concreto debe tener un buen curado.

#### *Curado húmedo*

El aumento de resistencia continuará con la edad mientras exista algo de cemento sin hidratar, mientras el concreto tenga una humedad superior a aproximadamente el 80 por ciento y de que la temperatura del concreto sea favorable. Cuando la humedad dentro del concreto cae por debajo del 80 por ciento o la temperatura del concreto desciende por debajo del punto de congelación del agua, la hidratación y el aumento de resistencia virtualmente se detienen.

Si se vuelve a saturar el concreto luego de un periodo de secado, la hidratación se reanuda y la resistencia vuelve a aumentar. Sin embargo lo mejor es aplicar el curado húmedo al concreto de manera continua desde el momento en que se ha colocado hasta que haya alcanzado la calidad deseada debido a que el concreto es difícil de saturar de nuevo.

#### *Velocidad de secado del concreto*

El concreto ni endurece ni se cura con el secado. El concreto (o de manera precisa, el cemento en él contenido) requiere de humedad para hidratarse y endurecer. El secado del concreto únicamente está relacionado con la hidratación y el endurecimiento de manera indirecta. Al secarse el concreto, deja de ganar resistencia; el hecho que esté seco, no es indicativo que haya experimentado la suficiente hidratación para lograr las

---

---

propiedades físicas deseadas. El conocimiento de la velocidad de secado es útil para comprender las propiedades o la condición física del concreto. Por ejemplo, tal como se mencionó, el concreto debe seguir reteniendo suficiente humedad durante todo el periodo de curado para que el cemento pueda hidratarse. El concreto recién colado tiene agua abundante, pero a medida que el secado progresa desde la superficie hacia el interior, el aumento de resistencia continuará a cada profundidad únicamente mientras la humedad relativa en ese punto se mantenga por encima del 80 por ciento.

Un ejemplo de curado deficiente se tiene en la superficie de un piso de concreto con curado húmedo reducido. Debido a que se seca rápidamente, el concreto de la superficie es débil y se produce descascaramiento de partículas finas provocado por el tránsito. Así mismo, el concreto se contrae al secarse, del mismo modo que lo hacen la madera, el papel o la arcilla. La contracción por secado es una causa fundamental del agrietamiento, y el ancho de las grietas es función del grado de secado.



El tamaño y la forma de un miembro de concreto mantienen una relación importante con la velocidad del secado. Los elementos de concreto de gran área superficial expuesta con relación a su volumen (tales como losas de piso) se secan con mucha mayor rapidez que los grandes volúmenes de concreto con áreas superficiales relativamente pequeñas.

Muchas otras propiedades del concreto endurecido se ven también afectadas por su contenido de humedad; entre ellas se incluye la elasticidad, flujo plástico, valor de aislamiento, resistencia al fuego, resistencia al desgaste, conductividad eléctrica y durabilidad.

---

---

## *Resistencia*

La resistencia a compresión se puede definir como la máxima resistencia medida de un espécimen de concreto (o de mortero) a carga axial. Generalmente se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ), se determina a la edad de 28 días y se le designa con el símbolo  $f_c'$ . Para determinar la resistencia a compresión, se realizan pruebas sobre especímenes de mortero o de concreto; generalmente los ensayos a compresión de mortero se realizan sobre cubos de 5 cm de lado, en tanto que los ensayos a compresión del concreto se efectúan sobre cilindros que miden 15 cm de diámetro y 30 cm de altura.



La resistencia del concreto a la compresión es una propiedad física fundamental, y es frecuentemente empleada en los cálculos para diseño de puentes, edificios y otras estructuras. El concreto de uso más generalizado tiene una resistencia a la compresión entre 200 y 350  $\text{kg}/\text{cm}^2$ . Un concreto de alta resistencia tiene una resistencia a la compresión de cuando menos 400  $\text{kg}/\text{cm}^2$ .



---

---

La resistencia a la flexión del concreto se utiliza generalmente para diseñar pavimentos y otras losas sobre el terreno. La resistencia a la compresión se puede utilizar como un índice de la resistencia a la flexión, una vez que entre ellas se ha establecido una relación empírica para los materiales y el tamaño del elemento en cuestión. La resistencia a la flexión es también llamada *módulo de ruptura* y para un concreto de peso normal a menudo varía de 2.0 a 2.7 veces el valor de la raíz cuadrada de la resistencia a compresión.

El valor de la resistencia a la tensión del concreto determinada en forma indirecta es aproximadamente de 8 a 12 por ciento de su resistencia a compresión y también está en función de la raíz cuadrada de la resistencia a compresión, entre 1.3 y 2.0 veces el valor de ésta.



La resistencia a la torsión para el concreto está relacionada con el módulo de ruptura y con las dimensiones del elemento de concreto. La resistencia al cortante del concreto puede variar desde el 35 al 80 por ciento de la resistencia a compresión.

El módulo de elasticidad, denotado por el símbolo  $E$ , se puede definir como la relación del esfuerzo normal a la deformación correspondiente para esfuerzos de tensión o de compresión por debajo del límite de proporcionalidad de un material. Para concretos de peso normal,  $E$  fluctúa entre 120,000 y 422,000  $\text{kg/cm}^2$ .

Los principales factores que afectan a la resistencia son la relación agua/cemento y la edad o el grado al que haya progresado la hidratación. Por lo tanto a menores relaciones agua/cemento, se tendrán mejores propiedades mecánicas.

---

---

### *Estabilidad volumétrica*

El concreto endurecido, presenta ligeros cambios de volumen debidos a variaciones en la temperatura, en la humedad y en los esfuerzos aplicados. Estos cambios de volumen o de longitud pueden variar de aproximadamente 0.01 hasta un 0.08 por ciento. En el concreto endurecido los cambios de volumen por temperatura son casi los mismos que para el acero, entre 0.000007 y 0.000011 por grado centígrado.

El concreto que se mantiene continuamente húmedo se dilatará ligeramente. Cuando se permite que se seque, el concreto se contrae. El principal factor que influye en la magnitud de la contracción por secado es el contenido de agua del concreto recién mezclado. La contracción por secado aumenta directamente con los incrementos en el contenido de agua. La magnitud de la contracción también depende de otros factores, como las cantidades de agregado empleado, las propiedades del agregado, tamaño y forma de la masa de concreto, temperatura y humedad relativa del medio ambiente, método de curado, grado de hidratación y el tiempo. El contenido de cemento tiene un efecto mínimo a nulo sobre la contracción por secado para contenidos de cemento menores a 450 kg/m<sup>3</sup>.

Cuando el concreto se somete a esfuerzos, se deforma elásticamente. Los esfuerzos sostenidos resultan en una deformación adicional llamada fluencia. La velocidad de la fluencia (deformación por unidad de tiempo) disminuye con el tiempo.

### *Agrietamiento*

Las dos causas básicas por las que se producen grietas en el concreto son esfuerzos debidos a cargas aplicadas y esfuerzos debidos a contracción por secado o a cambios de temperatura en condiciones de restricción.

La contracción por secado es una propiedad inherente e inevitable del concreto, por lo que se utiliza acero de refuerzo colocado en una posición adecuada para reducir los anchos de grieta, o bien juntas que predeterminen y controlen la ubicación de las grietas. Los esfuerzos provocados por las fluctuaciones de temperatura pueden causar agrietamientos, especialmente a edades tempranas.

Las grietas por contracción del concreto ocurren debido a restricciones. Si no existe una causa que impida el movimiento del concreto y ocurren contracciones, el concreto no se agrieta. La contracción por secado siempre es mayor cerca de la superficie del concreto; las porciones húmedas interiores restringen al concreto en las cercanías de la superficie, con lo que se pueden producir agrietamientos.

## 5.1 RESISTENCIA A COMPRESIÓN

Los valores de resistencia a compresión obtenidos en este trabajo se presentan a continuación, de acuerdo con los tamaños de agregado usados, los contenidos de cemento y edad de ensaye.

*Resistencia a compresión a 7 días*

| <b>TMA 19 mm (3/4")</b> |                 |  |                              |   |  |                |
|-------------------------|-----------------|--|------------------------------|---|--|----------------|
| <b>Bachada</b>          | <b>Cilindro</b> | <b>Contenido de cemento (kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Edad de ensaye (días)</b> | <b>f'<sub>c</sub> (kg/cm<sup>2</sup>)</b> | <b>Peso Volumétrico (kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Aditivo</b> |
| 1                       | 7               | 350  | 7                            | 273                                       | 2,248                                      | SF-AMV         |
| 2                       | 4               | 350  | 7                            | 228                                       | 2,247                                      | SF-AMV         |
| 3                       | 5               | 350  | 7                            | 207                                       | 2,235                                      | SF-AMV         |
| <b>PROMEDIO</b>         |                 |  |                              | <b>236</b>                                | <b>2,243</b>                               |                |
| 1                       | 6               | 400  | 7                            | 334                                       | 2,246                                      | SF-AMV         |
| 2                       | 3               | 400  | 7                            | 287                                       | 2,175                                      | SF-AMV         |
| 3                       | 1               | 400  | 7                            | 287                                       | 2,164                                      | SF-AMV         |
| <b>PROMEDIO</b>         |                 |  |                              | <b>303</b>                                | <b>2,195</b>                               |                |
| 1                       | 4               | 450  | 6*                           | 321                                       | 2,227                                      | SF-AMV         |
| 2                       | 3               | 450  | 6*                           | 300                                       | 2,251                                      | SF-AMV         |
| 3                       | 4               | 450  | 6*                           | 345                                       | 2,264                                      | SF-AMV         |
| <b>PROMEDIO</b>         |                 |  |                              | <b>322</b>                                | <b>2,247</b>                               |                |

*\*Se ensayó a 6 días por cuestiones laborales.*

*SF: superfluidificante*

*AMV: agente modificador de viscosidad*

*Resistencia a compresión a 28 días*

| <b>TMA 19 mm (3/4")</b> |                 |  |                              |   |  |                |
|-------------------------|-----------------|--|------------------------------|---|--|----------------|
| <b>Bachada</b>          | <b>Cilindro</b> | <b>Contenido de cemento (kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Edad de ensaye (días)</b> | <b>f'<sub>c</sub> (kg/cm<sup>2</sup>)</b> | <b>Peso Volumétrico (kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Aditivo</b> |
| 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         |
| <b>PROMEDIO</b>         |                 |  |                              | <b>340</b>                                | <b>2,237</b>                               |                |
|                         |                 |  |                              |   |  |                |
| 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         |
| <b>PROMEDIO</b>         |                 |  |                              | <b>352</b>                                | <b>2,219</b>                               |                |
|                         |                 |  |                              |   |  |                |
| 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         |
| <b>PROMEDIO</b>         |                 |  |                              | <b>424</b>                                | <b>2219</b>                                |                |

*Resistencia a compresión a 90 días*

| <b>TMA 19 mm (3/4")</b> |                 |  |                              |   |  |                |
|-------------------------|-----------------|--|------------------------------|---|--|----------------|
| <b>Bachada</b>          | <b>Cilindro</b> | <b>Contenido de cemento (kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Edad de ensaye (días)</b> | <b>f'<sub>c</sub> (kg/cm<sup>2</sup>)</b> | <b>Peso Volumétrico (kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Aditivo</b> |
| 2                       | 6               | 350  | 90                           | 433                                       | 2,285                                      | SF-AMV         |
| 3                       | 2               | 350  | 90                           | 419                                       | 2,236                                      | SF-AMV         |
| <b>PROMEDIO</b>         |                 |  |                              | <b>426</b>                                | <b>2,260</b>                               |                |
|                         |                 |  |                              |   |  |                |
| 3                       | 8               | 400  | 90                           | 432                                       | 2,193                                      | SF-AMV         |
| 1                       | 2               | 400  | 90                           | 499                                       | 2,286                                      | SF-AMV         |
| <b>PROMEDIO</b>         |                 |  |                              | <b>465</b>                                | <b>2,240</b>                               |                |
|                         |                 |  |                              |   |  |                |
| 3                       | 5               | 450  | 90                           | 490                                       | 2,222                                      | SF-AMV         |
| 1                       | 3               | 450  | 90                           | 491                                       | 2,275                                      | SF-AMV         |
| 1                       | 5               | 450  | 90                           | 482                                       | 2,246                                      | SF-AMV         |
| 3                       | 7               | 450  | 90                           | 509                                       | 2,250                                      | SF-AMV         |
| <b>PROMEDIO</b>         |                 |  |                              | <b>493</b>                                | <b>2,248</b>                               |                |

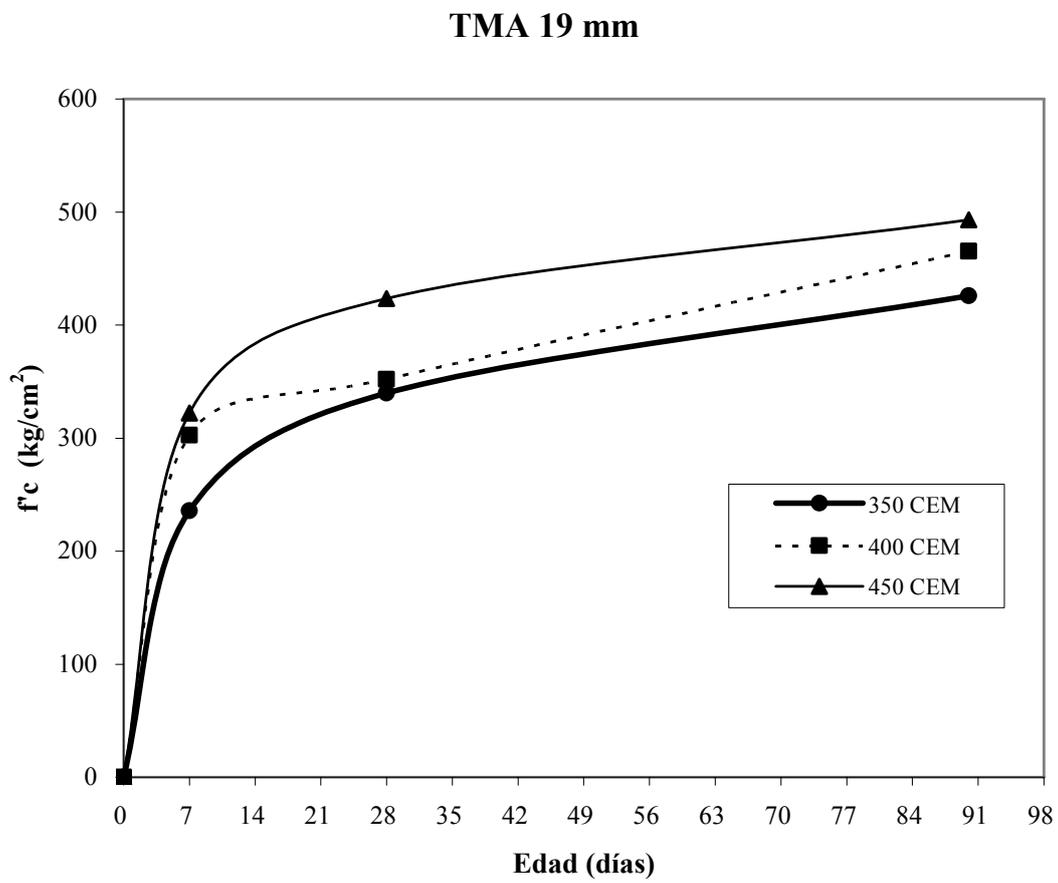
Como se puede observar en las tablas anteriores, para el TMA de 19 mm, la resistencia a compresión va en proporción con los contenidos de cemento, con excepción de la resistencia a 28 días del contenido de cemento de 400 kg/m<sup>3</sup>. La variación de la resistencia a compresión con la edad para éste tamaño de agregado se puede apreciar en la figura 5.1.

Respecto al peso volumétrico del concreto, los valores son muy aproximados para todos los contenidos de cemento.



*Resistencia a compresión a 7 días*

| <b>TMA 9.5 mm (3/8")</b> |                 |  |                              |   |  |                |
|--------------------------|-----------------|--|------------------------------|---|--|----------------|
| <b>Bachada</b>           | <b>Cilindro</b> | <b>Contenido de cemento (kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Edad de ensaye (días)</b> | <b>f'<sub>c</sub> (kg/cm<sup>2</sup>)</b> | <b>Peso Volumétrico (kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Aditivo</b> |
| 1                        | 4               | 350  | 7                            | 295                                       | 2,237                                      | SF             |
| 2                        | 1               | 350  | 7                            | 290                                       | 2,241                                      | SF             |
| 3                        | 3               | 350  | 7                            | 300                                       | 2,278                                      | SF             |
| <b>PROMEDIO</b>          |                 |  |                              | <b>295</b>                                | <b>2,252</b>                               |                |
| 3                        | 1               | 400  | 7                            | 315                                       | 2,211                                      | SF             |
| 1                        | 3               | 400  | 7                            | 323                                       | 2,224                                      | SF             |
| <b>PROMEDIO</b>          |                 |  |                              | <b>319</b>                                | <b>2,217</b>                               |                |
| 3                        | 7               | 450  | 7                            | 416                                       | 2,239                                      | SF             |
| 1                        | 2               | 450  | 7                            | 384                                       | 2,231                                      | SF             |
| 1                        | 6               | 450  | 7                            | 394                                       | 2,225                                      | SF             |
| 2                        | 1               | 450  | 7                            | 415                                       | 2,259                                      | SF             |
| <b>PROMEDIO</b>          |                 |  |                              | <b>402</b>                                | <b>2,238</b>                               |                |



*Fig 5.1 Variación de la relación resistencia a compresión con la edad.*

*Resistencia a compresión a 28 días*

| TMA 9.5 mm (3/8") |          |   |                       |                           |                                       |         |
|-------------------|----------|---|-----------------------|---------------------------|---------------------------------------|---------|
| Bachada           | Cilindro | Contenido de cemento (kg/m <sup>3</sup> ) | Edad de ensaye (días) | f'c (kg/cm <sup>2</sup> ) | Peso Volumétrico (kg/m <sup>3</sup> ) | 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      |
| <b>PROMEDIO</b>   |          |   |                       | <b>355</b>                | <b>2,251</b>                          |         |
|                   |          |   |                       |                           |                                       |         |
| 2                 | 3        | 400                                       | 28                    | 399                       | 2,231                                 | SF      |
| 3                 | 7        | 400                                       | 28                    | 317*                      | 2,226                                 | SF      |
| 2                 | 9        | 400                                       | 28                    | 401                       | 2,222                                 | SF      |
| <b>PROMEDIO</b>   |          |   |                       | <b>372</b>                | <b>2,226</b>                          |         |
|                   |          |   |                       |                           |                                       |         |
| 1                 | 5        | 450                                       | 28                    | 421                       | 2,189                                 | SF      |
| 2                 | 4        | 450                                       | 28                    | 481                       | 2,240                                 | SF      |
| 3                 | 1        | 450                                       | 28                    | 478                       | 2,213                                 | SF      |
| <b>PROMEDIO</b>   |          |   |                       | <b>460</b>                | <b>2,214</b>                          |         |

*Resistencia a compresión a 90 días*

| TMA 9.5 mm (3/8") |          |   |                       |                           |                                       |         |
|-------------------|----------|---|-----------------------|---------------------------|---------------------------------------|---------|
| Bachada           | Cilindro | Contenido de cemento (kg/m <sup>3</sup> ) | Edad de ensaye (días) | f'c (kg/cm <sup>2</sup> ) | Peso Volumétrico (kg/m <sup>3</sup> ) | Aditivo |
| 1                 | 2        | 350                                       | 90                    | 436                       | 2,240                                 | SF      |
| 2                 | 5        | 350                                       | 90                    | 428                       | 2,267                                 | SF      |
| 2                 | 3        | 350                                       | 90                    | 414                       | 2,221                                 | SF      |
| 3                 | 6        | 350                                       | 90                    | 453                       | 2,254                                 | SF      |
| 1                 | 1        | 350                                       | 90                    | 437                       | 2,261                                 | SF      |
| <b>PROMEDIO</b>   |          |   |                       | <b>433</b>                | <b>2,248</b>                          |         |
|                   |          |   |                       |                           |                                       |         |
| 3                 | 3        | 400                                       | 90                    | 492                       | 2,298                                 | SF      |
| 3                 | 9        | 400                                       | 90                    | 415                       | 2,292                                 | SF      |
| <b>PROMEDIO</b>   |          |   |                       | <b>454</b>                | <b>2,295</b>                          |         |
|                   |          |   |                       |                           |                                       |         |
| 3                 | 4        | 450                                       | 90                    | 360*                      | 2,270                                 | SF      |
| 1                 | 3        | 450                                       | 90                    | 332*                      | 2,281                                 | SF      |
| 2                 | 6        | 450                                       | 90                    | 487                       | 2,216                                 | SF      |
| <b>PROMEDIO</b>   |          |   |                       | <b>487</b>                | <b>2,256</b>                          |         |

**\*Datos no confiables, no promedian.**

Para el TMA de 9.5 mm, de las tablas anteriores, se observa que no hay un incremento sensible en la resistencia de 28 a 90 días para los contenidos de cemento de 400 y 450 kg/m<sup>3</sup>, lo cual se atribuye a una menor eficiencia del cemento para esos niveles de consumo. La variación de la resistencia a compresión con la edad para éste tamaño de agregado se puede apreciar en la figura 5.2. En general, los resultados de resistencia a compresión están de acuerdo al contenido de cemento.



Como se mostró, se hicieron pruebas de resistencia a compresión a 7, 28 y 90 días; con los resultados alcanzados se determinaron los incrementos de resistencia respecto a la de 28 días (fig. 5.3). La expresión encontrada para estimar la resistencia probable del concreto a cualquier edad respecto a la de 28 días resulta ser:

$$\text{TMA 19 mm} \quad (f_c)_t = \frac{t}{4.43 + 0.83t} (f'_c)_{28} \quad (\text{kg/cm}^2)$$

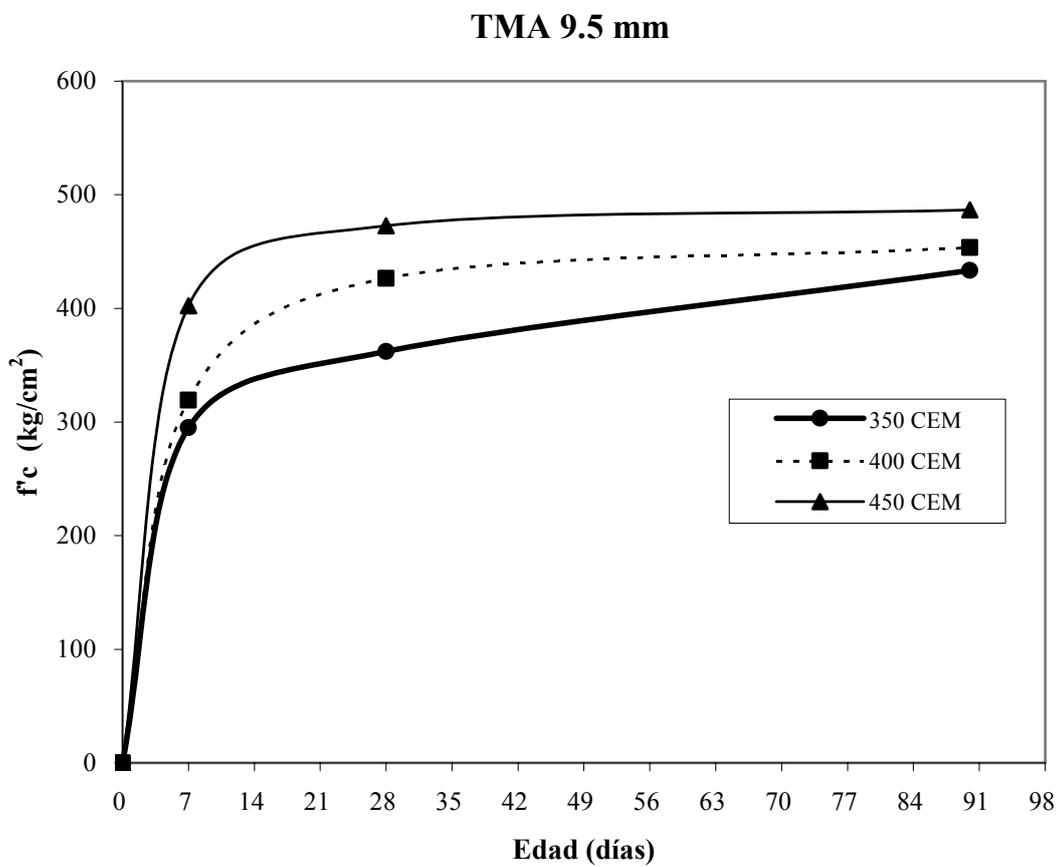
$$\text{TMA 9.5 mm} \quad (f_c)_t = \frac{t}{2.81 + 0.89t} (f'_c)_{28} \quad (\text{kg/cm}^2)$$

donde:

$(f_c)_t$  es la resistencia a compresión del concreto a  $t$  días después del colado, en kg/cm<sup>2</sup>.

$t$  es la edad en días a la que se desea estimar la resistencia

$(f'_c)_{28}$  resistencia a compresión del concreto a 28 días después del colado, en kg/cm<sup>2</sup>.



*Fig 5.2 Variación de la relación resistencia a compresión con la edad.*

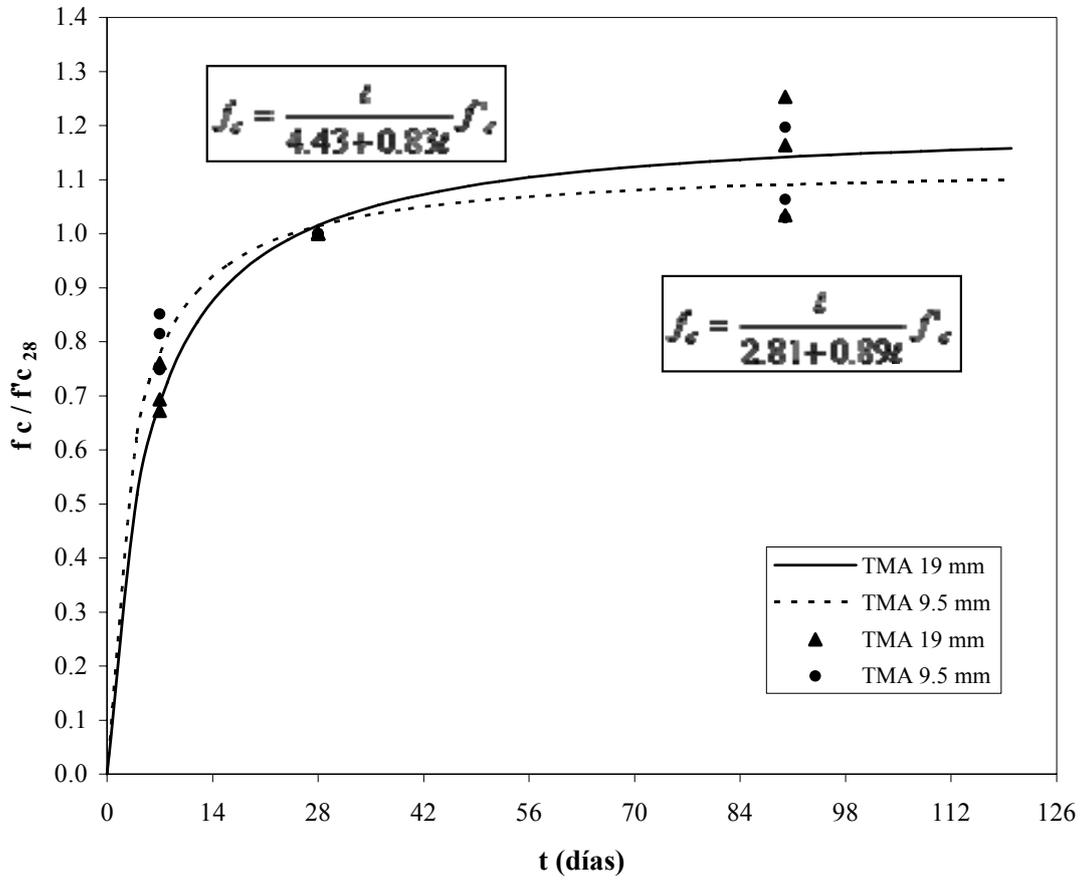


Fig 5.3 Variación de la relación resistencia a compresión a  $t$  días a la de 28 días con la edad.

---

---

En la figura 5.4 se puede ver la variación de la resistencia a compresión con respecto a la relación agua/cemento y en la cual se observa un comportamiento lógico, al disminuir la resistencia a compresión cuando la relación agua/cemento aumenta.

La variación de la eficiencia del cemento respecto a la relación agua/ cemento se observa en la figura 5.5.

## **5.2 RESISTENCIA A TENSIÓN**

Los valores de resistencia a tensión se presentan en las siguientes tablas, de acuerdo con los tamaños de agregado utilizados y contenidos de cemento. También, se divide en resistencia a tensión por flexión e indirecta, a la edad de 28 días.

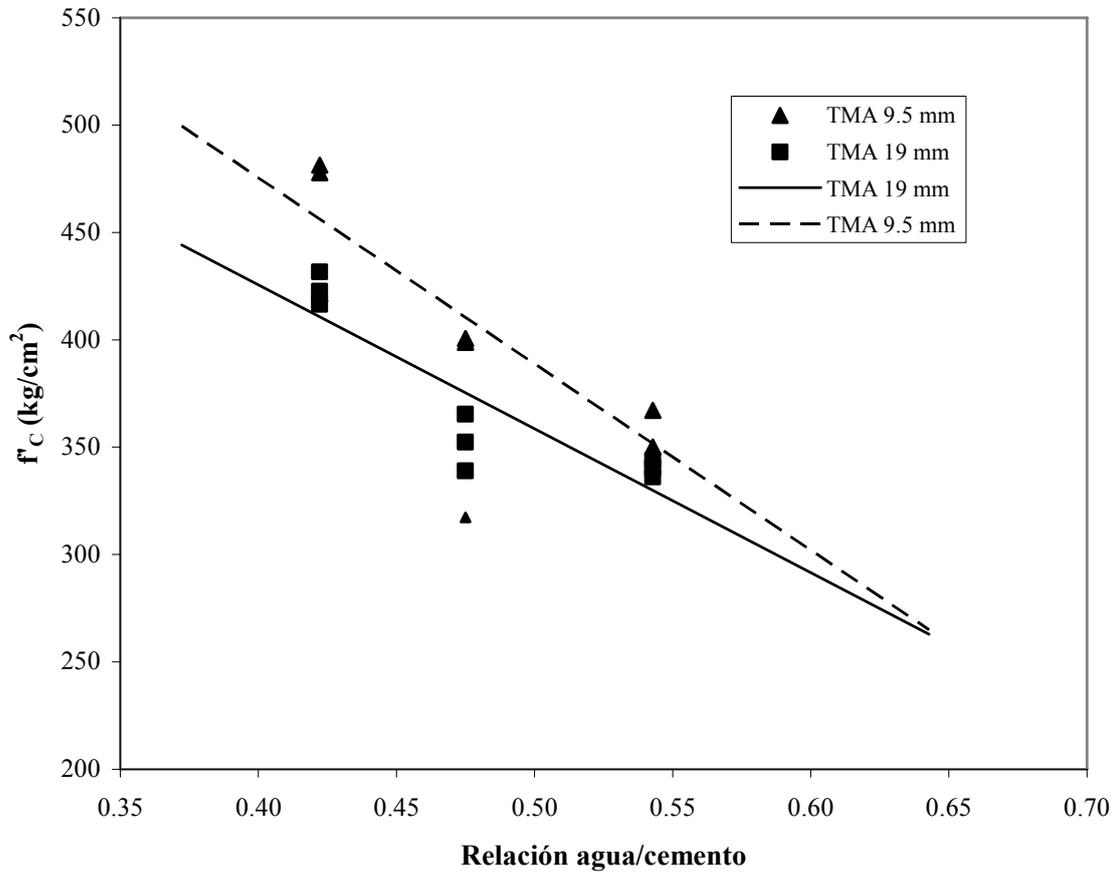
### **5.2.1 Flexión**

La resistencia a tensión por flexión se calcula por medio del ensaye de vigas de 15x15x60 cm.

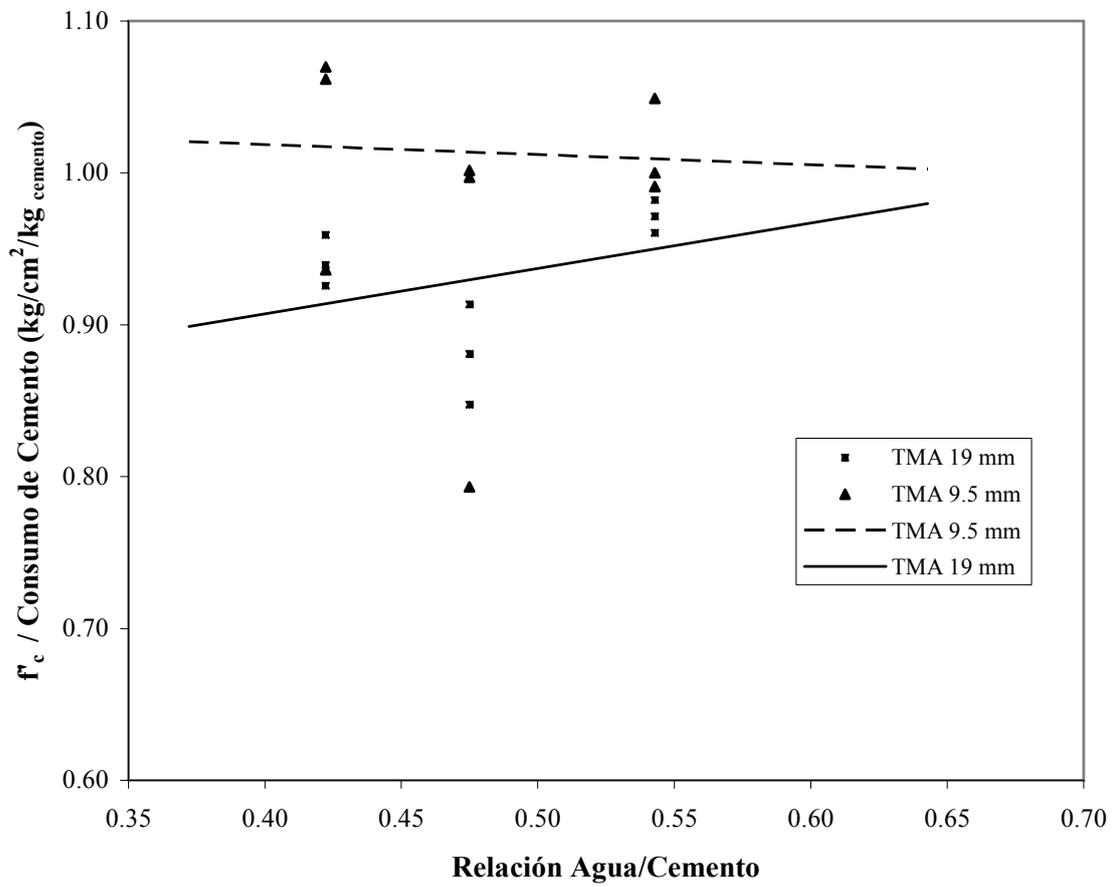
En la imagen siguiente se aprecia el ensaye a tensión por flexión.



*Ensaye de tensión por flexión*



*Fig 5.4 Variación de la resistencia a compresión con la relación agua/cemento.*



*Fig 5.5 Variación de la eficiencia del cemento con la relación agua/cemento.*

---

---

*Resistencia a tensión por flexión a 28 días*

| <b>TMA 19 mm</b> |             |                                  |                                 |  |                |
|------------------|-------------|----------------------------------|---------------------------------|--|----------------|
| <b>Bachada</b>   | <b>Viga</b> | <b>Contenido de cemento (kg)</b> | <b>f' f (kg/cm<sup>2</sup>)</b> | <b>Peso Volumétrico (kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Aditivo</b> |
| 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         |
| <b>Promedio</b>  |             |                                  | <b>40.25</b>                    | <b>2,251</b>                               |                |
|                  |             |                                  |                                 |  |                |
| 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         |
| <b>Promedio</b>  |             |                                  | <b>45.60</b>                    | <b>2,203</b>                               |                |
|                  |             |                                  |                                 |  |                |
| 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         |
| <b>Promedio</b>  |             |                                  | <b>44.98</b>                    | <b>2,215</b>                               |                |

Para el TMA de 19 mm, los valores de flexión para el contenido de 450 kg resultaron bajos en comparación a los de los otros contenidos de cemento. Lo anterior, puede indicar que se alcanzó la resistencia del agregado dejando en segundo término al contenido de cemento.

Respecto al peso volumétrico, los valores obtenidos son aproximadamente iguales en todos los casos, lo cual indica uniformidad en las mezclas.



*Prueba de tensión por flexión*

---

---

*Resistencia a tensión por flexión a 28 días*

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

En el caso de el TMA de 9.5 mm, los resultados para los tres contenidos de cemento fueron similares, por lo que podría señalarse que un contenido de cemento mayor no mejora la resistencia a flexión del concreto. En este caso, al igual que el otro tamaño de agregado, se debió a que el agregado alcanzo su resistencia y falló, de ahí que los resultados fueran similares.

Los valores de peso volumétrico obtenidos fueron muy semejantes en todos los casos, para el tamaño de agregado de 9.5 mm.



*Prueba de tensión por flexión*

---

---

Es usual expresar la resistencia a tensión del concreto en función de la raíz cuadrada de la resistencia a compresión (fig.5.6), con los resultados de las pruebas realizadas se encontraron las siguientes relaciones:

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

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

donde:

$f_f$  es la resistencia a tensión por flexión del concreto, en  $\text{kg/cm}^2$ .

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

### 5.2.2 Indirecta

La resistencia a tensión indirecta del concreto se calcula por medio del ensaye de cilindros, similares a los de resistencia a compresión, pero colocados en forma horizontal; a este ensaye se le conoce como prueba “brasileña”.



Los resultados de estas pruebas se muestran a continuación y se presentan de acuerdo al tamaño de agregado y contenidos de cemento, a la edad de 28 días.

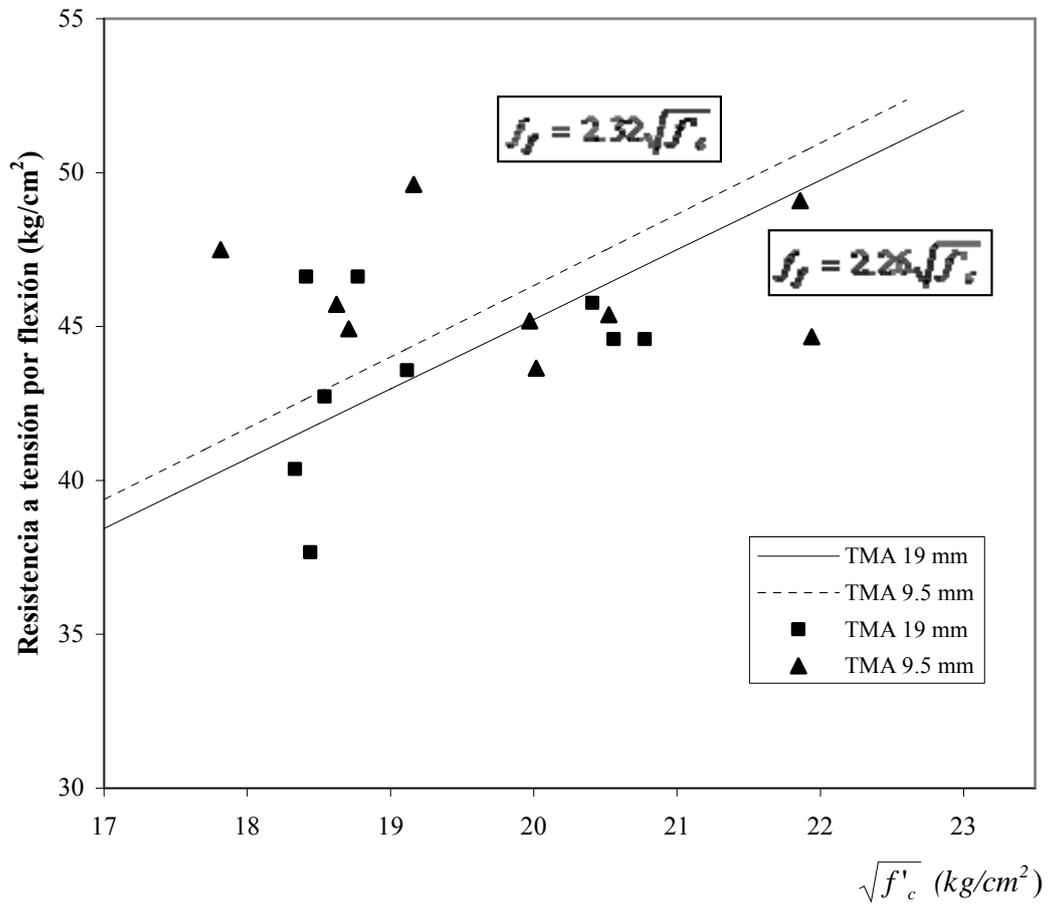


Fig 5.6 Variación de la resistencia a tensión por flexión con la raíz cuadrada de la resistencia a compresión.

**Resistencia a tensión indirecta a 28 días**

| <b>TMA 19 mm</b> |                 |  |  |  |                |
|------------------|-----------------|--|--|--|----------------|
| <b>Bachada</b>   | <b>Cilindro</b> | <b>Contenido de cemento (kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>f'<sub>tb</sub> (kg/cm<sup>2</sup>)</b> | <b>Peso Volumétrico (kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Aditivo</b> |
| 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         |
| <b>Promedio</b>  |                 |  | <b>29.30</b>                               | <b>2,290</b>                               |                |
| 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         |
| <b>Promedio</b>  |                 |  | <b>30.35</b>                               | <b>2,210</b>                               |                |
| 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         |
| <b>Promedio</b>  |                 |  | <b>33.60</b>                               | <b>2,251</b>                               |                |

En los resultados de la tabla anterior, que corresponde al TMA de 19 mm, se observa que la resistencia a tensión indirecta aumenta con el contenido de cemento, aunque los incrementos son pequeños.



**Resistencia a tensión indirecta a 28 días**

| <b>TMA 9.5 mm</b> |                 |  |  |  |                |
|-------------------|-----------------|--|--|--|----------------|
| <b>Bachada</b>    | <b>Cilindro</b> | <b>Contenido de cemento (kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>f'<sub>tb</sub> (kg/cm<sup>2</sup>)</b> | <b>Peso Volumétrico (kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Aditivo</b> |
| 1                 | 6               | 350  | 33.60                                      | 2,225                                      | SF             |
| 2                 | 2               | 350  | 34.42                                      | 2,267                                      | SF             |
| 3                 | 1               | 350  | 35.47                                      | 2,264                                      | SF             |
| <b>Promedio</b>   |                 |  | <b>34.50</b>                               | <b>2,252</b>                               |                |
|                   |                 |  |  |  |                |
| 1                 | 5               | 400  | 35.08                                      | 2,251                                      | SF             |
| 2                 | 4               | 400  | 34.50                                      | 2,280                                      | SF             |
| 3                 | 2               | 400  | 37.86                                      | 2,278                                      | SF             |
| <b>Promedio</b>   |                 |  | <b>35.82</b>                               | <b>2,270</b>                               |                |
|                   |                 |  |  |  |                |
| 1                 | 1               | 450  | 43.30                                      | 2,260                                      | SF             |
| 2                 | 5               | 450  | 28.23                                      | 2,269                                      | SF             |
| 3                 | 2               | 450  | 39.52                                      | 2,259                                      | SF             |
| <b>Promedio</b>   |                 |  | <b>37.02</b>                               | <b>2,263</b>                               |                |

Los valores de tensión indirecta para el TMA de 9.5, de igual manera que para el caso anterior, aumentan con el contenido de cemento, pero los incrementos son pequeños, por lo que se podría concluir que la cantidad de cemento no mejora de manera importante este parámetro.

La expresión que permite relacionar la resistencia a tensión indirecta con la raíz cuadrada de la resistencia a compresión (fig. 5.7) es la siguiente:

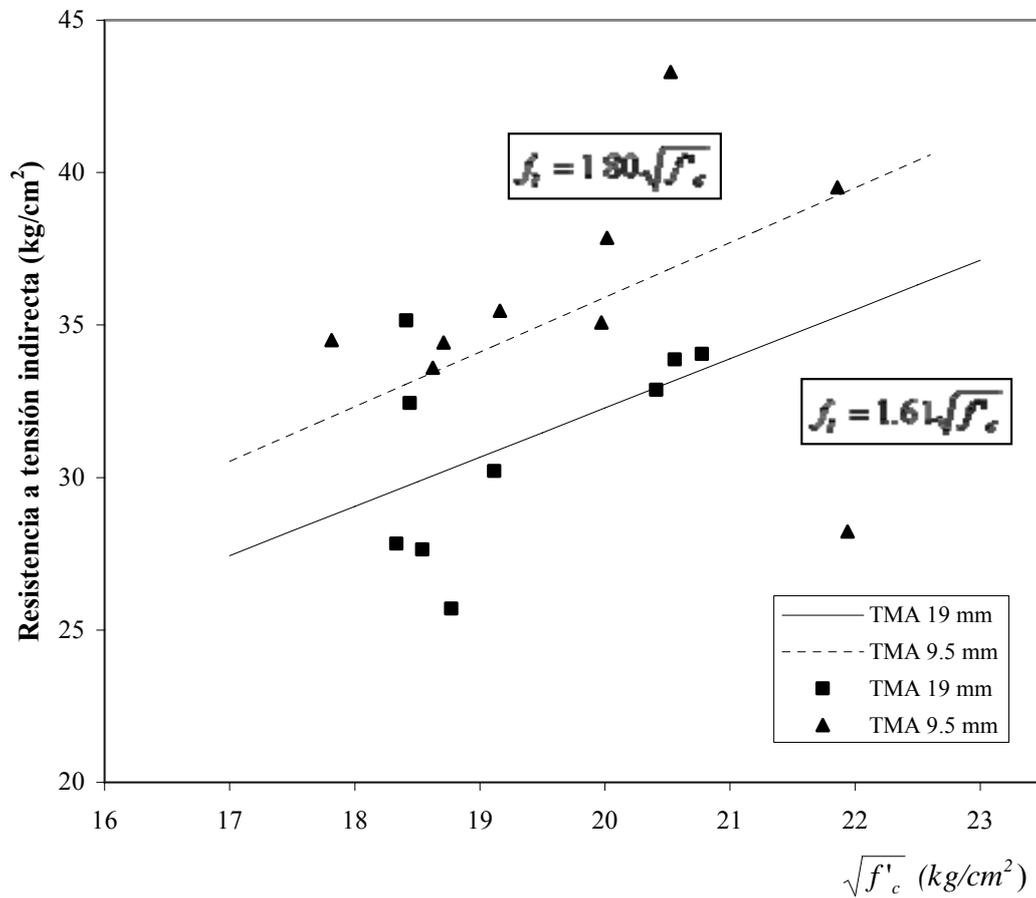
$$\text{TMA 19 mm} \quad f_t = 1.61\sqrt{f'_c} \quad (\text{kg/cm}^2)$$

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

donde:

$f_t$  es la resistencia a tensión indirecta del concreto, en kg/cm<sup>2</sup>.

$f'_c$  es la resistencia a compresión del concreto a 28 días, en kg /cm<sup>2</sup>.



*Fig 5.7 Variación de la resistencia a tensión indirecta con la raíz cuadrada de la resistencia a compresión.*

---

---

Algo importante que se puede observar en esta prueba es la homogeneidad de las mezclas, es decir, se puede observar uniformidad en la distribución de los agregados.

En las siguientes fotografías podemos observar que los agregados están distribuidos homogéneamente en todo el elemento, para los dos tamaños de agregado utilizados en este trabajo, sin que haya evidencia de segregación.

**TMA 19 mm**



**TMA 9.5 mm**



### 5.3 MÓDULO DE ELASTICIDAD EN COMPRESIÓN

Los resultados de la prueba de módulo de elasticidad se muestran a continuación de acuerdo con el tamaño de agregado, contenido de cemento y edad de ensaye.



#### *Módulo de elasticidad a 28 días*

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

---

---

*Módulo de elasticidad a 90 días*

| <b>TMA 19 mm</b> |                |  |  |                            |  |
|------------------|----------------|--|--|----------------------------|--|
| <b>Cilindro</b>  | <b>Bachada</b> | <b>Contenido de cemento (kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Módulo de Elasticidad (kg/cm<sup>2</sup>)</b> | <b>Relación de Poisson</b> | <b>f<sub>c</sub> (kg/cm<sup>2</sup>)</b> |
| 4                | 1              | 350  | 273,101  | 0.317                      | 414                                      |
| 6                | 1              | 350  | 291,255  | 0.350                      | 381                                      |
| 3                | 3              | 350  | 285,914  | 0.310                      | 405                                      |
| <b>Prom</b>      |                |  | <b>283,423</b>                                   | <b>0.326</b>               | <b>400</b>                               |
| 4                | 2              | 400  | 280,650  | 0.325                      | 494                                      |
| 9                | 3              | 400  | 266,437  | 0.313                      | 437                                      |
| <b>Prom</b>      |                |  | <b>273,544</b>                                   | <b>0.319</b>               | <b>466</b>                               |
| 5                | 2              | 450  | 296,503  | 0.324                      | 527                                      |
| 6                | 2              | 450  | 293,972  | 0.316                      | 501                                      |
| <b>Prom</b>      |                |  | <b>295,238</b>                                   | <b>0.320</b>               | <b>514</b>                               |

Para el TMA de 19 mm a las edades de 28 y 90 días, se observa que el concreto con contenido de cemento de 400 kg/m<sup>3</sup> muestra valores de módulo de elasticidad y resistencia a compresión relativamente bajos, lo cual es probable se deba a la cantidad de agua adicional agregada a la mezcla. Respecto a los valores de la relación de Poisson se observa uniformidad en los resultados para los distintos contenidos de cemento.



*Prueba de Módulo de elasticidad y Relación de Poisson*

*Módulo de elasticidad a 28 días*

| <b>TMA 9.5 mm</b> |                |  |  |                            |                                |
|-------------------|----------------|--|--|----------------------------|--------------------------------|
| <b>Cilindro</b>   | <b>Bachada</b> | <b>Contenido de cemento (kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Módulo de Elasticidad (kg/cm<sup>2</sup>)</b> | <b>Relación de Poisson</b> | <b>f'c (kg/cm<sup>2</sup>)</b> |
| 3                 | 1              | 350  | 251,292  | 0.306                      | 366                            |
| 7                 | 2              | 350  | 247,701  | 0.281                      | 357                            |
| 2                 | 3              | 350  | 247,144  | 0.325                      | 364                            |
| <b>Prom</b>       |                |  | <b>248,712</b>                                   | <b>0.304</b>               | <b>362</b>                     |
| 8                 | 3              | 400  | 264,282  | 0.318                      | 438                            |
| 4                 | 3              | 400  | 262,644  | 0.319                      | 426                            |
| 1                 | 2              | 400  | 250,703  | 0.325                      | 416                            |
| <b>Prom</b>       |                |  | <b>259,210</b>                                   | <b>0.321</b>               | <b>427</b>                     |
| 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                          |
| <b>Prom</b>       |                |  | <b>229,414</b>                                   | <b>0.275</b>               | <b>473</b>                     |

\* Resultados no confiables debido a falla técnica con el compresómetro.



*Equipo para prueba de módulo de elasticidad y Relación de Poisson*

---

---

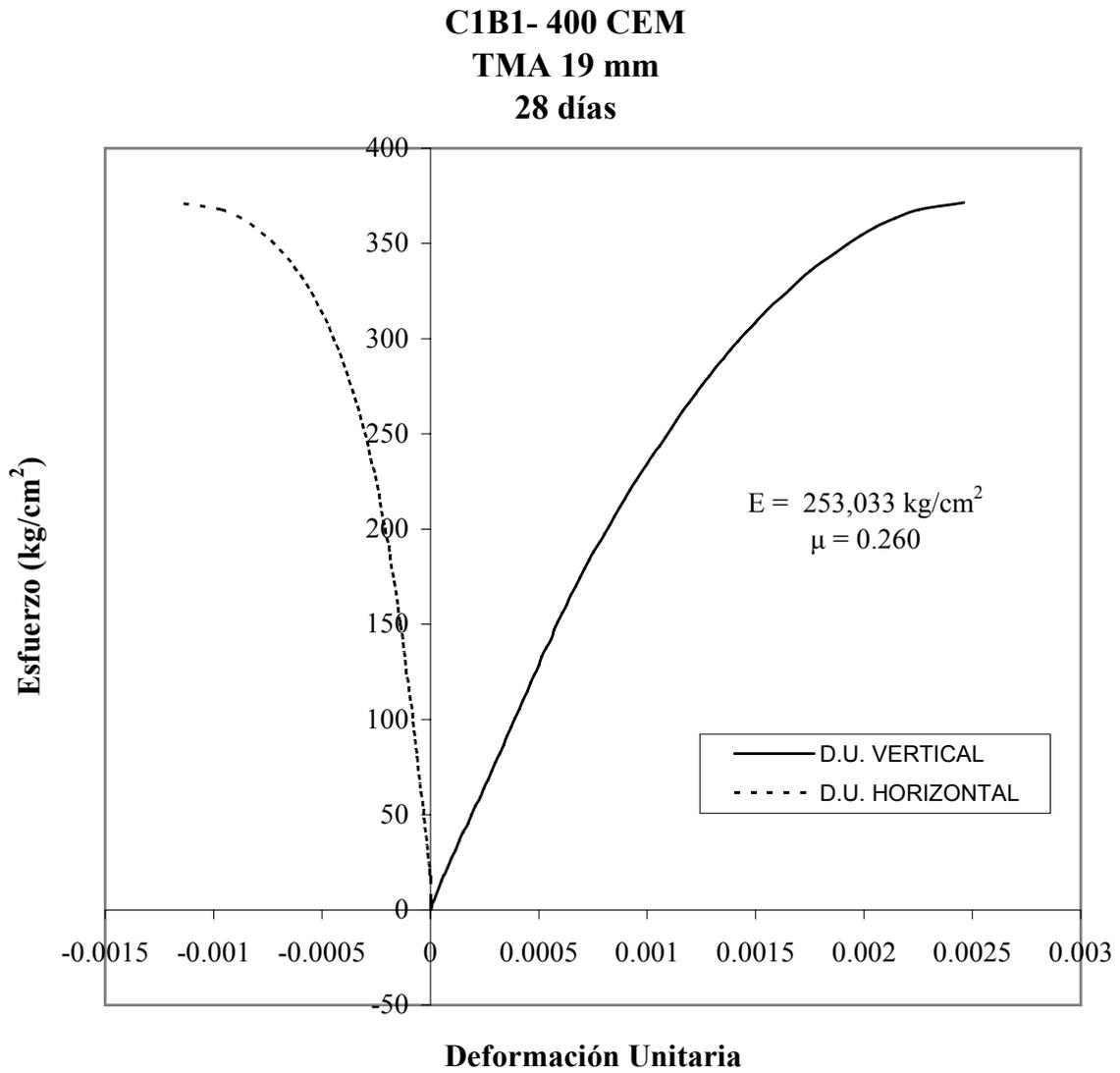
*Módulo de elasticidad a 90 días*

| <b>TMA 9.5 mm</b> |                |  |  |                            |                                |
|-------------------|----------------|--|--|----------------------------|--------------------------------|
| <b>Cilindro</b>   | <b>Bachada</b> | <b>Contenido de cemento (kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>Módulo de Elasticidad (kg/cm<sup>2</sup>)</b> | <b>Relación de Poisson</b> | <b>f'c (kg/cm<sup>2</sup>)</b> |
| 5                 | 1              | 350  | 283,268  | 0.358                      | 427                            |
| 4                 | 2              | 350  | 283,559  | 0.332                      | 439                            |
| 4                 | 3              | 350  | 264,038  | 0.277                      | 391                            |
| <b>Prom</b>       |                |  | <b>276,955</b>                                   | <b>0.322</b>               | <b>419</b>                     |
| 2                 | 2              | 400  | 272,321  | 0.302                      | 362                            |
| 5                 | 3              | 400  | 294,336  | 0.321                      | 481                            |
| <b>Prom</b>       |                |  | <b>283,329</b>                                   | <b>0.312</b>               | <b>422</b>                     |
| 4                 | 1              | 450  | 297,053  | 0.357                      | 547                            |
| 2                 | 2              | 450  | 296,664  | 0.317                      | 431                            |
| 5                 | 3              | 450  | 283,703  | 0.362                      | 532                            |
| <b>Prom</b>       |                |  | <b>292,473</b>                                   | <b>0.345</b>               | <b>504</b>                     |

Respecto a los resultados del TMA 9.5 mm a 28 días, los valores obtenidos de módulo de elasticidad para el contenido de cemento de 450 kg/m<sup>3</sup> muestran resultados bajos debido a una falla en el equipo de ensaye, por lo que no se consideran significativos. En lo que se refiere a la resistencia a compresión, los valores crecen en proporción a los contenidos de cemento.

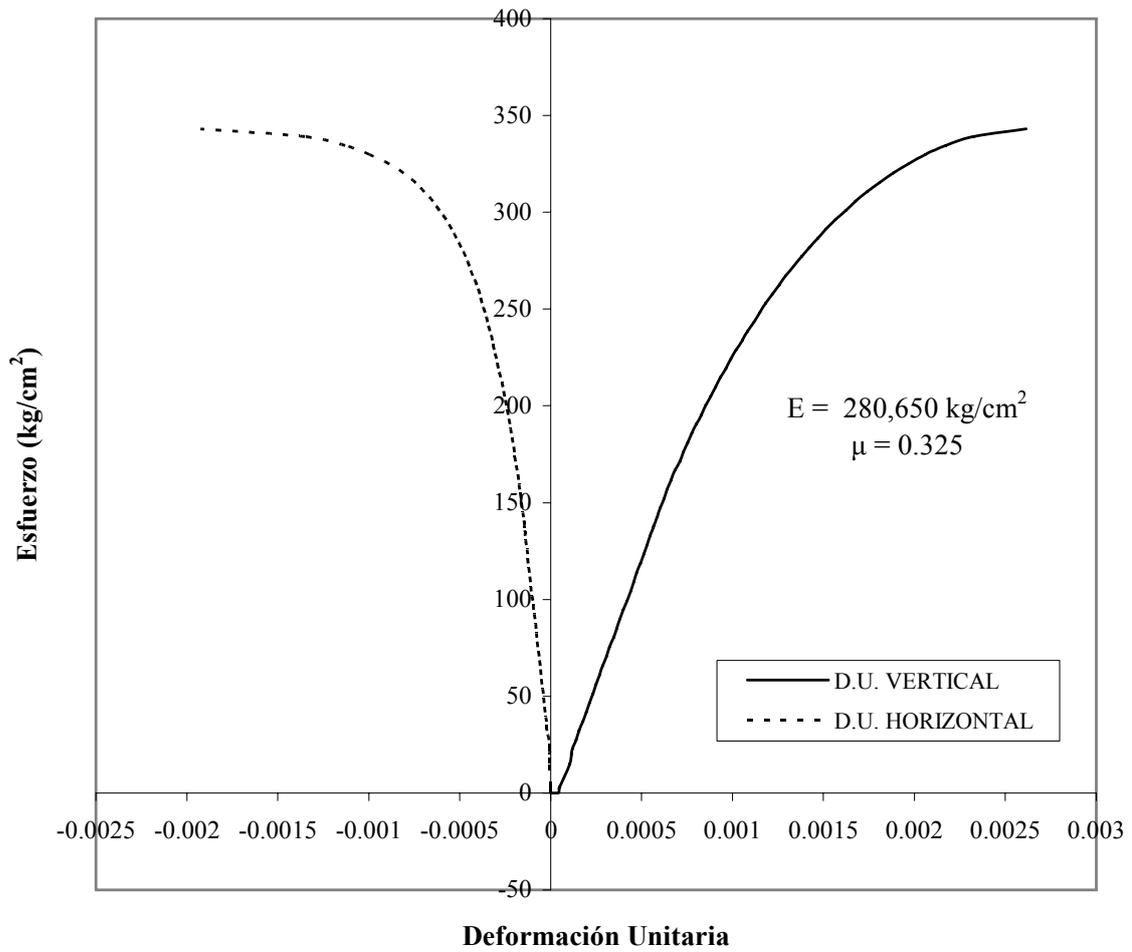
En los resultados del TMA 9.5 mm a la edad de 90 días, se observa un aumento proporcional en el módulo de elasticidad, así como en los valores de la relación de Poisson, conforme los consumos de cemento crecen. Sin embargo, la resistencia a compresión para el contenido de cemento de 400 kg/m<sup>3</sup> tuvo una ligera baja, probablemente debido a una mayor relación agua/cemento.

Algunos resultados de la prueba de módulo de elasticidad y relación de Poisson se muestran en las figuras 5.8 a 5.11.



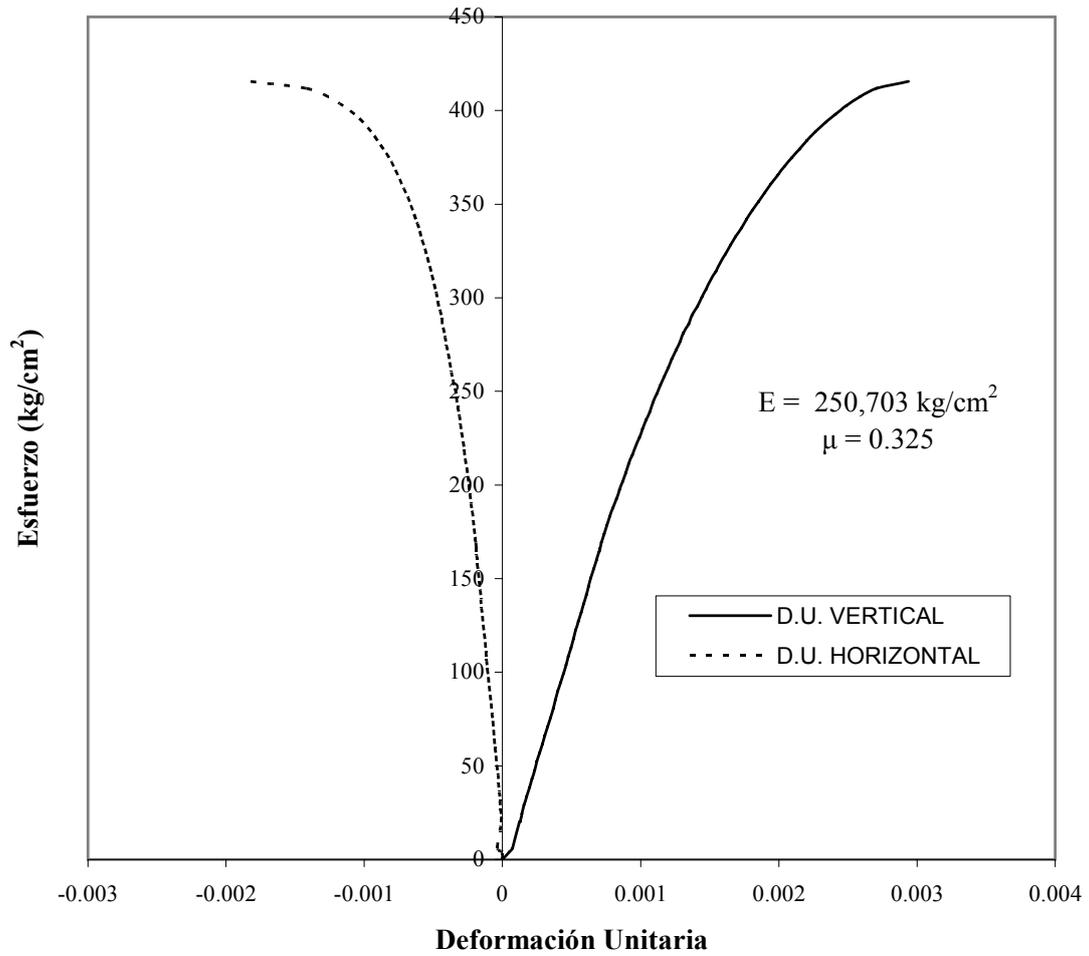
*Fig. 5.8 Variación del esfuerzo con la deformación unitaria*

**C4B2 - 400 CEM**  
**TMA 19 mm**  
**90 días**



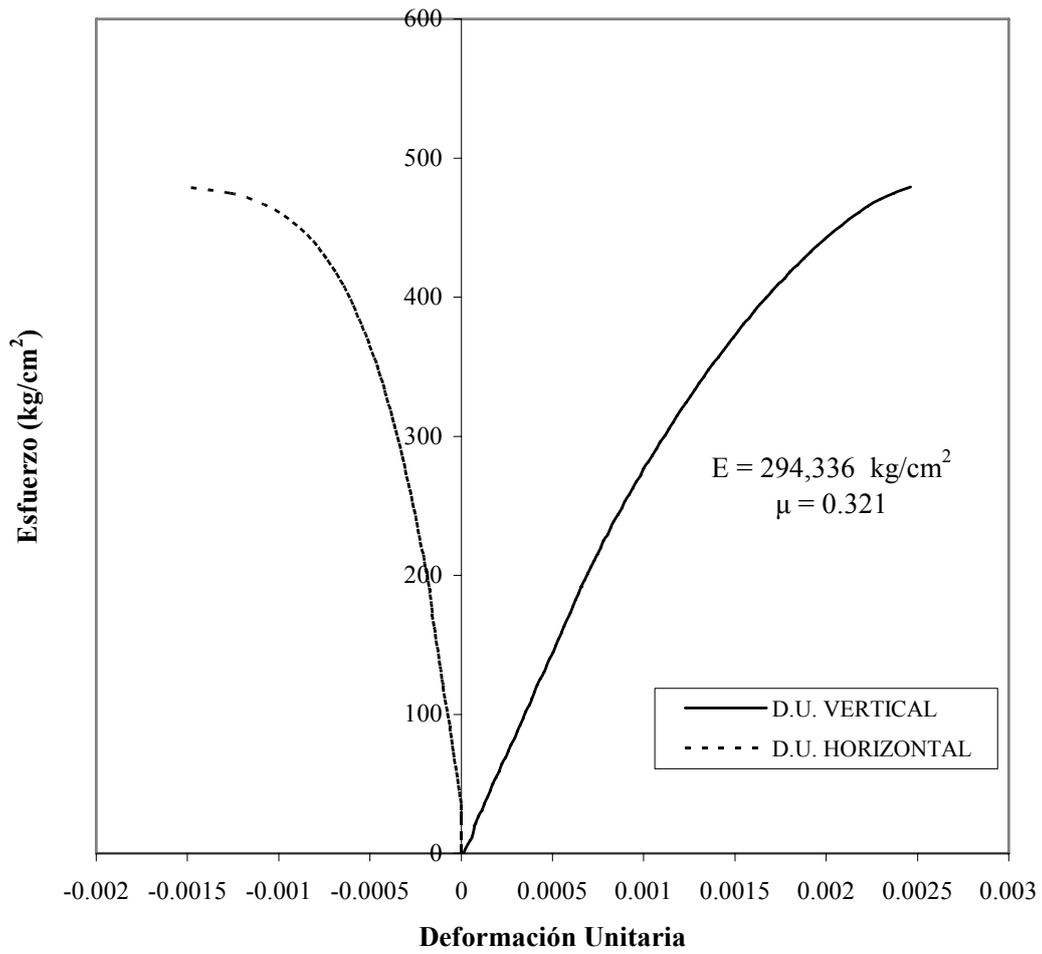
*5.9 Variación del esfuerzo con la deformación unitaria*

**C1B2 - 400 CEM  
TMA 9.5 mm  
28días**



*Fig 5.10 Variación del esfuerzo con la deformación unitaria.*

**C5B3 - 400 CEM  
TMA 9.5 mm  
90 días**



*Fig 5.11 Variación del esfuerzo con la deformación unitaria.*

Los resultados de deformación al esfuerzo máximo se presentan en la figura 5.12, en la que se observa que las deformaciones están entre  $2000$  y  $3000 \times 10^{-6}$ . Cabe mencionar que para un concreto normal fabricado con estos agregados, el valor estimado es de  $2000 \times 10^{-6}$ .



Con los valores obtenidos en las pruebas, el módulo de elasticidad se relaciona con la resistencia a compresión del concreto de la siguiente manera (fig. 5.13):

$$\text{TMA 19 mm} \quad E_c = 13,156\sqrt{f'_c} \quad (\text{kg/cm}^2)$$

$$\text{TMA 9.5 mm} \quad E_c = 13,060\sqrt{f'_c} \quad (\text{kg/cm}^2)$$

donde:

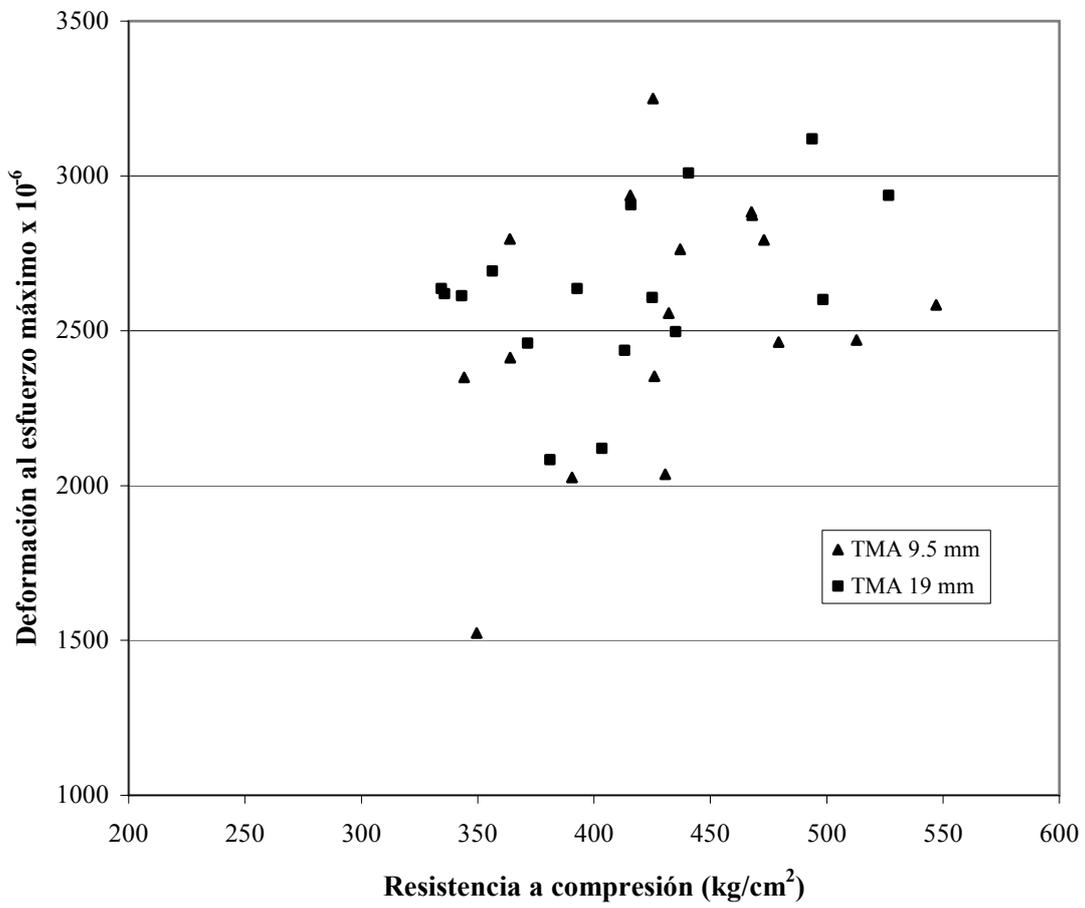
$E_c$  es el módulo de elasticidad del concreto, en  $\text{kg/cm}^2$ .

$f'_c$  es la resistencia a compresión del concreto a la edad del ensaye, en  $\text{kg/cm}^2$ .

Por otro lado, la expresión que estima el valor de la relación de Poisson ( $\nu$ ) en función de la resistencia a compresión ( $f'_c$ ) resultó ser (fig. 5.14):

$$\text{TMA 19 mm} \quad \nu = 0.00023 f'_c + 0.206$$

$$\text{TMA 9.5 mm} \quad \nu = 0.00029 f'_c + 0.197$$



*Fig 5.12 Variación de la deformación al esfuerzo máximo con la resistencia a compresión.*

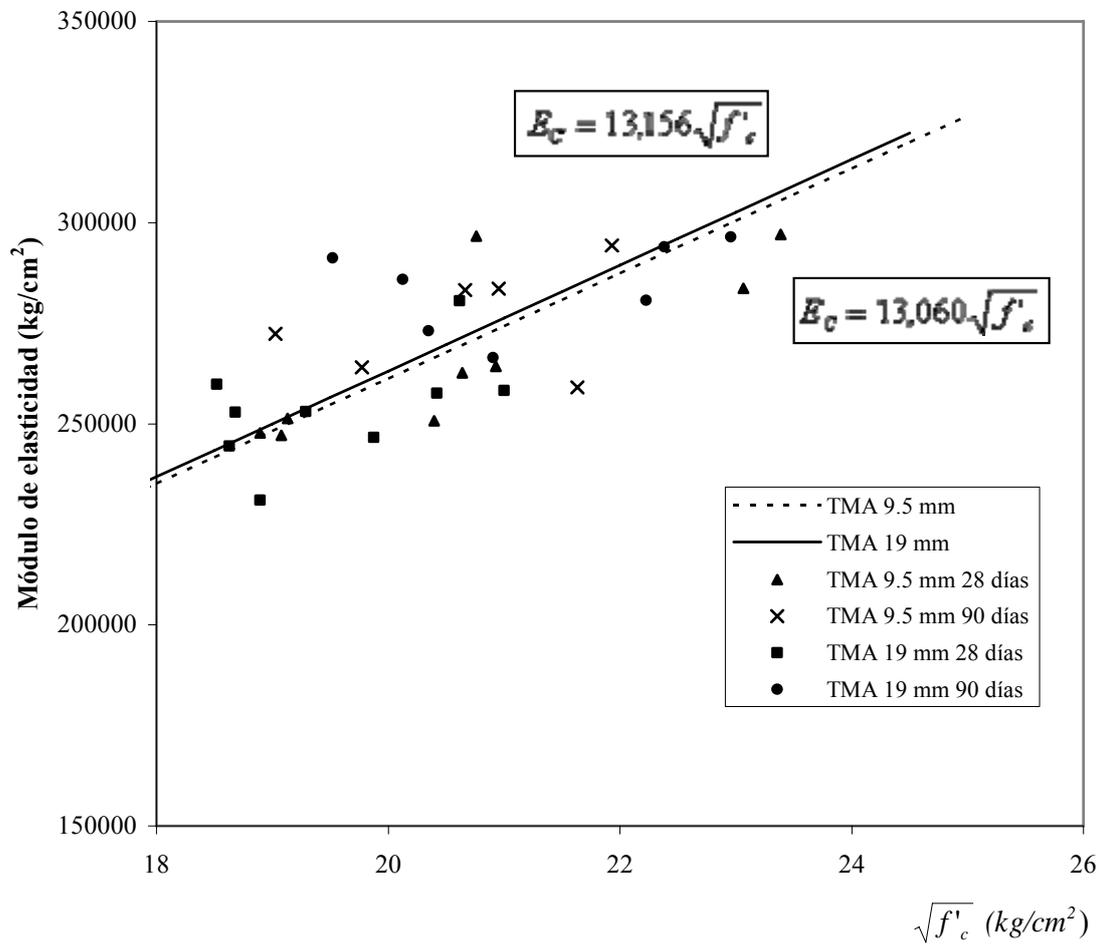


Fig 5.13 Variación del módulo de elasticidad con la raíz cuadrada de la resistencia a compresión.

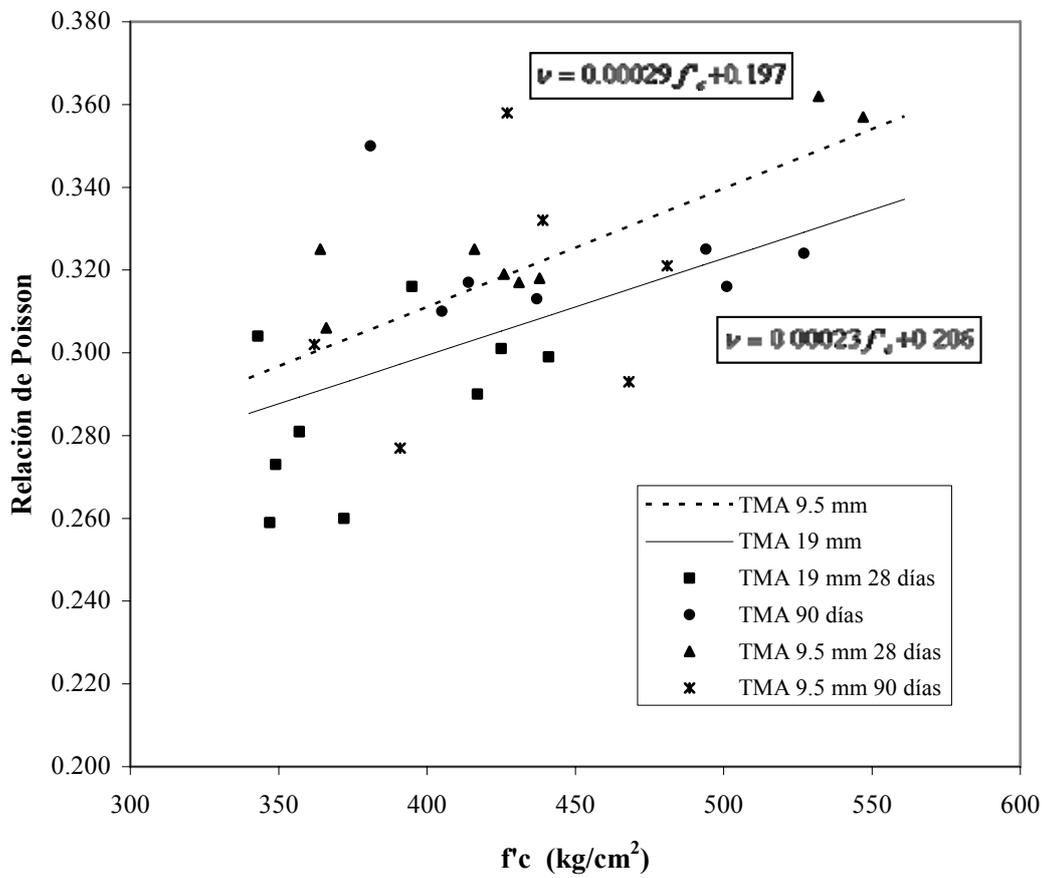


Fig 5.14 Variación de la relación de Poisson con la resistencia a compresión.

---

---

#### 5.4 CONTRACCIÓN POR SECADO

En la estimación de los valores de la contracción por secado última ( $\epsilon_u$ ) esperada para las mezclas de estudio, se tomaron registros hasta de 200 días de edad. En las gráficas presentadas de algunas de estas pruebas se muestran los valores alcanzados así como las expresiones que permiten relacionar el valor de contracción con el tiempo de exposición transcurrido (figuras 5.15 a 5.20).



Los valores obtenidos de contracción por secado última se muestran en la tabla siguiente. En la figura 5.21 se muestra la variación de la contracción de acuerdo con el contenido de cemento.

| <b>TMA<br/>(mm)</b> | <b>Contenido de<br/>cemento<br/>(kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b><math>\epsilon_u</math><br/>x 10<sup>-6</sup></b> |
|---------------------|--|--|
| 19                  | 350  | 692  |
|                     | 400  | 525  |
|                     | 450  | 673  |
| 9.5                 | 350  | 591  |
|                     | 400  | 615  |
|                     | 450  | 592  |

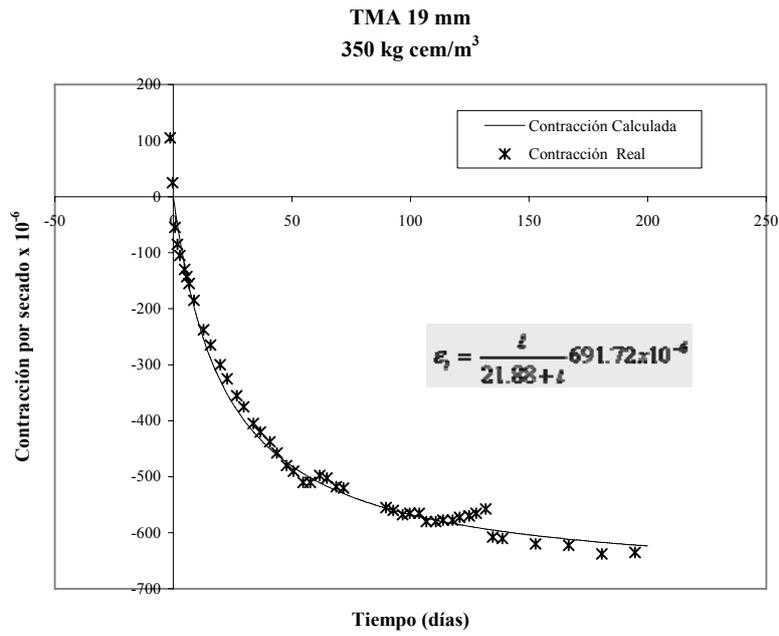
---

---

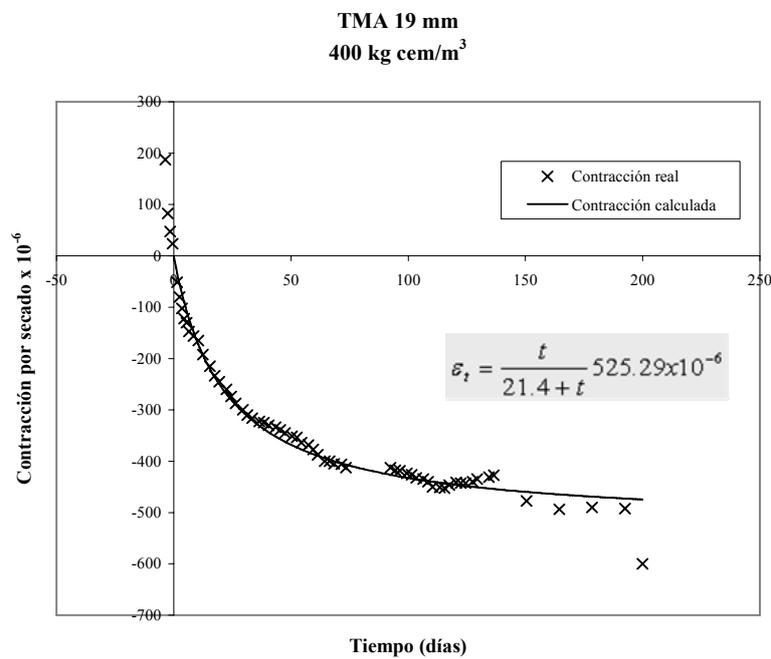
En la tabla anterior, se observa que el valor de contracción por secado para el tamaño de 19 mm y contenido de cemento de  $350 \text{ kg/m}^3$  presenta un resultado relativamente alto en comparación a los demás, aunque son del mismo orden de magnitud.



Para el tamaño de 9.5 mm, todos los valores obtenidos son similares, con una contracción promedio de  $599 \times 10^{-6}$ , resultado que es semejante a los obtenidos en otras investigaciones para un concreto normal con iguales características.

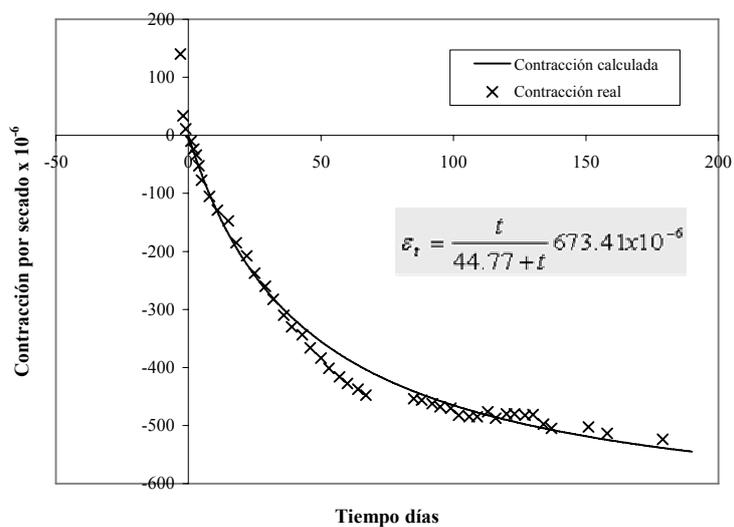


*Fig. 5.15 Variación de la contracción por secado con el tiempo*



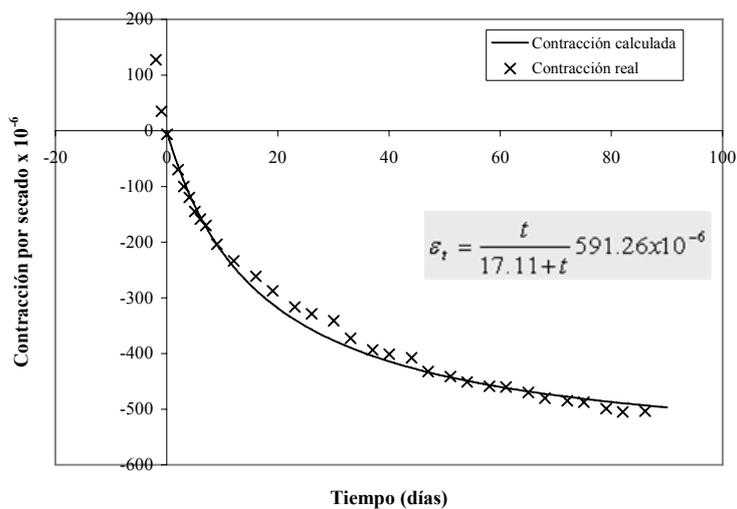
*Fig. 5.16 Variación de la contracción por secado con el tiempo*

**TMA 19 mm**  
**450 kg cem/m<sup>3</sup>**

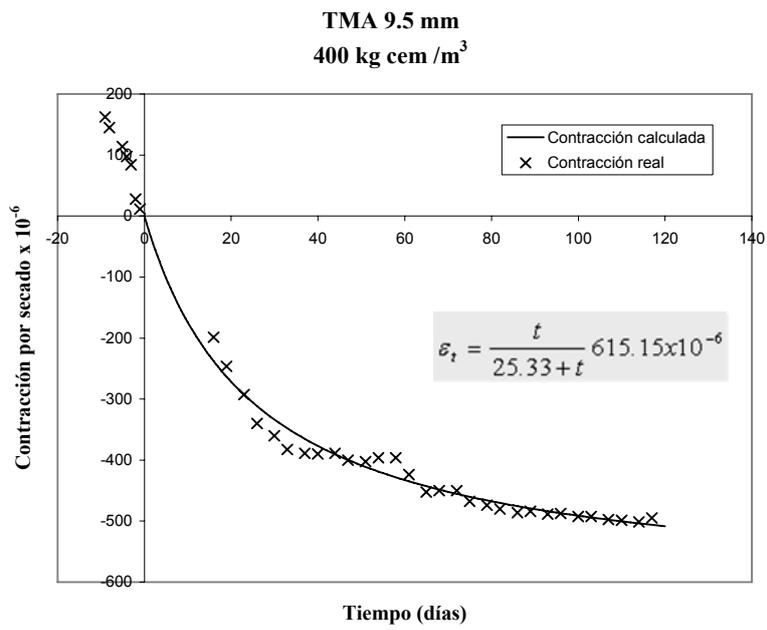


*Fig. 5.17 Variación de la contracción por secado con el tiempo*

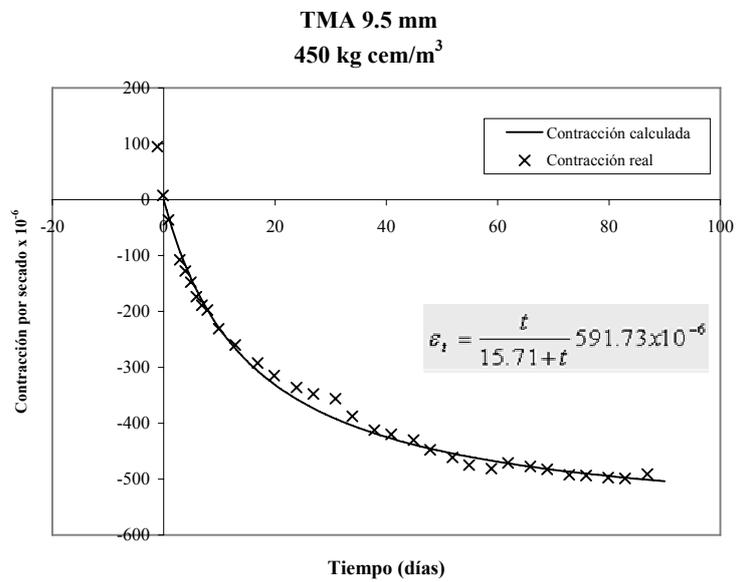
**TMA 9.5 mm**  
**350 kg cem/m<sup>3</sup>**



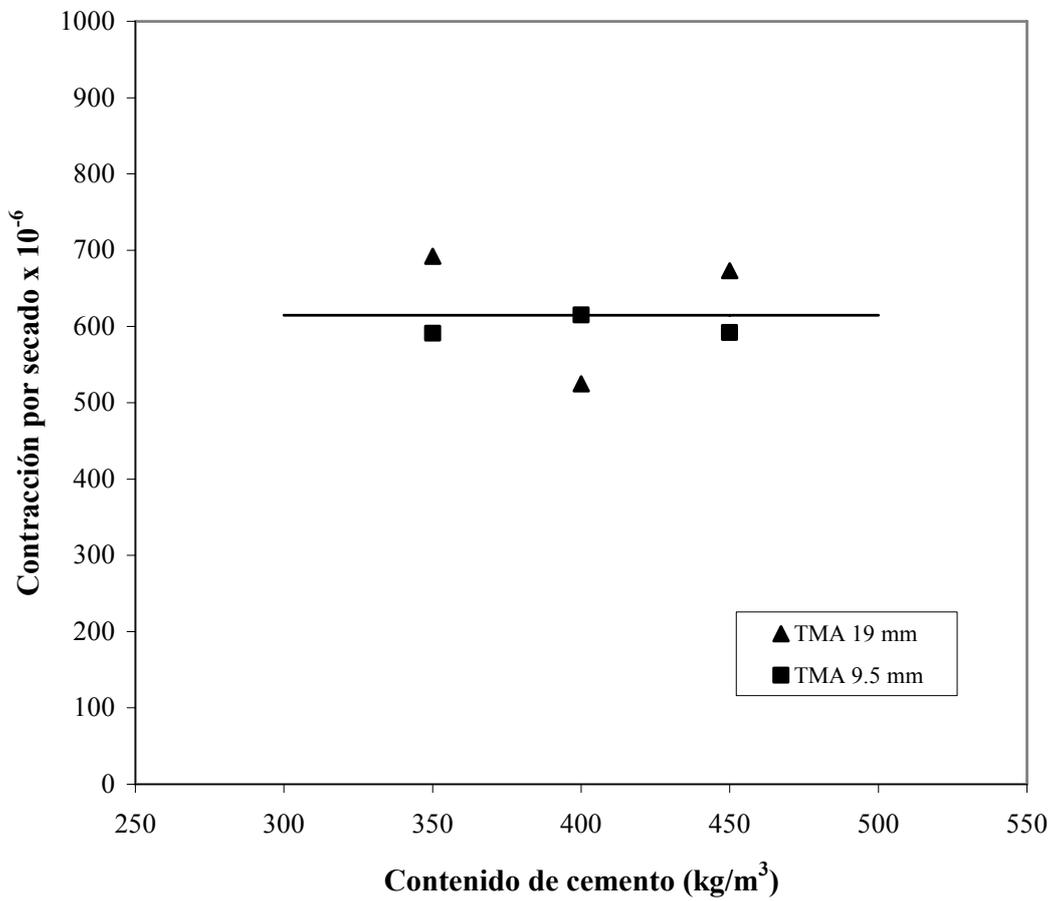
*Fig. 5.18 Variación de la contracción por secado con el tiempo*



*Fig. 5.19 Variación de la contracción por secado con el tiempo*



*Fig. 5.20 Variación de la contracción por secado con el tiempo*



*Fig. 5.21 Variación de la contracción por secado con el contenido de cemento*

---

---

## 5.5 DEFORMACIÓN DIFERIDA

La deformación diferida se determina para este fin en función de su coeficiente, el cual se expresa como la relación entre la deformación diferida y la instantánea, siendo la deformación diferida igual a la deformación total en el tiempo menos la deformación instantánea.

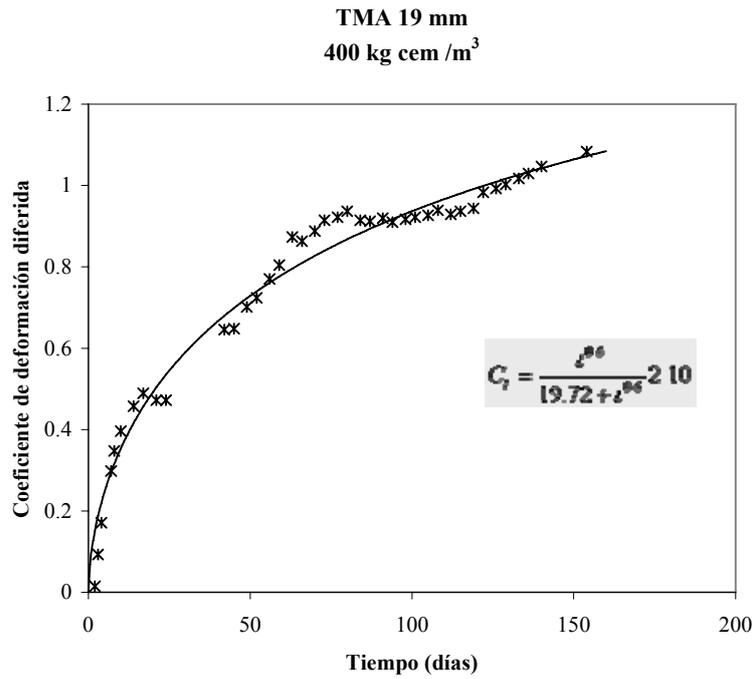
En lo que respecta a la deformación diferida sólo se utilizaron especímenes de dos mezclas con consumos de cemento iguales ( $400\text{kg/m}^3$ ) pero con diferente tamaño de agregado (19 y 9.5 mm).



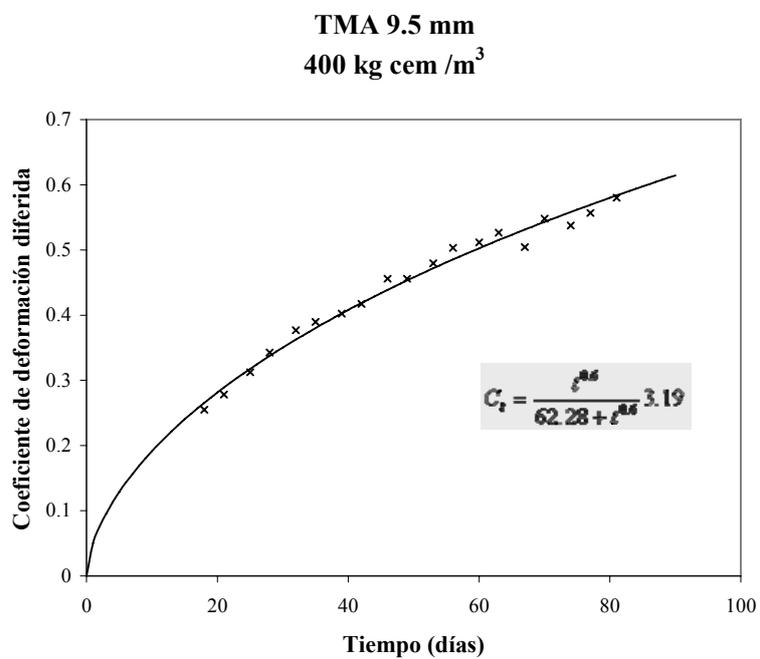
Los valores de los coeficientes de deformación diferida ( $C_u$ ) y deformación inicial ( $\epsilon_0$ ) obtenidos en las pruebas realizadas, son los siguientes:

| TMA (mm) | $C_u$ | $\epsilon_0 \times 10^{-6}$ |
|----------|-------|-----------------------------|
| 19       | 2.10  | 509.52                      |
| 9.5      | 3.19  | 468.41                      |

En las gráficas correspondientes se muestra la tendencia observada para estos concretos y las expresiones que permiten relacionar la deformación diferida con el tiempo transcurrido de exposición así como la variación de la relación deformación unitaria/esfuerzo con el tiempo en escala semilogarítmica (figuras 5.22 a 5.24).

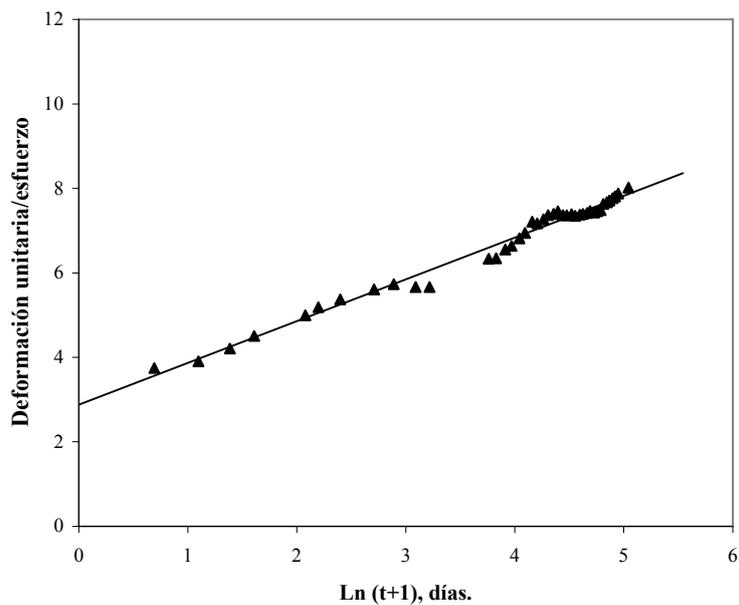


*Fig. 5.22 Variación del coeficiente de deformación diferida con el tiempo*



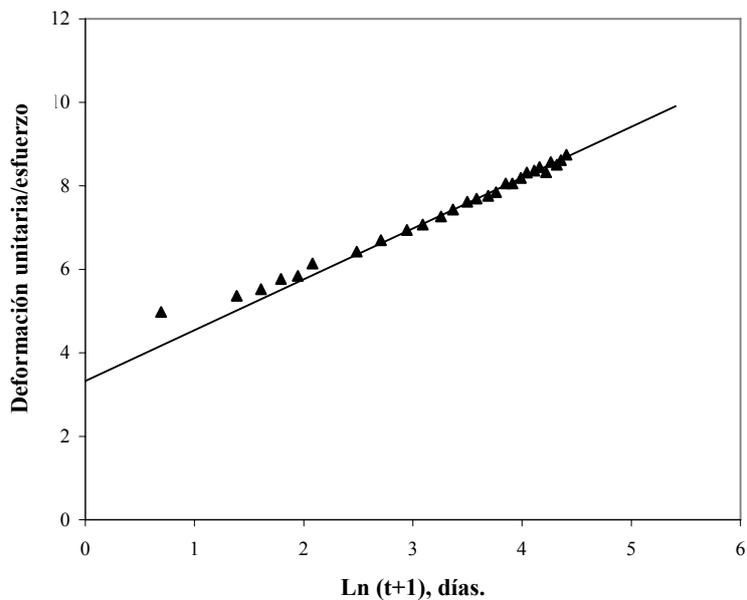
*Fig. 5.23 Variación del coeficiente de deformación diferida con el tiempo*

**TMA 19 mm**  
**400 kg cem / m<sup>3</sup>**



*Fig. 5.24 Variación de  $\epsilon/0.4f_c$  con el logaritmo natural del tiempo.*

**TMA 9.5 mm**  
**400 kg cem / m<sup>3</sup>**



*Fig. 5.25 Variación de  $\epsilon/0.4f_c$  con el logaritmo natural del tiempo.*

---

---

## 5.6 PERMEABILIDAD A LOS CLORUROS

En éste método se determina la conductividad eléctrica del concreto, a partir de la cual se estima la permeabilidad del concreto a los iones de cloruro. La permeabilidad del concreto se debe a que existen poros de saturación abiertos.

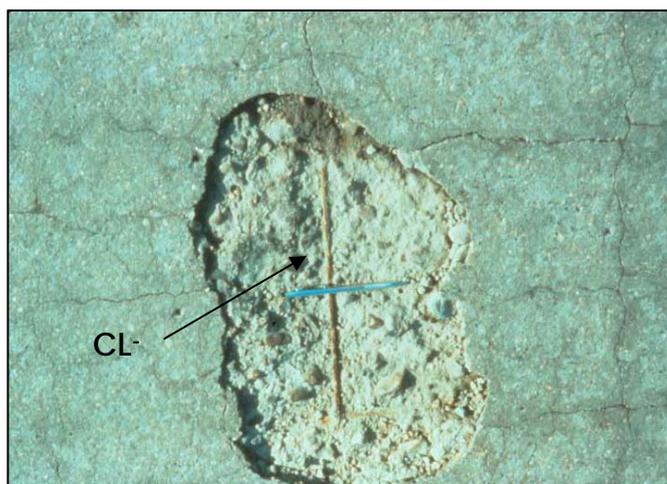
En la tabla siguiente se muestra la clasificación del tipo de permeabilidad de acuerdo con la carga filtrada (coulombs) en el concreto.

### *Clasificación de la permeabilidad*

| <b>Coulombs</b> | <b>Permeabilidad al ion cloruro</b> | <b>Típico de:</b>                 |
|-----------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| >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 |



*Prueba de permeabilidad a los cloruros*



*Penetración del ión cloruro en el concreto*

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.

*Permeabilidad a 28 días*

| <i>TMA (mm)</i> | <i>Cilindro</i> | <i>Bachada</i> | <i>Contenido de cemento (kg/m<sup>3</sup>)</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                     |
|                 | <b>1</b>        | <b>2</b>       | <b>400</b>                                     | <b>3188</b>                      | <b>Moderada</b>              |
|                 | <b>2</b>        | <b>2</b>       | <b>400</b>                                     | <b>2811</b>                      | <b>Moderada</b>              |
|                 | <b>1</b>        | <b>2</b>       | <b>400</b>                                     | <b>3459</b>                      | <b>Moderada</b>              |
|                 | 2               | 2              | 450  | 2608                             | Moderada                     |
|                 | 1               | 3              | 450  | 3166                             | Moderada                     |
|                 | 2               | 3              | 450  | 2945                             | Moderada                     |
|                 | 3               | 3              | 450  | 2242                             | Moderada                     |

*Permeabilidad a 90 días*

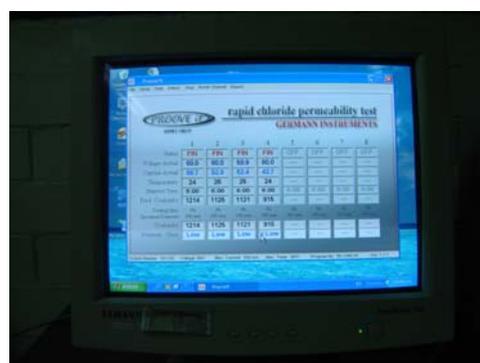
| <i>TMA<br/>(mm)</i> | <i>Cilindro</i> | <i>Bachada</i> | <i>Contenido<br/>de cemento<br/>(kg/m<sup>3</sup>)</i> | <i>Carga filtrada<br/>(Coulombs)</i> | <i>Tipo de<br/>Permeabilidad</i> |
|---------------------|-----------------|----------------|--|--------------------------------------|----------------------------------|
| 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                             |
|                     | <b>1</b>        | <b>1</b>       | <b>400</b>   | <b>1202</b>                          | <b>Baja</b>                      |
|                     | <b>2</b>        | <b>1</b>       | <b>400</b>   | <b>1467</b>                          | <b>Baja</b>                      |
|                     | <b>1</b>        | <b>2</b>       | <b>400</b>   | <b>1899</b>                          | <b>Baja</b>                      |
|                     | <b>2</b>        | <b>2</b>       | <b>400</b>   | <b>1756</b>                          | <b>Baja</b>                      |
|                     | <b>3</b>        | <b>2</b>       | <b>400</b>   | <b>1229</b>                          | <b>Baja</b>                      |
|                     | 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                             |



*Prueba de permeabilidad a los cloruros*

*Permeabilidad a 28 días*

| <i>TMA (mm)</i> | <i>Cilindro</i> | <i>Bachada</i> | <i>Contenido de cemento (kg/m<sup>3</sup>)</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                     |
|                 | <b>1</b>        | <b>1</b>       | <b>400</b>                                     | <b>4061</b>                      | <b>Alta</b>                  |
|                 | <b>2</b>        | <b>1</b>       | <b>400</b>                                     | <b>3396</b>                      | <b>Moderada</b>              |
|                 | <b>1</b>        | <b>3</b>       | <b>400</b>                                     | <b>3949</b>                      | <b>Moderada</b>              |
|                 | <b>2</b>        | <b>3</b>       | <b>400</b>                                     | <b>2844</b>                      | <b>Moderada</b>              |
|                 | 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                     |



*Prueba de permeabilidad a los cloruros mediante el software PROOVE IT.*

*Permeabilidad a 90 días*

| <i>TMA<br/>(mm)</i> | <i>Cilindro</i> | <i>Bachada</i> | <i>Contenido<br/>de cemento<br/>(kg/m<sup>3</sup>)</i> | <i>Carga filtrada<br/>(Coulombs)</i> | <i>Tipo de<br/>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                         |
|                     | <b>1</b>        | <b>1</b>       | <b>400</b>   | <b>1057</b>                          | <b>Baja</b>                      |
|                     | <b>2</b>        | <b>1</b>       | <b>400</b>   | <b>933</b>                           | <b>Muy Baja</b>                  |
|                     | <b>3</b>        | <b>1</b>       | <b>400</b>   | <b>891</b>                           | <b>Muy Baja</b>                  |
|                     | <b>4</b>        | <b>1</b>       | <b>400</b>   | <b>1105</b>                          | <b>Baja</b>                      |
|                     | 1               | 2              | 450  | 978                                  | Muy Baja                         |
|                     | 2               | 2              | 450  | 1088                                 | Baja                             |
|                     | 3               | 2              | 450  | 1020                                 | Baja                             |
|                     | 4               | 2              | 450  | 1103                                 | Baja                             |



*Cilindros utilizados en la prueba de permeabilidad a los cloruros.*

---

---

De los resultados obtenidos en las pruebas realizadas para el TMA de 9.5 mm se observa que a la edad de ensaye de 28 días la tendencia es a una permeabilidad moderada y a los 90 días la línea es a una permeabilidad baja.

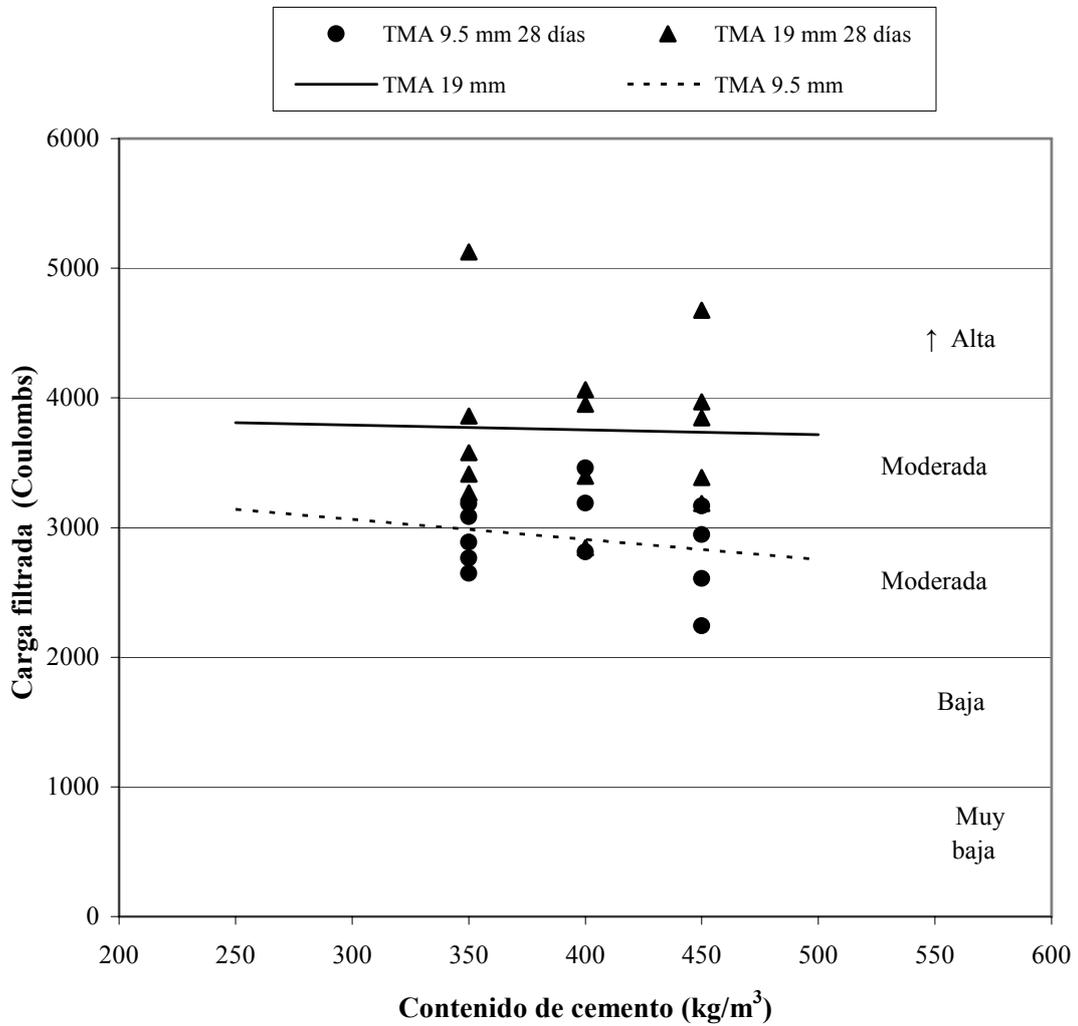
La tendencia de la permeabilidad a los cloruros del concreto con respecto al contenido de cemento y al tamaño de agregado se muestra en la figura 5.26.



Para el caso del TMA de 19 mm a los 28 días presenta una tendencia hacia una permeabilidad moderada-alta. A la edad de 90 días la línea es hacia una permeabilidad baja a muy baja.

La tendencia de la permeabilidad a los cloruros con respecto a la edad y al tamaño de agregado se muestra en la figura 5.27, en la cual se observa un claro cambio del tipo de permeabilidad conforme la edad avanza, pasando de una moderada (28 días) a baja (90 días).

Así mismo, en la figura 5.28 se presenta la variación de la permeabilidad a los cloruros a los 28 días de edad con respecto a la relación agua /cemento y en la cual se puede apreciar que para dicha edad, la tendencia es que el concreto presente una permeabilidad moderada (2000-4000 coulombs).



*Fig 5.26 Variación de la carga filtrada en el concreto en la prueba de permeabilidad con el contenido de cemento.*

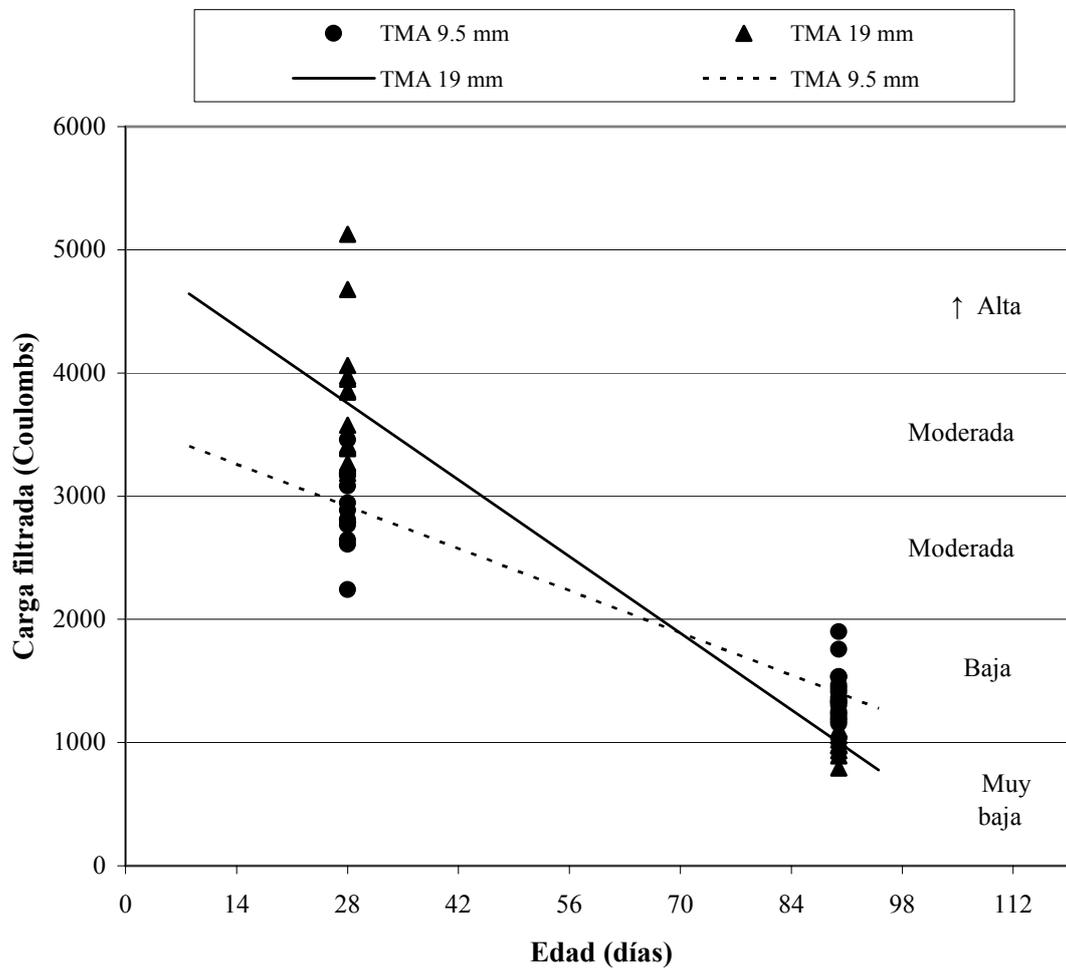
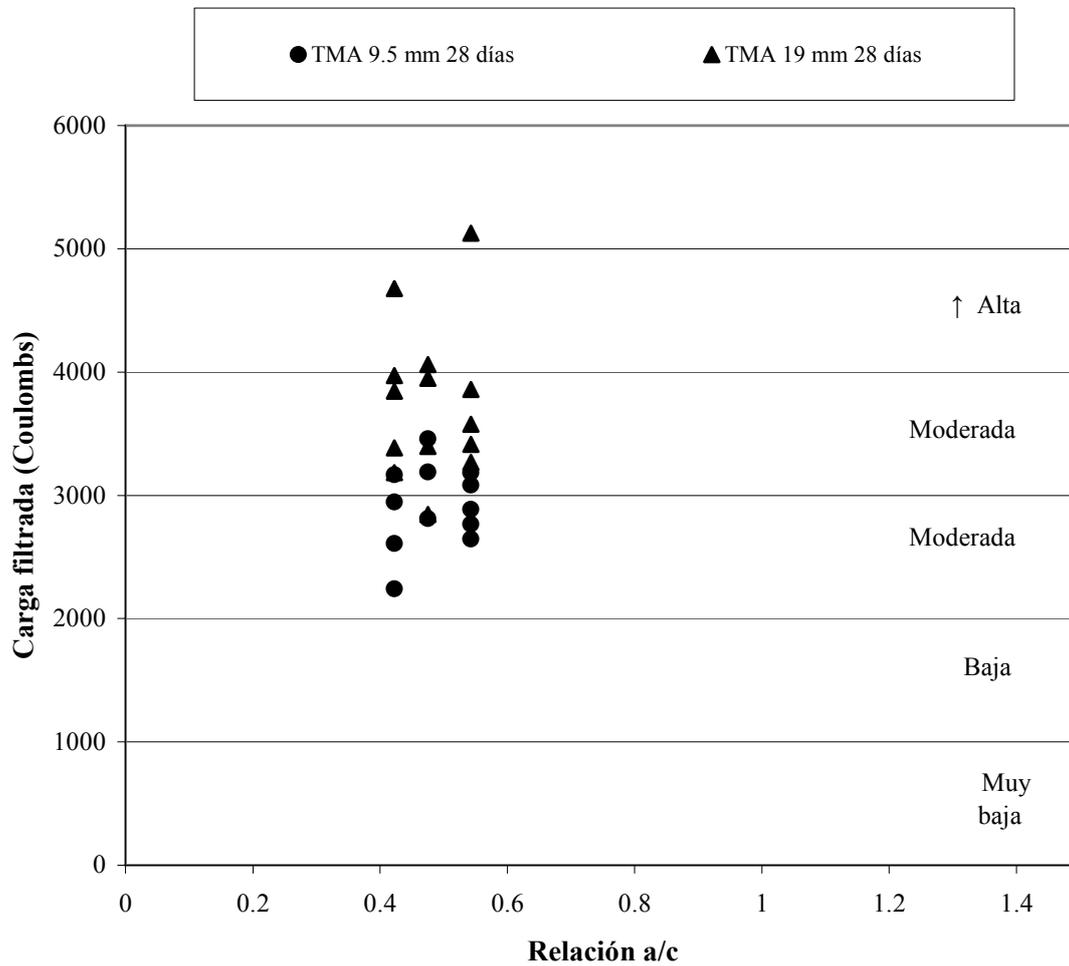


Fig 5.27 Variación de la carga filtrada en el concreto en la prueba de permeabilidad con la edad.



*Fig 5.28 Variación de la carga filtrada en el concreto en la prueba de permeabilidad con la relación agua/cemento.*

---

---

# CAPÍTULO VI

---

---

---

---

## **VI. DESEMPEÑO DE LAS ESTRUCTURAS**

### **COLADAS CON CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES**

#### *Aspectos generales*

El uso de concreto en secciones que tienen un alto grado de congestión de refuerzo, tal como es el caso de columnas y vigas dúctiles en marcos sísmo-resistentes y algunas secciones reparadas, complican de manera importante el acomodo del concreto. Es esencial suministrar una consolidación completa al concreto para lograr la durabilidad requerida y algunas veces esto depende de la habilidad del operador del equipo para asegurar una vibración adecuada. Una vibración inadecuada puede llevar a defectos estructurales y en la superficie, y a un desarrollo inadecuado de la adherencia con el refuerzo. Una vibración excesiva del concreto puede originar segregación y sangrado que puede afectar adversamente el funcionamiento estructural y la calidad del acabado superficial.

Una posibilidad para reducir la labor de vibrado en secciones congestionadas y acelerar el tiempo de colocación del concreto es usar el concreto autocompactable (CAC). El CAC es proporcionado para alcanzar un valor alto de fluencia y una moderada viscosidad, lo cual asegura una alta capacidad de llenado del molde con el mínimo riesgo de segregación y bloqueo del flujo.



---

---

El uso de CAC ha ganado aceptación en Japón desde los años 80's para la elaboración de elementos densamente armados, así como también en la colocación de concreto en áreas restringidas donde la compactación puede no ser práctica para lograr concretos durables.

El CAC ofrece una valiosa solución para acelerar la velocidad de colocación y reducir la demanda de trabajo requerido por la vibración y acabados superficiales en la construcción de sótanos y muros de cimentación en estructuras residenciales que presentan restricciones para el acomodo de concreto fresco.

A continuación se presentan algunos trabajos realizados en otros países respecto a vigas, columnas y otros elementos estructurales, elaborados con concreto autocompactable, para calificar su desempeño.

## **6.1 VIGAS**

En este estudio, el objetivo fue investigar la uniformidad de la resistencia en sitio y comparar el desempeño estructural de vigas elaboradas con CAC y con un concreto de referencia. Fueron evaluadas dos mezclas de concreto con resistencia a compresión a 28 días en cubos estándar de 35 y 60 MPa. Estas corresponden a dos clases de concreto: C35 Y C60. También se examina la distribución de la resistencia a compresión de muestras de núcleos a lo largo de las vigas. Las vigas de las mezclas de referencia (RC35 Y RC60) fueron fabricadas con vibración externa y las elaboradas con CAC fueron fabricadas sin ninguna vibración.

### *Programa experimental*

Se examinaron dos tipos de concreto en esta investigación: un concreto para aplicación en vivienda con una resistencia en cubos de 35 MPa (C35) y uno con aplicación en ingeniería civil con una resistencia en cubos de 60 MPa (C60). La notación de CAC60 corresponde a la mezcla de CAC con una resistencia de diseño de 60 MPa.

Se usaron grandes cantidades de materiales cementantes en el CAC, ya que se requiere para mantener un valor apropiado de fluencia y viscosidad de la mezcla en estado fresco

---

---

y por lo tanto, reducir el sangrado, la segregación y mejorar el acomodo. Por el uso de una gran cantidad de cemento se incrementa el costo y la temperatura del concreto se eleva mucho, por lo que en varias mezclas de CAC se reemplaza parte del cemento por otros materiales cementantes como polvo calizo, escoria y ceniza volante.

Las mezclas de concreto usadas en este estudio se prepararon con cemento Pórtland, polvo calizo y escoria. A las mezclas investigadas de CAC se les agregaron aditivos minerales para aumentar la trabajabilidad y la resistencia a la segregación. El polvo calizo fue producido de piedra caliza altamente pura. El polvo calizo tuvo una densidad relativa de 2.65 y fue más fino que el cemento.

Para las mezclas C35 Y C60 se usaron agregados triturados de granito, con graduación continua, con tamaño nominal máximo de 20 y 10 mm respectivamente. Se usó arena de cuarcita bien graduada con un módulo de finura de 2.74. Los valores de densidad relativa del agregado grueso y de la arena fueron de 2.62 y 2.56, y sus absorciones fueron de 0.8 y 1%, respectivamente. Se usó una base de copolímero reductor de agua de alto rango para la mezcla (RAAR-CAC), el cual tuvo un contenido sólido y una gravedad específica de 30% y 1.11, respectivamente. Este reductor de agua de alto rango fue usado en dosificaciones de 0 a 1% por masa del total de finos.

La secuencia de mezclado para las mezclas de CAC fue similar a las de las mezclas de referencia, excepto que el tiempo de mezclado para las mezclas de CAC fue 1 minuto más largo después de agregar el reductor de agua de alto rango. La escoria y el polvo calizo fueron agregados al mezclador junto con los agregados, al inicio de la mezcla.

#### *Procedimiento experimental*

Se realizaron las pruebas de Extensión de flujo, Caja L y el Ensayo de Orimet para probar la trabajabilidad del CAC. Además, se introdujo un nuevo método para probar la capacidad de llenado y de bloqueo, el Ensayo de Orimet combinado con el Anillo Japonés.

---

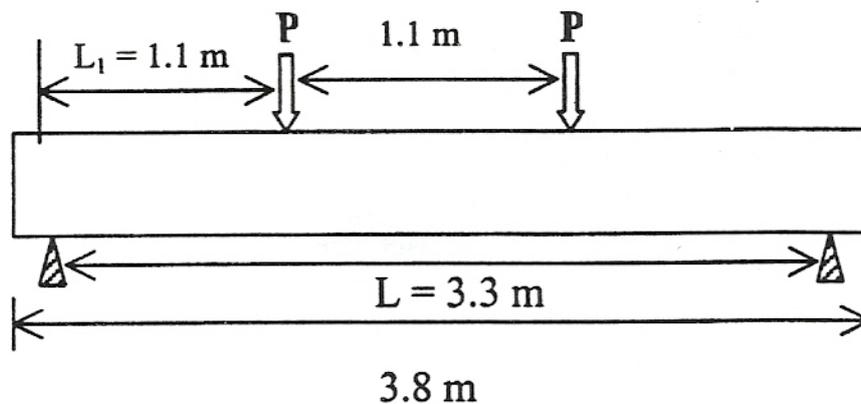
---

## Resultados

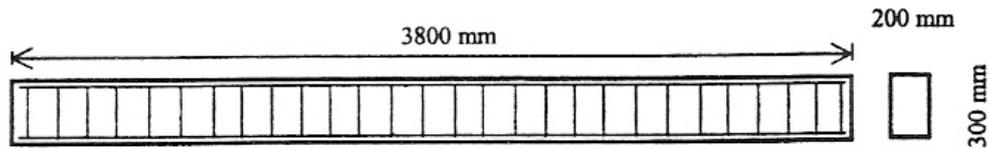
Resistencia a compresión en sitio de las vigas.

Las vigas de CAC estuvieron bien compactadas y tuvieron un acabado superficial sin defectos considerables ni señales de segregación. Se obtuvo una buena capacidad de llenado a través del armado.

El desarrollo relativamente más rápido de la resistencia de la mezcla de CAC con fibras de acero, particularmente a edades tempranas, es debido al hecho de incluir polvo calizo fino, el cual pudo tener un efecto acelerante en la hidratación del  $C_3S$  y en las resistencias tempranas. La mezcla de CAC60, la cual contenía escoria cementante en vez de polvo calizo, tuvo una resistencia más baja a 1 y 7 días que la correspondiente a la mezcla de referencia RC60, pero desarrolló una resistencia a compresión significativamente más grande a 28 días y más edad. Esto es debido a la lenta pero prolongada reacción (hidráulica y puzolánica) entre la hidratación de los productos cementantes y la escoria, lo que contribuye significativamente a la resistencia. Como se esperaba, la resistencia a compresión fue fuertemente afectada por la relación agua/cemento y los tipos de filler.



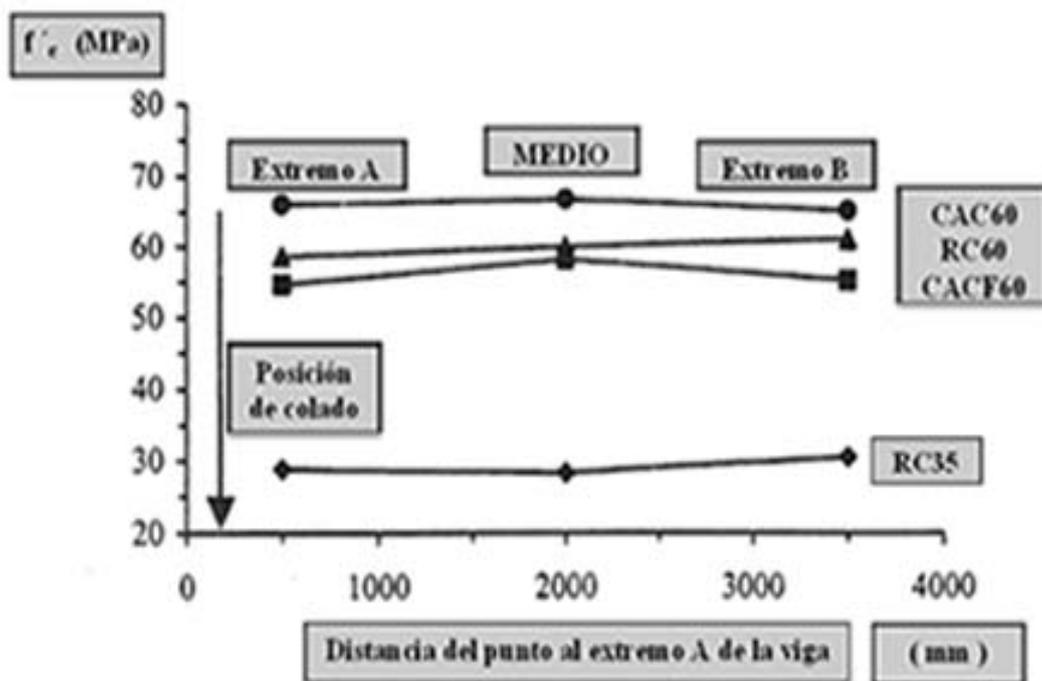
*Dimensiones de las vigas*



*Dimensiones de las vigas*

En la siguiente gráfica se muestra como la mezcla de CAC60 tuvo una resistencia a compresión en sitio más grande que la mezcla RC60, como fue en el caso de los cubos de control. La resistencia a compresión en sitio de la mezcla de CAC con fibras de acero, sin embargo, fue similar a la de la viga de RC60.

*Variación de la resistencia a compresión en sitio a lo largo de la longitud de las vigas*



*Prueba de vigas*

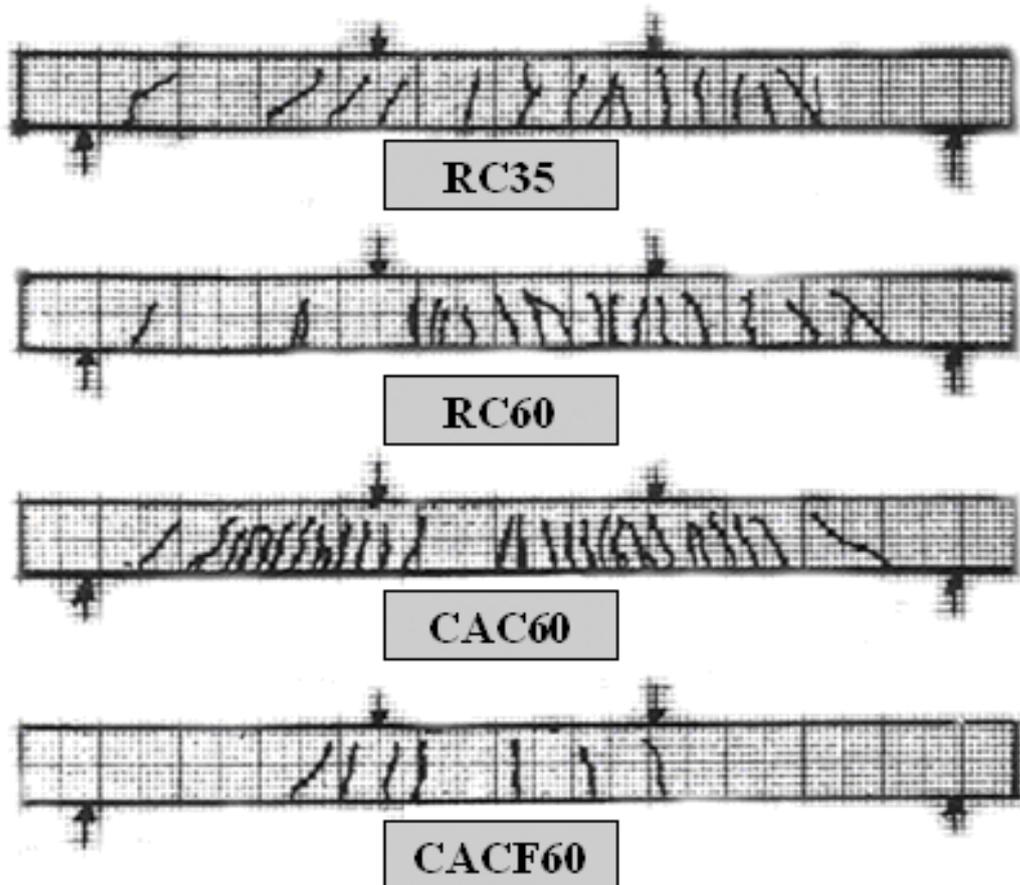
El comportamiento en flexión de las vigas reforzadas de las mezclas de referencia y de CAC fueron investigadas en términos del agrietamiento, capacidad de carga, modo de falla y respuesta de deflexión a la carga.

---

---

### *Comportamiento al agrietamiento*

Los modelos típicos de agrietamiento de las vigas de RC60, CAC60, RC35 y CACF60 con fibras de acero, a una carga alta (85-90% del  $M_u$ ), se muestran en la siguiente figura.



Para todas las vigas, al nivel de carga de servicio, las grietas en el claro de flexión se componen predominantemente de grietas verticales perpendiculares a la dirección del esfuerzo máximo principal inducido por momento puro. El promedio de espaciamiento de las grietas del CAC60 y RC60 fue de aproximadamente 80 y 160 mm, respectivamente. El espaciamiento de las grietas del CACF60 con fibras de acero fue más grande, no obstante que, el espaciamiento de los estribos de esta viga fue de 350 mm comparado con los 250 mm que se usó en las otras.

---

---

### Momento de agrietamiento

Los momentos teóricos se calcularon de dos formas:

1.-  $M_{cr-teo1}$ . Se calcula tomando en cuenta el momento de inercia de todo el refuerzo (tensión y compresión).

2.-  $M_{cr-teo2}$ . Se calcula de acuerdo con el Código BS, en el cual se olvida de los momentos de inercia del refuerzo y se asume que la sección de la viga está hecha sólo de concreto.

$$M_{cr} = \frac{(f_r I)}{y_t} \qquad f_r = 0.40(f'_{cu})^{\frac{2}{3}}$$

donde:

$f_r$  = módulo de ruptura del concreto

$I$  = momento de inercia de la sección de la viga

$y_t$  = distancia del centroide al plano de tensión de la sección.

$f'_{cu}$  = resistencia a compresión de los cubos de concreto.

Los resultados teóricos y experimentales para momentos correspondientes a la primera grieta, se presentan en la siguiente tabla, en kN\*m:

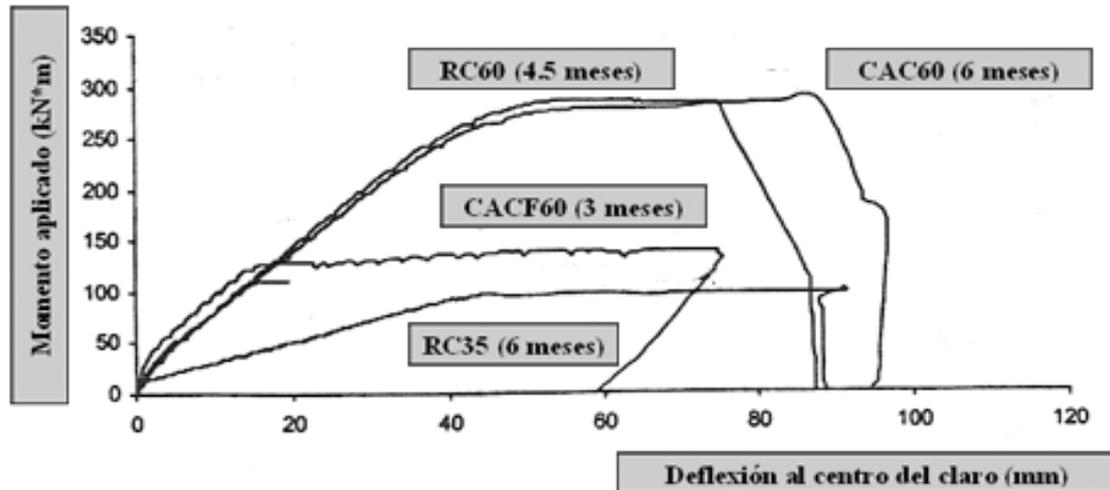
| Viga                    | $M_{cr-exp}$ | $M_{cr-teo1}$ | $M_{cr-teo2}$ |
|-------------------------|--------------|---------------|---------------|
| RC35                    | 6.6          | 16.6          | 14.1          |
| RC60                    | 23.1         | 23.1          | 20.4          |
| CAC60                   | 22.0         | 27.1          | 24.6          |
| CACF60 (fibra de acero) | 15.4         | 23.1          | 19.8          |

---

---

### Respuesta deflexión-carga

La siguiente figura muestra los resultados experimentales de la respuesta deflexión-carga de las vigas RC60, CAC60, CACF60 (con fibra de acero) y RC35.



Inicialmente, las vigas no se agrietan y se mantienen rígidas. Con una carga más grande, aparecen las grietas a la mitad del claro cuando el momento aplicado excede el momento de agrietamiento  $M_{cr}$ , causando una reducción en la rigidez.

### Conclusiones

Con base en los resultados presentados, se lograron las siguientes conclusiones:

1.- La variación de las propiedades del concreto fueron estadísticamente insignificantes a lo largo de los 3.8 m de longitud de las vigas. La resistencia a compresión in situ obtenida en las vigas para el CAC60, CACF60 con fibra de acero, y la mezcla de referencia RC35 estuvieron en el rango de 80 a 100% de la resistencia a compresión a 28 días para especímenes cúbicos estándar y, entre 75 y 80% para la mezcla de referencia RC60.

---

---

2.- Bajo cargas de servicio, hay más grietas, más anchas y con más profundidad con la mezcla de referencia RC60 que con la mezcla de CAC60, lo cual puede atribuirse a la diferencia de resistencia a compresión. El ancho de las grietas puede predecirse para las vigas de RC60 y CAC60 por el Código ACI, usando  $K_g=11$ , en la expresión siguiente.

$$w = K_g f_s \sqrt[3]{d_c A} * 10^{-6}$$

donde:

$w$ = ancho de la grieta en la superficie de tensión de la viga, mm.

$A$ = área efectiva de tensión del concreto,  $\text{mm}^2$ .

$f_s$ =esfuerzo del acero de refuerzo a cargas específicas, MPa.

$d_c$ = espesor del recubrimiento de concreto, mm.

3.- Las vigas elaboradas con CAC60 y RC60, exhibieron comportamientos similares, en términos de la deformación unitaria a carga máxima y la tenacidad.

4.- Finalmente, se observó que la capacidad de momento último de la viga de CAC60 fue comparable con la viga de RC60, y la máxima deflexión de la viga de CAC60 fue ligeramente más alta que la de la viga de RC60. La predicción de la máxima deflexión de las vigas elaboradas con mezclas CAC y convencionales, se puede hacer usando la expresión del Código ACI basada en la ecuación de Branson.

## 6.2 COLUMNAS

El propósito de esta investigación fue comparar el desempeño estructural de columnas de concreto altamente confinadas elaboradas con concreto normal (CN) y CAC, con resistencias a la compresión de 40 a 50 MPa. También se busca determinar la distribución de la resistencia a compresión y módulo de elasticidad a lo largo de columnas no reforzadas elaboradas con CN, que ha sido consolidado con vibración interna, así como en aquellas sin consolidación (CAC).

---

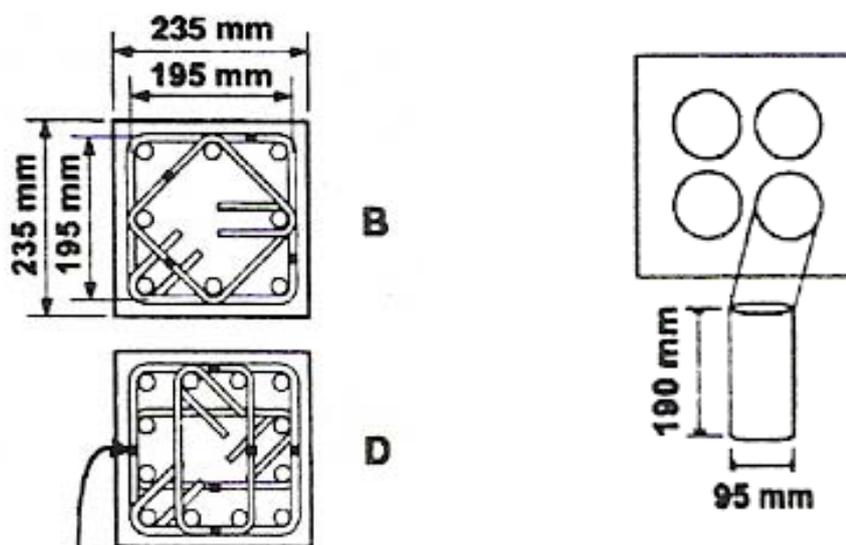
---

Finalmente, se estableció la capacidad de carga en compresión de columnas no reforzadas, y comparada con los valores obtenidos de las pruebas estándar de cilindros de 100x200 y 150x300 mm, así como de muestras de núcleos.

### *Programa experimental*

El programa experimental consistió en la prueba de dos columnas de concreto altamente reforzadas con CAC y otras dos con CN con resistencia a compresión de 40 a 50 MPa y sometiéndolas a una carga axial concéntrica hasta la falla.

Se utilizaron dos tipos de configuración de estribos (Tipo B y D). Además de las cuatro columnas reforzadas, se probaron cuatro columnas no reforzadas que fueron elaboradas con mezclas de CN y CAC. Dos de ellas fueron probadas bajo una carga axial concéntrica hasta la falla para determinar su capacidad total de carga, y por lo tanto la resistencia a compresión total en sitio del concreto. Después, se extrajeron núcleos de los extremos de la columna para determinar la resistencia a compresión en sitio y compararla con el valor total obtenido de la prueba de las columnas no reforzadas.

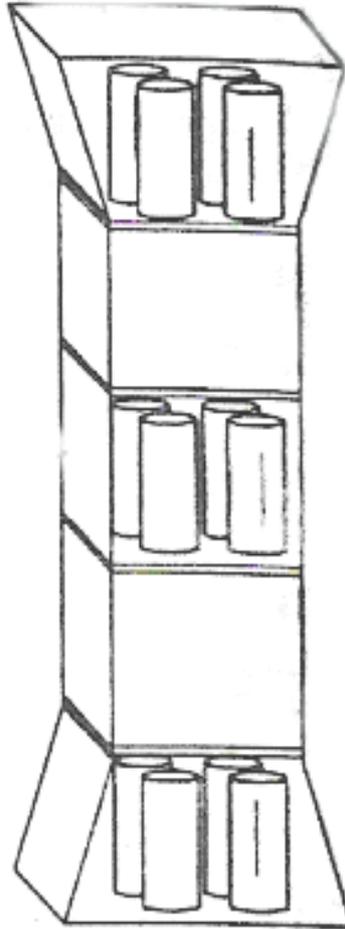


*Dimensiones y armado de las columnas*

---

---

Las otras dos columnas no reforzadas fueron probadas dividiéndolas en tres secciones, a tres diferentes alturas. Los resultados de los núcleos fueron usados para determinar la resistencia a compresión en sitio y el módulo de elasticidad a lo largo de la altura de la columna.



*Columna no reforzada dividida en tres secciones*

Finalmente, se probó otra columna no reforzada hecha con CAC con una resistencia a compresión de 60 MPa, sujetándola a una prueba de resistencia a compresión uniaxial.

Las series de especímenes designadas con el número 10 corresponden a concretos con resistencia a compresión de 40 MPa, la letra B o D indican el tipo de configuración de los estribos, y la letra X, cuando se presenta, identifica los especímenes no reforzados. La designación CAC indica que fue usada una mezcla de concreto autocompactable. Los especímenes sin designación indican que las columnas fueron hechas con concreto normal.

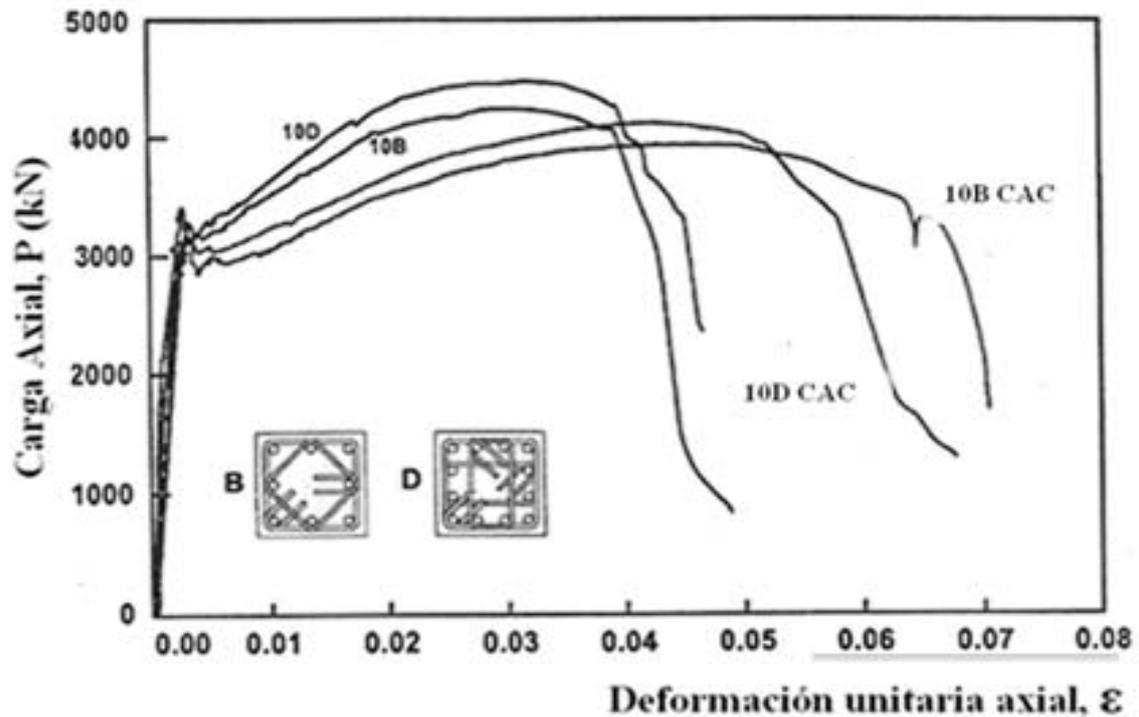
Todas las columnas fueron reforzadas con el mismo porcentaje de acero longitudinal ( $\rho_g=3.6\%$ ) y aproximadamente la misma cantidad de refuerzo lateral ( $\rho_g=4.9\%$  para estribos Tipo B y  $\rho_g=4.8\%$  para el Tipo D). Se utilizó un espaciamiento de estribos de 50 mm de centro a centro para todos los especímenes.

Se utilizaron barras de acero corrugado como refuerzo longitudinal y barras lisas como refuerzo lateral. Se utilizó acero convencional de alta resistencia para el refuerzo longitudinal y transversal, con valores de fluencia nominal de 400 y 800 MPa, respectivamente.

### Resultados de las pruebas

| Columnas                      | Carga axial        |                        |                      |                         |                  |                          | Deformación unitaria axial |                                       |                 |                                       |                   |   |
|-------------------------------|--------------------|------------------------|----------------------|-------------------------|------------------|--------------------------|----------------------------|---------------------------------------|-----------------|---------------------------------------|-------------------|---|
|                               | $P_{\max}$<br>(kN) | $\frac{P_{\max}}{P_0}$ | $P_{C1}$<br>(kN)     | $\frac{P_{C1}}{P_{0C}}$ | $P_{C2}$<br>(kN) | $\frac{P_{C2}}{P_{0CC}}$ | $\epsilon_{C1}$            | $\frac{\epsilon_{C1}}{\epsilon_{C0}}$ | $\epsilon_{C2}$ | $\frac{\epsilon_{C2}}{\epsilon_{C0}}$ | $\epsilon_{C50C}$ | $\frac{\epsilon_{C50C}}{\epsilon_{C0}}$ |
| 10B                           | 4249               | 1.51                   | 2433                 | 1.23                    | 3145             | 2.36                     | 0.0031                     | 0.98                                  | 0.0287          | 9.19                                  | 0.0429            | 13.75                                   |
| 10B CAC                       | 3939               | 1.50                   | 2276                 | 1.29                    | 2739             | 2.29                     | 0.0034                     | 1.12                                  | 0.0356          | 11.58                                 | 0.0686            | 22.34                                   |
| 10D                           | 4425               | 1.53                   | 2441                 | 1.24                    | 3231             | 2.42                     | 0.0026                     | 0.85                                  | 0.0274          | 8.77                                  | 0.0449            | 14.39                                   |
| 10D CAC                       | 4063               | 1.50                   | 2195                 | 1.24                    | 2766             | 2.31                     | 0.0034                     | 1.09                                  | 0.0385          | 12.53                                 | 0.0592            | 19.28                                   |
| 10X                           | 2441               | 1.07                   | 2441                 | 1.07                    | -                | -                        | 0.0024                     | 0.96                                  | -               | -                                     | -                 | -                                       |
| 10X CAC                       | 2153               | 0.96                   | 2153                 | 0.96                    | -                | -                        | 0.0029                     | 0.81                                  | -               | -                                     | -                 | -                                       |
| 8X CAC                        | 2943               | 1.02                   | 2943                 | 1.02                    | -                | -                        | 0.0020                     | 0.67                                  | -               | -                                     | -                 | -                                       |
| * $P_0=0.85f'_cA_c+f_yA_{st}$ |                    |                        | $P_{0C}=0.85f'_cA_c$ |                         |                  |                          | $P_{0CC}=0.85f'_cA_{cc}$   |                                       |                 |                                       |                   |   |

En la siguiente grafica, se presenta una comparación de carga axial contra deformación unitaria axial de columnas de concreto normal (CN) y concreto autocompactable (CAC). Los resultados son normalizados en términos de la carga en el concreto, con respecto a la sección no confinada y la sección transversal confinada.



### Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos, se presentan las siguientes conclusiones:

- El CAC adecuadamente proporcionado puede ser usado para elaborar columnas altamente confinadas, las cuales pueden ser hechas exitosamente sin vibración externa o interna, con lo que se simplifica y acelera el proceso de construcción.
- Las columnas hechas con CAC pueden desarrollar capacidades de carga máxima similares a las de concreto normal, pero considerablemente más dúctiles que las realizadas con este último.
- Se obtuvo una mayor homogeneidad en la distribución de la resistencia a compresión usando el altamente estable CAC, que la obtenida con concreto vibrado convencionalmente.
- A pesar de su alta deformabilidad, el CAC puede desarrollar resistencias a compresión más bajas en sitio, que las resistencias determinadas en cilindros de

---

---

control. Por lo tanto, debe ser aplicado un factor de reducción de 10%, para estimar la resistencia en sitio de los elementos de CAC probados en compresión.

### **6.3 OTROS ELEMENTOS ESTRUCTURALES**

En una investigación realizada por Khayat, Marai y Truder se obtuvieron algunas propiedades mecánicas de muros elaborados con CAC (40-50 MPa). Los núcleos (95 mm de diámetro y 190 mm de altura) tuvieron menor resistencia a la compresión que los cilindros estándar. La reducción fue aproximadamente de 10 % tanto para el CAC como para el concreto normal hecho con agregado máximo de 10 mm. La diferencia es debida particularmente al hecho de que los núcleos de la muestra estaban colados perpendicularmente a la dirección del ensaye, comparados con los cilindros de control, los cuales fueron probados en la misma dirección del ensaye. Estadísticamente, se obtuvieron diferencias insignificantes entre núcleos probados de la sección de la base y del extremo de muros experimentales de 1500 mm de altura y las diferencias estuvieron limitadas a 8%.

Las variaciones en resistencia a compresión de núcleos de CAC probados de la sección de la base y del extremo la columna de 1.4 m de altura fueron de 5% y cercano a 13% en el caso de la columna de la mezcla de control.

---

---

CONCLUSIONES  
Y  
RECOMENDACIONES

---

---

# **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

## **CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN**

Aunque el concreto autocompactable tiene características reológicas significativamente diferentes a las de los concretos normales, ambos no difieren mucho en términos de su comportamiento en otros aspectos del estado fresco o en el estado endurecido.

Sin embargo se ha observado que, en un CAC, la microestructura y las interfases agregado-pasta son más densas que un concreto normal con la misma relación agua/cemento, la permeabilidad a cloruros y gases es menor, y la adherencia entre el concreto y las barras del armado es mejor. Por otro lado, debido al contenido mayor de pasta, es de esperar un aumento en la sensibilidad a un curado no adecuado, que puede conducir al agrietamiento por contracción en elementos como losas y pavimentos; así mismo, un módulo de elasticidad más bajo que un concreto normal de la misma resistencia; y una mayor contracción por secado en el CAC de alta resistencia.

El concreto autocompactable realizado en este trabajo dio como resultado superficies mejor acabadas y por lo tanto menos permeables en comparación con un concreto normal.

## **CAPÍTULO II. CARACTERÍSTICAS DESEABLES DE LOS MATERIALES COMPONENTES**

### ***Materiales componentes***

La mayoría de los componentes del concreto autocompactable son los que se utilizan para la fabricación de los normales. Así por ejemplo, el cemento y los agregados (a excepción del tamaño máximo) no tiene que cumplir requisitos específicos adicionales a los que se exigen para concretos normales de buena calidad. En este sentido, siempre resulta ventajoso desde el punto de vista económico utilizar materiales locales, a efectos de minimizar costos de transporte.

---

---

## **Cemento.**

Tal como se mencionó, no existen en principio requisitos específicos en cuanto al tipo de cemento a utilizar en el CAC, siendo los criterios de elección en cuanto a su tipo similares a los empleados en el concreto normal (bajo calor de hidratación, resistente a sulfatos, etc.).

Sin embargo, en la literatura técnica sobre el CAC hay referencias sobre el uso de varios cementos no convencionales por la idoneidad de sus características especiales. En un interesante trabajo, Tanaka pone de manifiesto que el uso de “cemento esférico”, obtenido a través de un tratamiento mecánico del cemento normal, es benéfico para el CAC en términos de fluidez y control del calor de hidratación. Este cemento, con partículas esféricas, contenía menor volumen de finos inferiores a 3 micras que un cemento convencional.

## **Agregados.**

Los agregados usualmente empleados en la fabricación de concretos normales sirven para el CAC. Como en todos los concretos de buena calidad, es preferible emplear arenas y gravas limpias con granulometría continua y sin lajas.

El tamaño máximo del agregado grueso normalmente no sobrepasa los 20 mm en el CAC, siendo usuales los tamaños máximos comprendidos entre 12 y 16 mm. Se impone esta limitación para obtener mayor uniformidad en el movimiento y menor riesgo de bloqueo en el flujo.

Para este trabajo, el uso de los tamaños de 9.5 y 19 mm dio buenos resultados. Respecto al agregado fino, la arena tenía un porcentaje alto de polvo (21%), lo cual no hizo necesario agregar ningún adicinante (filler).

## **Adicionantes (finos tipo filler)**

Son distintos los tipos de finos “filler” utilizados en el CAC con el objetivo principal de aportar la apropiada cohesión a la mezcla, necesaria para evitar la segregación de los

---

---

agregados gruesos y el sangrado de agua durante la colocación del concreto. La definición de los finos tipo filler varía entre diferentes países con el tamaño máximo de las partículas, siendo este de 80, 90 o 125 micras. Los filler más empleados son polvo calizo, polvo de cuarzo, humo de sílice y cenizas volantes.

Además de ayudar a conseguir la cohesión necesaria en el CAC, los finos tipo filler permiten reducir el contenido de cemento en la pasta, evitando los problemas relacionados con el exceso de calor de hidratación y contracción.

Para conferir un mayor valor agregado al CAC desde la vertiente medioambiental, en investigaciones realizadas en Japón se ha utilizado como filler el polvo obtenido de la trituración de concreto de demolición

### **Aditivos**

El aditivo superfluidificante es un componente imprescindible para el CAC, y también se puede seleccionar de entre los disponibles en el mercado. Los únicos componentes atípicos del CAC en relación al concreto normal son los finos minerales y agentes modificadores de viscosidad que se emplean para conseguir un nivel adecuado de cohesión en la mezcla, evitando la segregación y el sangrado durante la colocación del concreto.

En esta investigación, el uso de superfluidificante fue necesario en todas las mezclas, no así el uso del modificador de viscosidad, del cual se puede prescindir si se llega a la dosificación óptima del primero.

### **CAPÍTULO III. DISEÑO DE LAS MEZCLAS**

La composición de la mezcla de un concreto autocompactable, al igual a la de un concreto normal, debe satisfacer todos los criterios de desempeño para este material en estado fresco y endurecido.

---

---

Para un concreto autocompactable se debe cumplir con tener una buena trabajabilidad, lo que incluye habilidad de llenado, acomodo por peso propio, alta fluidez con resistencia a la segregación y capacidad de paso entre el acero de refuerzo.

Se debe cuidar la dosificación de cada uno de los materiales componentes, en especial aquellos que contienen finos como la arena y el cemento ya que estos influyen en forma importante en la trabajabilidad de la mezcla.

Es importante cuidar el tiempo que la mezcla de concreto mantiene las propiedades reológicas deseadas para obtener buenos resultados a la hora de la colocación de este material.

Para obtener buenos resultados se deben cuidar las recomendaciones mencionadas en cuanto al proporcionamiento y las restricciones que hay para cada material componente, especialmente en cuanto a los finos.

#### **CAPÍTULO IV. REOLOGÍA DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE.**

De las pruebas realizadas al concreto autocompactable en estado fresco, que se aplican también al concreto normal, se puede decir que no existe una importante diferencia en cuanto los valores obtenidos:

| <b>Propiedad</b>                      | <b>Concreto autocompactable</b> | <b>Concreto normal</b> |
|---------------------------------------|---------------------------------|------------------------|
| Revenimiento (cm)                     | 1-4 *                           | 0-8                    |
| Peso volumétrico (kg/m <sup>3</sup> ) | 2200**                          | 2200-2400              |
| Contenido de aire (%)                 | 4.4**                           | 2-5                    |

\* Antes de aplicar aditivo.

\*\* Valor promedio

Respecto a las pruebas de trabajabilidad que se realizan propiamente para el concreto autocompactable podemos decir que las mezclas lograron las características deseadas

para un material de este tipo y que son: capacidad de llenado, capacidad de paso y resistencia a la segregación y sangrado.

En la siguiente tabla se resumen los valores promedio obtenidos en las pruebas de trabajabilidad y los rangos recomendados para cada una de ellas.

| Prueba                                   | Unidad      | Resultados* |            | Intervalo típico de valores |        |
|--|-------------|-------------|------------|-----------------------------|--------|
|  |             | TMA 19 mm   | TMA 9.5 mm | Mínimo                      | Máximo |
| Extensión de flujo por el cono de Abrams | mm          | 690         | 700        | 650                         | 800    |
| Extensión de flujo $T_{50}$              | seg         | 1.90        | 1.53       | 2                           | 5      |
| Embudo V                                 | seg         | 3.66        | 4.33       | 8                           | 12     |
| Caja L                                   | $(h_2/h_1)$ | 0.85        | 0.83       | 0.8                         | 1      |
| Orimet                                   | seg         | 2.33        | 2.66       | 0                           | 5      |

**\* Valores promedio**

*Extensión de flujo por el cono de de Abrams.* Los valores obtenidos en las pruebas realizadas se encuentran dentro del intervalo sugerido para esta prueba y se debe a que se encontró la dosificación óptima de superfluidificante.

*Extensión de flujo  $T_{50}$ .* Los valores que se obtuvieron en esta prueba están ligeramente bajos respecto al intervalo sugerido, principalmente para el TMA de 9.5 mm y se debe a que las partículas son más redondeadas en comparación al otro tamaño de agregado, pero se consideran aceptables.

*Embudo V.* Para esta prueba, en ambos tamaños de agregados, los valores registrados están muy por debajo del rango recomendado por lo que se recomienda evaluar la idoneidad de la aplicación de la prueba a los concretos estudiados. No se presentó bloqueo en ninguna prueba.

*Caja L.* En esta prueba los valores registrados para ambos tamaños de agregado, están dentro del intervalo sugerido y siempre se van a alcanzar si la mezcla tiene la fluidez suficiente. No se presentó bloqueo en ningún caso.

*Orimet.* Para este ensaye los valores obtenidos en las pruebas realizadas en ambos tamaños de agregado, son congruentes con los límites sugeridos. No se presentó bloqueo ya que las mezclas tenían la fluidez necesaria y los agregados no son lajeados.

En general, las mezclas elaboradas mostraron buenas características de autocompactabilidad de acuerdo con las pruebas realizadas.

Sin embargo, los ensayos de caracterización de la autocompactabilidad del concreto son numerosos y fundamentados en una base esencialmente empírica.

#### **CAPÍTULO V. CARACTERIZACIÓN DE LOS CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES.**

Las propiedades del concreto en estado endurecido son muy importantes en el desempeño de las estructuras durante su vida útil. Para que alcance ese estado de manera eficiente, el concreto debe tener un buen curado.

##### ***Resistencia a compresión***

| <b><math>f'_c</math> (kg/cm<sup>2</sup>) *</b> |  |                    |           |           |
|--|--|--------------------|-----------|-----------|
|  |  | <b>Edad (días)</b> |           |           |
| <b>TMA (mm)</b>                                | <b>Contenido de cemento (kg/m<sup>3</sup>)</b> | <b>7</b>           | <b>28</b> | <b>90</b> |
| 19   | 350  | 236                | 340       | 426       |
|  | 400  | 303                | 352       | 465       |
|  | 450  | 322                | 424       | 493       |
| 9.5  | 350  | 295                | 355       | 433       |
|  | 400  | 319                | 372       | 454       |
|  | 450  | 402                | 460       | 487       |

\* *Valores promedio*

---

---

Para concretos normales elaborados con agregados y consumos de cemento similares a los de esta investigación, los valores obtenidos de resistencia a compresión a 28 días están en un rango de 280 -380 kg/cm<sup>2</sup>.

En general, los valores obtenidos en la prueba de resistencia a compresión, son congruentes con el contenido de cemento usado, con excepción de una sensible baja en la resistencia para el TMA de 19 mm a 28 días y un contenido de cemento de 400 kg/m<sup>3</sup> (ver fig. 5.1.2).

La expresión encontrada para estimar la resistencia probable del concreto a cualquier edad respecto a la de 28 días resulto ser:

$$\text{TMA 19 mm} \quad (f_c)_t = \frac{t}{4.43 + 0.83t} (f'_c)_{28}$$

$$\text{TMA 9.5 mm} \quad (f_c)_t = \frac{t}{2.81 + 0.89t} (f'_c)_{28}$$

### ***Resistencia a tensión por flexión e indirecta***

La expresión que relaciona la resistencia a tensión por flexión del concreto con la resistencia a compresión fue la siguiente:

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

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

Para un concreto normal, elaborado con agregados similares (TMA de 19 mm), la resistencia a tensión por flexión se puede estimar como:

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

---

---

La expresión que relaciona la resistencia a tensión indirecta del concreto con la resistencia a compresión fue la siguiente:

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

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

Para un concreto normal, elaborado con agregados similares (TMA de 19 mm), la resistencia indirecta se puede evaluar como:

$$f_t = 1.53\sqrt{f'_c} \quad (\text{kg/cm}^2)$$

#### ***Módulo de elasticidad y Relación de Poisson***

En esta prueba se tuvieron buenos resultados en general a excepción de la mezcla de TMA 19 mm y 400 kg/m<sup>3</sup>, en la que los resultados no fueron los esperados.

La expresión que relaciona el módulo de elasticidad con la resistencia a compresión encontrada fue la siguiente:

$$\text{TMA 19 mm} \quad E_c = 13,156\sqrt{f'_c} \quad (\text{kg/cm}^2)$$

$$\text{TMA 9.5 mm} \quad E_c = 13,060\sqrt{f'_c} \quad (\text{kg/cm}^2)$$

Esta propiedad, para un concreto normal elaborado con agregados similares (TMA de 19 mm), se puede estimar como:

$$E_c = 14,700\sqrt{f'_c} \quad (\text{kg/cm}^2)$$

La deformación al esfuerzo máximo estuvo en el rango de 0.002-0.003. En comparación, para un concreto normal elaborado con materiales similares, la deformación al esfuerzo máximo está aproximadamente en 0.002.

La expresión que relaciona la relación de Poisson con la resistencia a compresión, resultó ser:

$$\text{TMA 19 mm} \quad \nu = 0.00023 f'_c + 0.206$$

$$\text{TMA 9.5 mm} \quad \nu = 0.00029 f'_c + 0.197$$

En un concreto elaborado con materiales componentes similares, el valor aproximado de la relación de Poisson es de 0.23.

### *Contracción por secado*

Los valores de contracción por secado última ( $\epsilon_u$ ) resultaron ser:

| TMA (mm) | Contenido de cemento (kg/m <sup>3</sup> ) | $\epsilon_u \times 10^{-6}$ |
|----------|---|-----------------------------|
| 19       | 350                                       | 692                         |
|          | 400                                       | 525                         |
|          | 450                                       | 673                         |
| 9.5      | 350                                       | 591                         |
|          | 400                                       | 615                         |
|          | 450                                       | 592                         |

Para un concreto normal en condiciones similares, los valores de contracción por secado se encuentran en el rango de 550-700 x 10<sup>-6</sup>.

---

---

### ***Deformación diferida***

El coeficiente de deformación diferida para una mezcla con contenido de cemento de  $400\text{kg/m}^3$ , resultó ser:

| <b>TMA (mm)</b> | <b><math>C_u</math></b> |
|-----------------|-------------------------|
| 19              | 2.10                    |
| 9.5             | 3.19                    |

Para un concreto normal en condiciones similares, los valores de  $C_u$  se encuentran en el intervalo de 4.4 - 4.8.

## **CAPÍTULO VI. DESEMPEÑO DE LAS ESTRUCTURAS COLADAS CON CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES**

### **Vigas**

Bajo cargas de servicio, hay más grietas, más anchas y con más profundidad en una viga elaborada con concreto normal (CN) que en una fabricada con concreto autocompactable (CAC) de resistencia similar, lo cual puede atribuirse a la diferencia de resistencia a compresión en sitio.

Las vigas elaboradas con CAC y CN con resistencia equivalentes, muestran comportamientos similares en términos de la deformación unitaria a carga última y tenacidad.

Finalmente, se observa que la capacidad de momento último de una viga fabricada con CAC es comparable con una viga fabricada con un CN de resistencia equivalente, y la máxima deflexión de la viga de CAC es ligeramente más alta que la de una viga de CN.

---

---

La predicción de la máxima deflexión de las vigas elaboradas con mezclas CAC y convencionales, se puede hacer usando la expresión del Código ACI basada en la ecuación de Branson.

### **Columnas**

El CAC adecuadamente proporcionado puede ser usado para elaborar columnas altamente confinadas, las cuales pueden ser hechas exitosamente sin vibración externa o interna, con lo que se simplifica y acelera el proceso de construcción.

Las columnas hechas con CAC pueden desarrollar capacidades de carga máxima ligeramente menores a las de concreto normal (10%), pero considerablemente más dúctiles que las realizadas con este último.

Se obtiene una mayor homogeneidad en la distribución de la resistencia a compresión usando el altamente estable CAC, que la obtenida con concreto vibrado convencionalmente.

### **COMENTARIOS FINALES**

Se debe de profundizar en aspectos referentes a la selección o priorización del tipo o tipos de ensayos más representativos, la sistematización y normalización de procedimientos de ensayo, y el desarrollo de criterios de validación o de aceptación - rechazo en un ámbito general, tanto en etapa de diseño del material, como para recepción y control en obra de concreto

---

---

## REFERENCIAS

- ASTM, “ANUAL BOOK OF ASTM STANDARDS: CONCRETE AND MINERAL AGGREGATES”, 1985.
- CONTRERAS, J., “CONCRETO, ESTRUCTURAS ELEMENTALES.”, REG. DE PROP. EN TRÁMITE, MÉXICO.
- DE LA PEÑA, B., “HORMIGON AUTOCOMPACTANTE”, REVISTA BIT, JUNIO 2001.
- EFNARC, “SPECIFICATION AND GUIDELINES FOR SELF-COMPACTING CONCRETE”, NOVIEMBRE 2001.
- INSTITUTO MEXICANO DEL CEMENTO Y DEL CONCRETO, “PRÁCTICA PARA DOSIFICAR CONCRETO NORMAL, CONCRETO PESADO Y CONCRETO MASIVO”, IMCYC, MEXICO 1986, pp. 108
- MENDOZA C., “CONCRETOS FABRICADOS CON ARENAS Y GRAVAS CALIZAS DISPONIBLES EN EL D.F.”, INSTITUTO DE INGENIERIA, UNAM, MÉXICO 1995.
- OKAMURA, H., “CONCRETO AUTOCOMPACTANTE DE ALTO COMPORTAMIENTO”, ACI MATERIALS JOURNAL, 1996.
- SONEBI M., TAMIMI A. Y BARTOS P., “PERFORMANCE AND CRACKING BEHAVIOR OF REINFORCED BEAMS CAST WITH SELF-COMPACTING CONCRETE”, ACI MATERIALS JOURNAL, DICIEMBRE 2003, pp. 492-499.
- “FUNCIONAMIENTO ESTRUCTURAL Y PROPIEDADES EN SITIO DEL CONCRETO AUTOCOMPACTABLE USADO PARA LA ELABORACIÓN DE COLUMNAS ALTAMENTE REFORZADAS”, ACI MATERIALS JOURNAL.