

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**CONCRETOS AUTO-COMPACTABLES, SUSTENTABLES Y ECONÓMICOS,
CON ALTOS CONSUMOS DE CENIZA VOLANTE, PARA USO
ESTRUCTURAL**

Por

PEDRO ALBERTO RAMÍREZ GARZA

**Como requisito parcial para obtener el grado de
MAESTRIA EN INGENIERÍA, con Especialidad en
Ingeniería Estructural**

Diciembre de 2 0 0 7

**CONCRETOS AUTO-COMPACTABLES, SUSTENTABLES Y ECONÓMICOS
CON ALTOS CONSUMOS DE CENIZA VOLANTE PARA USO
ESTRUCTURAL**

Aprobación de la Tesis:

Dr. Alejandro Durán Herrera

Dr. Pedro L. Valdez Tamez

Asesores de Tesis

Dr. Pedro L. Valdez Tamez
Subdirector de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería Civil U. A. N. L.

RESUMEN

El concreto auto-compactable tiene la capacidad de fluir en el interior de la cimbra, pasando entre el acero de refuerzo y consolidándose únicamente bajo la acción de su propio peso, “auto-compactándose” sin presentar segregación. La ceniza volante es un material puzolánico artificial sub-producto de las impurezas obtenidas del proceso de combustión del carbón; se utiliza como complemento cementante, y en conjunto con el cemento Pórtland, se pueden producir diferentes tipos de concretos estructurales. En el presente trabajo se utilizaron altas relaciones ceniza volante / cemento Pórtland para estudiar su influencia en la fabricación de concretos auto-compactables. Al ser la ceniza volante un material contaminante ambiental y al utilizarla en grandes cantidades en el diseño de concretos auto-compactables, se apoyan los procesos sustentables; así también, se tienen beneficios económicos debido al ahorro en la cantidad de cemento Pórtland y de mano de obra necesarios para la colocación y compactación; además, se conservan los requerimientos mínimos de resistencia para su uso estructural y se mejora la durabilidad. El estudio se encaminó a encontrar las proporciones de ingredientes que condujeran a obtener las propiedades de auto-compactabilidad en estado fresco, para lo cual se utilizaron diferentes dispositivos de medición y métodos especiales seleccionados de recomendaciones y normas internacionales. La investigación también se orientó en realizar pruebas de resistencia mecánicas en estado endurecido a diferentes edades para definir su uso en aplicaciones de elementos estructurales. Se realizaron los análisis de costos de material para el concreto auto-compactable y se compararon con los costos de los concretos estructurales convencionales.

Contribuciones y Conclusiones: Se encontraron para algunos proporcionamientos las características del concreto en estado fresco que definen la auto-compactabilidad. La resistencia a la compresión especificada del concreto ($f'c$) para diferentes consumos de ceniza resultó mayor a lo mínimo especificado por el ACI-318-05; los valores del módulo de elasticidad y la relación de poisson estuvieron dentro de los rangos reportados en la literatura. Se determinó un procedimiento de diseño para optimizar la dosificación de materiales y la fabricación de estos tipos de concreto. El costo de los materiales para los concretos estudiados resultó menor al de un concreto convencional para uso estructural de resistencia a la compresión similar.

AGRADECIMIENTOS

Gracias a Dios...

También quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi mamá, la Sra. Bertha Leticia Garza Tijerina (†) por darme la vida, por hacerme la persona que soy ahora y hacer posible que llegara este momento.

Gracias a mi Papá, el Sr. Pedro Ramírez Pavón y a mis hermanos Diego y Edgar, porque son parte importante en mi vida; también un agradecimiento a mis familiares, los cuales siempre han estado conmigo en los momentos difíciles.

También quiero agradecerle a mis amigos: Miguel, Sergio (†), Juan, Benito, Luis (Batman), Luis (Wicho), Cristian, Taméz y el Ing. Mario Castillo quienes de alguna u otra forma me ayudaron incondicionalmente para el desarrollo de esta investigación.

Gracias al Dr. Alejandro Durán y al Dr. Pedro Valdez por darme la oportunidad de hacer este trabajo y tomarse su tiempo tan valioso en ayudarme y asesorarme para la realización del mismo. Gracias también al Departamento de Tecnología del Concreto de la FIC de la U.A.N.L., al Ing. Manuel Durán, Don Cata y Jonhy por su apoyo en la realización de pruebas y ensayos.

A mi Amor (Liz), gracias por tu apoyo incondicional, tu tiempo, comprensión... en fin, nunca acabaría de agradecerte todo lo que haces por mí... te amo y siempre te amaré porque tú eres el amor de mi vida.

DEDICATORIA

Quisiera dedicar este trabajo a mi mamá, la Sra. Bertha Leticia Garza Tijerina (†), a quien cual le debo todo lo que soy ahora; sé que ella leerá estas palabras, porque siempre estará conmigo cuidándome y queriéndome como siempre. A mis hermanos Diego y Edgar y mi Papá, el Sr. Pedro Ramírez Pavón, quienes siempre han estado al pendiente de mí y siempre lo estarán.

Amor, este trabajo también es para ti...te amo.

Gracias a Dios y a todos mis familiares y amigos.

Pedro Alberto Ramírez Garza

ÍNDICE DE CONTENIDO

Sección	Página	
1	INTRODUCCIÓN.	1
1.1	Concreto auto-compactable.	1
1.2	Homogeneidad.	1
1.3	Materiales para la producción del CAC.	2
1.3.1	Cemento Pórtland.	2
1.3.2	Ceniza volante.	2
1.3.3	Agregados.	3
1.3.4	Aditivos superfluidificantes.	4
1.3.5	Aditivos modificadores de la viscosidad.	4
1.4	Caracterización de los CAC en estado fresco.	5
1.4.1	Resistencia a la segregación.	5
1.4.2	Capacidad de paso.	5
1.4.3	Capacidad de llenado.	6
1.5	Sustentabilidad y economía.	6
1.6	Concreto auto-compactable estructural.	7
1.6.1	Dosificación de materiales para la producción del concreto.	8
1.6.2	Resistencia promedio requerida.	8
1.7	Técnicas de fabricación.	9
1.8	Costos del concreto estructural.	11
2	ANTECEDENTES.	12
3	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA / JUSTIFICACIÓN.	14
4	HIPÓTESIS.	17
5	OBJETIVOS.	18
6	METAS.	19
7	DESARROLLO EXPERIMENTAL.	20
7.1	Materiales.	20
7.1.1	Cemento Pórtland.	20
7.1.2	Ceniza volante.	20
7.1.3	Agregados.	21
7.1.3.1	Combinación inicial de agregados.	21
7.1.4	Aditivo superfluidificante.	22
7.1.5	Modificador de la viscosidad.	22
7.2	Constantes del proyecto.	22
7.2.1	Cementante total.	22
7.2.2	Proporcionamientos cemento - ceniza volante.	23
7.2.3	Relación agua - cementante total (A/CT).	23
7.2.4	Parámetros de auto-compactabilidad.	23
7.3	Selección de las proporciones de la pasta.	24
7.3.1	Procedimiento de mezclado de pastas.	24
7.3.2	Dosificación óptima del aditivo.	24
7.3.2.1	Procedimiento de prueba del cono de fluidez.	25
7.3.3	Dosificación óptima de ceniza volante.	26
7.3.3.1	Mini-revenimiento.	27

Sección	Página
7.4 Mezclas de concreto.	28
7.4.1 Criterios para establecer las proporciones de partida.	28
7.4.2 Procedimiento de mezclado del concreto.	29
7.4.3 Propiedades del concreto en estado fresco.	30
7.4.3.1 Prueba del revenimiento fluido.	33
7.4.3.2 Prueba del índice de estabilidad visual.	35
7.4.3.3 Prueba del anillo "J".	37
7.4.3.4 Prueba del embudo "V".	41
7.4.3.5 Prueba de la caja "L".	43
7.5 Definición de las proporciones del concreto.	44
7.6 Propiedades mecánicas por determinar.	45
8 RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	46
8.1 Determinación de la densidad del cementante.	46
8.2 Granulometría.	46
8.2.1 Agregado fino.	47
8.2.2 Agregado grueso.	48
8.2.3 Diseño de granulometría total.	50
8.3 Aditivo superfluidificante.	51
8.4 Resultados para A/CT=0.40.	51
8.4.1 Resultados de la prueba de revenimiento fluido, con A/CT=0.40.	51
8.4.2 Resultados de la prueba del mini-revenimiento, para A/CT=0.40.	53
8.4.3 Tanteos en la prueba de revenimiento fluido, para definir Las proporciones (A/CT=0.40).	54
8.5 Resultados para A/CT=0.425.	55
8.5.1 Resultados de la prueba del cono de fluidez, para A/CT=0.425.	55
8.5.2 Resultados de la prueba de mini-revenimiento, para A/CT=0.425.	57
8.5.3 Tanteos en la prueba revenimiento fluido, para definir las proporciones (A/CT=0.425).	58
8.6 Resultados de las mediciones de las propiedades en estado fresco.	60
8.7 Resultados de las mediciones de las propiedades en estado endurecido.	65
8.7.1 Resultados de resistencia a la compresión.	65
8.7.2 Resultados del módulo de elasticidad y la relación de Poisson.	70
8.8 Análisis de los costos del concreto auto-compactable.	71
8.9 Procedimiento sugerido para la producción de concretos auto- compactables con ceniza volante.	73
9 CONCLUSIONES.	74
10 RECOMENDACIONES.	76
11 GLOSARIO DE TÉRMINOS.	77
13 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	82
12 ANEXO DE FIGURAS.	85
12.1 Plano de prueba revenimiento fluido.	85
12.2 Plano de dispositivo anillo "J".	86
12.3 Plano de dispositivo embudo "V".	87
12.4 Plano de dispositivo caja "L".	88
12.5 Mini-cono de revenimiento "kantro".	89

NOMENCLATURA

A	Agua
ACI	Instituto Americano del Concreto
A/CT	Relación agua - cementante total
AF	Agregado fino
AG	Agregado grueso
ASF	Aditivo superfluidificante
ASTM	American Society for Testing Materials
C	Cemento Pórtland
CT	Cementante total
cm	Centímetros
CAC	Concreto auto-compactable
CV/C	Relación ceniza volante – cemento Pórtland
CPC	Cemento Pórtland compuesto
CO₂	Bióxido de carbono
CV	Ceniza volante (cementante complementario)
DIA	Dosificación inicial de aditivo superfluidificante
DOA	Dosificación óptima de aditivo superfluidificante
E	Módulo de elasticidad (módulo de Young)
EFNARC	Federación Europea para Sistemas Especializados en Concretos y Químicos para la Construcción
F	Filler
fc	Resistencia a la ruptura del concreto a compresión
f'c	Resistencia especificada del concreto a compresión
f'cr	Resistencia promedio a la compresión requerida
g	Gramos
g/cm³	Gramos por centímetro cúbico
IVA	Impuesto al valor agregado
kg	Kilogramo
kgf/cm²	Kilogramos fuerza por centímetro cuadrado
kg/m³	Kilogramo por metro cúbico
L	Litros
mm	Milímetro
mL/kgCT	Mililitros por kilogramo de cementante total
MPa	Megapascales (1x10 ⁶ Pascales)
NA	Información no aplicable
PVSS	Peso volumétrico seco suelto
PVVS	Peso volumétrico varillado seco
s	Segundos
Ss	Desviación estándar (desviación media cuadrática de los valores individuales con respecto a su promedio)
TA	Temperatura ambiente (°C)
TDIM	Tiempo después de iniciado el mezclado
TMA	Tamaño máximo del agregado
T115	Tiempo necesario para que se presente un diámetro de 11.5cm
T50	Tiempo necesario para que se presente un diámetro de 50cm
VSI	Índice de estabilidad visual
μ	Relación de Poisson
μm	Micrómetro

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Título	Página
1.	Resistencia promedio a la compresión requerida cuando existen datos disponibles para establecer una desviación estándar [3]. . . .	9
2.	Costo promedio del concreto estructural premezclado en el área metropolitana de Monterrey.	11
3.	Contenidos de C y CV en el cementante total.	23
4.	Dispositivos de medición de propiedades en estado fresco.	31
5.	Criterio de clasificación del índice visual de estabilidad (VSI).	36
6.	Geometría del anillo “J” de acuerdo al T.M.A.	37
7.	Tamices y graduaciones establecidos en ASTM C-33.	46
8.	Granulometrías arenas muestreadas.	47
9.	Granulometría del agregado fino.	48
10.	Granulometrías gravas muestreadas.	49
11.	Granulometría del agregado grueso.	50
12.	Determinación de las propiedades físicas de los agregados.	51
13.	Puntos de saturación de aditivo para A/CT=0.40.	52
14.	Tanteos en la prueba revenimiento fluido con A/CT=0.40.	55
15.	Puntos de saturación de aditivo para A/CT=0.40 y 0.45.	56
16.	Tanteos en la prueba de revenimiento fluido, con A/CT=0.425.	59
17.	Proporciones de mezclas para A/CT=0.425.	60
18.	Dosificaciones de ASF para las pastas y los concretos, con A/CT=0.425.	60
19.	Criterios de aceptación para el CAC.	61
20.	Resultados en la prueba revenimiento fluido, VSI y embudo “V” con A/CT=0.425.	61
21.	Resultados del anillo “J” con A/CT=0.425.	62
22.	Resultados de la caja “L” con A/CT=0.425.	63
23.	Resultados de pruebas en estado fresco para A/CT=0.425.	64
24.	Desarrollo de resistencias a compresión hasta la ruptura (fc).	66
25.	Valores de f'cr necesarios para diferentes f'c.	69
26.	Proporciones de C y CV para diferentes f'c a la edad de 28 días.	69
27.	Resultados de E y μ para resistencias a compresión (fc) a 28 días.	70
28.	Costos de los materiales constituyentes del concreto.	71
29.	Costos del concreto auto-compactable para diferentes mezclas.	71
30.	Costos comerciales y de materiales del concreto.	72

ÍNDICE DE IMAGENES

Imagen	Descripción	Página
1.	Colado de concreto convencional.	1
2.	Detalle de obstrucción del concreto por una pobre capacidad de paso.	6
3.	Compactación del concreto convencional por medios físicos (vibrado).	10
4.	Cono de fluidez con abertura de 8mm.	25
5.	Mini-cono kantro.	27
6.	Medición de diámetro en la prueba del mini-revenimiento.	28
7.	Mezcladora de concreto tipo trompo.	29
8.	Prueba de revenimiento fluido.	31
9.	Anillo “J”.	32
10.	Túnel “V”.	32
11.	Caja “L”.	33
12.	Llenado del cono de revenimiento en prueba revenimiento fluido.	34
13.	Extensión final del concreto en prueba revenimiento fluido.	34
14.	Medición del diámetro final en prueba revenimiento fluido.	35
15.	Mezcla no homogénea con segregación y sangrado (VSI=3).	36
16.	Mezcla homogénea sin problemas de segregación y sangrado (VSI=0).	37
17.	Puntos de medición de la prueba del Anillo “J”.	39
18.	Prueba del anillo “J”.	40
19.	Detalle de la capacidad de paso en la prueba del anillo “J”.	40
20.	Llenado del embudo “V”.	42
21.	Vaciado del concreto en el embudo “V”.	42
22.	Llenado de la caja “L”.	44
23.	Capacidad de paso y llenado en la caja “L”.	44
24.	Cilindros de CAC para ser ensayados a compresión.	65
25.	Cilindros ensayados a compresión.	65
26.	Determinación del módulo de elasticidad y la relación de Poisson.	70

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica	Título	Página
1.	Gráfica de Fuller.	21
2.	Granulometría del agregado fino.	48
3.	Granulometría del agregado grueso.	49
4.	Granulometría total con 41.5% AG y 58.5% AF.	50
5.	Dosificaciones de aditivo para una A/CT=0.40.	52
6.	Tiempo T115 en la prueba del mini-revenimiento para A/CT= 0.40. . .	53
7.	Diámetro final en la prueba del mini-revenimiento para A/CT= 0.40. .	54
8.	Dosificaciones de aditivo para una A/CT=0.425.	56
9.	Influencia de la CV en el punto de saturación del aditivo para A/CT=0.425.	57
10.	Tiempo T115 en la prueba del mini-revenimiento para A/CT=0.425. .	57
11.	Diámetro final en la prueba del mini-revenimiento para A/CT=0.425.	58
12.	Desarrollo de resistencias a compresión hasta la ruptura (fc).	66
13.	Relación de resistencia a la compresión con la cantidad de cemento.	67
14.	Relación de resistencia con la cantidad de ceniza volante.	68
15.	Costos comerciales y de materiales del concreto estructural Vs. costos de materiales del CAC.	72

1. INTRODUCCIÓN

1.1.-Concreto auto-compactable.

El Concreto Auto-compactable (CAC), utilizado en la fabricación de elementos estructurales, se define como aquel concreto que es capaz de fluir libremente durante el colado, librando obstáculos a su paso como armados congestionados de acero de refuerzo (varillas) y llenando espacios que no podrían llenarse de manera tradicional sin presentar segregación; además, debe conservar los requerimientos mínimos de resistencia y durabilidad, similar a un concreto reforzado compactado convencionalmente (**Imagen 1**).



Imagen 1.- *Colado de concreto convencional.*

1.2.-Homogeneidad.

Como es sabido, el concreto es un material compuesto, por ser el resultado de una mezcla de diferentes ingredientes. El concepto de homogeneidad se refiere a una distribución uniforme de todos los materiales que lo conforman. En los concretos convencionales es relativamente fácil lograr la homogeneidad sin problemas de segregación (inestabilidad).

En el CAC éste es un aspecto que demanda mucha atención, ya que por los niveles típicos de fluidez representa un riesgo latente, que al presentarse, demerita de manera significativa la calidad del concreto endurecido en la estructura. Por tal motivo, el control de esta propiedad en los CAC requiere, desde la etapa de diseño, un control de selección de materiales y de las etapas de producción.

1.3.- Materiales para la producción del CAC.

1.3.1.- Cemento Pórtland.

En el diseño o proporcionamiento del concreto estructural, el cemento Pórtland (C) es considerado el cementante principal y éste puede ser de varios tipos, dependiendo de las condiciones de exposición de la estructura, de la sanidad de los agregados y del acabado estético deseado. Al aumentar la cantidad de C en una mezcla de concreto la resistencia del mismo se ve incrementada, pero, a su vez, se tiene la posibilidad de problemas relacionados con las retracciones o cambios volumétricos que afectan la durabilidad [1]; cabe mencionar que el C es el material que más puede influir en el costo del concreto y que, desde un enfoque de durabilidad, se debe tratar de minimizar su contenido en el mismo.

1.3.2.- Ceniza volante.

En conjunto con el cemento, se puede recurrir al uso de cementantes complementarios que pueden ser de origen natural o artificial. Estos materiales coadyuvan a mejorar las propiedades del concreto en estado fresco y en estado endurecido, incrementando la durabilidad de la estructura.

Los factores económicos y ambientales han incrementado el uso de diversos cementantes complementarios, conocidos como puzolanas; algunos de los más importantes provienen de subproductos de procesos industriales.

La importancia de estos materiales radica en que presentan propiedades cementantes al reaccionar con los hidróxidos de calcio, producidos en la reacción de hidratación del cemento Pórtland y el agua disponible en la solución del poro en el concreto; en muchos de los casos, los precios de estos productos son menores con respecto al C.

La ceniza volante (CV) es un material que resulta de la producción de energía eléctrica, en las plantas carboeléctricas, producto de la combustión del carbón; como resultado de este proceso, se generan polvos o partículas en la mayoría de los casos de forma esférica y de tamaño microscópico, que están conformadas principalmente de óxidos de silicio y aluminio.

Si este tipo de materiales no son colectados y dispuestos de manera responsable, representan un contaminante para nuestra atmósfera, el suelo y el agua; en el nivel mundial, se estima que sólo el 20% de este material se utiliza como complemento cementante y el resto se utiliza en aplicaciones menores, como rellenos de tierra y bases de asfalto y la gran mayoría se deposita como desperdicio [2]; entonces, desde un enfoque ecológico, este material representa un agente de contaminación ambiental.

1.3.3.- Agregados.

Los agregados son materiales granulares que junto con el cementante se utilizan para la fabricación del concreto. Éstos se clasifican como agregados gruesos (AG) y agregados finos (AF).

Para su uso en el concreto, cada uno de ellos deberá contar con una granulometría o distribución de tamaños de partícula tal, que en conjunto con la pasta se logre un concreto lo más denso posible.

A diferencia de los agregados naturales, los agregados triturados, como el utilizado para este proyecto, son aquéllos que resultan de un proceso de molienda.

1.3.4.- Aditivos superfluidificantes.

Los aditivos superfluidificantes son ingredientes diferentes al agua, el cemento y a los agregados, que se utilizan en el concreto para mejorar alguna(s) de sus propiedades en estado fresco o endurecido. En el caso de los superfluidificantes, éstos se utilizan para aumentar la fluidez del concreto y son imprescindibles para dar una alta fluidez a los CAC.

En los concretos convencionales, facilitan el proceso de colocación y vibrado; disminuyen, para la misma consistencia, la relación agua/cementante total (A/CT), con lo cual se tienen mejores características de resistencia y durabilidad. Adicionalmente a esto, en ocasiones este tipo de aditivos ayudan a reducir los costos de producción para una resistencia similar en concretos sin este tipo de aditivos.

1.3.5.- Aditivos modificadores de la viscosidad.

La función de estos aditivos es incrementar la cohesividad de la mezcla, para evitar que la fluidez sea excesiva; o, en otras palabras, se aumente la resistencia a la segregación del concreto.

Los aditivos modificadores de la viscosidad pueden clasificarse de dos maneras diferentes:

- a) Químicos.
- b) Filler: es un producto que resulta de la molienda de agregados para concreto, con un tamaño máximo de 0.125mm.

1.4.- Caracterización de los CAC en estado fresco.

A diferencia de los concretos convencionales, como ya se mencionó anteriormente, por la alta fluidez requerida en estado fresco, los CAC demandan un mayor cuidado y control de las propiedades en este estado; para ello existen diversos métodos (algunos recientemente estandarizados por ASTM), orientados a caracterizar su comportamiento en cuanto a:

- a) Estabilidad (Revenimiento fluido ASTM C-1611).
- b) Capacidad de paso (Anillo "J" ASTM C-1621).
- c) Capacidad de llenado (En proceso de estandarizar).

1.4.1.- Resistencia a la segregación.

Cuando se hace el diseño de la mezcla de concreto, se busca que, en conjunto, las propiedades en que se dosifiquen los ingredientes y el mezclado produzcan una mezcla homogénea que tenga la fluidez y trabajabilidad necesarias para la adecuada colocación del mismo. Para que estos concretos resulten estables, deben mantener una cohesividad que garantice la uniformidad de la mezcla durante el colado y hasta el reposo del concreto en su posición final en la estructura; es decir, que la fluidez no se exceda, ya que con esto provocaría la separación de algunos constituyentes (normalmente los agregados), causando la pérdida de homogeneidad; en otras palabras, que el concreto se segregue.

1.4.2.- Capacidad de paso.

En elementos de concreto estructural, donde se tiene un gran congestionamiento del refuerzo (varillas), el concreto puede enfrentar problemas para colarse, ya que cuando trata de pasar a través de las obstrucciones, la mezcla puede perder fluidez y pueden separarse los elementos constitutivos de la mezcla (agregados y pasta), produciendo con esto una segregación inducida por la obstrucción que representa el refuerzo (**Imagen 2**).



Imagen 2.- *Detalle de obstrucción del concreto por una pobre capacidad de paso.*

1.4.3.- Capacidad de llenado.

En el momento en que el concreto pasa a través de las obstrucciones, éste debe conservar la suficiente cohesividad y viscosidad para que el elemento estructural sea llenado en su totalidad, asegurando una mezcla homogénea y un llenado completo de todos los espacios del elemento que se esté colando.

Esta propiedad es muy importante, para evitar zonas sin concreto en los elementos que durante el colado están totalmente cubiertos por la cimbra y que a simple vista no es posible apreciar si ese espacio se llenó por completo.

1.5.- Sustentabilidad y economía.

Sustentabilidad es la interrelación entre los sistemas económicos y ecológicos; en la cual, los efectos de las actividades humanas no permitan la destrucción de la diversidad, la complejidad o el funcionamiento de los sistemas ecológicos que soportan la vida.

Al utilizar la CV en la producción del CAC, se apoyan los procesos sustentables al reducir la contaminación; ya que la disposición final de este material será como complemento cementante en el concreto; además, los CAC no requieren de medios físicos o mecánicos para realizar su compactación, tales como el vibrado, logrando con esto que se reduzca la contaminación acústica en las zonas donde se realicen obras de construcción.

También se tendrá ahorro en el costo, al no requerir mano de obra calificada para realizar la compactación del concreto, además de ahorro en tiempo, ya que el colado del concreto se podrá realizar con mayor rapidéz.

1.6.- Concreto auto-compactable estructural.

El reglamento ACI-318-05 [3] establece, en la sección 5.1.1, que el concreto debe dosificarse para proporcionar una resistencia promedio a la compresión requerida (f'_{cr}), de acuerdo con las condiciones estructurales y de servicio del proyecto. El concreto debe producirse de tal manera que se minimice la frecuencia de resultados inferiores a la resistencia especificada de diseño (f'_c); el reglamento enfatiza que la resistencia promedio a la compresión del concreto producido debe exceder siempre el valor especificado f'_c utilizado en el diseño estructural. La determinación del f'_c se basa en conceptos probabilísticos que están orientados a asegurar un desarrollo adecuado de la resistencia en la estructura.

El reglamento establece que un concreto se considerará con capacidad estructural, cuando presente un f'_c mayor que 17.0MPa (175kg/cm²). A menos que se especifique lo contrario, f'_c debe basarse en ensayos a los 28 días. Si el ensayo no es a los 28 días, la edad del ensayo para obtener f'_c debe indicarse en los planos o especificaciones de diseño. El concreto auto-compactable debe considerar todas las especificaciones indicadas en este reglamento para que pueda considerarse su uso en elementos estructurales.

1.6.1.- Dosificación de materiales para la producción del concreto.

De acuerdo con la sección 5.2.1 del ACI-318-05 [3], la dosificación de los materiales para la producción del concreto debe establecerse para lograr:

- (a) Una trabajabilidad y consistencia que permitan colocar fácilmente el concreto dentro de la cimbra y alrededor del refuerzo, según las condiciones de colocación seleccionadas, sin que se presente segregación ni sangrado excesivo.
- (b) Una resistencia que supere las condiciones de exposición especiales.
- (c) Suficiente conformidad con los requisitos de resistencia mecánica.

Para seleccionar las proporciones del concreto, el reglamento hace hincapié en el empleo de la experiencia en la producción del concreto o en la elaboración de mezclas de prueba en el laboratorio.

1.6.2.- Resistencia promedio requerida.

La resistencia, promedio, a la compresión, requerida (f'_{cr}), usada como base para definir las proporciones que constituirán la mezcla del concreto, debe determinarse empleando las ecuaciones de la **Tabla 1**. Para el empleo de estas ecuaciones se debe establecer una desviación estándar (S_s) con base en registros de pruebas previas. En este sentido, las experiencias en la producción de concreto premezclado, en el área metropolitana de Monterrey, presentan una S_s promedio de 30kg/cm^2 .

Para el diseño de los elementos estructurales es necesario contar con los valores de módulo de elasticidad (E) y la relación de Poisson (μ). El módulo E resulta de dividir el esfuerzo unitario entre su deformación unitaria correspondiente; se podría decir que es el grado de rigidez del material; el valor μ en un elemento estructural

representa la relación de su deformación longitudinal entre la transversal.

Tabla 1.- Resistencia promedio a la compresión requerida cuando existen datos disponibles para establecer una desviación estándar [3].

Resistencia especificada a la compresión, $f'c$, kgf/cm^2	Resistencia promedio requerida a la compresión, $f'cr$, kgf/cm^2
$f'c < 350$	Usar el mayor valor obtenido de las ecuaciones (1-1) y (1-2): $f'cr = f'c + 1.34 Ss \quad (1-1)$ $f'cr = f'c + 2.33 Ss - 350 \quad (1-2)$
$f'c > 350$	Usar el mayor valor obtenido con las ecuaciones (1-3) y (1-4): $f'cr = f'c + 1.34 Ss \quad (1-3)$ $f'cr = 0.90 f'c + 2.33 Ss \quad (1-4)$

1.7.-Técnicas de fabricación.

El CAC se fabrica con técnicas y proporciones de materiales adecuados para obtener condiciones de fluidez, homogeneidad en cuanto a la distribución granulométrica de las fases y la estabilidad apropiadas, sin la necesidad de medios físicos para su compactación; así mismo, debe tener las características de resistencia, apariencia y durabilidad necesarias para la correcta funcionalidad de las construcciones.

Al hablar de medios físicos, se alude a aquellos necesarios para lograr la compactación del concreto, sin provocar con esto que se altere la distribución de los materiales y se vea afectada la estabilidad; tal es el caso de la vibración por medios mecánicos o vibradores (**Imagen 3**); los cuales, cuando se utilizan de manera inadecuada en concretos convencionales, pueden generar problemas de pérdida de homogeneidad o segregación y causar que se vean afectadas las características de resistencia y durabilidad del concreto. Además, estos equipos producen ruido, provocando que exista contaminación acústica.

Este procedimiento consiste en introducir un vibrador mecánico en el concreto, en intervalos de distancia y tiempo especificados, de acuerdo con las características del vibrador, como: frecuencia, intensidad y área de influencia.



Imagen 3.- Compactación del concreto convencional por medios físicos (vibrado).

En el proceso de construcción con criterio convencional, una etapa obligada para asegurar el mínimo contenido de aire y por consiguiente máxima densificación, es la compactación, la cual normalmente se lleva a cabo por medio de vibradores internos, externos o una combinación de ambos. Adicional a los recursos humanos y económicos que las etapas previas demandan (fabricación del concreto, transporte y colocación) la compactación también requiere de estos recursos y en muchos de los casos no se ejecuta de una manera adecuada por falta de capacitación del personal que la realiza; además de que es una operación que genera ruido.

Los CAC, por su lado, son concretos que por no requerir de esta etapa, aportan ahorros en la planeación y la mano de obra; y en muchas de las ocasiones no generan ruido, lo cual resulta muy

atractivo en proyectos como ampliaciones de hospitales, escuelas, museos, etc.

1.8.-Costos del concreto estructural.

En el área Metropolitana de Monterrey, los concretos para uso estructural, para diferentes resistencias de diseño especificadas a la compresión ($f'c$), con revenimiento mínimo de 15cm, tienen los costos que aparecen en la **Tabla 2**.

Tabla 2.- Costo promedio del concreto estructural premezclado en el área metropolitana de Monterrey.

f'c kg/cm²	Costo Comercial Pesos/m³	Costo Material* Pesos/m³
100	\$ 782.00	\$ 531.71
150	\$ 831.00	\$ 616.35
200	\$ 908.00	\$ 701.00
250	\$ 993.00	\$ 777.70
300	\$1,105.00	\$ 871.83
350	\$1,373.00	\$ 948.40
400	\$1,641.00	\$1,032.32

*Excluye los costos de diseño, mezclado, transporte, gastos administrativos y de logística, así como utilidad; precios de materiales a agosto del 2007 (Sin IVA). El $f'c$ considerado para el cálculo corresponde a los 28 días.

2. ANTECEDENTES

La tecnología del CAC surgió en Japón, a finales de los ochenta del siglo XX, como una necesidad debida a la cada vez más faltante mano de obra calificada y certificada [4, 5]; este tipo de concreto se ha desarrollado rápidamente en Asia, Europa y Norte América, ha sido usado principalmente en componentes prefabricados, obras inaccesibles y estructuras en reparación, en donde la rapidez de colocación juega un papel importante [6].

En nuestro país, al CAC se le considera como un nuevo material; del cual, en la industria de la construcción, se conoce muy poco acerca de sus características y beneficios. De esta tecnología se pueden obtener muchos beneficios, si se estudian e investigan sus variables más significativas.

Los consumos de cemento Pórtland utilizados comúnmente para el concreto auto-compactable oscilan entre 400 y 600 kg/m³ [4, 7, 8]; estos consumos resultan elevados en relación con los utilizados en los concretos convencionales para uso estructural (250 a 450 kg/m³) [9], además de que se requiere del uso de aditivos superfluidificantes para aumentar la fluidez del concreto y/o aditivos modificadores de la viscosidad, para dar la cohesividad necesaria y mantener la estabilidad. En muchos de los casos, estos aditivos resultan costosos [10].

Diversas investigaciones realizadas en otros países o centros de investigación han sido llevados a cabo con materiales tales como agregados, cementos, aditivos etc., que existen en esas regiones [5, 8, 11]; los que no es posible comparar con los disponibles en nuestro país e inclusive en nuestra región (noreste de México), ya que las características físicas, morfológicas y mecánicas de estos materiales son diferentes.

Recientemente, la ASTM ha adoptado tres métodos de prueba al CAC en estado fresco, por lo cual su efectividad aún no ha sido comprobada en la práctica. Por otro lado, existen otros métodos que han sido exhaustivamente utilizados y que pueden complementar la caracterización del CAC en estado fresco, estas metas, en la actualidad, siguen siendo evaluadas con miras a su probable estandarización [5, 8, 10, 13].

Existe poca investigación relacionada con el CAC para valorar su comportamiento con el uso de ceniza volante en altas cantidades, y la poca que existe está enfocada para volúmenes de dosificación bajos (<50% de relación al volumen de cemento) [10].

La mayoría de los trabajos de investigación reportados han estado orientados a reducir los costos de producción y a generar concretos con propiedades mecánicas y de durabilidad mejorados, y, en últimas fechas, a complementar los esfuerzos orientados a frenar el calentamiento global mediante el uso de subproductos industriales en el concreto y, por consiguiente, mediante la producción de concretos ecológicamente sustentables.

Prácticamente, todos los CAC contienen algún cementante complementario; la cual, en la mayoría de los casos, es la microsíllica, la cual sirve para incrementar en gran medida la resistencia del concreto; algunos de los trabajos reportados utilizan ceniza volante en porcentajes en sustitución que oscilan entre 10 a 50% en masa, en relación con el peso del cemento [10].

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA / JUSTIFICACIÓN

La industria de la construcción presenta una gran dependencia tecnológica y, en particular, la construcción con concreto se encuentra rezagada en términos generales de calidad y particularmente en la compactación, en el curado y en un aspecto de suma relevancia como lo es el de la durabilidad, debido a que la mayoría de los profesionistas de la construcción no pueden poner en práctica los últimos desarrollos tecnológicos, por desconocimientos y/o por prácticas que obedecen más a las costumbres que a la ingeniería.

Un desarrollo notable que últimamente en México ha sido explicado sólo por la industria del concreto premezclado, es el de los CAC. A pesar de que esta tecnología resulta relativamente sencilla, ésta no ha podido ser explotada por los profesionistas de la construcción, debido a los aspectos citados anteriormente. En este sentido, sería de relevante utilidad desarrollar una guía para la producción de estos concretos, que se presentan a los usuarios en términos amigables y claros.

Por otro lado, las tendencias globalizadas apuntan hacia la implantación de procesos sustentables, que coadyuven a frenar el deterioro del medio ambiente y exhorta hacia el manejo y procesamiento responsable de subproductos industriales.

Bajo este enfoque se plantea la utilización de un subproducto industrial considerado como contaminante ambiental, el cual es una ceniza volante que resulta de la quema de carbón mineral.

Al utilizar este ingrediente en el concreto, en cantidades maximizadas, en función del cumplimiento de las propiedades de auto-compactibilidad, se estará produciendo un material sustentable debido a que:

- Se podría reducir el consumo de cemento Pórtland por volumen de concreto producido; lo cual, desde un enfoque sustentable, ayudaría a reducir las emisiones de CO₂ a la atmósfera.
- Se utilizaría al concreto como lugar de disposición final de un contaminante ambiental.
- Se podrían mejorar las propiedades en estado fresco.
- Se podría mejorar la durabilidad del concreto en estado endurecido, al proporcionarle una mayor densificación de la matriz cementante, gracias a la actividad puzolánica, producto de la fineza, la distribución de tamaños de partículas y la composición micro-estructural de este material.

Por otro lado, el uso de estos cementantes complementarios evitaría que éstos pudiesen llegar a depósitos de desechos o directamente al medio ambiente; por lo tanto, al utilizarlos se estará contribuyendo a disminuir la contaminación ambiental.

Así mismo, mediante la transferencia a la práctica de los concretos que se produzcan, se podría disminuir la contaminación acústica durante la colocación por no requerir compactación, la cual normalmente se realiza mediante vibradores que producen mucho ruido. Esto significa que se incrementará el beneficio social, gracias al desarrollo de procesos y productos sustentables.

Es de importancia mencionar que, al producir estos concretos estructurales, se evita el uso de equipos para realizar la compactación, para la cual, en la mayoría de las ocasiones, los operadores desconocen el correcto funcionamiento, y esto influye en la compactación adecuada del concreto, disminuyendo, en ocasiones de manera significativa, las propiedades mecánicas de los elementos.

Para esto, se hace necesaria la investigación de las características “obligatorias” con las que debe cumplir la auto-compactabilidad; una de ellas es la capacidad de fluidez, a través de espacios inaccesibles o angostos o con alta presencia de acero de refuerzo; otra es la capacidad del concreto a no perder homogeneidad o segregarse y la última es la de rellenar de manera homogénea el volumen del elemento por colar; sin descuidar la de resistencia mecánica y la mayor durabilidad.

Al sustituir el contenido de cemento Pórtland en la mezcla de concreto por un complemento cementante de precio mucho menor, se reducirán los costos, con lo cual se podrán administrar los recursos económicos hacia una mayor calidad y cantidad de obras de construcción.

4. HIPÓTESIS

En esta investigación se tienen variables que causan que sea complicado predecir su efecto en los concretos auto-compactables; por tal motivo, se han planteado las siguientes hipótesis:

- El uso de la ceniza volante en sustitución, en relación con la masa del cemento Portland, proporcionará al concreto auto-compactable una mejor estabilidad en estado fresco, ayudando a obtener las propiedades de auto-compactabilidad deseadas.
- Los proporcionamientos que resulten con propiedades adecuadas de auto-compactabilidad, presentarán propiedades mecánicas como: resistencias a la compresión, módulos de elasticidad y relaciones de Poisson, a la edad de 28 días, adecuadas para aplicaciones estructurales.
- Para cada uno de los concretos en los que se logran las propiedades básicas de auto-compactabilidad, el costo resultará significativamente menor al de un concreto convencional de la misma resistencia y, como consecuencia, se apoyarán los procesos sustentables.

5. OBJETIVOS

El objetivo general de esta investigación es desarrollar un procedimiento sistematizado para el diseño de concretos auto-compactables, utilizando ceniza volante de Nava Coahuila y materiales del área metropolitana de Monterrey, que presenten propiedades adecuadas tanto en estado fresco como endurecido, para aplicaciones estructurales.

Objetivos Particulares:

- Estudiar y validar los métodos y los dispositivos de medición de las propiedades del concreto auto-compactable, en estado fresco.
- Minimizar la cantidad de cemento Pórtland y maximizar la cantidad de ceniza volante en la mezcla, para obtener las propiedades de auto-compactabilidad en estado fresco establecidas como propiedades objetivo,.
- Definir los proporcionamientos óptimos para obtener las propiedades objetivo de auto-compactabilidad en estado fresco y el intervalo de las resistencias estructurales a la compresión.

6. METAS

- Establecer un procedimiento sistematizado para la producción del concreto auto-compactable, con ceniza volante de Nava Coahuila, y con resistencia mecánica a la compresión estructural.
- Diseñar concretos auto-compactables, con altos volúmenes de ceniza volante, que resulten más económicos que los concretos convencionales y con igual resistencia mecánica a la compresión.
- Fabricar los aditamentos (equipos) para la caracterización (verificación / control) de las propiedades del concreto auto-compactable en estado fresco y desarrollar nuevos conocimientos en el manejo y la aplicación.
- Coadyuvar en la promoción de nuevas aplicaciones de la ceniza volante, orientadas a reducir los efectos negativos que este contaminante puede originar al medio ambiente.

7. DESARROLLO EXPERIMENTAL

Debido a que ésta es una nueva generación de concretos en periodo de investigación en el Departamento de Tecnología del Concreto de la Facultad de Ingeniería Civil de la U.A.N.L., la investigación se planteó en tres etapas:

Etapa 1; Estudio y selección de los métodos disponibles para la caracterización de los CAC en estado fresco. En esta etapa se decidió la fabricación de los dispositivos de medición necesarios. (Ver imágenes 8 a 11 y anexos 1 a 4).

Etapa 2; Selección de las proporciones de partida y los tanteos para establecer proporciones definitivas.

Etapa 3; Determinación de las propiedades mecánicas y elásticas en estado endurecido y los costos de fabricación del CAC.

7.1.- Materiales.

7.1.1.- Cemento Pórtland.

El cementante utilizado en la investigación fue conformado por cemento Pórtland CPC 30 R que cumple la norma mexicana NMX-C-414-ONNCCE-1999. La selección del cemento fue definida basándose en el tipo más usado en la construcción local.

7.1.2.- Ceniza volante.

El cementante complementario utilizado fue ceniza volante integral Tipo F, de acuerdo con la Norma ASTM C-618, procedente de la planta carboeléctrica de la Comisión Federal de Electricidad (C.F.E.) "José López Portillo" ubicada en el Municipio de Nava Coahuila, México.

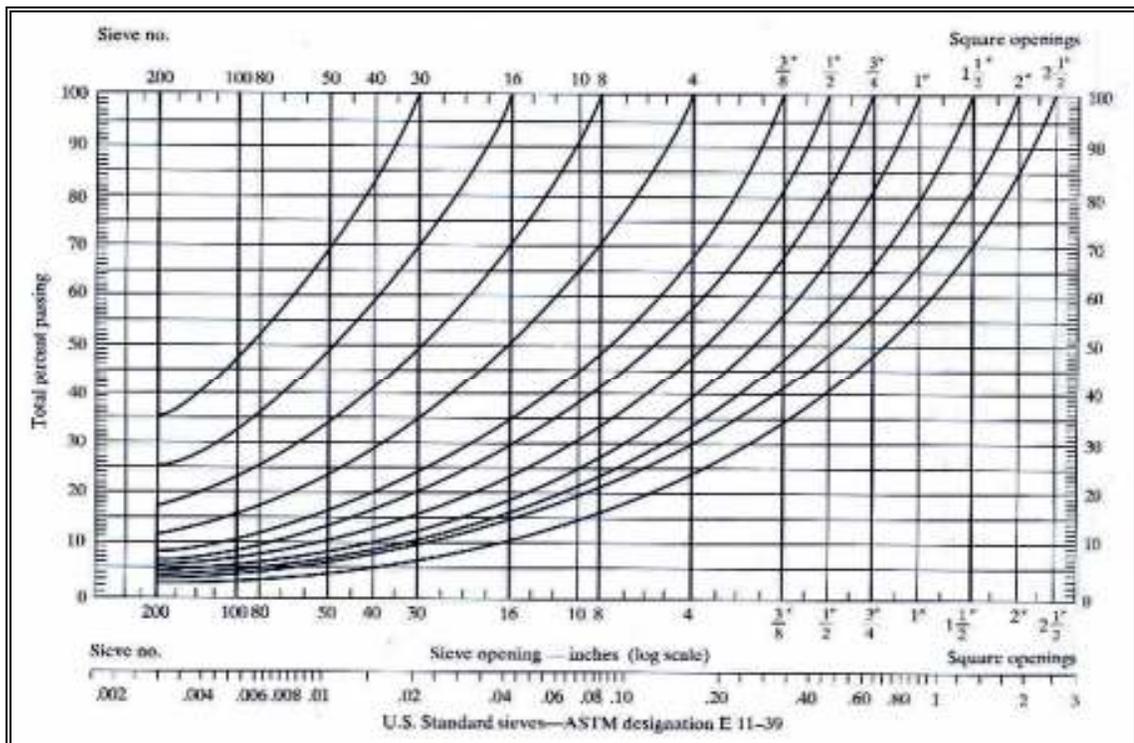
7.1.3.- Agregados.

Se usaron agregados típicos del área Metropolitana de la ciudad de Monterrey N.L. México, en donde abundan las calizas, que son rocas sedimentarias formadas por carbonatos, principalmente carbonato de calcio.

Se investigaron diferentes proveedores de agregados para definir la mejor combinación de AG y AF que produjera la mayor compacidad; es decir, encontrar la distribución de tamaños de partículas que arrojara la menor cantidad de vacíos y una distribución más homogénea del agregado en la mezcla del concreto.

7.1.3.1.- Combinación inicial de agregados.

La combinación de agregados (fino y grueso) se seleccionó para la máxima compacidad, utilizando el criterio de la gráfica de Fuller (**Gráfica 1**).



Gráfica 1.- Gráfica de Fuller.

7.1.4.- Aditivo superfluidificante.

El aditivo utilizado fue un hiperfluidificante constituido por policarboxilatos (tipo poliéster), que cumple la especificación ASTM C-494 como tipo A (reductor de agua) y como tipo F (reductor de agua de alto nivel).

7.1.5.- Modificador de la viscosidad.

De la dosificación de CV utilizada como cementante, una parte cumple la función de proporcionarle cohesión a la mezcla, es decir, que se le considera un modificador de la viscosidad.

Adicionalmente, a los beneficios en las propiedades puzolánicas y de uniformidad granulométrica que la CV proporciona a la mezcla de concreto, también se considera que actúe como agente modificador de la viscosidad, para mejorar la estabilidad de las mezclas de CAC.

7.2.- Constantes del proyecto.

En el desarrollo experimental se tiene un sinnúmero de variables que afectan las características del CAC en estado fresco; por ello fue necesario fijar algunos parámetros o constantes para disminuir las variables.

7.2.1.- Cementante total.

La primera consideración fue el determinar la cantidad de CT que debía contener el proporcionamiento elegido, para esto se fijó una cantidad de 400kg/m^3 de concreto, ya que es la cantidad mínima que recomiendan los autores para poder diseñar un CAC [4, 7]; además de que se buscó que la cantidad de cemento fuera la menor posible, para disminuir su impacto en los costos, el calor de hidratación, y así mejorar los parámetros que definen la durabilidad.

7.2.2.- Proporcionamientos cemento - ceniza volante.

Se definieron seis proporcionamientos o mezclas con diferentes relaciones CV/C para una misma cantidad de CT.

Tabla 3.- *Contenidos de C y CV en el cementante total.*

MEZCLA	CEMENTANTE TOTAL kg/m ³	CONTENIDO CV kg/m ³ , (%)	CONTENIDO C kg/m ³ , (%)
P-R	400	0 (0.0)	400 (100.0)
P-1	400	100 (25.0)	300 (75.0)
P-2	400	150 (32.5)	250 (62.5)
P-3	400	200 (50.0)	200 (50.0)
P-4	400	250 (62.5)	150 (37.5)
P-5	400	300 (75.0)	100 (25.0)

El proporcionamiento de referencia fue el P-R, este proporcionamiento no contiene CV y se diseñó como un concreto convencional con consistencia alta, ya que con el comportamiento que se obtuvo en estado fresco nunca se pudieron obtener características de auto-compactabilidad.

Esta referencia fue necesaria para concluir adicionalmente a los beneficios que se esperaban de la CV en el concreto en estado fresco, sobre los beneficios en estado endurecido.

7.2.3.- Relación agua- cementante total (A/CT).

La relación agua-cementante total afecta las características reológicas y de estabilidad de la mezcla. Para el CAC, los autores recomiendan una relación A/CT mínima de 0.40 [5, 8], por lo cual, en esta investigación se decidió iniciar los tanteos con esta relación.

7.2.4.- Parámetros de auto-compactabilidad.

Los parámetros de auto-compactabilidad estarán basados inicialmente en la prueba de revenimiento fluido con los parámetros **T50** (5 ± 2s) y **extensión final** (65-75cm).

7.3.- Selección de las proporciones de la pasta.

La fracción de pasta en los CAC que se produjeron, está compuesta por la combinación de C+CV+A+ASF, las proporciones iniciales de la pasta, previo a los tanteos con concreto, fueron definidas utilizando el cono de fluidez descrito en ASTM C-939 y el minicono de revenimiento “kantro”. El procedimiento para determinar las proporciones de las pastas es descrito por Gettu [8].

7.3.1.- Procedimiento de mezclado de pastas.

Para el diseño de las pastas se realizaron tanteos orientados a obtener el punto de saturación; se calcularon las cantidades necesarias de ingredientes para producir un volumen de 1.2L en las bachadas de tanteo en una temperatura ambiente (TA) de $23 \pm 1^\circ\text{C}$. A continuación se presentan las etapas del mezclado de las pastas:

- a.- Inicialmente se coloca el C y el complemento cementante en una bolsa de plástico y se homogeniza agitándolo $15 \pm 2\text{s}$.
- b.- Se humedecen la batidora, el cono y las espátulas.
- c.- Se mezclan y homogenizan el aditivo ASF y el agua de reacción y se vierten en el tazón de la batidora.
- d.- Verter el cementante total en el tazón de la batidora, dejar reposar por 15 segundos, lapso en el cual se coloca la paleta y se acomoda el tazón para iniciar el proceso de mezclado.
- e.- Mezclar por 30 segundos, a una velocidad baja.
- f.- Apagar la batidora y raspar con una espátula durante 15s, para retirar el material adherido en las paredes del tazón y la paleta.
- g.- Cambiar a una velocidad media y mezclar durante 60s.

7.3.2.- Dosificación óptima del aditivo.

El punto de saturación del aditivo en la pasta, está definido como la dosificación óptima de aditivo (DOA), para la cual la pasta ya no presenta un aumento en su fluidez; para obtener este punto normalmente se utiliza el cono Marsh con una abertura de 8mm.

En nuestra investigación se adaptó el cono de fluidez de acuerdo con ASTM C-939-02 (**Imagen 4**), con la misma abertura, debido a que no se contaba con el cono Marsh.



Imagen 4.- Cono de fluidez con abertura de 8mm.

7.3.2.1.- Procedimiento de prueba del cono de fluidez.

Como ya se mencionó anteriormente, la prueba del cono de fluidez se usa para determinar el punto de saturación (dosificación óptima) del ASF, el cual se obtiene relacionando el tiempo de fluidez y la dosificación de ASF.

Equipo:

- Báscula (precisión $\pm 0.1g$).
- Cono de fluidez, con una abertura de 8mm.
- Base del cono.
- Probeta graduada de 1L.
- Batidora ASTM C 305.
- Espátula.
- Cronómetro.

Procedimiento:

- a.- Después de terminado el mezclado de la pasta y manteniendo sellada la salida de la boquilla en el cono, se tienen 45 segundos para colocar 1.0L de pasta en el cono de fluidez.
- b.- Al finalizar los 45 segundos se deja fluir la pasta libremente por gravedad a una probeta graduada y se registra el tiempo necesario para desalojar 0.5L.
- c.- Se realiza el mismo procedimiento para las diferentes dosificaciones de ASF.

7.3.3.- Dosificación óptima de ceniza volante.

Una vez terminada la dosificación óptima del ASF, hay otro factor importante que se debe tomar en cuenta, éste se refiere a la cohesión necesaria en la pasta para que encuentre un punto óptimo en donde se tenga la suficiente fluidez que le permita al concreto llenar espacios difíciles de acceder sin segregarse.

Esto se logra con la adición de un modificador de la viscosidad, en este caso se aprovechó la cohesión que la CV aporta a las pastas de cemento hidráulico; en la medida que se quiera tener mayor cohesión, se tendrá que agregar más CV, y en el caso que se desee tener menor viscosidad se tiene que utilizar menor cantidad de este producto.

Para determinar la cantidad óptima del modificador de la viscosidad, se utiliza la prueba del mini-revenimiento con el minicono de kantro (**Imagen 5**). En esta investigación se utilizó este método para complementar los resultados obtenidos en el cono de fluidez.

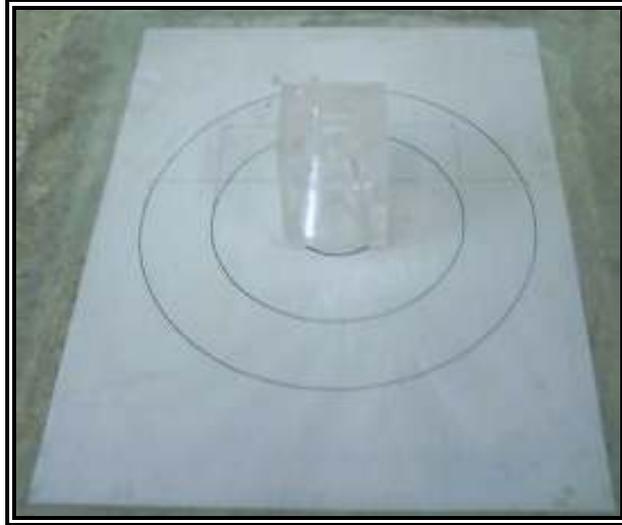


Imagen 5.- *Minicono kantro.*

7.3.3.1.- Mini-revenimiento.

La prueba del mini-revenimiento se usa para la determinación de la cantidad óptima inicial de modificador de viscosidad, para así obtener la cohesión de la pasta necesaria para la fabricación del CAC; debido a que este método no está aún especificado por la ASTM, se atendieron los parámetros que indica Gettu [8].

Equipo.

- Báscula (precisión $\pm 0.1g$).
- Minicono Kantro.
- Placa con diámetros marcados de 11.5cm y 18cm.
- Batidora.
- Bolsas de plástico.
- Cronómetro.

Procedimiento:

- a.-Después del mezclado (sección 7.3.1) se dispone de 60 segundos para llenar el mini-cono y enrasarlo.
- b.-Se levanta el mini-cono y se registra el tiempo requerido para que la pasta alcance un diámetro de 11.5cm.
- c.-Se registra el diámetro final y su tiempo.



Imagen 6.- *Medición de diámetro en la prueba del mini-revenimiento.*

7.4.- Mezclas de concreto.

7.4.1.- Criterios para establecer las proporciones de partida.

Para el establecimiento de las proporciones de partida se definió un procedimiento de mezclado, de acuerdo con el tipo de mezcladora que se utilizó en la investigación.

Cuando se definió el procedimiento de mezclado, se utilizó el criterio de aceptación de mezclas, de acuerdo con el punto 7.2.4 (Prueba de revenimiento fluido); cuando las pruebas resultaban aceptables se consideraban que tenían las propiedades iniciales de auto-compactabilidad (resistencia a la segregación y fluidez); con este criterio se procedió a realizar la siguientes pruebas de medición de propiedades de auto-compactabilidad en estado fresco.

7.4.2.- Procedimiento de mezclado del concreto.

El procedimiento de mezclado del concreto se definió para una mezcladora tipo trompo, con una capacidad de 30L (**Imagen 7**), observando los tiempos óptimos de dosificaciones de materiales y mezclado, para los concretos estudiados a una temperatura ambiente de $23 \pm 1^\circ\text{C}$.



Imagen 7.- Mezcladora de concreto tipo trompo.

Procedimiento:

- a.- Humedecer la parte interna del tambor (trompo) y todos los instrumentos necesarios para el manejo del concreto en estado fresco.
- b.- Colocar el agregado grueso en la máquina de mezclado.
- c.- Colocar el agregado fino en la máquina de mezclado.
- d.- Agregar, en una cantidad aproximada el agua de absorción de los agregados.
- e.- Encender la máquina y homogenizar el material por 45s.

- f.- Colocar el CT (C y CV) y verter aproximadamente el 90% del agua de reacción mientras se encuentra en movimiento el equipo y terminar de verterlos hasta completar 1½ minutos.
- g.- Continuar el mezclado hasta completar 2 ½ minutos colocando una protección en el trompo para evitar la salida de polvos durante el mezclado.
- h.- Añadir y homogenizar el aditivo en el 10% del agua de reacción restante, y verter la mezcla en la revolvedora; hacer esto antes de alcanzar los 3 minutos.
- i.- Colocar una protección (franela) en el trompo para evitar la pérdida de humedad y al minuto 3 encender la revolvedora y continuar el mezclado hasta completar 5 minutos.
- j.- Dejar reposar la mezcla por un minuto, colocando una protección para evitar la pérdida de humedad.
- k.- Mezclar, adicionalmente, un minuto; es decir, terminar el mezclado al minuto 7.

7.4.3.- Propiedades del concreto en estado fresco.

Se realizaron pruebas para medir las propiedades en estado fresco del CAC y compararlas con los diferentes niveles establecidos como objetivo en el presente proyecto. Para esto, la investigación se apoyó en normas y especificaciones emitidas por organismos internacionales como: EFNARC, ACI, y ASTM.

El siguiente punto a tratar fue el de la fabricación de CAC con diferentes proporciones de materiales, de los cuales el contenido óptimo de C y CV, para una determinada resistencia, fueron los puntos importantes a encontrar. Se realizaron las pruebas de medición de las propiedades con los dispositivos apropiados y se analizaron los resultados.

Para diferentes parámetros de diseño, se realizó una comparación de las características de homogeneidad, resistencia a la segregación, apariencia, capacidad de paso y capacidad de llenado.

Se estudiaron los métodos y los dispositivos para la medición de las propiedades del CAC en estado fresco que se mencionan en la **Tabla 4**; para esto, fue necesario realizar una investigación bibliográfica relacionada con el uso de los mismos. Posteriormente, tomando en cuenta las propiedades de los materiales disponibles, se fabricaron los dispositivos con las dimensiones y materiales más apropiados.

Tabla 4.- *Dispositivos de medición de propiedades en estado fresco.*

DISPOSITIVO	PROPIEDAD	IMAGEN	FIGURA (ANEXO)
Revenimiento fluido	- Capacidad de paso. - Segregación. - Capacidad de llenado.	8	1
Anillo "J"	- Capacidad de llenado. - Segregación.	9	2
Embudo "V"	- Capacidad de paso.	10	3
Caja "L"	- Capacidad de paso. - Capacidad de llenado.	11	4

En las **Imágenes** de la **8** a **11** se muestran cada uno de los dispositivos seleccionados; así mismo, en el **Anexo 12** se presentan las **Figuras 1** a **4** en donde se ilustra la geometría y las dimensiones específicas de cada dispositivo.



Imagen 8.- *Prueba de revenimiento fluido.*



Imagen 9.- Anillo "J".



Imagen 10.- Embudo "V".



Imagen 11.- Caja "L".

7.4.3.1.- Prueba del revenimiento fluido.

La prueba del revenimiento fluido (ASTM C-1611) se usa para determinar el flujo horizontal libre del concreto auto-compactable (CAC) en la ausencia de obstrucciones. La extensión del diámetro del concreto es una medida de la fluidez del CAC.

Equipo.

- Placa de un material no absorbente de al menos 80cm de diámetro marcada con círculos de 20cm y 50cm de diámetro en la parte central.
- Cinta o regla.
- Cono de revenimiento.
- Franela.
- Mezcladora de concreto.
- Cronómetro.

Procedimiento de la prueba de revenimiento fluido:

- a.- Realizar proporcionamientos para un volumen mínimo de 6L.
- b.- Humedecer la placa y el cono de revenimiento.
- c.- Colocar la placa en una superficie nivelada y colocar el cono de revenimiento en la parte central, sujetándolo firmemente.

- d.-Vaciar el concreto en el cono sin golpearlo ni imprimir vibración alguna hasta llenarlo.
- e.-Enrasar y limpiar la superficie de la mesa. Hasta este paso no deberán de transcurrir más de 90 segundos (1 ½ minutos).
- f.- Levantar el cono verticalmente dejando fluir el concreto libremente.
- g.-Registrar el tiempo necesario para que se presente una extensión (diámetro) de 50cm (T50).
- h.-Medir el diámetro final y registrar el promedio de dos diámetros perpendiculares.



Imagen 12.- Llenado del cono de revenimiento en la prueba de revenimiento fluido.



Imagen 13.- Extensión final del concreto en prueba revenimiento fluido.



Imagen 14.- *Medición del diámetro final en prueba revenimiento fluido.*

El T50 es una medida que involucra la fluidez y la cohesión de la mezcla; y de manera práctica representa la capacidad que tendrá el concreto de fluir hasta lugares poco accesibles sin presentar segregación o pérdida de homogeneidad. Para que se considere un CAC se recomienda una extensión final de al menos 65cm y máxima de 75cm. Esta prueba también se utiliza para determinar el índice de estabilidad visual (VSI por sus siglas en inglés).

7.4.3.2.- Prueba del índice de estabilidad visual.

El índice de estabilidad visual sirve para tener un parámetro visual de las características de estabilidad del concreto (**Tabla 5**). Este valor se obtiene de manera visual a partir de la apariencia del concreto cuando presenta la extensión final en la prueba del revenimiento fluido [13].

Tabla 5.- Criterio de clasificación del índice visual de estabilidad (VSI).

VSI	CRITERIO
0	No hay evidencia de segregación en la placa de la prueba del cono de flujo ni en el concreto de la mezcladora.
0.5	No hay mortero segregado en el perímetro del concreto sobre la placa, pero hay evidencia de poco sangrado o burbujas de aire en la superficie del CAC y en mezcladora.
1	No hay mortero segregado en el perímetro del concreto sobre la placa, pero hay evidencia de sangrado o burbujas de aire en la superficie del CAC en la mezcladora.
1.5	La segregación del mortero en las orillas y una bolsa de agregado en la placa son poco apreciables y existe un apreciable sangrado en la mezcladora.
2	Evidencia de una ligera capa de mortero en las orillas (anillo perimetral con espesor $\leq 10\text{mm}$) y/o una bolsa de agregado y sangrado en la mezcladora altamente apreciable.
3	Evidencia clara de segregación de una capa de mortero ($>10\text{mm}$) y/o una bolsa de agregado en el centro del CAC y una pequeña capa de pasta en la superficie de la mezcladora.

La resistencia a la segregación puede cuantificarse de forma visual al observar que en todas las partes del disco que se forma al realizar la prueba del revenimiento fluido, se observe una mezcla lo más homogénea posible. En la **Imagen 15** puede observarse una mezcla no homogénea con problemas de segregación y sangrado (VSI=3, un anillo de mortero con espesor promedio $>10\text{mm}$). En la **Imagen 16** se observa una mezcla homogénea y sin problemas de segregación y sangrado, resultando en un VSI=0.



Imagen 15.- Mezcla no homogénea con segregación y sangrado (VSI=3).



Imagen 16.- Mezcla homogénea sin problemas de segregación y sangrado (VSI=0).

7.4.3.3.- Prueba del anillo “J”.

De acuerdo con la ASTM C-1621, esta prueba sirve para los mismos fines que el revenimiento fluido, pero con la variante de que se simulan las obstrucciones que en estructuras reales pudieran presentarse (acero de refuerzo). El anillo “J” consta de un círculo de 30cm de diámetro en el cual se colocan varillas de 1.25cm de diámetro y 10cm de alto, separadas de acuerdo con el tamaño máximo del agregado (T.M.A) (**Tabla 6**).

Tabla 6.- Geometría del anillo “J” de acuerdo al T.M.A.

Tamaño máximo nominal del agregado	Espacio centro a centro varillas	Espacio libre entre varillas	Número de varillas
8mm ≈ 1/4”	30mm ≈ 1 1/8”	14mm ≈ 1/2”	31
10mm ≈ 3/8”	35mm ≈ 1 3/8”	19mm ≈ 3/4”	27
20mm ≈ 3/4”	55mm ≈ 2 1/8”	39mm ≈ 1 1/2”	17

Equipo:

- Placa de un material no absorbente de al menos 80cm de diámetro marcada con un círculo de 20cm de diámetro en la parte central.
- Cinta o regla.
- Cono de revenimiento sin soportes para fijación con los pies.
- Anillo “J”.

Procedimiento:

- a.- Realizar proporcionamientos para un volumen mínimo de 6L.
- b.- Humedecer la placa y el cono de revenimiento.
- c.- Colocar la placa en una superficie nivelada y colocar el anillo y el cono en la parte central, sujetándolo firmemente.
- d.- Vaciar el concreto en el cono sin golpearlo ni imprimir vibración alguna hasta llenarlo.
- e.- Enrasar y limpiar la superficie de la placa. Hasta este paso no deberán de transcurrir más de 90 segundos (1 ½ minutos).
- f.- Levantar el cono verticalmente dejando fluir el concreto libremente.
- g.- Medir el diámetro promedio final.
- h.- Medir la diferencia en altura en el concreto en el interior y exterior del anillo.
- i.- Calcular el promedio de la diferencia en altura en cuatro puntos expresados en mm.
- j.- Registrar cualquier borde de mortero o pasta de cementante sin agregado grueso en la orilla de la pila del concreto.

Para el cálculo del valor del anillo “J” se observó la capacidad del CAC a pasar por obstáculos (varillas); para esto se registraron las diferencias en altura del CAC en el centro (h_1), interior (h_a) y exterior (h_b) del anillo (**Imagen 17**). Este valor resulta de las operaciones aritméticas de acuerdo con el siguiente procedimiento:

- a.- Medir el valor “ d_1 ” en el centro del anillo j y cuatro valores “ d_a ” y “ d_b ” dentro y fuera del anillo (medidas en mm.).
- b.- Calcular $h_1 = 125 - d_1$ y los “ h ” valores $h_{ax} = 125 - d_{ax}$ ($x = 1$ a 4).
- c.- Calcular cuatro valores $h_1 - h_{ax}$; calcular el valor medio $h_{1m} - h_{am}$.
- d.- Calcular cuatro valores $h_{ax} - h_{bx}$; calcular el valor medio $h_{am} - h_{bm}$.
- e.- Calcular el Valor Anillo “J” = $2(h_{am} - h_{bm}) - (h_{1m} - h_{am})$.

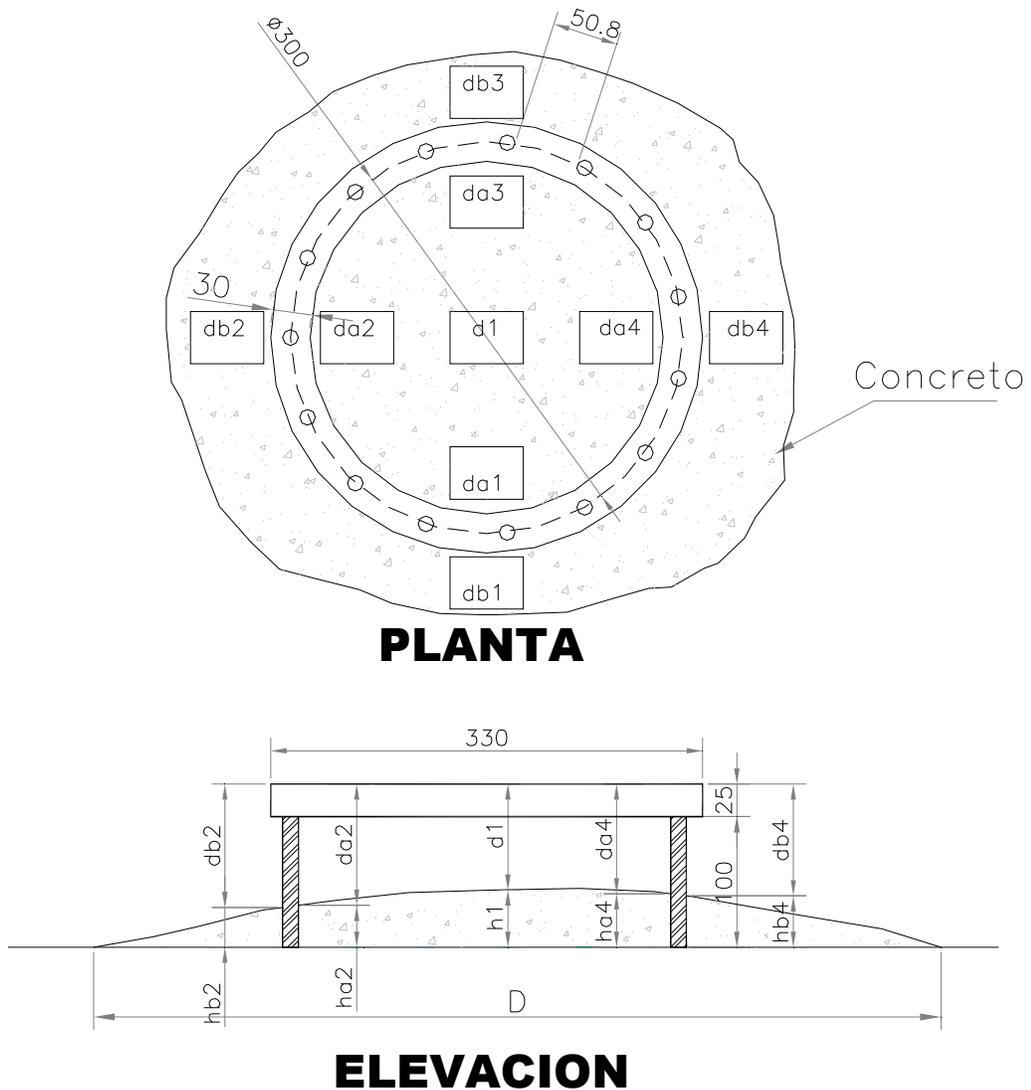


Imagen 17.- Puntos de medición de la prueba del Anillo “J”.

Registrar la diferencia en altura entre el CAC en el interior y exterior del anillo “J”, muestra un indicio de la capacidad de paso del concreto o el grado en el cual el paso del CAC a través de las barras es restringido.

La resistencia a la segregación puede cuantificarse de forma visual, si en todas las partes del círculo formado se observa una mezcla lo más homogénea posible y el agregado grueso es capaz de pasar a través de las obstrucciones. La habilidad de paso se considera aceptable, cuando se registra un valor de anillo “J” desde 0 hasta 15mm.

En la **Imagen 18** se puede observar la ubicación del anillo “J” en la placa utilizada en la prueba del revenimiento fluido.



Imagen 18.- Prueba del anillo “J”.

En la **Imagen 19** se observa la capacidad de paso del CAC con la prueba del anillo “J”.



Imagen 19.- Detalle de la capacidad de paso en la prueba del anillo “J”.

7.4.3.4.- Prueba del embudo “V”.

La prueba (aun no estandarizada por ASTM) se usa para determinar la capacidad de flujo y llenado del CAC y puede usarse para observar la resistencia a la segregación; se mide el tiempo en que un volumen de concreto tarda en desalojarse del embudo.

Equipo:

- Embudo “V” fabricado con un material no absorbente.
- Mezcladora de concreto.
- Cronómetro.
- Cucharón.
- Varilla de enrase.

Procedimiento.

- a.-Realizar proporcionamientos para un volumen mínimo de 12L.
- b.-Humedecer el embudo dejando la compuerta abierta para drenar el agua en exceso.
- c.-Colocar el embudo en una superficie plana y firme y cerrar la compuerta de salida.
- d.-Colocar el concreto en el embudo hasta llenarlo y enrasar.
- e.-Abrir la compuerta de salida, dentro de los 10 segundos después del llenado.
- f.- Registrar el tiempo desde que se abrió la compuerta, hasta que se termine de vaciar por completo el concreto.
- g.-Desde el momento de empezar a llenar el concreto en el embudo hasta que se vacíe no deberán transcurrir más de 5 minutos.

Mientras sea menor el tiempo, indicará que se tiene una mayor capacidad de fluidez. Para CAC se recomienda un tiempo menor que 10s. Si el concreto presenta segregación, los agregados tapanán la salida del embudo y a pesar de que se aprecia una alta fluidez, la cohesividad entonces no será la apropiada.

En la **Imagen 20** se observa la manera de vaciar el concreto en la etapa de llenado del embudo "V".



Imagen 20.- Llenado del embudo "V".

En la **Imagen 21** se observa el final de la prueba del embudo "V" al abrir la compuerta de salida y registrar el tiempo necesario para que se desaloje el concreto.



Imagen 21.- Vaciado del concreto en el embudo "V".

7.4.3.5.- Prueba de la caja “L”.

La prueba (aún no estandarizada por la ASTM) consiste de un aparato en forma de “L”, en el cual se deposita el concreto en el compartimiento vertical; en la parte horizontal se cuenta con una compuerta, la cual se abre y el concreto fluye a través de una obstrucción consistente en 3 varillas.

Equipo:

- Caja “L”.
- Cinta o regla.
- Mezcladora de concreto.
- Cronómetro.
- Cucharón.
- Varilla de enrase.

Procedimiento.

- a.-Realizar proporcionamientos para un volumen mínimo de 12L.
- b.-Humedecer la caja L.
- c.-Cerrar la compuerta de salida, llenar la parte vertical de la caja y enrasar.
- d.-Abrir la compuerta en un tiempo no mayor que 10s después de haber enrasado.
- e.-Registrar el tiempo, desde que se abrió la compuerta, hasta que el concreto alcance una distancia de 20, 40 y 80cm.
- f.- Medir las alturas cuando el concreto termine de fluir, al inicio (H1) y al final de su recorrido (H2).
- g.-Desde el momento de vaciar el concreto hasta que se proceda a medir las distancias H1 y H2 no deberá haber transcurrido un tiempo mayor que 5 min.

Mientras los tiempos sean menores, se tendrá una mayor capacidad de fluidez y mayor capacidad de paso por los obstáculos, además de que, mientras sea mayor la relación H2/H1 esto representará que se tiene una mayor capacidad de llenado.

El valor de H_2/H_1 recomendado es de 0.8 a 0.85 [12]; relaciones mayores que 0.85 podrían presentar segregación. En las **Imágenes 22 y 23** se observa el llenado y la capacidad de paso y la capacidad de paso obtenida.



Imagen 22.- Llenado de la caja "L".



Imagen 23.- Capacidad de paso y llenado en la caja "L".

7.5.- Definición de las proporciones del concreto.

Partiendo de las dosificaciones óptimas encontradas en las pastas (sección 7.3), se determinó la dosificación de aditivo necesaria para tener las características de estabilidad en las mezclas de concreto en estado fresco deseadas; estas dosificaciones se hicieron para dos relaciones A/CT (0.40 y 0.425).

7.6.- Propiedades mecánicas por determinar.

A los diferentes concretos producidos se les determinaron los desarrollos de la resistencia a la compresión, a las edades de 7, 14, 28 y 56 días, en especímenes de 10cm de diámetro por 20cm de altura y relación de esbeltez de 2, de acuerdo con el procedimiento descrito en ASTM C-39.

A los concretos definitivos se les determinó el módulo de elasticidad estático, en cilindros de 10cm de diámetro, por 20cm de altura, de acuerdo con el procedimiento descrito en ASTM C-469 y la relación de Poisson.

Las etapas involucradas para la determinación de las dosificaciones óptimas de los concretos fueron:

- La determinación del punto de saturación en las pastas, mediante la prueba de fluidez con el cono de fluidez.
- Las pruebas complementarias para definir y confirmar el punto de saturación, mediante el minicono de revenimiento.
- La determinación de la combinación inicial de los agregados, mediante la gráfica de Fuller.
- La determinación de la combinación final de los agregados, mediante pruebas de tanteo en los concretos, para lograr la estabilidad de las mezclas.
- La determinación de las proporciones definitivas de CAC con base en las propiedades de autocompactabilidad objetivo; es decir, la extensión en el cono de flujo y el T50 (ASTM C-1611).

El resto de las pruebas anteriormente citadas, utilizadas para caracterizar a los CAC en estado fresco, se midieron para tener un estudio más completo y evaluar el cumplimiento de los concretos producidos con recomendaciones internacionales.

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1.- Determinación de la densidad del cementante.

Se determinaron las densidades del cemento y de la ceniza volante, de acuerdo con la norma ASTM C-188, obteniendo un valor de 3.07g/cm^3 y 2.27g/cm^3 , respectivamente. Las densidades resultan congruentes con las reportadas en la literatura [4, 10].

8.2.- Granulometría.

El tamaño de las partículas está definido por la fracción del material que pasa por las mallas o tamices, con aberturas estándar de acuerdo con la norma ASTM C-33 (Tabla 7); para el agregado grueso (AG), la norma establece los requerimientos de graduación de acuerdo al TMA, asignando un número. En esta investigación, el TMA es de 3/4" (19mm), con lo que le corresponde el tamaño número 6; para el agregado fino (AF), la norma establece una sola graduación.

Tabla 7.- Tamices y graduaciones establecidos en ASTM C-33.

TAMIZ	ABERTURA	AG (#6) %Pasa	AF %Pasa
1"	25.0mm	100	-
3/4"	19.0mm	90-100	-
1/2"	12.5mm	20-55	-
3/8"	9.5mm	0-15	100
#4	4.75mm	0-5	95-100
#8	2.36mm	-	80-100
#16	1.18mm	-	50-85
#30	600 μm	-	25-60
#50	300 μm	-	5-30
#100	150 μm	-	0-10
P-100	<150 μm	-	-

Para seleccionar los agregados grueso y fino a utilizar, se consideraron 7 diferentes muestras de agregados comercialmente disponibles en el área metropolitana de Monterrey, denominados grava 2 y arena 4, con tamaños máximos nominales de 19 y 4mm, respectivamente.

Con base en estudios realizados en el Departamento de Tecnología del Concreto, y fijando como parámetro principal la granulometría, se seleccionaron la arena y la grava de un mismo proveedor y de aquél que tuviera menores variaciones en la granulometría.

A los diferentes proveedores se identificaron como “Muestras-#”, para diferenciar uno del otro. Los AG y AF que se utilizaron en la investigación se identificaron con el nombre: “Investigación”.

En las secciones 8.2.1 y 8.2.2 se presenta el análisis de los agregados seleccionados.

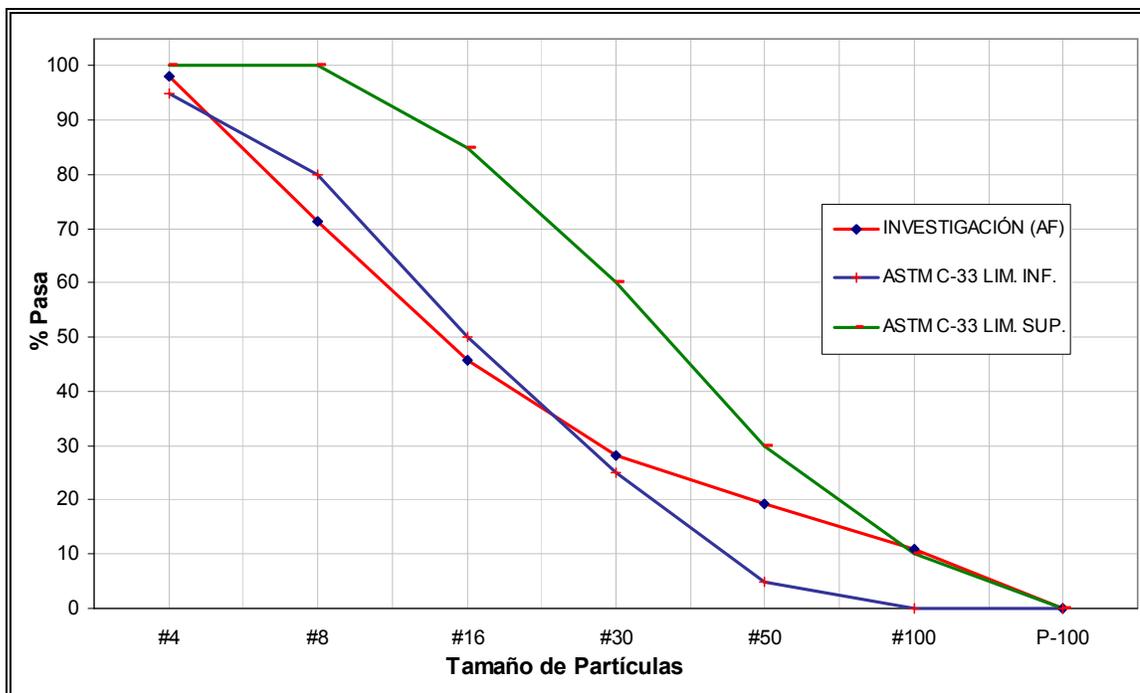
8.2.1.- Agregado fino.

Para la determinación del AF a utilizar en la investigación, se analizaron las granulometrías de 7 diferentes muestras de arena 4 (Tabla 8).

Tabla 8.- Granulometrías de arenas muestreadas.

TAMIZ	% PASA						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7
#4	100.0	99.7	99.6	99.6	98.4	97.9	98.1
#8	87.3	93.2	83.4	82.9	78.3	85.6	71.3
#16	59.9	68.6	55.1	53.9	51.7	67.0	45.8
#30	35.7	42.1	32.8	35.0	31.0	41.4	28.1
#50	23.1	27.5	17.8	22.3	19.4	21.8	19.3
#100	14.3	10.8	11.0	13.7	13.6	5.8	10.8
P-100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Se seleccionó la muestra 7, para utilizarse en la investigación, con el fin de encontrar la máxima compacidad al combinarla con la grava a utilizar. En la **Gráfica 2** se observa que algunos tamaños de partícula de la muestra de AF seleccionada (%Pasa) no cumplen el límite inferior, como lo especifica la ASTM C-33.



Gráfica 2.- Granulometría del agregado fino.

La granulometría de la muestra (% Pasa) y su comparación con los límites superiores e inferiores que marca la ASTM C-33 se encuentran en la **Tabla 9**.

Tabla 9.- Granulometría del agregado fino.

TAMIZ	Retenido Parcial %	Retenido Acumulado %	% PASA	ASTM C-33 % PASA	
				LIM. SUP.	LIM. INF.
#4	1.9	1.9	98.1	100	95
#8	26.8	28.7	71.3	100	80
#16	25.5	54.2	45.8	85	50
#30	17.7	71.9	28.1	60	25
#50	8.8	80.7	19.3	30	5
#100	8.5	89.2	10.8	10	0
P-100	10.8	100.0	0.0	0	0

8.2.2.- Agregado grueso.

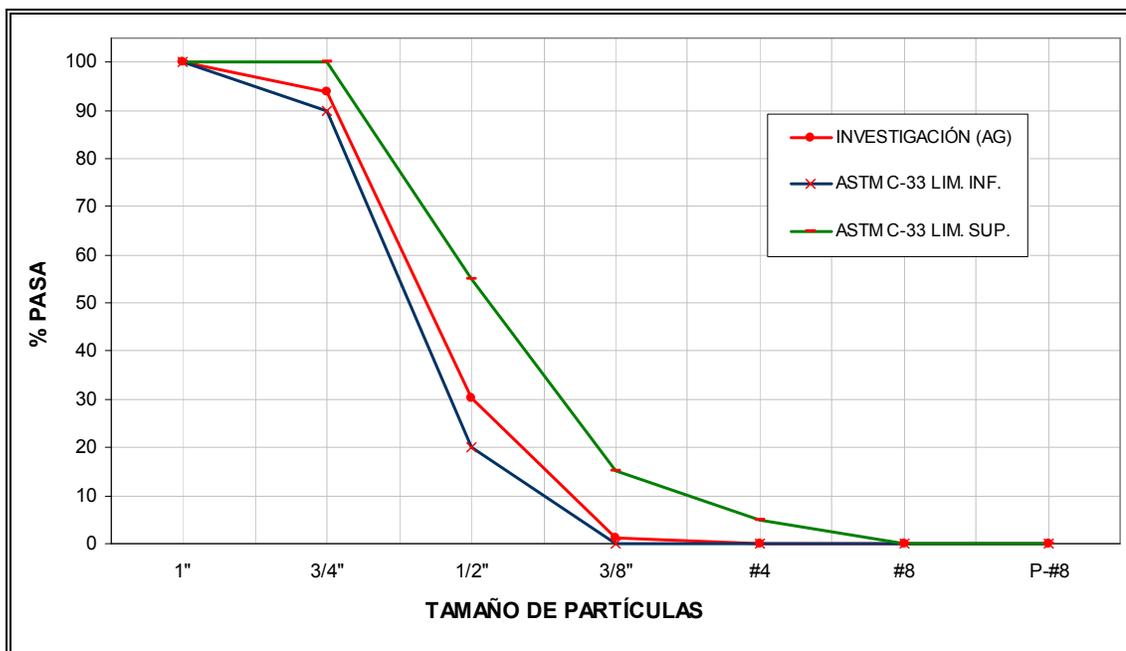
Para la determinación del AG a utilizar en la investigación, se analizaron las granulometrías de 7 diferentes muestras de grava 2. En la **Tabla 10** se muestran los porcentajes de tamaños que pasan los tamices indicados (%Pasa).

Tabla 10.- Granulometrías de gravas muestreadas.

TAMIZ	% PASA						
	Muestra 1	Muestra 2	Muestra 3	Muestra 4	Muestra 5	Muestra 6	Muestra 7
1"	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.0
3/ 4"	86.7	98.9	99.3	97.4	96.6	85.8	93.8
1/ 2"	35.0	35.3	80.0	68.2	48.3	62.4	30.2
3/ 8"	7.4	14.5	57.4	38.3	8.4	51.9	1.3
#4	0.4	1.5	9.5	1.8	0.2	50.0	0.1
#8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
P-#8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Se utilizó al mismo proveedor de AF para definir el AG a utilizar en la investigación; es decir, la muestra 7, ya que uno de los objetivos de la investigación es utilizar los materiales tal como pueden encontrarse en el área metropolitana de Monterrey, en donde se acostumbra utilizar el AF y AG de un mismo proveedor.

En la **Gráfica 3** se observa que para todos los tamaños de partícula de la muestra de AG seleccionada, se cumplen los límites superior e inferior, como lo especifica la ASTM C-33.



Gráfica 3.- Granulometría del agregado grueso.

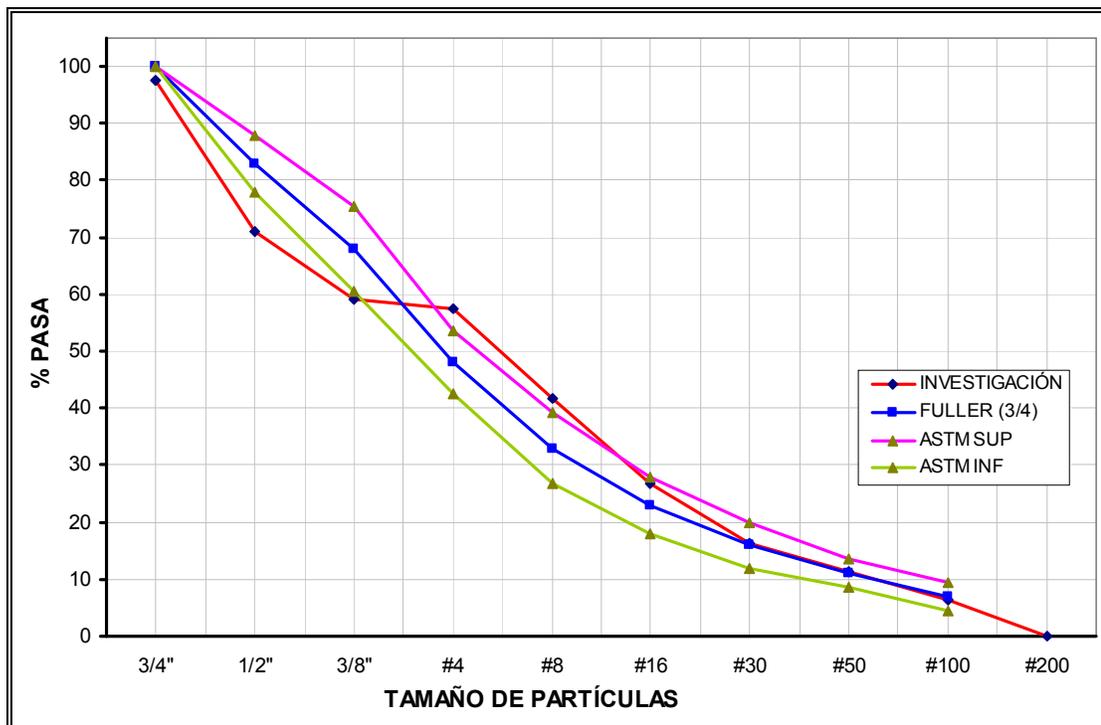
La granulometría de la muestra y su comparación con los límites que marca la ASTM C-33 se encuentran en la **Tabla 11**.

Tabla 11.- Granulometría del agregado grueso.

TAMIZ	Retenido Parcial %	Retenido Acumulado %	%PASA	ASTM C-33 %PASA	
				LIM. SUP.	LIM. INF.
1"	0.0	0.0	100.0	100	100
3/ 4"	6.2	6.2	93.8	100	90
1/ 2"	63.6	69.8	30.2	55	20
3/ 8"	28.9	98.7	1.3	15	0
#4	1.2	99.9	0.1	5	0
#8	0.0	99.9	0.1	0	0
P-#8	0.1	100.0	0.0	0	0

8.2.3.- Diseño de granulometría total.

La combinación inicial de agregados (como se definió en 7.1.3.1) resultó ser 41.5% de AG y 58.5% de AF en masa, se iniciaron los tanteos en concreto para definir la combinación de agregados por medio de la prueba del revenimiento fluido al obtener una mezcla de concreto con características de auto-compactabilidad. En la **Gráfica 4** se muestra la combinación óptima de porcentajes en peso, la cual también resultó ser 41.5% AG y 58.5% AF; se revisó la granulometría completa de acuerdo con la gráfica de Fuller, para un TMA=3/4" y se calcularon los límites, de acuerdo a las medidas indicadas por ASTM para cada tamiz.



Gráfica 4.- Granulometría total con 41.5% AG y 58.5% AF.

En la **Tabla 12** se encuentran listadas las propiedades físicas de los agregados seleccionados, tales como la densidad y la absorción, obtenidas de acuerdo con la ASTM C-128, el peso volumétrico seco suelto y el peso volumétrico varillado seco conforme a la ASTM C-29.

Tabla 12.- Determinación de las propiedades físicas de los agregados.

Material	Densidad Especifica kg/m³	PVSS kg/m³	PVVS kg/m³	Absorción %
Grava 2	2700	1463	1568	0.3
Arena 4	2630	1764	1934	1.7

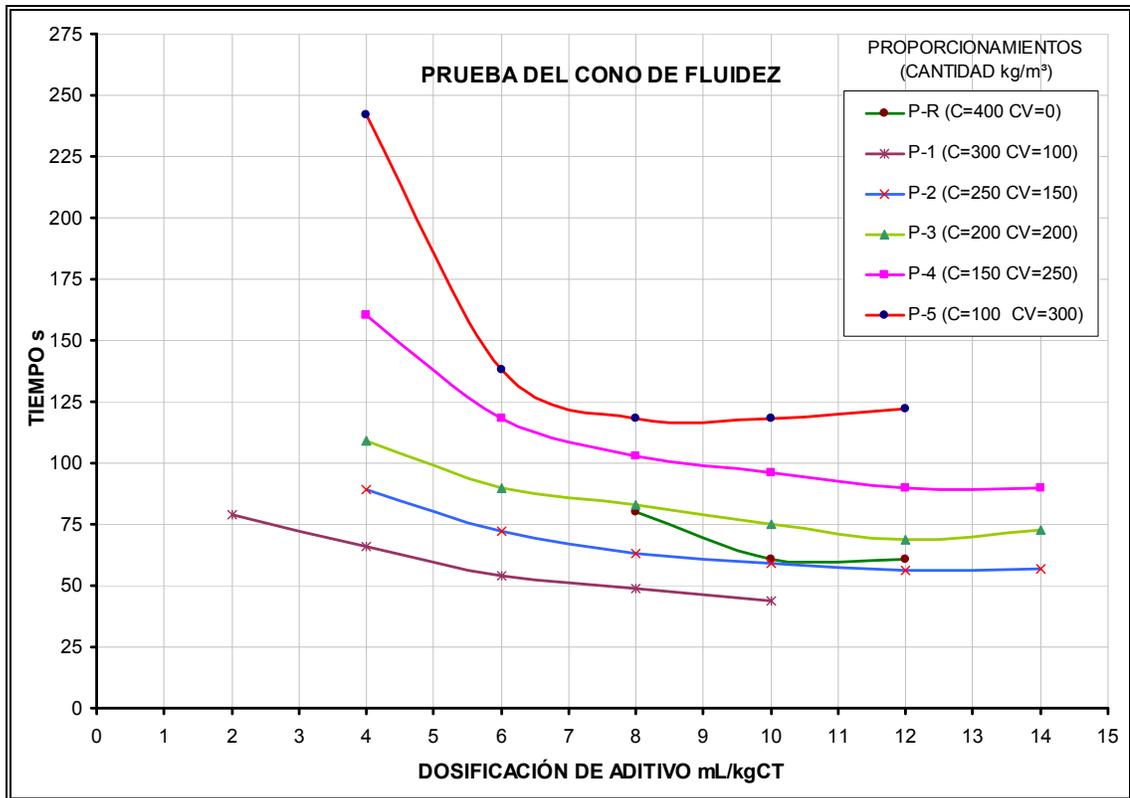
8.3.- Aditivo superfluidificante.

La densidad del aditivo superfluidificante (ASF) fue de 1.07g/cm³ y el contenido de sólidos resultó ser de 30% de material sólido.

8.4.- Resultados para A/CT=0.40.

8.4.1.- Resultados de la prueba de revenimiento fluído, con A/CT=0.40.

De acuerdo con Gettu [8], al realizar la gráfica de tiempo en segundos, en el eje de las ordenadas, frente a la dosificación de aditivo en mililitros por kg de cementante total (mL/kgCT), en el eje de las abscisas, para diferentes dosificaciones de aditivo, se encuentra que el punto de saturación óptimo o de dosificación óptima de aditivo (DOA), es el punto de inflexión donde se intersectan las dos tangentes de las curvas, como se muestra en la **Gráfica 5**.



Grafica 5.- Dosificaciones de aditivo para una $A/CT= 0.40$.

Los puntos de saturación se obtuvieron de manera visual en la gráfica, al encontrar de forma aproximada el punto en donde se intersectaron las tangentes de la curva, lo cual representa el punto en donde ya no se aprecia que mayores dosificadores de aditivo le proporcionen mayor fluidez a la pasta. Las dosificaciones iniciales resultaron ser las que se muestran en la **Tabla 13**:

Tabla 13.- Puntos de saturación de aditivo para $A/CT=0.40$.

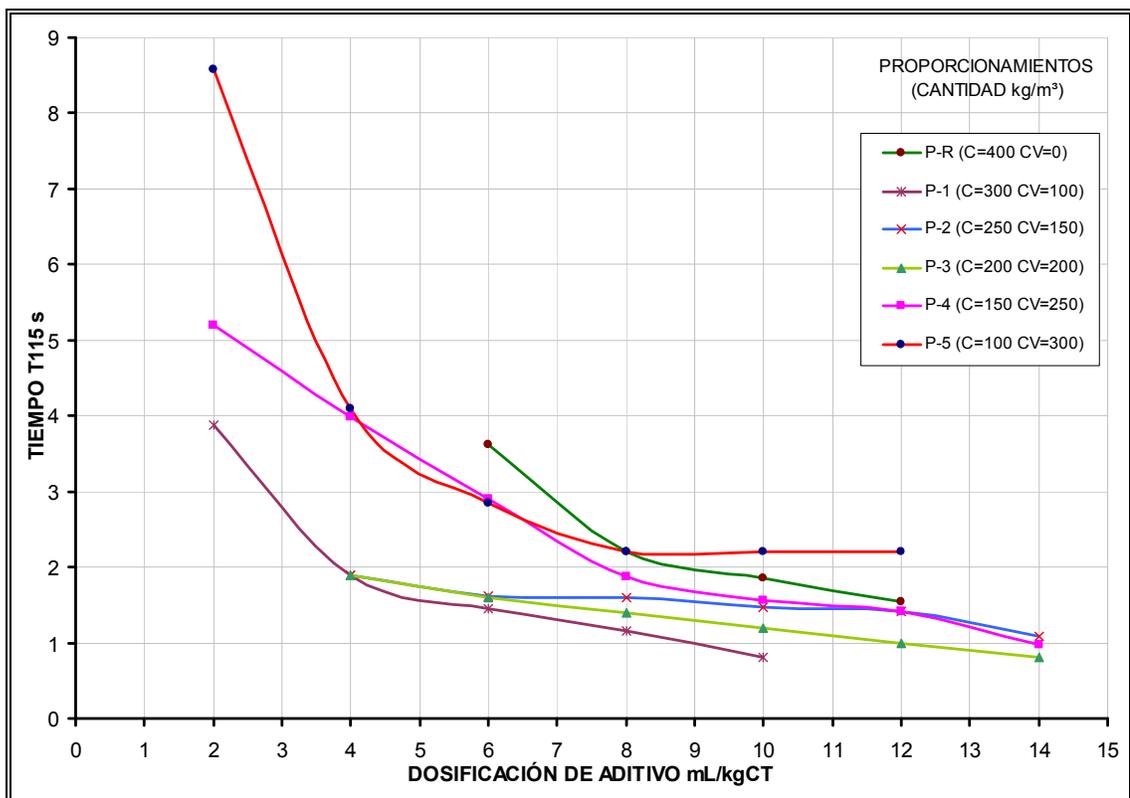
MEZCLA	CEMENTANTE TOTAL		DOSIFICACIÓN INICIAL DE ASF mL/kgCT
	CEMENTO kg/m³	CENIZA kg/m³	
P-R	400	0	10.0
P-1	300	100	8.0
P-2	250	150	8.0
P-3	200	200	7.0
P-4	150	250	8.0
P-5	100	300	8.0

8.4.2.- Resultados de la prueba del mini-revenimiento, para $A/CT=0.40$.

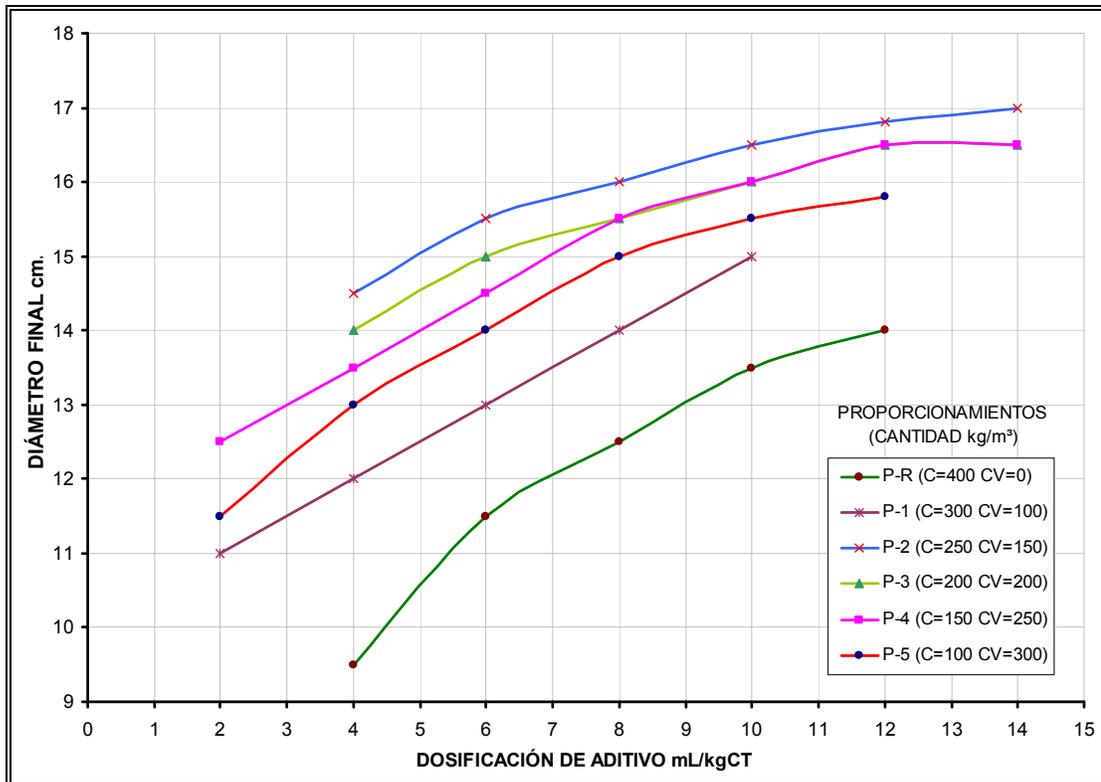
Se realizaron las gráficas de tiempo en segundos, frente a la dosificación de ASF en mL/kgCT, para diferentes dosificaciones y se observó la influencia de la CV en la viscosidad, registrando el tiempo T115 (**Gráfica 6**). Para que la cohesión fuera adecuada, se estableció que el T115 tuviera un nivel de 3 ± 1 s.

También, se graficó el diámetro final, frente a la dosificación de ASF, para las diferentes dosificaciones empleadas (**Gráfica 7**). Se estableció como adecuada una cohesión cuyo diámetro final fuese de 180 ± 10 mm. Para algunas mezclas este diámetro no se cumplió.

De acuerdo con estas gráficas, se observó que la adición de CV fue suficiente para proporcionarle a las pastas la cohesión necesaria, evitando con esto el agregado de aditivos modificadores de la viscosidad.



Gráfica 6.- Tiempo T115 en la prueba del mini-revenimiento para $A/CT=0.40$.



Gráfica 7.- Diámetro final en la prueba del mini-revenimiento para $A/CT=0.40$.

8.4.3.- Tanteos en la prueba de revenimiento fluido, para definir las proporciones ($A/CT=0.40$).

Para determinar las mezclas definitivas se utilizaron las dosificaciones iniciales de ASF encontradas en las pastas, para utilizarlas en la prueba del revenimiento fluido. Para cada proporcionamiento se hicieron pruebas con ajustes en las dosificaciones de aditivo, buscando que los resultados mostraran una extensión (diámetro) de 65 a 75cm, en un tiempo de 5 ± 2 segundos: Los resultados se obtuvieron después de 10min de empezar el proceso de mezclado.

Se fijó esta prueba y los parámetros que mide como criterios para definir el cumplimiento de los requisitos de auto-compactabilidad. Para fines de esta investigación, éstos son los parámetros objetivo, con las tolerancias mencionadas anteriormente. Los tanteos en el cono de flujo, con $A/CT=0.40$ presentaron los resultados que se muestran en la **Tabla 14**:

Tabla 14.- Tanteos en la prueba revenimiento fluido con A/CT = 0.40.

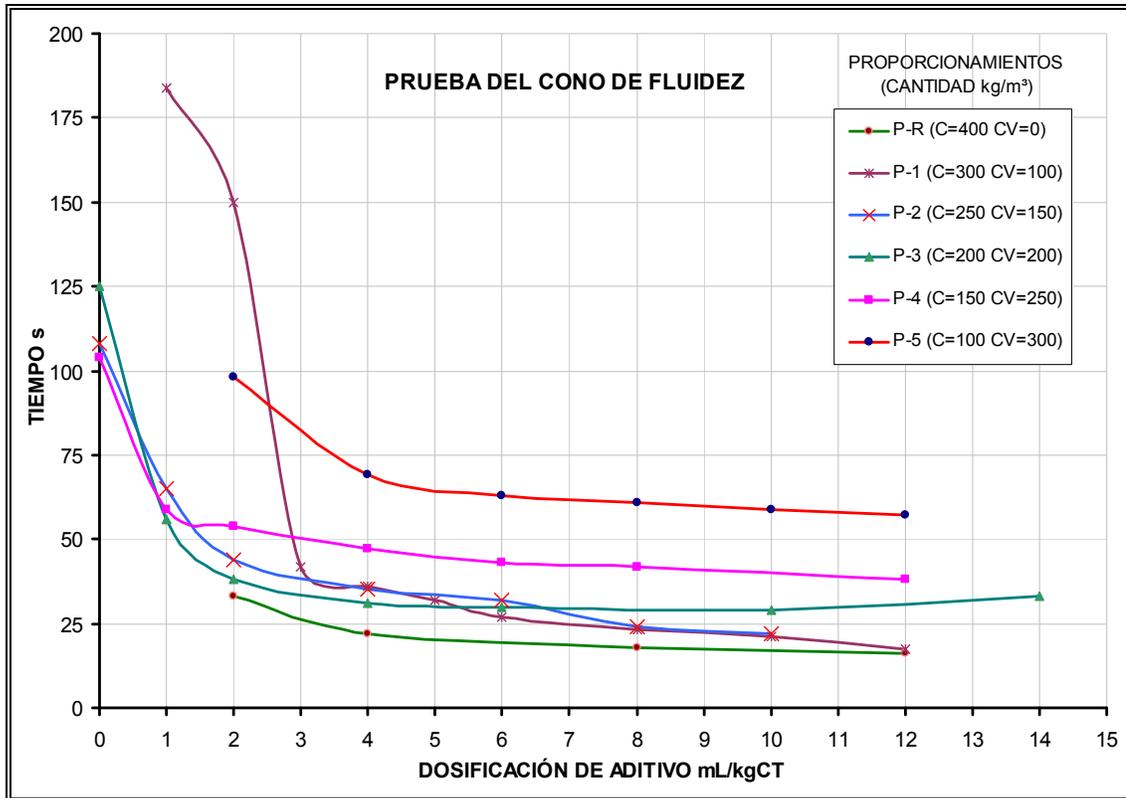
MEZCLA	CEMENTO C kg/m ³	CENIZA CV kg/m ³	ADITIVO mL/kg C	EXTENSIÓN cm	T50 s
P-R	400	0	27.9	N.A.	N.A.
P-1	300	100	20.0	64.0	9.0
P-2	250	150	22.7	63.0	13.0
P-3	200	200	21.6	66.0	12.0
			27.6	65.0	20.0
			23.0	65.0	16.0
P-4	150	250	14.8	67.5	10.0
			17.4	60.0	28.0
			19.6	66.0	21.0
			18.0	68.0	10.0
			19.0	65.0	13.0
			16.0	58.0	45.0
P-5	100	300	24.0	N.A.	N.A.
			10.5	73.0	6.2
			14.8	55.0	84.0
			15.8	59.0	45.0
			20.0	NA	NA
			30.0	NA	NA

De los tanteos para una A/CT=0.40 no se encontraron los resultados que cumplieran con los parámetros objetivo; recordando que los parámetros objetivo fijados fueron los siguientes: una extensión (diámetro) de 65 a 75cm, un tiempo (T50) de 5 ± 2 segundos y un aspecto visual homogéneo y sin evidencia de segregación. Según los resultados obtenidos, se optó por **aumentar la relación A/CT a 0.425** para inducir las características de auto-compactabilidad, ya que para la relación A/CT inicial nunca se hubiesen podido cumplir los parámetros-objetivo.

8.5.- Resultados para A/CT=0.425.

8.5.1.- Resultados de la prueba del cono de fluidez, para A/CT=0.425.

Se hicieron las pruebas de tanteos con el cono de fluidez para una A/CT=0.425, los resultados se presentan en la **Gráfica 8**; con esto, se buscó que las propiedades de auto-compactabilidad en las pastas produjeran resultados dentro de los intervalos que especifica Gettu [8].

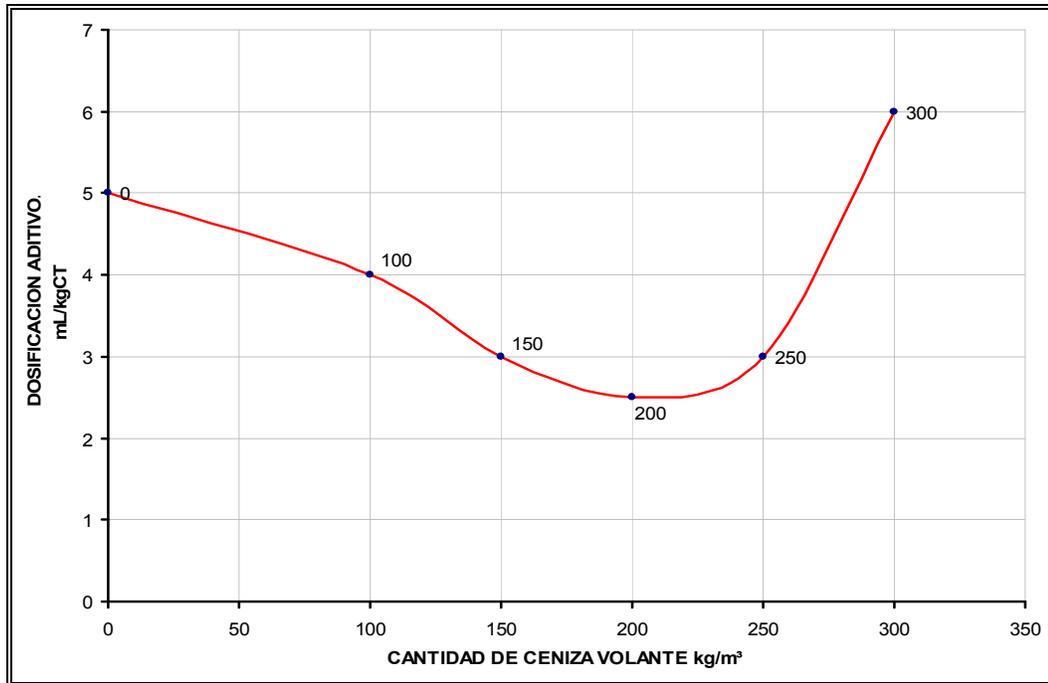


Gráfica 8.- Dosificaciones de aditivo para una A/CT= 0.425.

Puede observarse en la **Tabla 15** que, al aumentar la relación A/CT a 0.425, la dosificación inicial de aditivo (DIA), comparada con una A/CT=0.40, disminuye; la DIA es máxima para el P-R; disminuye en el P-1, P-2 y P-3 y vuelve a aumentar hasta el P-5. En relación con este comportamiento, se observa que la CV disminuye la demanda de aditivo, para dar la fluidez objetivo, hasta una sustitución de 67.5%; a partir del cual, la dosificación de ASF tiende a aumentar. En la **Gráfica 9** se observan los valores encontrados.

Tabla 15.- Puntos de saturación de aditivo para A/CT=0.40 y 0.425.

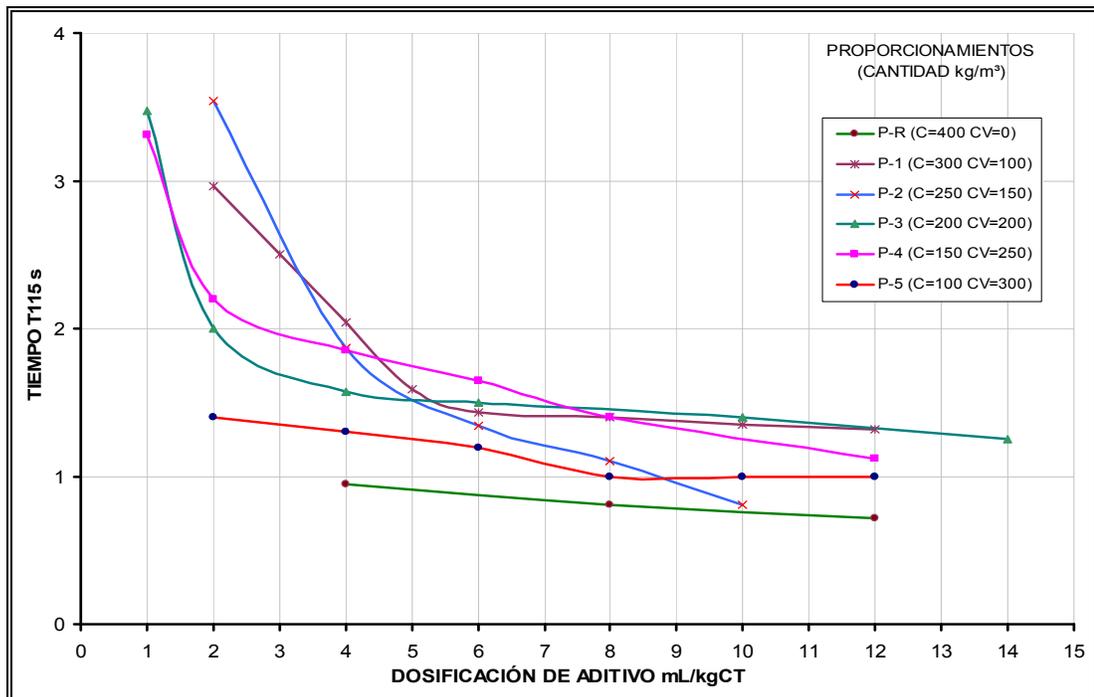
MEZCLA	CEMENTANTE TOTAL		DOSIFICACIÓN INICIAL DE ASF	
	CEMENTO kg/m³	CENIZA kg/m³	A/CT=0.40 mL/kgCT	A/CT=0.425 mL/kgCT
P-R	400	0	10.0	5.0
P-1	300	100	8.0	4.0
P-2	250	150	8.0	3.0
P-3	200	200	7.0	2.5
P-4	150	250	8.0	3.0
P-5	100	300	8.0	6.0



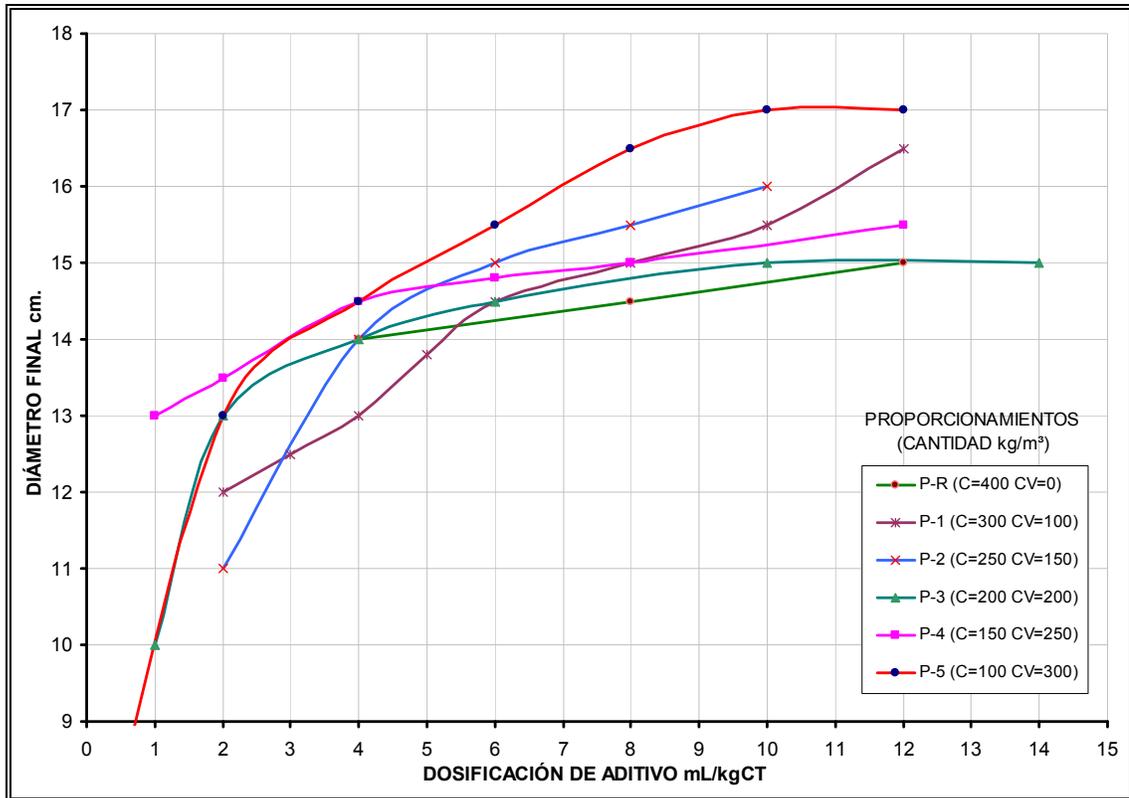
Gráfica 9.- Influencia de la CV en el punto de saturación del aditivo para $A/CT=0.425$.

8.5.2.- Resultados de la prueba de mini-revenimiento, para $A/CT=0.425$.

Con esta prueba se obtuvieron los resultados del T115 y el diámetro final para una $A/CT=0.425$ (**Gráficas 10 y 11**).



Gráfica 10.- Tiempo T115 en la prueba del mini-revenimiento para $A/CT=0.425$.



Gráfica 11.- Diámetro final en la prueba del mini-revenimiento para $A/CT=0.425$.

Los tiempos T115 estuvieron en el nivel recomendado de 3 ± 1 s (**Gráfica 10**) y, en todos los casos, los diámetros finales fueron menores que el recomendado de 18 ± 1 cm (**Gráfica 11**). Estos resultados ilustran el incremento en la viscosidad atribuido a la presencia de CV en la matriz cementante; en otras palabras, ilustra el efecto de la CV como modificador de la viscosidad.

8.5.3.- Tanteos en la prueba de revenimiento fluido, para definir las proporciones ($A/CT=0.425$).

Se realizaron tanteos en mezclas de concreto con la prueba de revenimiento fluido, para una $A/CT=0.425$; se buscó que el CAC tuviera una extensión final de 65 a 75cm y un aspecto visual con características de auto-compactabilidad; los resultados se muestran en la **Tabla 16**:

Tabla 16.- Tanteos en la prueba de revenimiento fluido, con A/CT=0.425.

MEZCLA	CEMENTO C kg/m ³	CENIZA CV kg/m ³	ADITIVO mL/kgCT	EXTENSIÓN cm.	T50 s.
P-R	400	0	10.0	68	3.0
P-1	300	100	8.0	68.0	3.0
			6.0	69.0	3.4
			6.0	68	4.0
			4.0	N.A.	N.A.
P-2	250	150	4.0	50.0	6.0
			8.0	70.0	3.3
			6.0	69.0	3.6
			4.5	66.0	3.8
			4.5	64	4.2
P-3	200	200	6.0	74	1.8
			18.0	70.0	3.5
			6.0	70.0	3.3
			4.5	69.0	3.5
			4.0	60.0	5.7
P-4	150	250	6.0	72	3.4
			16.0	70.0	3.7
			15.0	74.0	1.9
			12.0	70.0	3.1
			10.0	70.0	3.0
			6.0	69.0	4.0
P-5	100	300	5.5	69	5.1
			12.0	68.0	9.5
			14.0	70.0	4.9
			14.0	70.0	5.3

Al aumentar la relación A/CT a 0.425 se encontraron mejores resultados; para todas estas mezclas, la extensión resultó dentro del intervalo esperado y se cumplieron los tiempos y/o índices visuales de estabilidad óptimos.

Con base en esos tanteos, se obtuvieron las proporciones definitivas, las cuales aparecen en la **Tabla 17**. Con estas proporciones se reprodujeron las mezclas de concreto, para llevar a cabo la caracterización en estado fresco y para la fabricación de los especímenes a emplearse en el desarrollo de las resistencias mecánicas a la compresión, el módulo de elasticidad y la relación de Poisson del concreto en estado endurecido.

Tabla 17.- Proporciones de mezclas para A/CT=0.425.

MEZCLA	C	CV	AGUA	ADITIVO		AG kg/m ³	AF kg/m ³
	kg/m ³ (%)	kg/m ³ (%)	kg/m ³	mL/kgCT	L/m ³		
P-R	400 (100)	0 (0)	170	10	4.0	719	1014
P-1	300 (75)	100 (25)	170	6	2.4	700	986
P-2	250 (62.5)	150 (37.5)	170	6	2.4	700	987
P-3	200 (50)	200 (50)	170	6	2.4	693	978
P-4	150 (37.5)	250 (62.5)	170	5.5	2.2	688	971
P-5	100 (25)	300 (75)	170	14	5.6	693	977

NOTA: El aire teórico considerado en el diseño fue de 3%

En la **Tabla 18** se hace una relación de las dosificaciones óptimas de aditivo de las pastas y los concretos. En todos los casos fue necesario incrementar las dosificaciones de ASF encontradas mediante las pruebas en las pastas descritas en la sección 8.5. Los incrementos variaron entre 0 y 75%.

Tabla 18.- Dosificaciones de ASF para las pastas y los concretos, con A/CT=0.425.

MEZCLA	C kg/m ³	CV kg/m ³	PASTA		CONCRETO mL/kgCT
			CONO FLUIDEZ mL/kgCT	MINI- REVENIMIENTO mL/kgCT	
P-R	400	0	5	8	10
P-1	300	100	4	6	6
P-2	250	150	3	5	6
P-3	200	200	2.5	4	6
P-4	150	250	3	5	5.5
P-5	100	300	6	8	14

Para los proporcionamientos, del P-1 al P-4, los resultados ilustran la utilidad de las pruebas en pasta, como un primer tanteo, ya que el incremento en la dosificación para dar la fluidez objetivo en las muestras de concreto fue mínimo y, por consiguiente, se minimizan las pruebas de tanteo para definir la dosificación final de ASF. Al aumentar la cantidad de CV, de 0 a 100kg/m³, se redujo la dosificación de ASF, debido a que para una misma cantidad de masa de CV se tiene un volumen mayor de CT, respecto al C.

8.6.- Resultados de las mediciones de las propiedades en estado fresco.

En la **Tabla 19** se muestran los criterios de aceptación de las mezclas de CAC, para los cuales se utilizaron los valores que

especifican la EFNARC [12] y Gettu [8]; lo anterior para diferentes parámetros, orientados a caracterizar a los CAC en estado fresco.

Tabla 19.- Criterios de aceptación para el CAC.

MÉTODO	UNIDAD	MARGEN	
		Mín.	Máx.
1. Extensión en revenimiento fluido.	mm	650	750
2. Revenimiento fluido T50cm.	s	3	7
3. Valor Anillo "J".	mm	0	15
4. Embudo "V".	s	6	12
5. Caja "L".	H2/H1	0.8	1.0

Cuando se realizaron las primeras pruebas, a los 10min después de iniciado el mezclado (TDIM), se encontraron resultados aceptables para el VSI, ya que no se presentaron valores mayores que 0.5. En la prueba del revenimiento fluido se obtuvieron los diámetros finales y el tiempo T50 dentro, de los valores especificados, como se muestra en la **Tabla 20**.

Tabla 20.- Resultados en la prueba revenimiento fluido, VSI y embudo "V" con A/CT=0.425.

MEZCLA	ADITIVO mL/kgCT	TDIM min	REVENIMIENTO FLUIDO		VSI	EMBUDO "V" s
			T50 s	DIAM cm		
P-R	10.0	10	2.97	68.0	0.0	46.0
		40	4.00	65.0	0	56.0
P-1	6.0	10	3.97	68.0	0	27.0
		40	6.19	60.0	0	27.0
P-2	6.0	10	1.84	74.0	0.5	7.50
		40	5.62	61.0	0	7.90
P-3	6.0	10	3.40	72.0	0.5	91
		40	4.00	70.0	0.5	97.0
P-4	5.5	10	5.06	69.0	0	148.0
		40	6.22	67.0	0	212.0
P-5	14.0	10	5.25	70.0	0	278.0
		40	5.69	69.0	0	NA

Cuando se caracterizaron las propiedades, a los 40min después de iniciado el mezclado, se presentó una pérdida de fluidez al disminuir los diámetros y un incremento en la cohesión de la mezcla al aumentar el T50. El proporcionamiento que presentó las mejores características en estas pruebas fue el P-2.

Algunos de los diámetros finales quedaron fuera del nivel recomendado; se observó una pérdida de trabajabilidad de la mezcla, provocando que se disminuyeran las propiedades de capacidad de paso y llenado, aunque se conservaron las propiedades de resistencia a la segregación.

Las mediciones realizadas con el Anillo "J" se muestran en la **Tabla 21**. Los resultados son favorables cuando se realizó la medición a los 10min, ya que la mayoría resultaron con valores menores o cercanos a 15. Cuando se hicieron las mediciones a los 40min, mediante este dispositivo, se observó una disminución en la capacidad de paso del concreto.

Tabla 21.- Resultados del anillo "J" con A/CT=0.425.

MEZCLA	TDIM min	DIÁMETROS ANILLO "J"									VALOR ANILLO "J"
		d1	da1	da2	da3	da4	db1	db2	Db3	db4	
P-R	10	9.0	10.0	10.0	10.5	10.0	11.5	11.5	11.0	12.0	16.3
	40	9.0	10.0	10.0	9.5	10.0	11.0	11.5	12.2	11.8	26.3
P-1	10	9.0	8.5	9.6	9.5	10.0	11.2	11.0	11.4	11.5	33.5
	40	7.4	8.5	8.4	9.0	8.2	11.0	10.2	10.5	10.5	29.3
P-2	10	9.5	10.0	10.0	9.8	10.0	11.0	11.0	11.0	11.0	16.5
	40	7.5	7.8	8.5	7.5	8.5	10.3	10.5	10.8	9.5	38.3
P-3	10	10.5	10.5	10.5	11.0	11.0	12.0	11.0	11.5	11.5	12.5
	40	9.0	10.0	9.0	9.5	10.0	12.0	11.1	11.5	12.0	34.3
P-4	10	9.5	9.8	10.0	9.5	10.0	10.8	11.0	11.1	11.2	20.8
	40	7.4	9.9	8.7	9.9	9.5	11.5	10.9	11.5	11.4	15.5
P-5	10	9.0	9.5	10.5	10.5	10.3	11.0	11.2	11.1	11.0	5.5
	40	9.0	10.5	10.6	10.2	10.0	11.0	11.2	11.2	11.5	4.8

En la **Tabla 22** se observa que ninguna de las relaciones de altura H2/H1 resultó dentro del nivel recomendado para considerar una buena capacidad de llenado; cuando se hicieron las mediciones a los 40min, fue evidente la disminución en la capacidad de llenado y paso. Los tiempos para llegar a una distancia de 40 y 80cm (T40 y T80) fueron menores para los proporcionamientos P-3 y P-4, considerándose a éstos como los que presentaron mejores capacidades de paso.

Tabla 22.- Resultados de la caja "L" con A/CT=0.425.

MEZCLA	ADITIVO mL/kgCT	TDIM min	CAJA "L"				
			T40	T80	H1	H2	H2/H1
P-R	10.0	10	12.0	134.0	18.0	4.0	0.22
		40	5.0	NA	NA	NA	NA
P-1	6.0	10	3.0	17.0	11.0	5.8	0.53
		40	3.0	18.0	20.5	3.3	0.16
P-2	6.0	10	3.0	8.0	9.7	6.7	0.69
		40	4.0	31.0	9.0	2.5	0.28
P-3	6.0	10	4.0	12.0	9.5	6.0	0.63
		40	4.0	15.0	12.5	5.1	0.41
P-4	5.5	10	5.0	23.0	8.0	5.4	0.67
		40	6.0	30.0	7.2	3.8	0.53
P-5	14.0	10	10.0	21.0	8.8	4.8	0.54
		40	5.7	23.6	8.2	6.5	0.79

En la **Tabla 23** se encuentra el resumen de los resultados de las pruebas en estado fresco. De estos resultados se puede apreciar lo siguiente:

- Para todos los proporcionamientos, la prueba de revenimiento fluido resultó con los valores mínimos especificados para el T50 y la extensión final.
- Los tiempos en la prueba del embudo "V" solamente resultaron satisfactorios para el proporcionamiento P-2.
- Los índices visuales de estabilidad (VSI) tuvieron valores adecuados para aceptar todas las mezclas, a partir de este criterio.
- Los valores de anillo "J" presentaron valores aceptables, sólo para los proporcionamientos P-2, P-3 y P-4, cuando se hicieron las pruebas en estado fresco, a los 10min TDIM.
- La capacidad de llenado con la relación de H2/H1, que resulta de la prueba de la caja "L", presentó valores por debajo de lo recomendado, que era de 0.85.

Tabla 23.- Resultados de pruebas en estado fresco para A/CT=0.425.

MEZCLA	ADITIVO mL/kgCT	TDIM min	FLUIDEZ		VSI	EMBUDO “V” s	ANILLO “J” mm	CAJA “L”				
			T50 s	DIAM cm				T40	T80	H1	H2	H2/H1
P-R	10.0	10	2.9	68	0	56	16.3	12	134	18.0	4.0	0.22
		40	4.0	65	0	35	26.3	5	NA	NA	NA	NA
P-1	6.0	10	3.9	68	0	27	33.5	3	17	11.0	5.8	0.53
		40	6.1	60	0	27	29.3	3	18	20.5	3.3	0.16
P-2	6.0	10	1.8	74	0.5	7.5	16.5	3	8	9.7	6.7	0.69
		40	5.6	61	0	7.9	38.3	4	31	9.0	2.5	0.28
P-3	6.0	10	3.4	72	0.5	121	12.5	4	12	9.5	6.0	0.63
		40	4.0	70	0.5	67	34.3	4	15	12.5	5.1	0.41
P-4	6.0	10	5.1	69	0	148	20.8	5	23	8.0	5.4	0.67
		40	6.2	67	0	212	15.5	6	30	7.2	3.8	0.53
P-5	10.0	10	5.3	70	0	278	5.5	10	21	8.8	4.8	0.54
		40	5.7	69	0	NA	4.8	5	23	8.2	6.5	0.79

8.7.- Resultados de las mediciones de las propiedades en estado endurecido.

8.7.1.- Resultados de resistencia a la compresión.

Para la determinación de esta propiedad se fabricaron especímenes cilíndricos de 10cm de diámetro nominal y relación de esbeltez de 2, los cuales fueron curados conforme lo indica la norma ASTM C-31, a las edades de 7, 14, 28 y 56 días. Los especímenes se ensayaron para obtener su resistencia mecánica a la compresión, hasta la ruptura (f_c), de acuerdo con ASTM C-39. En las **Imágenes 24** y **25** se muestran los cilindros ensayados.



Imagen 24.- Cilindros de CAC para ser ensayados a compresión.



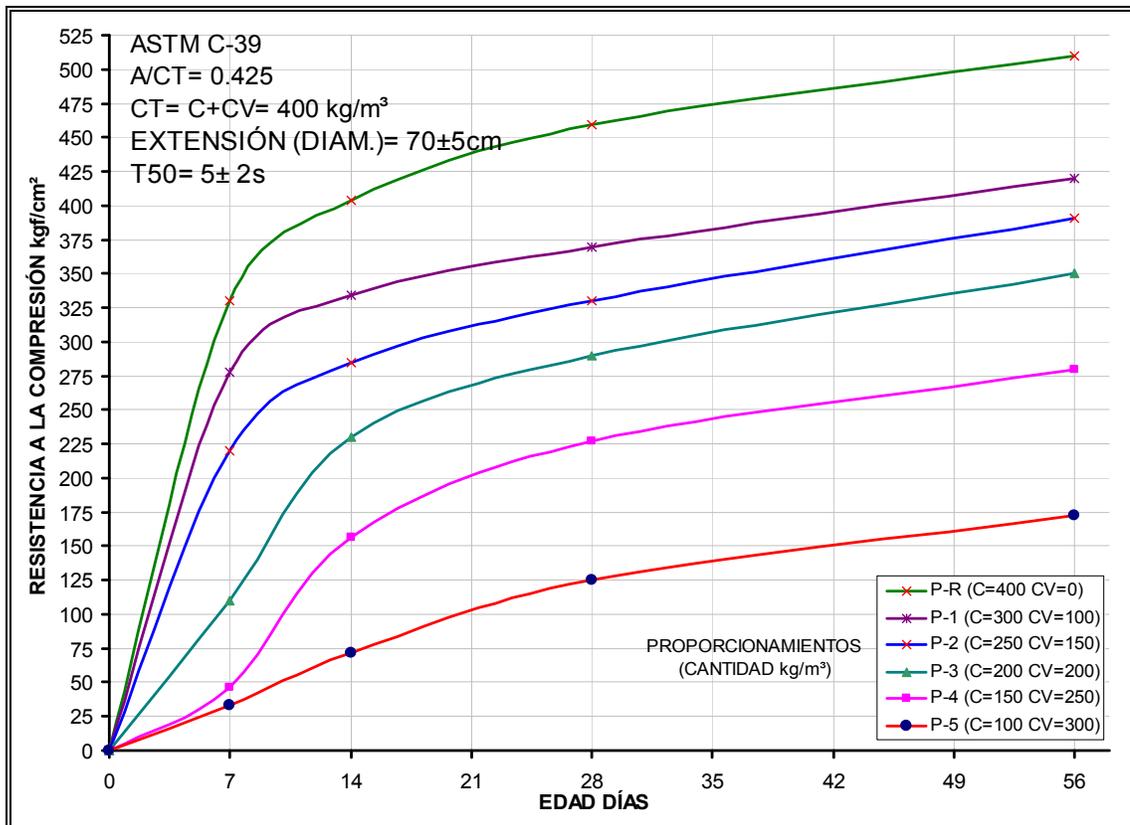
Imagen 25.- Cilindros ensayados a compresión.

En los concretos ensayados no se observó segregación, ya que se presentó una distribución homogénea de los materiales en toda la longitud de los cilindros. En la **Tabla 24** se presentan las resistencias a la compresión obtenidas a diferentes edades. Se considera importante destacar que estas resistencias son a la ruptura, es decir, se calcularon con la carga máxima resultante.

Tabla 24.- Desarrollo de resistencias a compresión hasta la ruptura (f_c).

MEZCLA	Resistencias a la compresión hasta la ruptura (f_c) kgf/cm ²				Incremento en % 28-56 días
	7 días	14 días	28 días	56 días	
P-R	330	404	459	510	11.1
P-1	277	334	370	420	13.5
P-2	220	284	330	391	18.5
P-3	110	230	290	350	20.7
P-4	47	156	227	280	23.3
P-5	33	72	125	172	37.6

En la **Gráfica 12** se observan las resistencias a compresión a la ruptura (f_c) obtenidas para los diferentes proporcionamientos.

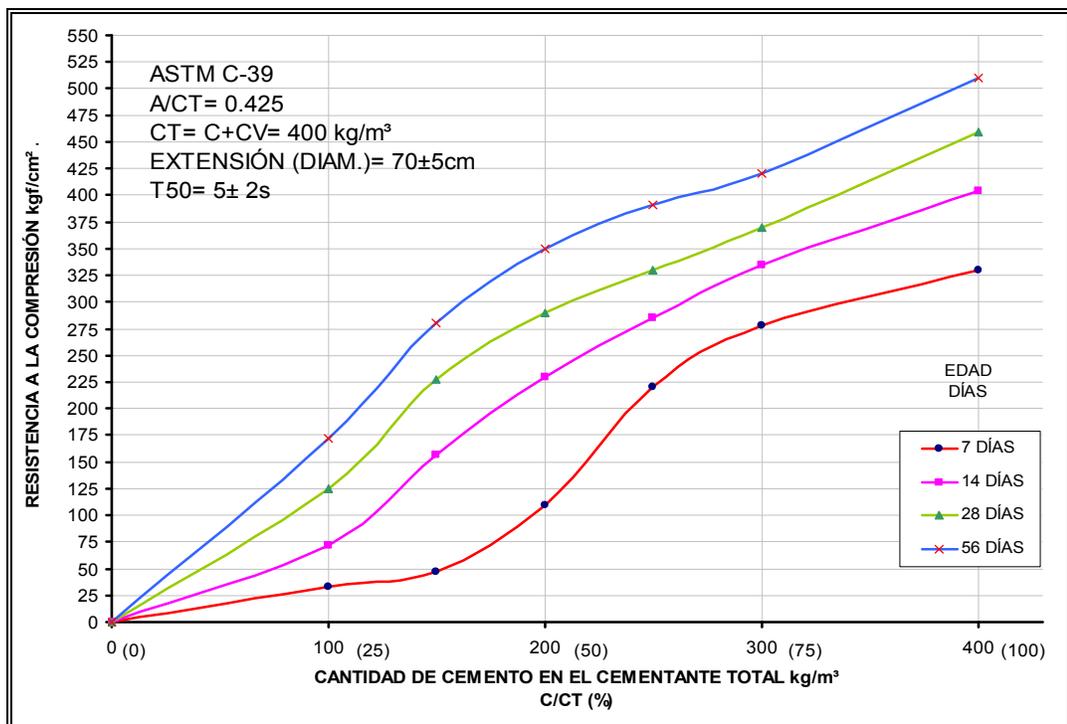


Gráfica 12.- Desarrollo de resistencias a compresión hasta la ruptura (f_c).

La resistencia a edades tempranas fue más lenta y con mayor incremento; de 28 a 56 días para el P-5 (37.6%), debido a la actividad puzolánica característica de los materiales como la CV, los cuales normalmente presentan un incremento en resistencia mayor que el que presentaría un concreto fabricado solamente con C.

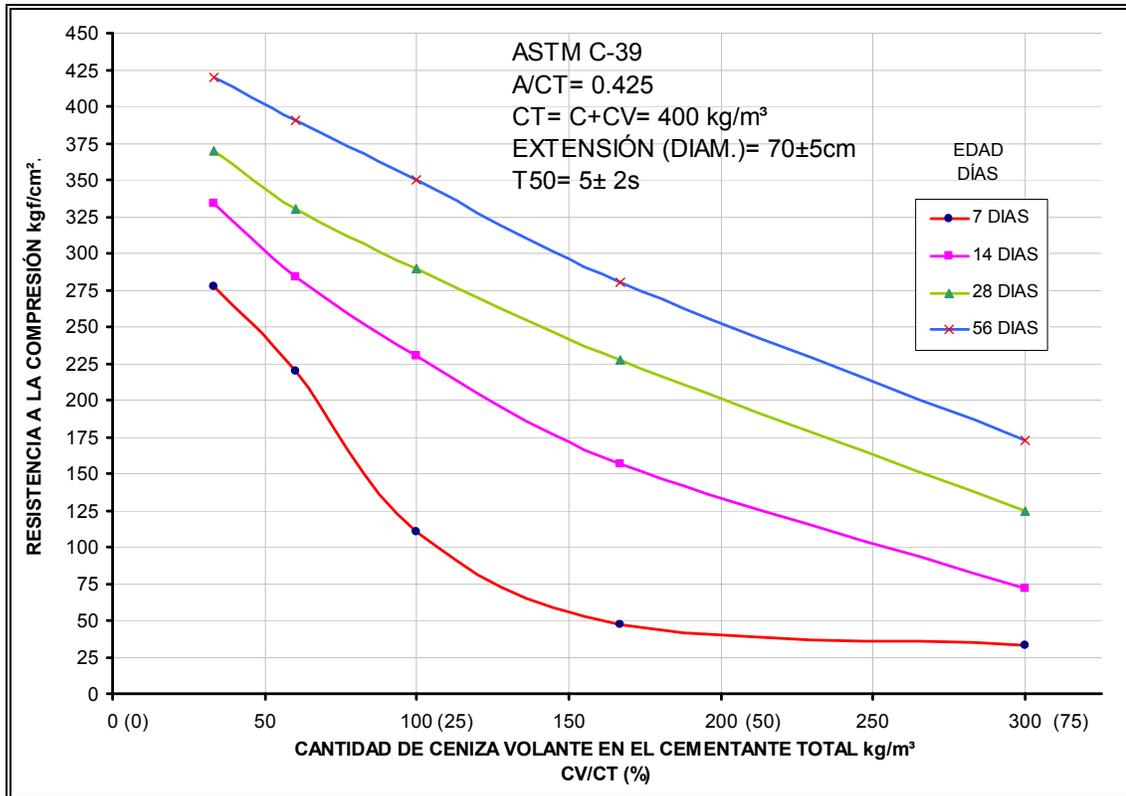
A la edad de 28 días se obtuvieron resistencias a la ruptura (f_c) entre 125 y 370 kgf/cm^2 . Para el proporcionamiento P-R se encontró una resistencia de 459 kgf/cm^2 . A medida que se aumentó la cantidad de CV, la resistencia se vió disminuida; no obstante, se encontraron resultados aceptables para la utilización de estos concretos en aplicaciones estructurales.

En la **Gráfica 13** se observan las resistencias del CAC obtenidas para los diferentes proporcionamientos definitivos (Para un contenido de $CT = 400 \text{ kg/m}^3$ y una $A/CT = 0.425$), mediante esta gráfica es posible estimar la resistencia del CAC a diferentes edades y seleccionar las diferentes opciones que pudiesen satisfacer una resistencia a la compresión requerida para una edad determinada entre los 7 y los 56 días.



Gráfica 13.- Relación de resistencia a la compresión con la cantidad de cemento.

En la **Gráfica 14** se observa que las resistencias disminuyen a medida que se aumenta la cantidad de CV. Para las edades de 14, 28 y 56 días, el comportamiento es prácticamente lineal.



Gráfica 14.- Relación de resistencia a la compresión con la cantidad de ceniza volante.

En el Reglamento ACI 318-05 [3] (sección 5.3) se especifican los valores de resistencia promedio a la compresión requeridos para los diseños de los proporcionamientos de concreto (f'_{cr}), necesarios para encontrar la resistencia de diseño especificada a la compresión (f'_c), que se utiliza para dimensionar los elementos de concreto. Para calcular f'_{cr} , a partir de f'_c , se requiere conocer la desviación estándar (S_s), la cual es un parámetro estadístico que integra todas las posibles variaciones en la producción del concreto.

Según información recopilada en el Departamento de Tecnología del Concreto del Instituto de Ingeniería Civil de la U.A.N.L., para el área metropolitana de Monterrey la industria del concreto premezclado reporta una S_s de 30kgf/cm².

En la **Tabla 25** se observan las f'_{cr} requeridas de acuerdo con la ecuación $f'_{cr} = f'_c + 1.34S_s$, donde $1.34S_s = 40 \text{ kgf/cm}^2$.

Tabla 25.- Valores de f'_{cr} necesarios para diferentes f'_c .

f'_c kgf/cm ²	$f'_c + 1.34(S_s)$ kgf/cm ²	f'_{cr} kgf/cm ²
100	100 kgf/cm ² + 40 kgf/cm ²	140
150	150 kgf/cm ² + 40 kgf/cm ²	210
200	200 kgf/cm ² + 40 kgf/cm ²	240
250	250 kgf/cm ² + 40 kgf/cm ²	290
300	300 kgf/cm ² + 40 kgf/cm ²	340
350	350 kgf/cm ² + 40 kgf/cm ²	390

En la **Tabla 26** se presentan las proporciones de C y CV para las diferentes resistencias de diseño especificadas a la compresión (f'_c). Esta información resulta de mucha utilidad para la selección de las proporciones de una mezcla de "concreto fluido" con $A/CT = 0.425$ y $CT = 400 \text{ kg/m}^3$.

Tabla 26.- Proporciones de C y CV para diferentes f'_c a la edad de 28 días.

f'_{cr} kg/cm ²	f'_c kg/cm ²	MEZCLA	Cemento kg/m ³	Ceniza kg/m ³	CV/CT %
140	100	P-4	110	290	72.5
190	150	P-4	140	260	65.0
240	200	P-3	160	240	60.0
290	250	P-2	200	200	50.0
340	300	P-1	270	130	32.5
390	350	P-R	340	60	15.0

Sólo los proporcionamientos P-2 y P-3 resultaron con propiedades de auto-compactabilidad; pero esto no quiere decir que los otros concretos no resulten técnicamente útiles, sino simplemente que estos concretos no tienen la posibilidad de producirse con propiedades auto-compactables, pero sí como concretos de alto comportamiento con CV.

8.7.2.- Resultados del módulo de elasticidad y la relación de Poisson.

Se realizaron las pruebas para determinar el módulo de elasticidad (E) y la relación de Poisson (μ), a los 28 días de edad y de acuerdo con el procedimiento de la ASTM C-469 (Imagen 26).



Imagen 26.- Determinación del módulo de elasticidad y la relación de Poisson.

Para concretos de peso normal, el ACI considera el valor del módulo de elasticidad obtenido de la fórmula $E = 15100 \cdot \sqrt{f'_c}$ [3] (en este caso "fc"); el valor de μ varía de 0.15 a 0.30 [14] para resistencias a compresión similares a los concretos producidos. En la Tabla 27 se presentan los resultados obtenidos de E y μ para los proporcionamientos más representativos P-1, P-2, P-4 y P-R.

Tabla 27.- Resultados de E y μ para resistencias a compresión (fc) a 28 días.

MEZCLA	Resistencias a compresión (fc) kgf/cm ²	E (ACI) kgf/cm ²	E kgf/cm ²	μ
P-4	227	227504	301853	0.23
P-2	330	274305	321143	0.25
P-1	370	290454	365106	0.26
P-R	460	323859	417210	0.26

8.8.- Análisis de los costos del concreto auto-compactable.

En la **Tabla 28** se presentan los costos de los materiales constituyentes del concreto, que se encuentran disponibles en el Área Metropolitana de Monterrey.

Tabla 28.- Costos de los materiales constituyentes del concreto.

Concepto	Unidad	Costo * \$ Pesos
Cemento Pórtland CPC 30R	kg	\$ 1.70
Ceniza volante	kg	\$ 0.03
Grava 2	m ³	\$ 210.0
Arena 4	m ³	\$ 240.0
Aditivo superfluidificante	L	\$ 30.0
Agua	L	\$ 0.03

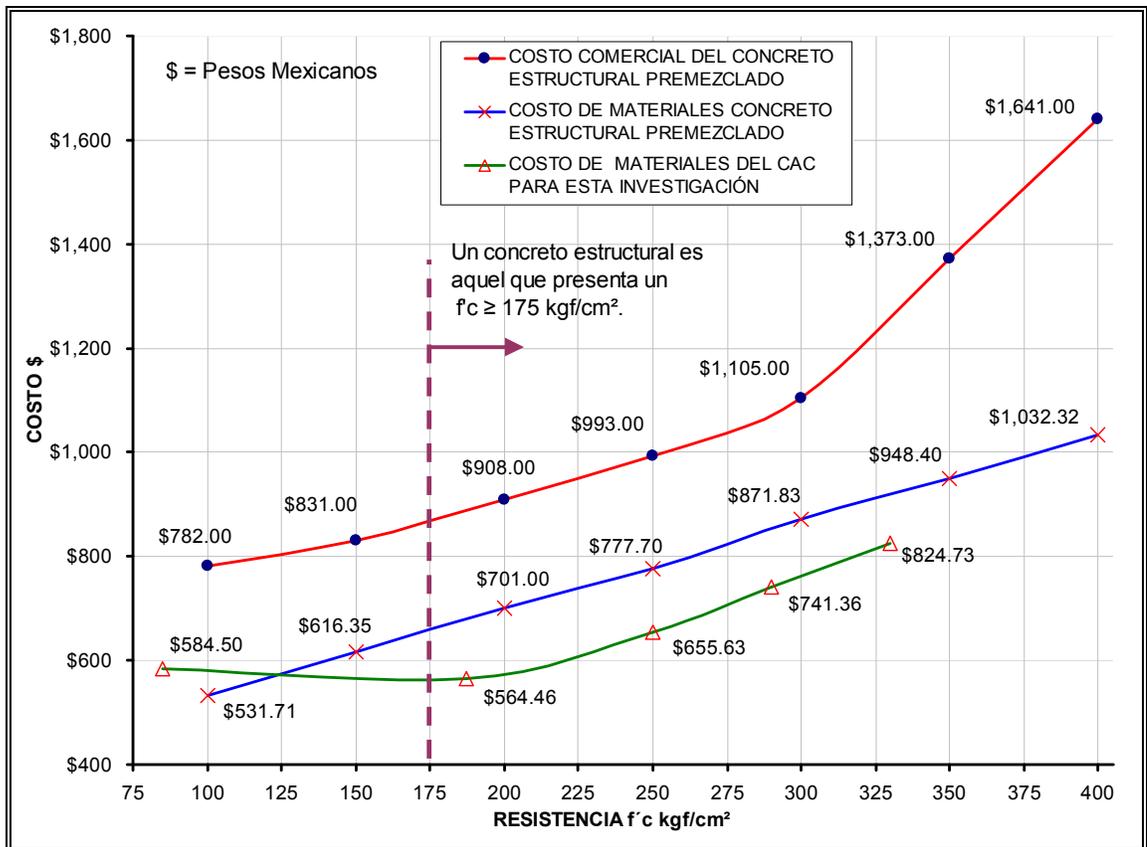
De acuerdo con los precios de los materiales de la tabla anterior y de las cantidades de los mismos en los diferentes proporcionamientos de esta investigación, se obtuvieron los costos de las mezclas de concreto que se presentan en la **Tabla 29**. Los $f'c$ son los obtenidos para una $S_s=30\text{kg/cm}^2$ de acuerdo con los diferentes f_c registrados en los proporcionamientos, a los 28 días.

Tabla 29.- Costos del concreto auto-compactable para diferentes mezclas.

MEZCLA	$f'c$ kgf/cm ²	Costo Material* Pesos/m ³
P-1	330	\$ 824.73
P-2	290	\$ 741.36
P-3	250	\$ 655.63
P-4	187	\$ 564.46
P-5	85	\$ 584.50

*Excluye los costos de diseño, mezclado, transporte, gastos administrativos y de logística, así como utilidad; precios de los materiales en agosto de 2007 (Sin IVA). El $f'c$ considerado para el cálculo corresponde a los 28 días.

En la **Gráfica 15** se pueden observar los costos comerciales y de materiales del concreto estructural tradicional y el costo de los materiales para el CAC. Con el uso del CAC producido en esta investigación se aprecia un ahorro considerable en los costos.



Gráfica 15.- Costos comerciales y de materiales del concreto estructural Vs. costos de materiales del CAC.

En la **Tabla 30** se presentan los costos de los materiales para las mezclas de concreto de esta investigación y su comparación con los concretos premezclados para uso estructural con resistencias a la compresión especificadas ($f'c$) de igual valor.

Tabla 30.- Costos comerciales y de materiales del concreto.

f'c kgf/cm ²	Costos de concreto premezclado estructural				Costo de materiales para CAC con CV	
	Costo comercial	Costo de materiales	Costo producción	% Costo producción	Costo con CV	Ahorro* %
175	\$ 869.5	\$ 658.7	\$ 210.8	24.25 %	\$ 563.0	14.5 %
200	\$ 908.0	\$ 701.0	\$ 207.0	22.80 %	\$ 571.0	18.6 %
250	\$ 993.0	\$ 777.7	\$ 215.3	21.68 %	\$ 655.6	15.7 %
300	\$ 1,105.0	\$ 871.8	\$ 233.2	21.10 %	\$ 762.0	12.6 %
350	\$ 1,373.0	\$ 948.4	\$ 424.6	30.93 %	N.A.	N.A.
400	\$ 1,641.0	\$ 1,032.3	\$ 608.7	37.09 %	N.A.	N.A.

*El ahorro es en relación al costo deducido exclusivamente para los materiales a partir del costo comercial del concreto premezclado en el área metropolitana de Monterrey

8.9.- Procedimiento sugerido para la producción de concretos auto-compactables, con ceniza volante.

- 1.- Definir los parámetros que definen la auto-compactabilidad (en esta investigación se utilizaron la extensión y el T50 de acuerdo con la prueba del revenimiento fluído).
- 2.- Con base en experiencias previas, como la que se presenta en esta investigación, definir el contenido de cemento Pórtland, los cementantes complementarios y el cementante total (CT) por m³ y la relación agua / cementante total (A/CT).
- 3.- Determinar el punto de saturación del aditivo superfluidificante (ASF) por medio del cono Marsh (en esta investigación se utilizó el cono de fluidez).
- 4.- Determinar la combinación de agregados grueso y fino para una máxima compactación (peso volumétrico seco suelto).
- 5.- Definir las proporciones para mezclas de tanteo.
- 6.- Realizar mezclas de tanteo, para obtener las proporciones que muestren las propiedades objetivo de auto-compactabilidad, de acuerdo con la prueba de revenimiento fluído (extensión y T50).
- 7.- Una vez obtenidas las propiedades objetivo, caracterizar el concreto en estado fresco, con los equipos que se dispongan para este fin.
- 8.- Fabricar especímenes para determinar la resistencia a la compresión y otras propiedades de interés en estado endurecido (módulo de elasticidad, relación de poisson, etc.,).
- 9.- Si las propiedades en estado fresco y la resistencia a la compresión no tienen los resultados esperados, el proporcionamiento podrá modificarse, para obtener la resistencia y las propiedades objetivo: reduciendo o aumentando la relación A/CT o modificando la proporción CV/C. Para este fin resultarán de suma utilidad las herramientas desarrolladas en esta investigación.

9. CONCLUSIONES

Con base en los parámetros investigados, tales como: la relación agua/cementante, el porcentaje de ceniza volante, el tipo de cemento, la fluidez, etc., es posible presentar las siguientes conclusiones:

- Para las variables consideradas en el proyecto, no es posible obtener los parámetros de auto-compactabilidad especificados, con relaciones agua/cementante menores que 0.425.
- Es factible producir concretos auto-compactables y ecológicamente sustentables utilizando contenidos de ceniza volante, en sustitución del cementante total, en porcentajes entre 37.5 y 50%.
- Es factible producir concretos estructurales ($f'c > 175 \text{ kgf/cm}^2$) con porcentajes de ceniza volante en sustitución del cemento Pórtland, hasta del 50%
- Los resultados demuestran que es posible producir concretos para diferentes valores de resistencia especificada a la compresión ($f'c$) entre 100 y 300 kgf/cm^2 a la edad de 28 días.
- Entre las edades de 28 y 56 días, producto de la sustitución del cemento Pórtland por ceniza volante, se obtuvieron tendencias positivas de incremento en la resistencia a la compresión (de 13.5 a 37.6%). A mayor porcentaje de sustitución, mayor es el incremento en la resistencia a la compresión.
- El uso de la ceniza volante originó un ahorro promedio en el costo de los materiales de un 15%, en comparación con un concreto estructural convencional.

- En todos los casos, los resultados del módulo de elasticidad y de la relación de Poisson fueron superiores a los típicos reportados en la literatura especializada para concretos estructurales de similar resistencia a la compresión.
- Los resultados de esta investigación representan una herramienta práctica y de mucha utilidad para la selección inicial de las proporciones para producir concretos autocompactables y de alto comportamiento con ceniza volante, en sustitución del cemento, entre un 25 y un 75% del CT.
- A través de los diferentes métodos utilizados en esta investigación, se verificó el cumplimiento de los parámetros comunes para concretos, en términos de auto-compactabilidad.
- Los proporcionamientos para los que no se obtuvieron las propiedades de auto-compactabilidad pueden producirse para aplicaciones prácticas, como concretos de alto comportamiento.

10. RECOMENDACIONES

Es recomendable realizar pruebas adicionales para evaluar el comportamiento, tanto en estado fresco como endurecido, para diferentes relaciones A/CT, así como diferentes contenidos de cementantes complementarios. A continuación se mencionan otras recomendaciones para trabajos futuros.

- Para la determinación de la dosificación óptima de aditivo, se deberán realizar las correlaciones con los resultados de los valores óptimos en las mezclas de concreto y en las pastas con diferentes contenidos de cementante total y diferentes relaciones de CV/C.
- Realizar proporcionamientos de concreto con bajos volúmenes de CV u otro complemento cementante, para observar la aplicación del filler calcáreo y encontrar las relaciones F/CT adecuadas.
- Se deberán hacer diseños de mezclas variando la relación A/CT, con el fin de encontrar las dosificaciones óptimas de aditivo en el concreto.
- En esta investigación no se midieron las características de temperatura y contenido de aire en el concreto. Éstas deben medirse en investigaciones posteriores, para ver su influencia en las propiedades en estado fresco y en la resistencia.
- Se deben estudiar las características de auto-compactabilidad y resistencia, para contenidos de CT diferentes a 400kg/m³.
- Reproducir las mezclas de CAC obtenidas en esta investigación para llevar a cabo la experimentación requerida, orientada a definir su durabilidad.

11. GLOSARIO DE TÉRMINOS.

Absorción- Proceso en el cual un líquido es atraído hacia los vacíos de un cuerpo sólido poroso y trata de llenarlos.

Adición- Material inorgánico finamente dividido, utilizado para mejorar ciertas propiedades o para lograr propiedades especiales.

Aditivo- Material añadido en pequeñas cantidades durante el proceso de mezclado del cemento, para modificar las propiedades del concreto fresco o endurecido.

Agregado- Material granular tal como arena, grava, roca triturada, concreto hecho con cemento hidráulico triturado, o escoria de fundición de acero, que se une junto con un medio cementante hidráulico, para producir ya sea concreto o mortero.

Bachada- Cantidad, ya sea de concreto o de mortero, que se combina una sola vez.

Calcáreo- Que contiene carbonato de calcio, menos general, que contiene el elemento Calcio.

Capacidad- Una medida de volumen nominal de un cierto tipo de mezclador o agitador para concreto, generalmente regulado por especificaciones a un máximo porcentaje del volumen total bruto; también el rendimiento del concreto, agregado a otro tipo de material por unidad de tiempo (como capacidad de planta o capacidad de cribado); así mismo, la posibilidad de carga máxima de una estructura.

Capacidad de llenado- Es la capacidad del CAC para fluir y llenar completamente todos los espacios, dentro de un elemento estructural, bajo su propio peso.

Capacidad de paso- La capacidad del CAC para fluir a través de armaduras sin segregación ni bloqueos.

Capacidad de sangrado- Relación entre el volumen del agua exudado por el sangrado y el volumen de la pasta o del mortero.

Cemento Pórtland- Cemento hidráulico producido por la pulverización de clínker de cemento Pórtland y que generalmente contiene sulfato de calcio.

Ceniza volante- Residuo finamente pulverizado, derivado de la combustión de carbón molido o pulverizado y el cual se transporta mediante gases, de la zona de combustión hacia el sistema de eliminación de partículas.

Cimbra- Sistema total para soportar el concreto fresco recién colado que incluye el molde o las tarimas en contacto con el concreto así como todos los elementos de apoyo, herrajes y atiesadores.

Compactación- Proceso para introducir un mejor acomodamiento entre las partículas sólidas, en un concreto recién mezclado o en mortero durante la colocación, a través de la reducción de vacíos, lo cual generalmente se logra con vibración, centrifugado, varillado, apisonado, o alguna combinación de estos efectos.

Complemento cementante- Material que, en conjunto con el cemento Pórtland, adquiere características de cementante.

Concreto- Material compuesto formado básicamente por un medio aglutinante, dentro del cual quedan ahogadas partículas o fragmentos de agregados, generalmente formados por una combinación de agregado fino con agregado grueso; en un concreto de cemento Pórtland, el aglutinante es una mezcla de cemento Pórtland y agua, con o sin aditivo.

Concreto auto-compactable- Concreto que puede fluir por su propio peso y llenar completamente la cimbra, incluso en presencia de un armado denso, sin necesidad de ninguna vibración, al tiempo que mantiene la homogeneidad.

Cono de revenimiento- Molde que contiene la forma de la superficie lateral del tronco con un diámetro interior, en la base, de 200mm; un diámetro, en la parte superior, de 100mm y una altura de 300mm, que se usa para la prueba de revenimiento.

Consistencia- Movilidad relativa o capacidad de fluencia del concreto recién mezclado o del mortero; la forma de cuantificarla es mediante pruebas de revenimiento en concreto, de flujo para mortero y lechada, y de resistencia a la penetración, para pasta pura de cemento.

Estabilidad- Habilidad de una mezcla de CAC para mantener una distribución uniforme de todos los materiales constituyentes, una vez que el concreto se ha colocado. Se puede presentar inestabilidad de varias maneras, tales como sangrado, asentamiento del agregado grueso y bloqueo durante el flujo del concreto.

Estabilidad dinámica- Se refiere a la característica de la mezcla de concreto a resistir la segregación durante el proceso de colado.

Estabilidad estática- Se refiere a la habilidad de la mezcla de concreto a resistir el sangrado, la segregación y el asentamiento, una vez completadas las operaciones de colocación y colado.

Filler- Material modificador de la viscosidad, constituido por polvos, con un tamaño de partícula inferior que 0.125mm.

Fluidez- Medida de la consistencia de un concreto, mortero o pasta de cemento recién mezclados, expresados en términos de incremento en el diámetro de un espécimen cónico truncado moldeado después de sacudirlo, con movimientos rápidos, un número especificado de veces.

Fluidificador- Un aditivo empleado en la lechada para reducir el factor de flujo, sin cambiar el contenido del agua.

Fluidificante- Un aditivo empleado en la lechada para reducir el factor de flujo, reduciendo el contenido del agua.

Fraguado- La condición alcanzada por una pasta de cemento, mortero o concreto, cuando ha perdido plasticidad a un grado arbitrario, generalmente medido en términos de resistencia a la penetración o deformación.

Fraguado Inicial- Tiempo necesario para que una pasta de cemento, mortero o concreto, recién mezclados, alcance el fraguado inicial.

Fraguado Final- Tiempo necesario para que una pasta de cemento, mortero o concreto, recién colados, alcancen el fraguado final.

Granulometría- La distribución de partículas del material granular entre varios tamaños; usualmente se expresa en términos de porcentajes acumulativos más grandes o más pequeños que cada uno de una serie de tamaños o los porcentajes entre ciertos grupos de tamaños.

Mortero- La fracción de concreto consistente en la pasta junto con los agregados de tamaño inferior que 4.76mm.

Pasta- La fracción de concreto consistente, en los finos, con el agua y el aire.

Polvo- Material con un tamaño de partícula inferior que 0.125mm, incluyendo el cemento, la adición y la aportación de las arenas.

Punto de Saturación- Es el punto en donde, en la medida que se agrega más aditivo a la pasta, ésta no aumentará su fluidez.

Puzolana- Material puramente silícico o silicoaluminico que en sí mismo posee muy bajo valor cementante o ninguno, pero si se le divide en partículas finas y con la adición de agua, reaccionará químicamente con el hidróxido de calcio, a temperatura ambiente, para formar compuestos que poseen propiedades cementantes.

Reología- Ciencia que trata con la influencia de materiales, incluyendo estudios de deformación del concreto endurecido, el manejo y colocación de concreto recién mezclado, y el comportamiento de lodos, pastas y mezclas semejantes.

Resistencia a la Segregación- Capacidad del concreto auto-compactable, para mantener homogénea su composición durante el transporte y la puesta en obra.

Segregación- Concentración diferencial de los componentes de concreto mezclado, agregados, o materiales afines, como resultado de las proporciones no uniformes en la masa.

Trabajabilidad- Una medida de la facilidad con la que el concreto fresco puede colocarse y auto-compactarse; se trata de una compleja combinación de aspectos de fluidez, cohesión, compactabilidad, y viscosidad.

Viscosidad- Es una propiedad de los fluidos y las lechadas que indica su resistencia a fluir; se define como la relación entre el esfuerzo cortante y la velocidad de corte.

13. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1.- **Metha Kumar y Monterero Paulo.** *“Concreto, Estructura, Propiedades y Materiales”*. IMCYC, Primera Edición, 1998. pp 83-89, 185-186.
- 2.- **Malhotra V. M., Metha P. K.** *“High-Performance, High-Volume Fly Ash Concrete”*. Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc. Ottawa, Canada, Second Edition 2005; pp 30-42.
- 3.- **ACI 318-02 y ACI 318R-02.** *“Reglamento para las construcciones de concreto estructural y comentarios”*. IMCYC, Primera Edición 2004. pp 13-20, 32.
- 4.- **Van K Bui, Acalla Yilmaza, P. Shah Surendra.** *“Rheological Model for Self Consolidating Concrete”*. ACI Materials Journal, V.99, No. 6. November-December, 2002. pp 549-559.
- 5.- **Okamura Hajime, Ouchi Masahiro.** *“Self-Compacting Concrete”*. Journal of Advanced Concrete Technology. Vol. 1, 5-15, Japan Concrete Institute, April, 2003. pp 5-15.
- 6.- **Khayat Kamal H.** *“Workability Testing and Performance of Self-Consolidating Concrete”*. ACI Materials Journal, V. 96, No.3. May-June, 1999. pp 346-354.
- 7.- **Khayat Kamal H., Assaad Joseph, Dacszko.** *“Comparison of Field- Oriented Test Methods to Assess Dynamic Stability of Self-Consolidating Concrete”*. ACI Materials Journal, V. 101, No. 2. March-April, 2004. pp 168-176.
- 8.- **Gettu Ravindra, Gomes Paulo C., Agulló Luis y Bernad Camilo.** *“Diseño de Hormigones Autocompactables de Alta Resistencia Procedimiento para su Dosificación y Métodos de Caracterización”*. Universidad Politécnica de Cataluña, pp 30-42.
- 9.- **Hoff George C.** *“Concreto Durable en Estructuras Mar Adentro”*. Memorias Simposio Internacional sobre Durabilidad del Concreto, Facultad de Ingeniería Civil, U. A. N. L. 2005; pp 57- 90.

- 10.- **Lachemi Mohamed, Khandaker M.A. Hossain, Lambros Vasilios, Bouzoubaa Nabil.** *“Development of Cost-Effective Self-Consolidating Concrete Incorporating Fly Ash, Slag Cement or Viscosity-Modifying Admixtures”*. ACI Materials Journal, V. 100, No. 5, September-October, 2003. pp 419-425.

- 11.- **Cárcamo Juan Carlos.** *“Concreto Auto- Consolidante Repaso y Actualización sobre últimos Desarrollos”*. Memorias Simposio Internacional sobre Durabilidad del Concreto, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Autónoma de Nuevo León 2005; pp 106-122.

- 12.- **EFNARC Association House.** *“Especificaciones y Directrices para el Hormigón Autocompactable- HAC”*. EFNARC 2002. pp 1-30.

- 13.- **Precast Prestressed Concrete Institute.** *“Interim Guidelines for the use of Self Consolidating Concrete in Precast Prestressed Concrete Institute Member Plants”*. PCI; First Edition, 2003. pp 9-29, Apendixs.

- 14.- **Park R., Paulay T.** *“Estructuras de concreto reforzado”* Editorial LIMUSA, Primera edición 1978; pp 13-20.

- 15.- **Durán Alejandro.** *“Desarrollo de Compuestos Densificados Reforzados Base Cemento Pórtland CPO 40”*. Tesis de doctorado, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, U. A. N. L., 2003.

- 16.- **Ghezal A., Khayat Kamal H.** *“Optimizing Self-Consolidating with Limestone Filler by using Statistical Factorial Desing Methods”*. ACI Materials Journal, V. 99, No. 3, May-June, 2002. pp 264-272.

- 17.- **Nawa Toyuharu, Izumi Tatsuo, Edamatsu Yoshinobu.** *“State of the Art Report on Materials and Desing of Self Compacting Concrete”*. International Workshop on Self Compacting Concrete 23-26, Kochi University of Technology, August. 1998. pp 160-190.

- 18.- **Skarendahl A, Petersson O.** *“Self-Compacting Concrete”*. State of the Art Report of Rilem Technical Committee 174-SCC, Self Compacting Concrete Report 23, Rilem Publicaciones pp. 17-39.

- 19.- **ACI 309R-96.** *“Compactación del Concreto”*. Instituto Mexicano del Cemento y Concreto. Primera Edición. México, 1998.

- 20.- **ACI 116R-00.** *“Terminología del Cemento y del Concreto”*. Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto Primera Edición, México, 2002. pp 5-19.
- 21.- **Gaceta Oficial del Distrito Federal.** *“Reglamento de construcciones para el Distrito Federal”*. Gobierno del Distrito Federal, Enero 2004. pp 46.
- 22.- **Gaceta Oficial del Distrito Federal.** *“Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Estructuras de Concreto”*. Gobierno del Distrito Federal, Octubre 2004. pp 99,103,
- 23.- **Malthotra V. M., Spiratos N.** *“Superplasticizers for Concrete”*. Supplementary Cementing Materials for Sustainable Development Inc., Ottawa, Canada, K1Y2B3, 2005; pp 108-112,127-145.
- 24.- **Malhotra V. M.** *“Concreto con alto contenido de Ceniza Volante: Propiedades Mecánicas y Aspectos sobre la Durabilidad”*. Memoria del Seminario Internacional sobre Tecnología del Concreto, Facultad de Ingeniería Civil, U.A.N.L. 1993; pp 245-258.
- 25.- **Gogné Richard y Aitcin Pierre-Claude.** *“Superfluidificantes para obtener Concreto Durable”*. Memoria del Seminario Internacional sobre Tecnología del Concreto, Facultad de Ingeniería Civil, U.A.N.L. 1993; pp 201-219.
- 26.- **Young J. Francis, Mindess Sydney.** *“The Science and Technology of Civil Engineering Materials”*. Prentice Hall International Series in Civil Engineering and Engineering Mechanics. 1998; pp 189-199.

12. ANEXO DE FIGURAS

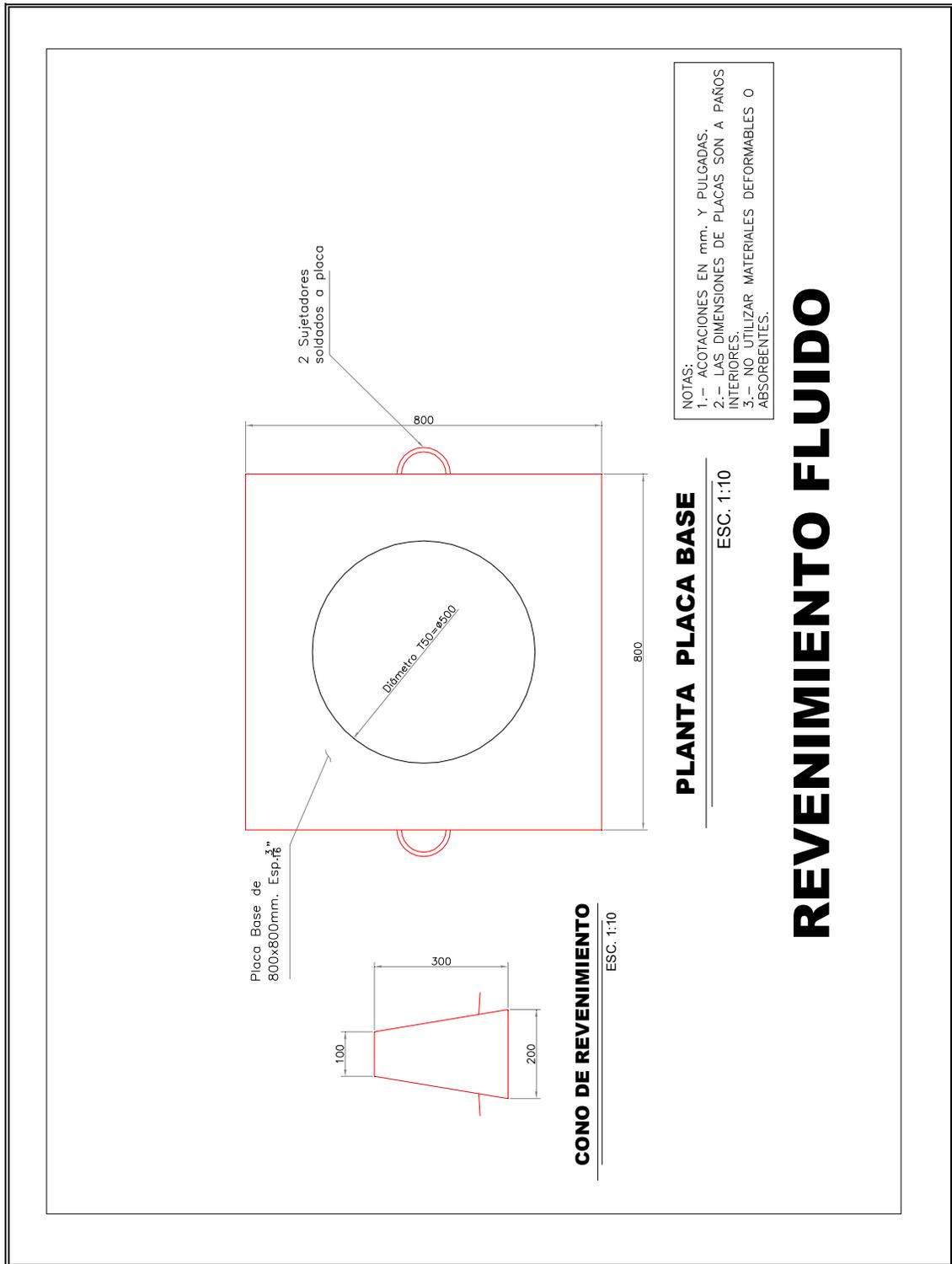
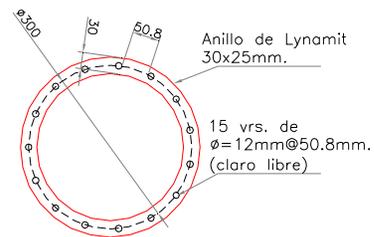
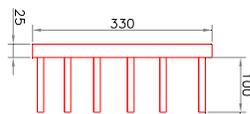


Figura 1.- Plano de prueba revenimiento fluido.

Figura 2.- Plano de dispositivo anillo "J".



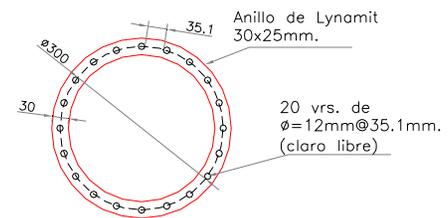
PLANTA



ELEVACIÓN

ANILLO-J (1)

ESC. 1:10



PLANTA



ELEVACIÓN

ANILLO-J (2)

ESC. 1:10

NOTAS:
 1.- ACOTACIONES EN MM. Y PULGADAS.
 2.- LAS DIMENSIONES DE PLACAS SON A PAÑOS INTERIORES.
 3.- NO UTILIZAR MATERIALES DEFORMABLES O ABSORBENTES.

ANILLO "J"

Figura 3.- Plano de dispositivo embudo "V".

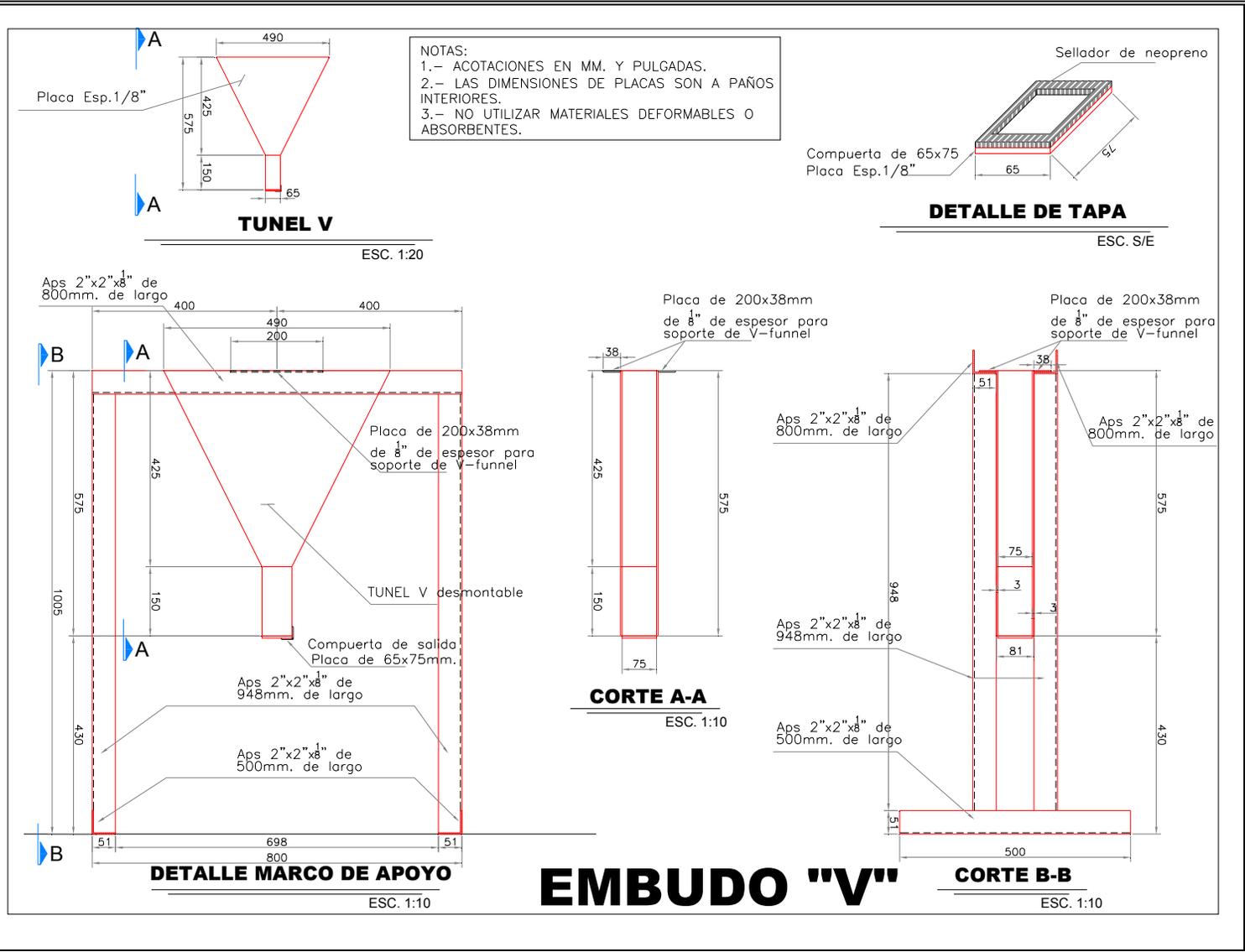
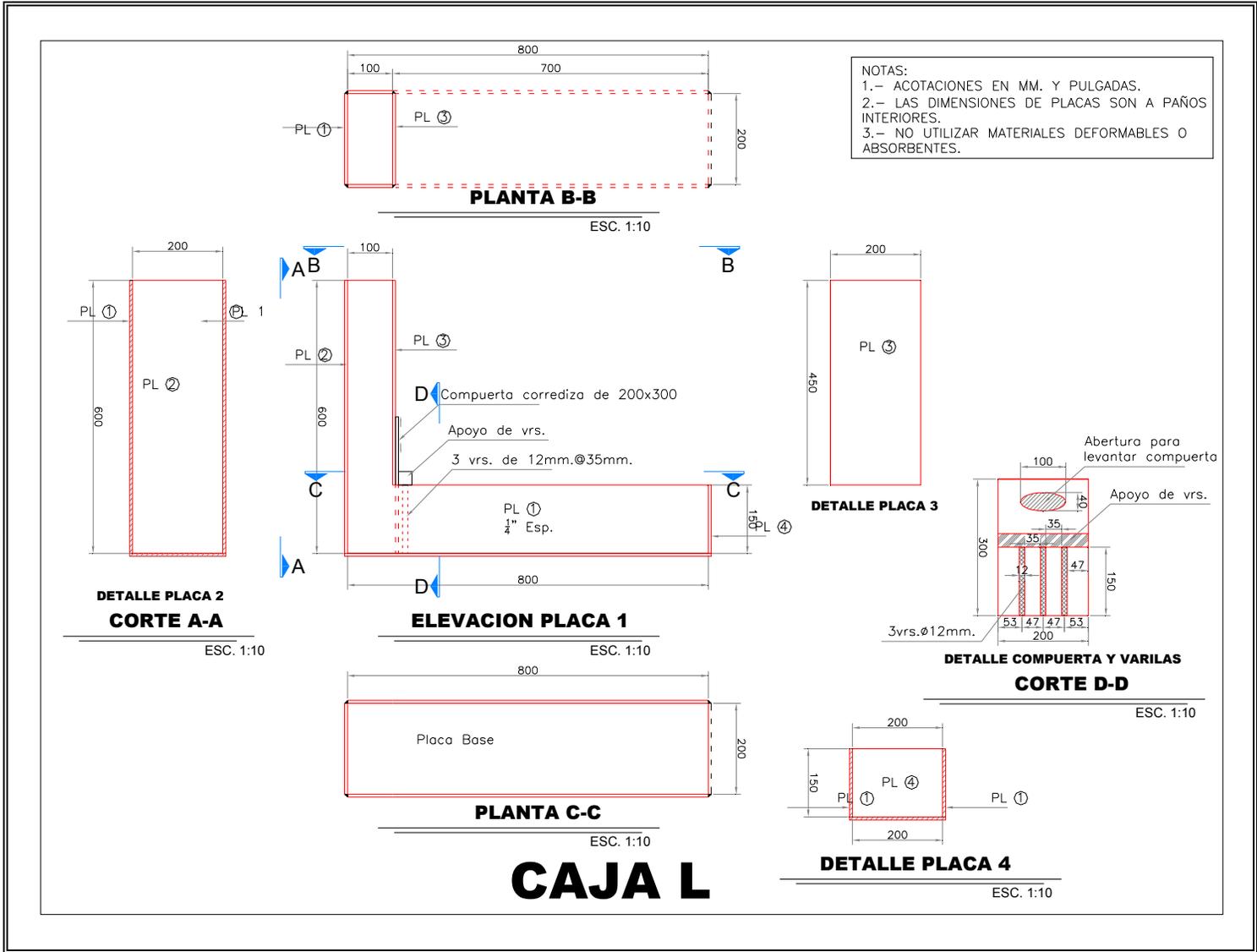


Figura 4.- Plano de dispositivo caja "L".



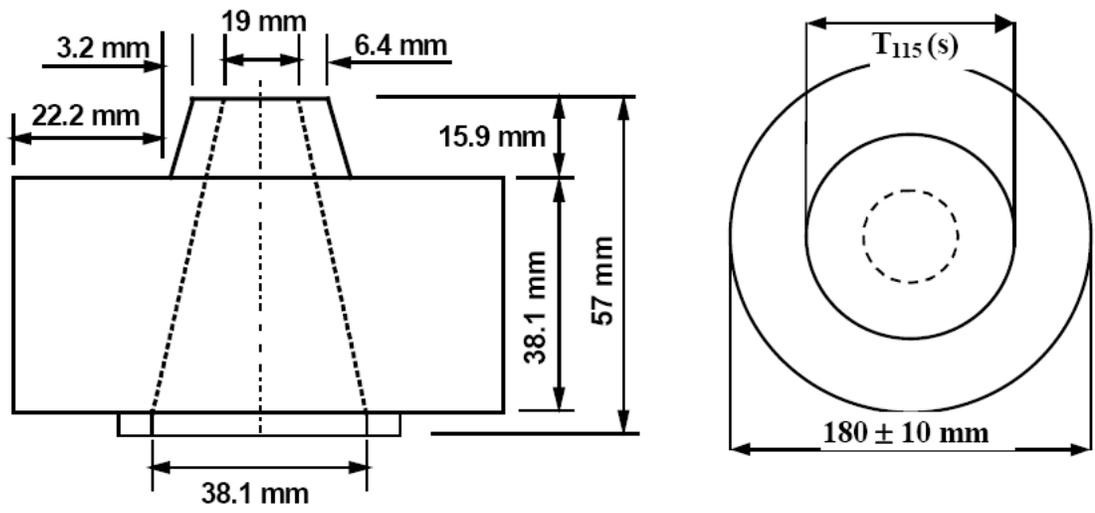


Figura 5.- Mini-cono "Kantro".

RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

Pedro Alberto Ramírez Garza

Candidato para el Grado de

Maestro en Ciencias con Especialidad en Ingeniería Estructural

Tesis: CONCRETOS AUTOCOMPACTABLES, SUSTENTABLES Y ECONÓMICOS CON ALTOS CONSUMOS DE CENIZA VOLANTE, PARA USO ESTRUCTURAL.

Campo de Estudio:
Ingeniería.

Biografía:

Datos Personales: Nacido en la ciudad de Monterrey, Nuevo León, México el 2 de Noviembre de 1979, hijo del Sr. Pedro Ramírez Pavón y la Sra. Bertha Leticia Garza Tijerina (†).

Educación:

Egresado de la Universidad Autónoma de Nuevo León, grado obtenido Ingeniero Civil en 2002. Maestría en Ingeniería Estructural por la Universidad Autónoma de Nuevo León, grado obtenido de pasante en 2005. Técnico en pruebas al concreto en la obra Grado 1 y Supervisor en obras de concreto (en entrenamiento) por parte del American Concrete Institute (ACI) 2003.

Experiencia Profesional:

Ingeniero calculista en la Secretaría de Obras Públicas del Estado de Nuevo León del 2001 a 2005; Ingeniero calculista en la empresa DEACERO, S.A de C.V. del 2005 a la fecha.