

Variación en las características de fluidez en mezclas de concreto mediante la modificación de aditivo y agua para la obtención de un concreto autocompactable



Abstract

The topic of this project is focused toward the elaboration of two self consolidating concrete with resistances to 28 days of 21 MPa and 28 MPa starting from two established designs, using admixtures, mainly a superplasticizer admixture of high range. The main objective is to adjust the designs and modify them so that they fulfill the production characteristics and market of Cemex Concretos. To achieve that, tests to the components of the mixture were made in the laboratory of Cemex Concretos using sand, stone, cement, water and admixtures, and they are evaluated according to ASTM Standards. It is proceeded to carry out a test at industrial level where it get ready cubic meters of concrete and they were taken to a specific work, evaluating in this case the concrete in work.

The qualitative and quantitative results that had place during the development are presented. This work concludes with the preparation of new products ready to throw them to the market by the company Cemex Costa Rica.

Keywords:

Self consolidating
Superplasticizer
SCC

Resumen

El tema de este proyecto se enfoca hacia la elaboración de dos concretos autocompactables con resistencias a 28 días de 21 MPa y 28 MPa, a partir de dos diseños establecidos, haciendo uso de aditivos, principalmente un aditivo súper plastificante de alto rango. El objetivo principal del proyecto fue ajustar los diseños establecidos y modificarlos para que cumplan con las características de producción y mercado de Cemex Concretos. Para lograr esto, se hicieron pruebas a los componentes de la mezcla en el laboratorio de Cemex Concretos, utilizando arena, piedra, cemento, agua y aditivos, y se evaluaron conforme a las normas ASTM. Se procedió a realizar una prueba a nivel industrial donde se prepararon varios metros cúbicos de concreto y se llevaron a una obra específica, evaluando para este caso el concreto en obra.

Por último, se presentan los resultados cualitativos y cuantitativos que tuvieron lugar durante el desarrollo. Este trabajo concluye con la preparación de un nuevo producto listo para lanzarlo al mercado por parte de la empresa Cemex Costa Rica.

Palabras clave:

Autocompactable
Súper plastificante
CAC

Variación en las características de fluidez en mezclas de concreto mediante la modificación de aditivo y agua para la obtención de un concreto autocompactable



JOSE MENA CARMONA

Setiembre 2004

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN CONSTRUCCIÓN

Contenido

PREFACIO	1
RESUMEN EJECUTIVO	2
INTRODUCCIÓN	5
METODOLOGÍA	9
RESULTADOS	26
ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	39
CONCLUSIONES	44
ANEXOS	46
REFERENCIAS.....	47

Prefacio

Es de gran importancia para las empresas constructoras, y para los clientes en general, que se les brinde la mejor calidad en los productos que se utilizarán en las construcciones, y en este caso se habla de un producto fundamental: el concreto. Este producto a lo largo de los años ha sido sometido a investigaciones variadas, se le han aplicado muchas pruebas a los agregados y a los aditivos para poder conformarlo, tanto en los aspectos teóricos como en la puesta en práctica. Es por esto que la empresa Cemex Costa Rica ha decidido llevar a cabo el desarrollo de un nuevo producto, junto con la colaboración de las casas de aditivos, para implementar nuevas soluciones para los clientes. Ha sido política de la empresa, mantener los altos niveles de eficiencia y la incorporación, de forma constante y planificada, de las últimas tendencias de la industria mundial. Cemex Costa Rica abastece al mercado costarricense brindándole al país seguridad y solidez en cuanto a cemento y concretos.

El concreto autocompactable debe responder a las necesidades de los clientes, respecto de la seguridad y la calidad. Los análisis de los resultados están planteados y desarrollados en este documento en forma de tablas y gráficos donde se pueden observar los diversos datos que proporcionan. Este concreto presenta grandes ventajas, entre las cuales se pueden citar la alta fluidez que presenta, la deformabilidad y la alta resistencia a la segregación.

El objetivo principal de este proyecto fue desarrollar mediante pruebas de laboratorio y de campo, un nuevo producto en el área de concretos premezclados, llamado “Concreto

Autocompactable”, mediante la influencia del uso de un aditivo súper plastificante en tres rangos de agua. De esta manera se buscó la forma de aumentar la gama de productos para ofrecer al mercado y satisfacer las necesidades de los clientes al brindarles otras alternativas. Por lo tanto, se realizan diversas pruebas para observar el comportamiento de las mezclas de concreto con respecto a los datos teóricos, para luego efectuar los ajustes necesarios. Se llevan a cabo pruebas realizando combinaciones que demuestran el comportamiento del concreto con la influencia del aditivo súper plastificante. Finalmente, se lleva al campo donde se utiliza en una construcción importante.

Dentro de las expectativas esperadas al final de un trabajo de este tipo, se encuentra principalmente el crecimiento en el campo profesional, y desde el punto de vista de proyecto, lograr determinar la dosificación de agua y aditivo que produzcan un concreto autocompactable de conformidad con las normas ASTM y satisfacer las necesidades de los clientes y brindarles un mejor servicio, ya que ellos son los principales impulsores de la realización del trabajo.

Por último, deseo agradecer a todas las personas e instituciones que colaboraron para el desarrollo de este estudio, que me permitió concluir la etapa de requisitos correspondientes a la Licenciatura en Ingeniería en Construcción. Agradecimientos especiales a Cemex Costa Rica, por la gran oportunidad que me brindó en la realización de este proyecto y por las excelentes relaciones humanas; al Ing. Fausto Jara Pérez, por el aporte de todo su esfuerzo, apoyo y dedicación durante el proceso y al Ing. Roberto Vega Guzmán, quien fue el profesor guía y además, excelente asesor durante toda la ejecución del trabajo.

Resumen ejecutivo

El presente estudio tiene como objetivo fundamental el desarrollo de un tipo de concreto autocompactable en la empresa Cemex Costa Rica. Para ello se utilizaron dos diseños, el de resistencia $F'c = 21$ MPa y el de 28 MPa. Ambos fueron elaborados con agregados provenientes de la zona de Guápiles, con el nuevo cemento Sansón, que cumple con lo establecido en la norma ASTM C-150, agua potable y aditivos de la empresa MBT Technologies.

El desarrollo de este tipo de concreto es de suma importancia hoy día, ya que el diseño y el colado del concreto cambian y evolucionan con los nuevos avances tecnológicos que aspiran incrementar al máximo la libertad de diseño, aumentar la productividad y la rentabilidad y elevar el ambiente general de trabajo del personal de la construcción. A través de los años, muchos desarrollos tecnológicos han proporcionado mayores avances en el diseño y colado de estructuras de concreto.

En la empresa Cemex Costa Rica, el desarrollo de este nuevo producto significó resolver problemas de las construcciones, brindar una mayor gama de los productos a los clientes, tomando en cuenta que existen muchas preocupaciones respecto de la manejabilidad, homogeneidad y consolidación del concreto colado en obra dentro de estructuras muy intrincadas y muy reforzadas.

Se establecieron los siguientes objetivos: Desarrollar mediante pruebas de laboratorio y de campo, un nuevo producto en el área de concretos premezclados, llamado "Concreto Autocompactable", mediante el uso de un aditivo súper plastificante en tres diferentes rangos de agua.

Realizar pruebas a los agregados para su aceptación en los concretos.

Determinar mezclas de concreto autocompactable en las resistencias 21 MPa y 28 MPa a partir de diseños de las mismas resistencias previamente establecidos.

Aumentar la gama de productos con que cuenta Cemex Concretos para satisfacer las necesidades de los clientes.

Observar los diferentes comportamientos de estas mezclas mediante pruebas de laboratorio de conformidad con las normas ASTM, a los tres, siete y 28 días, efectuando diferentes combinaciones en la dosificación de agua y aditivo súper plastificante.

Realizar una prueba a nivel industrial, llevar el diseño que dio mejores resultados al campo, para realizar las pruebas tanto en campo como en el laboratorio.

Establecer proyecciones de los concretos industriales con base en el conocimiento adquirido por la empresa en cuanto a la variabilidad del comportamiento del concreto.

Antes de efectuar el desarrollo de los concretos, se le deben hacer pruebas a los componentes de la mezcla, estos son cemento, arena, piedra de 12,5 mm, agua y aditivos. Estas pruebas se llevan a cabo de conformidad con la norma ASTM, que rige los procedimientos y materiales que se deben utilizar para tener los mejores resultados y así obtener diseños correctos.

Primero se estudia la materia prima, se le hacen las siguientes pruebas, cada una de las cuales está descrita en este documento:

Inspección visual: se trata de seleccionar el material para ser llevado al laboratorio y realizarle las pruebas que asegurarán su aprobación.

Cuarteo: este proceso se refiere a la reducción del material que se tiene para probar a una cantidad pequeña establecida por la norma ASTM C702. Esta disminución de material se debe hacer de tal manera que lo que se tome sea representativo de todo el material que se tiene en los apilamientos en los quebradores.

Humedad: el porcentaje del contenido de agua en los agregados, especialmente en la arena, es un dato de gran importancia en el desarrollo de una mezcla. Aquí se establece por

medio de secado el contenido de humedad que tiene el agregado. En la norma ASTM C566 se establecen los procedimientos necesarios para calcular correctamente este valor.

Ensayo de Colorimetría: este ensayo comprende el estudio de la arena en cuanto a la cantidad de materiales orgánicos que pueden resultar dañinos para la mezcla de concreto. Mediante la norma ASTM C 40 se llega a determinar el color del patrón Gardner, de donde se interpreta visualmente si el agregado se encuentra o no contaminado.

Peso unitario: la prueba de los pesos unitarios de los agregados se desarrolla conforme la norma ASTM C 29. El peso por metro cúbico se calcula para las condiciones suelta y compacta.

Granulometría: el análisis granulométrico de los agregados se realiza con una serie de tamices graduados en forma progresivamente menor. Así se determinan los diferentes tamaños de las partículas. Para su tamizado se utiliza una máquina tamizadora en la que se colocan todas las mallas correspondientes al agregado que se está estudiando. Los números de mallas que se utilizan para los agregados son diferentes de acuerdo con su tamaño. Este ensayo lo determina la norma ASTM C 136, los límites en la cantidad de material que está permitido que pase por las mallas está regulado por la norma ASTM C33, tanto para agregados gruesos como para finos. Dentro de este ensayo se encuentra una prueba para el material más fino que la malla No. 200, especificado en la Norma ASTM C-117.

Los aditivos que se utilizarán en el concreto son los siguientes:

Aditivo plastificante y retardante Pozzolith 322R. Reduce el contenido de agua de mezcla.

Aditivo modificador de viscosidad Rheomac VMA 358. Desarrollado para producir concretos de mejor viscosidad.

Aditivo reductor de agua de rango completo Glenium 3030 NS. Produce mezclas de concreto cohesivas y sin segregación.

Luego de hacerles todas las pruebas anteriores a los agregados, se procede a su aprobación y se utilizan en conjunto para realizar la mezcla de concreto autocompactable. Para esto se siguieron los procedimientos establecidos en la norma ASTM C 192. Para realizar las pruebas se partió de los datos del fabricante de aditivos, de donde se determinó un rango de cantidad de agua a reducir y la cantidad de

aditivo a utilizar, y a partir de un diseño establecido se probó la influencia del aditivo súper plastificante, y se le da seguimiento hasta obtener los diseños finales.

El mezclado de los materiales se realizó con una batidora de 35 litros de capacidad. El procedimiento se realizó primeramente vaciando el agregado grueso, luego el agregado fino, el cemento y los aditivos en el siguiente orden: 322 R, VMA y Glenium. Se sigue batiendo hasta un aproximado de 2,5 minutos entre un aditivo y otro. Una vez que se hizo la mezcla se procedió a hacerle las pruebas al concreto. Brevemente las pruebas que se hicieron fueron las siguientes:

Fluidez del asentamiento: en esta prueba se le midió una extensibilidad diferente al revenimiento que aparece en la norma ASTM C 143. Se trató de una prueba que no está normada en ASTM, pero que está en estudio por el comité C09 de ASTM International, y se espera que se establezcan normas internacionales que rijan los procedimientos. Por ahora, muchos países utilizan éste y otros métodos que se aplican a un concreto autocompactable, y han dado buenos resultados. El cono que utiliza es diferente, tiene la forma de la superficie lateral de un cono truncado con una base de 20,24 cm de diámetro, y la parte superior de 13,10 cm, con una altura de 19,80 cm. La base y la parte superior son abiertas y paralelas entre sí, y al mismo tiempo perpendiculares al cono. En el molde se colocan ménsulas al pie y sus asas son como se muestran en la figura 12. El interior del molde es relativamente liso y libre de cualquier protuberancia como remaches o cabezas, no presenta abolladuras. Se utiliza también una varilla igual a la varilla que se usa en los revenimientos normales. Lo que se mide en esta prueba es la extensibilidad del concreto a través de una superficie lisa y no absorbente, de forma rectangular, con medidas iguales a 78 cm de largo y 76 cm de ancho, se mide el diámetro promedio, luego levantando de un lado la superficie lisa se deja caer 15 veces y se vuelve a medir su extensión, esta última medida debe estar entre 45 y 65 cm.

Cilindros: se confeccionaron los cilindros en probetas metálicas no absorbentes de acuerdo con la norma ASTM C192. Seguidamente, se protegieron contra la evaporación y se dejan reposar durante 24 horas sin interrupción alguna.

Tiempo de fraguado: en esta prueba se determina el tiempo de fraguado en el concreto por resistencia a la penetración, de acuerdo con la norma ASTM C403. En esta prueba se utilizó un penetrómetro para realizar varios intentos de esfuerzo en el concreto. Este concreto se tamizó en la malla No.4 y se le hicieron las perforaciones al mortero. En esta prueba se alcanzaron dos valores, un esfuerzo inicial a los 3,5 MPa que es el fraguado inicial de la mezcla, y la otra medición de 28 MPa que se refiere al tiempo de fraguado final. Estos datos se grafican en una hoja de Excel.

Resistencia a la compresión: cada cilindro que se hizo se tuvo que fallar en la máquina para fallar cilindros en los días que se tienen establecidos, los moldes de los concretos se fallaron según la norma ASTM C 39.

Prueba Industrial: esta prueba se aplicó con la empresa constructora EDICA Ltda., en una construcción de gran magnitud e importancia. Se hicieron los estudios al concreto de igual forma que para las otras pruebas realizadas en el laboratorio, tanto al salir de la planta como a la llegada de la obra. Se tomaron los datos necesarios en cuanto a descripción del lugar, condiciones para la utilización de este concreto, horas de salida de la planta, horas de llegada a la obra, etc. De forma que se pueda observar desde un ámbito real, el comportamiento del concreto, tal como se presentará realmente en el campo.

Introducción

El desarrollo del concreto a través de los años ha evolucionado de manera considerable. Cada vez son más las empresas dedicadas al mejoramiento de los diferentes concretos, desde el punto de vista de durabilidad, disminución en la cantidad de agua, acelerantes, retardantes de fragua, modificadores de viscosidad, etc. Estas empresas, conocidas como casas de aditivos, desarrollan grandes cantidades de productos en sus laboratorios, que, químicamente comprobados, se podrán utilizar en los diferentes concretos. Las casas de aditivos son las que se encargan de proponerlos a los diseñadores de concretos en las empresas que lo fabrican, el desarrollo de los diferentes diseños utilizando los aditivos que ellos han fabricado, haciendo uso de varios de ellos simultáneamente, determinan los diferentes comportamientos que el concreto tendrá. Queda a consideración de las empresas dedicarse a la elaboración de estos diseños.

Este proyecto, brinda la dosificación de mezclas de concreto para lograr un concreto autocompactable. Este concreto tiene sus inicios en el año 1986, cuando Hajime Okamura, miembro del ACI y presidente el Comité del Concreto de la Sociedad de Ingenieros Civiles de Japón, propuso la necesidad del desarrollo de un "Concreto Autocompactable (SCC)". Se siguió utilizando en los Estados Unidos y a partir de este momento se promovieron importantes investigaciones alrededor del mundo, debido a la revolución tecnológica que implicaba este nuevo producto. El concreto autocompactable es un nuevo y revolucionario concepto que proporciona grandes ventajas a productores, contratistas y a sus clientes. Es un concreto de alto desempeño altamente fluido y aún estable que puede colocarse y extenderse fácilmente en sitio bajo su propio peso, con una excelente consolidación en ausencia de vibración y sin exhibir defectos debidos a segregación y exudación, presentando así un excelente acabado superficial en áreas y zonas de difícil acceso dentro de la formaleta.

Para producir Concreto Autocompactable se requieren aditivos especiales, que deben ser capaces de lograr:

1. Concreto fluido con manejabilidad extendida
2. Muy alta reducción de agua
3. Concreto estable y cohesivo

De esta forma se obtendrá una forma ultra estable del concreto

Este concreto presenta una característica que lo hace especial: no requiere de vibradores, o requiere la mínima vibración para su consolidación, su mezcla es suave, con gran fluidez y estabilidad inherentes durante y después de la colocación, además se puede diseñar para que soporte altas resistencias a la compresión. En este caso, se utilizan los diseños con resistencias de 21 MPa y 28 MPa, por dos razones muy importantes, primero porque son resistencias que la mayoría de los clientes exigen, y en segundo lugar, porque a partir de ellas se pueden hacer las proyecciones pertinentes para lograr los diseños que se encuentran dentro y fuera de ese rango.

Algunas de las características de este concreto son las siguientes:

- Presenta una fluidez del asentamiento entre 45 y 65cm. Este asentamiento no es como lo establece la norma ASTM C-143, se trata de una modificación a esa norma debido a su condición de alta fluidez que lo hacen someterse a diferentes pruebas, la prueba se llama Ensayo de la fluidez del asentamiento. En esta prueba de revenimiento lo que se conoce como asentamiento es la expansión horizontal, donde lo que se mide es el diámetro promedio.
- Reología controlada. Esta característica se refiere a la velocidad del desplazamiento de la masa del concreto en la superficie plana y no absorbente, característica que la determinan los aditivos.
- Flexibilidad en la dosificación de la mezcla.
- Estabilidad asegurada, sin segregación.

Entre los aspectos positivos que este concreto tiene para los contratistas, se puede citar:

- No se requiere vibración.
- Mayor velocidad de colocación.
- La mano de obra se puede utilizar en otras labores.
- Los equipos (grúas, etc) se requieren por menos tiempo en la obra.
- Los problemas por acero de refuerzo congestionado se reducen.
- Superficies de concreto más homogéneas se traducen en reducción de costos (no hormigueros o vacíos, lavado por segregación etc)
- Muy apropiado para pequeños y grandes trabajos de reparación.
- Dramática reducción de ruido.
- Mejora el ambiente de trabajo para empleados y vecinos al reducir ruido, desperdicio y uso de vibradores.

No se puede dejar de lado los aportes que este concreto da a las plantas de concreto. Entre estos se tiene:

- Diferenciación de la competencia.
- Mayor rotación de camiones mezcladores (mixers).
- Facilidad en el bombeo.

También es importante citar algunas de las ventajas que brinda a los clientes, quienes son en primera instancia, los impulsores de la realización del producto:

- Mas rápido desarrollo de los proyectos.
- Nuevas posibilidades arquitectónicas debido a que se pueden producir superficies con alta precisión en los detalles arquitectónicos.
- El acabado liso y uniforme de losas hace posible instalar enchapes o tabletas sin colocar capas de nivelación.

Este concreto tiene sitios típicos de aplicación, como los siguientes:

- Pisos y losas.
- Muros y elementos estructurales.
- Reparaciones , aun con difícil acceso.
- Elementos prefabricados.
- Túneles.
- Especialidades arquitectónicas con superficies complejas.

Las pruebas que se le realizan a este concreto varían con respecto a las normas establecidas por ASTM (American Society for Testing and Materials). Como se mencionó anteriormente, la prueba más importante que ha sido modificada es

la norma ASTM C-143. Existen otras pruebas que no tienen fundamento en las normas ASTM, las cuales han sido elaboradas por diferentes investigadores quienes han determinado que se puede evaluar y aprobar con esos criterios, al concreto autocompactable. Algunas de las pruebas que se han investigado, principalmente en Estados Unidos, son las que se han realizado en los aparatos como la caja "L", que sirve para observar el comportamiento de la manejabilidad del concreto a través de barras bajo una presión estática. Se proporcionan datos respecto a la resistencia a la segregación estática y dinámica; el embudo de "V", que demuestra qué tan rápido el concreto fluye a través de un área estrecha bajo su propio peso, dando una indicación de la viscosidad; o la prueba del anillo "j" que consiste en que el cono de Abrams o arreglo de Orimet, está rodeado por un anillo con pequeñas barras verticales, de modo que se observa cómo fluye el concreto a través de las barras a la hora de levantar el cono, desde el interior al exterior del anillo. Se pueden ajustar el tamaño y el espacio entre las barras para simular cualquier configuración del refuerzo.

Al darse a conocer esta situación, en la que se está impulsando de diferentes maneras una forma de lograr la aprobación de este concreto, es que ASTM International, más específicamente ASTM Committee C09, está estudiando y desarrollando las normas para las pruebas a las que se debe someter este concreto.

Surge entonces el interés por solucionar diferentes situaciones complicadas donde el concreto presenta grandes problemas en cuanto a su manejabilidad, y con ello, la necesidad de crear un concreto que satisfaga, eficazmente, los requerimientos establecidos, para lograr una mejor forma de trabajo en campo. Aquí toma lugar Cemex Costa Rica, cuando decide, en conjunto con la empresa MBT (Master Builders Technologies), someterse al desarrollo de este concreto y aumentar la cantidad de productos que ofrece a los clientes.

Su desarrollo tiene lugar en la planta de concretos Puente Piedra, donde actualmente se producen y comercializan cientos de metros cúbicos de concretos por día. Estos concretos, están sometidos diariamente a estrictos controles de calidad, donde se analizan detalladamente los procedimientos que rigen las normas ASTM para obtener los mejores resultados, desde los inicios

de la confección de un concreto, que tiene lugar en la adquisición de los agregados, pasando por pruebas físicas, esto es, todas las pruebas necesarias para su aceptación, hasta finalmente revisar los resultados obtenidos y tomar decisiones correctivas.

El concreto autocompactable tiene que seguir los mismos procedimientos y ajustarse a las normas de calidad. Los agregados que lo componen, por sus características, deben ser de menor tamaño que los que se presentan en los concretos tradicionales, y son los siguientes:

Piedra de 12,5mm, conocida como piedra quintilla, que tiene tamaños entre 9.52 mm y 12.7 mm, provenientes de Guápiles.

Arena lavada, natural, proveniente de Guápiles.

Respecto de los otros componentes de la mezcla, se tiene que se utilizará agua potable y un cemento nuevo que se está implementando en el mercado, que es evolucionado, diferente al tradicional cemento Cempa MP, llamado cemento Sansón, el cual brinda nuevas propiedades cementantes, mejor finura, mejor resistencia a los 28 días, así como mejoras en su composición química. Este cemento cumple con lo establecido en la norma ASTM C150.

Para darle las características autocompactantes a la mezcla se deben utilizar aditivos líquidos, los cuales son proporcionados por MBT, y se describen a continuación:

- *Aditivo plastificante y retardante Pozzolith 322R.* Reduce el contenido de agua de mezcla necesaria para obtener una consistencia determinada, retardando el tiempo de fraguado y facilitando su colocación y acabado.
- *Aditivo modificador de viscosidad Rheomac VMA 358.* Desarrollado para producir concretos de mejor viscosidad y características reológicas controladas. Este es el aditivo que mejora la estabilidad del concreto durante el transporte y colocación, así como le da flexibilidad.
- *Aditivo reductor de agua de rango completo Glenium 3030 NS.* Según los fabricantes, este aditivo pertenece a una nueva generación de aditivos a base de policarboxilato. Produce mezclas de concreto cohesivas y sin segregación.

Objetivos

General

Desarrollar mediante pruebas de laboratorio y de campo, un nuevo producto en el área de concretos premezclados, llamado "Concreto Autocompactable", mediante la influencia del uso de un aditivo súper plastificante para tres diferentes rangos de agua.

Específicos

-Obtener mezclas de concreto autocompactable en las resistencias 21 MPa y 28 Mpa a partir de diseños de las mismas resistencias previamente establecidos.

-Aumentar la gama de productos con que cuenta Cemex Concretos para satisfacer las necesidades de los clientes.

-Realizar diversas pruebas a los agregados, tanto al fino como al grueso, para determinar su aceptación.

-Observar las variaciones que se presentan en las características del concreto fresco y endurecido como respuesta a las diferentes combinaciones de agua y aditivo súper plastificante en las mezclas.

-Observar los diferentes comportamientos de estas mezclas mediante pruebas de laboratorio de conformidad con las normas ASTM, a los tres, siete y 28 días, efectuando diferentes combinaciones en la dosificación de agua y aditivo súper plastificante.

-Establecer proyecciones de los concretos con base en el conocimiento adquirido por la empresa en cuanto a la variabilidad del comportamiento del concreto a partir de los 7 días.

-Realizar una prueba a nivel industrial, la del concreto de resistencia $f'c = 21$ MPa. Llevar el diseño que dio mejores resultados al campo, donde se harán las ensayos tanto en campo como en el laboratorio.

Se utilizarán programas de computadora para el archivo de documentos y análisis de resultados, siendo el más usado el programa Excel, por su facilidad en tablas, cálculos, correcciones inmediatas, revisiones de diferentes alternativas en corto tiempo. En general, se usará

el sistema operativo Microsoft Windows, para todo el proyecto.

Para la realización de esta prueba se empezará por la revisión de la materia prima. Como se trata de una prueba base para los diseños de grandes construcciones, es necesario empezar correctamente. Se debe visitar el lugar donde se va a comprar el agregado, seguir las especificaciones establecidas en las normas ASTM que se deben aplicar a los agregados finos y gruesos utilizados en el concreto. Cada agregado se estudia y se prueba por separado, y las pruebas que se le realizan son como sigue: preparación de muestras de agregado (norma ASTM C702 y ASTM D75), especificaciones para agregados de concreto (norma ASTM C33), composición granulométrica incluyendo el ensayo del porcentaje pasando la malla #200 (norma ASTM C136 Y ASTM C117 respectivamente); determinación de sustancias nocivas o impurezas orgánicas en la arena (norma ASTM C40), determinación del porcentaje de humedad por secado (norma ASTM C566) y determinación del peso unitario del agregado fino y grueso (norma ASTM C29).

Seguidamente, cuando los agregados están listos, se procede a realizar la mezcla de concreto con una pequeña máquina de 35 litros de capacidad, que funciona eléctricamente. Se sigue la prueba conforme a lo estipulado en la norma ASTM C192. Al realizar la mezcla, se debe verter en un carretillo, de donde se le calculará el asentamiento al concreto fresco con el cono, siguiendo para esto la norma ASTM C143, se le toma la temperatura e inmediatamente después se deben hacer las muestras del concreto almacenando en 3 cilindros según la norma ASTM C 192. Para esto se usan cilindros metálicos reutilizables según la norma ASTM C470.

Se determinarán tiempos de fraguado por resistencia a la penetración, de acuerdo con la Norma ASTM C403.

Después de almacenar los cilindros en el cuarto de curado, hay un tiempo para su fecha de falla, el establecido es fallar un cilindro a los 3 días, luego a los siete días fallar 2, y a los 28 días se realiza una proyección con base en datos estadísticos brindados por la empresa en donde, con base en la experiencia adquirida, se asegura el comportamiento de las mezclas después de los 7 días. Esta prueba se realiza según la norma ASTM C 39.

Ya establecida la mezcla de laboratorio, fue necesario realizar una prueba a nivel industrial, que consistió en llevar varios metros cúbicos del concreto autocompactable en un camión revolador hacia una construcción de un cliente importante de Cemex Costa Rica, donde se pudiera apreciar la importancia del diseño del producto. En este caso se coordinó con el centro de servicio al cliente y alguna empresa que deseara adquirir el concreto. Para efectos del presente estudio, la empresa que decidió aceptar el producto fue Constructora EDICA LTDA, quien lo utilizó en una construcción a su cargo buscando cumplir con las exigencias del cliente. A este concreto se le hicieron las mismas pruebas a las que se sometieron los concretos realizados en el laboratorio. Es importante estar observando todo el proceso y tomar fotografías. Este concreto se evalúa al salir de planta y en la obra.

Metodología

El inicio de un concreto: materia prima

La fabricación del concreto autocompactable tiene su origen en los tajos, en los lugares donde se extrae naturalmente el material que sirve como materia prima. Ésta es una parte fundamental que debe ser estrictamente controlada porque forma parte de los aspectos que pueden cambiar completamente las expectativas de la empresa Cemex Costa Rica, y de cualquier empresa en general, no solamente por aspectos de calidad para los clientes, sino también desde el punto de vista de la economía de la empresa.

Antes de comprar la materia prima, se debe visitar el lugar donde regularmente se compra, no siempre la calidad del agregado es la misma, por esto hay que hacer diversas inspecciones en el tajo, rodear el lugar, los apilamientos reservados para la venta exclusiva a la empresa Cemex, observar detenidamente el estado físico de los agregados. Situaciones en la arena como presencia de un color amarillento, suciedad, arcillas, finura, su cantidad de finos y gruesos, su apariencia uniforme en toda su magnitud, así como en los agregados gruesos la presencia de gran cantidad de finos, suciedad, segregación del material; son cosas fundamentales básicas para inicialmente determinar si se puede o no comprar los agregados para el concreto. Existen empresas que tienen alto grado de calidad para el cliente debido a que utilizan equipo muy sofisticado, como por ejemplo el que se utiliza en el lavado del agregado a la hora que se quiebra, buen control en el mantenimiento de la mallas que utilizan para definir los tamaños o maquinaria para producir arena industrial procesada.

Se toma finalmente después de un día completo de inspección, la decisión de realizar pruebas serias y avaladas por las normas con el fin de determinar si el material es apto para utilizarlo en los concretos. Este material se utilizará para los diferentes concretos que se comercializan, y se transporta por medio de las llamadas trailetas, que se dirigen a los apilamientos de la empresa con un contenido aproximado de 20m³ de material, debidamente pesadas con romanas industriales. Este mismo material es el que se utilizará para realizar todas las pruebas de concreto autocompactable.

Agregados

Se le deben hacer diversas pruebas a los agregados para asegurarse de su aceptación para utilizarlos en concretos. Existen especificaciones para determinar esto, tanto para el agregado fino como para el grueso.

Agregados: fino y grueso

El agregado fino debe estar constituido por arena de río, de mina provenientes de piedras trituradas, de otra fuente o de arena de mar que cumplan con las especificaciones de la norma ASTM C33, puede ser arena natural, manufacturada o una combinación de ambas.

El agregado grueso debe estar constituido por piedra triturada, canto rodado, o una combinación de ellos o de otras fuentes siempre que cumplan con la norma.

Cuarteo

Hay que seleccionar el material del apilamiento en la empresa, para esto se debe hacer una reducción de la muestra de agregado a un tamaño adecuado según la norma ASTM C 702, el objetivo de esto es minimizar las variaciones en las características entre la muestra seleccionada y la total. Si no se hace cuidadosamente el resultado será una muestra no representativa, y el resto de la prueba para el diseño podría no salir bien.

Existen varios métodos para reducir el tamaño de la muestra para agregados finos, dependiendo del estado de su saturación. Para este caso siempre se utilizará el método cuando la arena se encuentra en su estado saturado superficie seca, el cual será descrito más adelante.

Se utiliza el método A de cuarteo, en el que se utiliza el separador mecánico. Este separador debe tener un número de canales de igual ancho, pero no menos de 12 aberturas, y que se distribuyan alternativamente a ambos lados del cuarteador. Para este agregado, que debe pasar la totalidad de la muestra por la malla de 9,5 mm (3/8"), las aberturas deben medir entre 12,5 mm y 20 mm de ancho. En los dos lados del separador se deben colocar los dos recipientes con los bordes redondeados para que la muestra al caer fluya suavemente sin restricción o pérdida de material.

Se debe colocar el material uniformemente distribuido de una orilla a la otra dentro del cuarteador con la compuerta cerrada, de forma que a la hora de abrirla la cantidad de material que pase por las aberturas sea el mismo. Se introduce el material de uno de los recipientes otra vez en el cuarteador hasta que haya una reducción adecuada para el ensayo.

Para el agregado grueso, la selección se realiza de la misma manera que el agregado fino, desde el punto de vista de la toma del apilamiento de la empresa.

El cuarteo lo define la norma ASTM C 702, donde se establece que para este tipo de agregado, se debe utilizar un cuarteador mecánico con el método A, que es el método recomendado, o bien, cuarteando por el método B.

En el método B se utilizan aparatos tales como una pala plana, una escobilla, y una lona de 2 x 2.5m. Se coloca la muestra original en

una superficie dura, nivelada, donde no haya pérdida de material ni adición accidental de material extraño. Se mezcla el material totalmente revolviéndolo tres veces o más. En la última batida, se hace un apilamiento cónico depositando cada pala llena encima de la que le precede. Cuidadosamente se aplanan el cono para dejarlo con un espesor y diámetro uniformes, presionando la parte superior hacia abajo con la pala, de modo que cada sección cuarteada resultante del apilamiento contiene el material originalmente en él. El diámetro debe ser aproximadamente de cuatro a ocho veces el espesor antes mencionado. Se divide la masa en cuatro partes iguales con la pala, se remueven 2 partes diagonales incluyendo todo el material fino, limpiando con la escobilla. Se realiza el mismo procedimiento hasta que se obtenga el tamaño del material deseado.

Como una alternativa al procedimiento anterior, cuando la superficie sea dispareja, se coloca la muestra en una lona y se mezcla con una pala así como se describió anteriormente, o bien levantando alternamente cada esquina de la lona y empujando hacia la otra esquina diagonal opuesta causando que el material ruede. Se aplanan el apilamiento como en el método B, se divide la muestra o bien se inserta una barra bajo el centro de la lona, se levanta dividiendo en dos partes al agregado. Se quita la barra dejando un pliegue entre las porciones divididas. Se inserta la barra bajo el centro de la barra perpendicularmente a la primera división y se levanta de nuevo la barra, dividiendo la muestra en cuatro pedazos. Se remueven los dos cuartos diagonalmente opuestos, con el cuidado de recoger los finos. Se mezcla y se cuarteo el material restante hasta que la muestra se reduzca a la medida deseada.



Figura 1. Cuarteador mecánico. Cemex Concretos

Humedad

De la cantidad de agregado que resulta al hacer un cuarteo, se puede determinar el porcentaje de humedad por secado (norma ASTM C 566).

Tanto para agregado fino como para agregado grueso, en una cocina simple de disco se coloca una cantidad, la cual está establecida en la tabla 1. Con una balanza al 0,10% de precisión, y un recipiente sencillo, se deja secar la muestra. El cuidado que se debe tener es que a la hora de que se va calentando la muestra, se debe revolver constantemente, debido a que puede existir sobrecalentamiento local, además de que se acelera la operación. Si el calentado se hace muy rápido, es posible que haya pérdida de material, por eso es bueno utilizar una cocina de disco corriente, no es requerido aquí el control estricto de la temperatura.

En los concretos que se producen diariamente, es importante conocer cada cierto tiempo, la condición de humedad, debido a que es un dato fundamental a la hora de elaborar el concreto.

En la empresa, hoy día se cuenta con un aparato que calcula la humedad automáticamente en tan sólo 10 minutos, llamado analizador de humedad, y sus resultados son óptimos. Este instrumento está diseñado para calcular la humedad de la misma manera como se haría en cocina, con la diferencia que en su computadora se realiza al cálculo de forma automática con pesos representativos con capacidad máxima de 40g.

Para el concreto autocompactable, se calcula con la cocina y con el analizador simultáneamente para las diferentes pruebas que se realicen.

En el caso de la cocina, antes de colocar la muestra en el recipiente, se pesa y se anota el peso. La muestra estará seca si al continuar calentando, la diferencia entre los dos pesos consecutivos es inferior al 0,1% del peso de la muestra seca. Se deja que la muestra se enfríe para no dañar la balanza. El contenido de humedad se calcula como sigue:

$$\% H = \frac{100 \times (W_h - W_s)}{W_s}$$

donde:

%H = Porcentaje de humedad, contenido de agua evaporado.

Wh = masa original, en gramos

Ws = masa de la muestra seca, en gramos

Para los agregados gruesos se tiene un procedimiento alternativo, en el caso de que se utilice el horno, éste consiste en dejar la muestra al horno a temperatura de 110 +/- 5°C durante 24 horas, o hasta que se alcance el peso constante.

La medida del tamaño de la muestra que se debe utilizar para secarla, se detalla en el siguiente cuadro:

TABLA 1. Medidas de muestra de agregados	
Tamaño nominal máximo mm (pulg)	Peso de la muestra (Kg)
4,75 (No 4)	0,5
9,5 (3/8)	1,5
12,5 (1/2)	2
19 (3/4)	3
25 (1)	4
37,5 (1 1/2)	6
50 (2)	8
63 (2 1/2)	10
75 (3)	13
90 (3 1/2)	16
100 (4)	25
150 (6)	50

En la figura 2 se muestra el analizador de humedad que se utiliza en el laboratorio de Cemex para calcular rápidamente la humedad.



Figura 2. Analizador de humedad. Cemex Concretos

Colorimetría

La colorimetría es la prueba que se le hace al agregado fino para determinar la presencia de impurezas orgánicas nocivas para su uso en morteros de cemento y concreto, según la norma ASTM C40.

Se necesitan dos frascos de vidrio transparente, graduados, de 350 cm³ aproximadamente.

Se debe utilizar una solución de Hidróxido de Sodio al 3%, se disuelven 3 partes por peso de hidróxido de sodio (NaOH) en 97 partes de agua, una muestra de arena que se ha obtenido por el método de cuarteo, alrededor de 0,5 kg.

Para la realización de esta prueba se llena un frasco de vidrio claro con la muestra de la arena hasta un tercio de su altura, se añade la solución hasta que el volumen de la arena y el líquido indicado después de agitar sea igual a las 2/3 partes de la altura. Se tapa el frasco agitando vigorosamente, y luego se deja reposar durante 24 horas.

Al pasar este tiempo, se desprenderán las sustancias nocivas de la arena y quedarán suspendidas en la solución, se notará por medio de colores el grado de contaminación de la arena, este grado se indica por medio del patrón Gardner, con el que se puede determinar con mayor precisión, el color del líquido sobre la muestra. En la tabla 2 se pueden ver la escala de

colores con los que se tiene que comparar la muestra.

TABLA 2. COLORES DEL PATRON GADNER	
No. del color patrón Gardner	Color de referencia (vidrios)
5	1
8	2
11	3 (Patrón)
14	4
16	5

Para interpretar el resultado, se debe observar el color de la muestra y compararla con alguno de los colores que se muestra en los vidrios del patrón Gardner. Si el color del líquido que sobrenada la muestra, es más oscuro que el color 3 patrón de referencia (color 11 del patrón Gardner), el agregado fino se considera que contiene impurezas orgánicas dañinas. Es necesario realizar pruebas posteriores antes de aprobar el agregado para utilizarlo para concretos.



Figura 3. Patrón Gardner. Cemex Concretos

Peso Unitario

Esta prueba se puede realizar tanto al agregado fino como al agregado grueso, o bien una mezcla de ambos. Esta es la prueba en donde se determina la masa por unidad de volumen.

Se necesita una balanza con precisión de 0,1%. Se utilizará una barra compactadora recta

de 16 mm de diámetro, aproximadamente de 60 cm de longitud y con punta semiesférica, y un recipiente cilíndrico de metal, preferiblemente con asas. Debe ser estanco, con tapa y fondo firmes y parejos, con precisión en sus dimensiones inferiores y suficientemente rígido para mantener su forma al ser maltratado. Los recipientes con que cuenta Cemex Concretos son adecuados para esta prueba según la norma ASTM C29. Dependiendo del agregado, así será el tipo de recipiente que se vaya a utilizar. La medida en volumen del recipiente se detalla en la tabla 3:

Tamaño máximo nominal de agregado		Capacidad del recipiente		Espesor mínimo del metal	
pulg	mm	L	m3	Fondo (mm)	Pared (mm)
1/2	12,5	2,8	0,0028	5	2,5
1	25	9,3	0,0093	5	2,5
1 1/2	37,5	14	0,0014	5	0,5
3	75	28	0,028	5	3
4	100	70	0,07	10	3,8
5	125	100	0,1	13	5

La prueba de pesos unitarios debe ser aplicada a los agregados con un tamaño máximo de 37.5 mm, o menos. Utilizamos la prueba tanto para la piedra de 12,7 mm como para la arena.

Al recipiente que se utiliza se le debe calibrar, para esto, se llena con agua a temperatura ambiente y se tapa con un pedazo de vidrio cilindrado para eliminar las burbujas y el exceso de agua. Se determina el peso neto del agua en el recipiente, con exactitud de +- 1%. Se mide la temperatura del agua y se mide su peso unitario utilizando los valores indicados en la tabla 4, e interpolando si es necesario.

Temperatura		Densidad	
°F	°C	lb/pie3	kg/m3
60	15,6	62,366	999,01
65	18,3	62,366	998,54
70	21,1	62,301	997,97
73,4	2	62,274	997,54
75	23,9	62,261	997,32
80	26,7	62,216	996,59
85	29,4	62,166	995,83

Una vez que se tengan estos datos, se procede a hacer el ensayo al agregado, tanto en la forma compacta, como en el estado suelto.

La muestra debe secarse en un horno a temperatura comprendida entre 105° y 110°C,

para un buen resultado, hasta lograr el peso constante.

El primer ensayo es determinar el peso compacto. Se llena la tercera parte del recipiente y se nivela la superficie con la mano. Se compacta la masa con la barra compactadora, mediante 25 golpes distribuidos uniformemente sobre la superficie, se llena hasta las dos terceras partes del recipiente y de nuevo se compacta con 25 golpes. Luego se llena el recipiente hasta rebosar, golpeándolo 25 veces con la barra compactadora. Se nivela con la mano la superficie del agregado o con alguna espátula.

A la hora de golpear la primera capa, no se debe golpear el fondo del recipiente, en la segunda capa se debe golpear vigorosamente pero teniendo el cuidado de no pasar a la primera capa.

El segundo paso es determinar el peso suelto. Se llena el recipiente con una pala hasta rebosar, se descarga desde una altura no mayor de 5 cm, por encima de la parte superior del recipiente. Se deben tomar precauciones para impedir en lo posible la segregación de las partículas. El agregado sobrante se desecha con una rejilla.

El cálculo de la masa por unidad de volumen se determina de la misma forma para los diferentes tipos de ensayo, de la siguiente manera: Se calcula el factor de calibración dividiendo el peso unitario del agua entre el peso necesario para llenar el recipiente, se calcula el peso neto del agregado en el recipiente. El peso unitario suelto o compacto del agregado se calcula multiplicando el peso neto del agregado por el factor de calibración. Lo anterior se puede expresar mediante las siguientes ecuaciones:

$$D = (G - T) / V$$

$$D = (G - T) \times F$$

Donde:

D = Peso unitario del agregado (Kg/m³)

G = Masa del agregado más el recipiente (Kg)

T = Masa del recipiente (Kg)

V = Volumen del recipiente (m³)

F = Factor de calibración del recipiente (m³)

Esta prueba se hace tres veces consecutivas y luego se calcula un promedio el

cual será el dato final que se podrá utilizar para los diseños de concretos y, para efectos del manejo de la proveeduría de la empresa, es muy útil para la compra de los agregados.

Granulometría

En esta parte, la muestra seca de agregado de peso conocido es separado por medio de una serie de tamices de aberturas progresivamente menores para la determinación de la distribución del tamaño de las partículas. Se le aplica tanto al agregado grueso como al fino. Se debe determinar la graduación de materiales propuestos para usarlos como agregados en el concreto.

Se utiliza una balanza con una precisión del 0.1%.

Los tamices deben ser sobrepuestos de manera tal que se asegure que no se pierde material. La tamizadora, es una máquina cribadora mecánica que hace que el agregado en los diferentes tamices correctamente colocados, haga rebotar y voltear al agregado de forma que se presenten diferentes orientaciones.

Es adecuado utilizar el horno que mantenga la temperatura uniforme de $110 \pm 5^\circ \text{C}$.

El material es cuarteado, la muestra del agregado fino debe ser de un tamaño, después de secado, de 300g mínimo, para esta prueba se hace una muestra de 500g.

Para el agregado grueso, existen diferentes tamaños de muestra para diferentes tipos de agregado. La siguiente tabla, tomada de la norma ASTM C136, determina los tamaños de la muestra para agregados gruesos:

TABLA 5. TAMAÑOS DE MUESTRAS	
Tamaño nominal máximo en mm (pulg)	Tamaño mínimo de la muestra (Kg)
9,5 (3/8)	1
12,5 (1/2)	2
19,0 (3/4)	5
25,0 (1)	10
37,5 (1 1/2)	15
50 (2)	20
63 (2 1/2)	35
75 (3)	60
90 (3 1/2)	100
100 (5)	150
125 (5)	300

Para el caso del concreto en estudio se utilizan 2 kg de agregado de piedra 12,5mm .

La muestra se mete al horno y se deja secar hasta que alcance el peso constante. Se pesa el material, este valor es el peso seco de la muestra. Antes de continuar se debe aclarar que hay una prueba que está normada como un ensayo aparte, pero que se puede adjuntar a éste, se trata del *ensayo de la masa de material más fino que la malla No. 200*, descrito en la norma ASTM C 117. En esta prueba se utiliza el material después de secado al horno por primera vez, se coloca dentro de un recipiente, se le agrega bastante agua, se agita vigorosamente para que las partículas finas queden en suspensión dentro del recipiente para luego verter el agua con las partículas dentro de la malla No.200, se hace esto repetidas veces hasta que el agua se vea clara. Se regresa el material que queda en la malla al recipiente y se mete al horno a una temperatura de $110^\circ \text{C} \pm 5^\circ \text{C}$ hasta alcanzar el peso constante.

Cuando es el tiempo para sacarlo del horno, se deja enfriar, y se pesa el material. A este peso se le llama *peso seco lavado*, y es el que se utiliza como base para pasarla por los diferentes tamices.

Se tienen entonces tres pesos para realizar la granulometría: *peso húmedo*, que es el peso de la muestra después de reducirla al tamaño necesario para el ensayo; *peso seco* y *peso seco lavado*, es la muestra después de que se ha lavado por medio de la malla No.200 y que se ha secado de nuevo al horno.

Este último peso, se utiliza para realizar el procedimiento con las mallas.

Se ordenan las mallas en la tamizadora, quedando las aberturas ordenadas en forma decreciente de arriba hacia abajo y se coloca la muestra en la parte superior de las mallas. Se agitan las mallas para acomodar el agregado, y dejar que parte de la muestra pase por la malla. Esto con el objetivo de no hacer que exista mucha cantidad de material en una malla y a la hora de encender la máquina pueda causar algún tipo de deformación. Existe un límite en la cantidad de agregado que se puede retener en las mallas después del tamizado. Para mallas con aberturas inferiores a 4,75 mm (No. 4), la cantidad de material que se acepta quede retenido al final del tamizado, no debe exceder de 7kg/m^2 del área de la superficie del tamiz. Para tamices iguales o mayores que el tamiz 4.75mm,

la cantidad retenida permitida en kgf se calcula multiplicando 2,5 x el tamaño de la abertura x el área efectiva del tamiz. Estas cantidades se extraen de la norma, solamente se utilizarán los valores para los tamices usuales de 8 pulgadas de diámetro (203,2 mm), cuya área efectiva es igual a 0,0285 m². Estos valores se tienen en la siguiente tabla:

Medida de la abertura tamiz (mm)	Masa retenida (Kg)
50	3,6
37,5	2,7
25	1,8
19	1,4
12,5	0,89
9,5	0,67
4,75	0,33

La norma ASTM C33 establece que en la arena, no debe haber un porcentaje mayor al 45 % pasando ninguna malla y que quede retenido en la siguiente.

La graduación de las mallas para los agregados finos debe ser la que aparece en la norma ASTM C-33, y es la que se utiliza en el proyecto. Su detalle se presenta en la siguiente tabla:

ABERTURA DEL TAMIZ		NORMA	
(mm)	(Denom. Estándar)	Límite inferior	Límite superior
9,5	3/8"	100%	100%
4,76	No. 4	95%	100%
2,38	No. 8	80%	100%
1,19	No. 16	50%	85%
0,6	No. 30	22%	60%
0,3	No. 50	5%	30%
0,15	No. 100	0%	10%
0,075	No. 200	0%	5%
Fondo			

La graduación del agregado grueso es diferente. Existen diferentes graduaciones dependiendo del tamaño máximo del agregado, en la tabla 2 de la norma, pero para efectos del proyecto, se tomó que para el caso de la piedra

de 12,5mm se tuvieron los siguientes límites granulométricos, dados en la tabla 8:

ABERTURA DEL TAMIZ		NORMA	
(mm)	(Denom. Estándar)	Límite Inferior	Límite Superior
19,00	3/4"	100%	100%
12,50	1/2"	92%	97%
9,50	3/8"	40%	65%
4,76	N° 4	0%	12%
2,36	N° 8	0%	5%
0,08	N° 200	0%	1,5%
Fondo			

Después de haber pasado los tamices por la máquina, se debe pesar el contenido de cada malla, y al final el peso de todas las mallas juntas no debe exceder en más del 0.3% del peso total de la muestra en condición seca. Si excede esa cantidad, los resultados no se deben aceptar. Las tablas anteriores muestran que para cada malla establecida para realizar la granulometría de arena o piedra, existe un porcentaje del material que pasa las mallas, limitado por dos criterios: el límite inferior y el superior. A la hora de graficarlos se hace en la escala logarítmica del eje X, es decir el eje de las aberturas de las mallas en el eje de las abscisas, y el eje Y en escala milimétrica, donde se ubican los porcentajes pasando. La gráfica debe quedar dentro de estos límites.

En el caso de la arena, se debe calcular el módulo de finura, que es la suma de todos los porcentajes del material que es más grueso que cada uno de los siguientes tamices (porcentaje retenido acumulado) y dividiendo la suma por 100: No. 100 (0.15 mm), No. 50 (0.3 mm), No. 30 (0.6 mm), No. 16 (1.18), No. 8 (2.36 mm), No.4 (4.75 mm), 3/8 (9.5 mm), 3/4 (19 mm), 1 1/2 (37.5 mm).

El módulo de finura tiene límites, debe estar entre 2,3 y 3,1.

En este trabajo, se resume toda la información anterior en una hoja de cálculo elaborada en Excel, que contiene los datos de los tres pesos de la muestra a la hora de prepararla, los cálculos de las masas retenidas, masas retenidas acumuladas, porcentajes pasando, los límites granulométricos, el módulo de finura, la humedad del agregado y el fondo después de

tamizado pasando la malla No. 200. Con estos datos, se grafican las tres curvas: la curva del límite inferior, límite superior y la curva propiamente del comportamiento del agregado. Se toman las consideraciones pertinentes para su aceptación. Esta decisión se debe tomar antes de seguir con la elaboración de la mezcla de concreto.

En la figura 4 y 5 se pueden apreciar los tamices que se utilizan para el cribado y la máquina tamizadora respectivamente.



Figura 4. Tamices redondos usuales. Cemex Concretos



Figura 5. Máquina tamizadora con las mallas colocadas

Aditivos

Para llevar el concreto convencional a características autocompactables es necesario utilizar aditivos líquidos¹ especiales que le den las características necesarias para un adecuado funcionamiento. Estos aditivos son los que, en conjunto, van a reaccionar químicamente y su resultado será un concreto con alta fluidez, fácil de trabajar, gran estabilidad, que maximice la durabilidad e integridad estructural del concreto in situ.

El concreto se produce usando la tecnología del aditivo reductor de agua de alto rango, junto con un aditivo modificador de viscosidad como Rheomac VMA 358, que mejora la estabilidad del concreto vaciado en obra. Estos dos aditivos se mezclan con el tradicional Pozzolith 322R, que es el aditivo de línea retardante y plastificante, utilizado en todos los concretos en general para retardar el tiempo de fraguado.

La dosificación de estos aditivos se fundamenta en las fichas técnicas, las cantidades son recomendadas por el fabricante, de ahí que sea necesario empezar a realizar pruebas diferentes para acercarse cada vez más a la cantidad correcta de aditivo por metro cúbico de concreto, dependiendo del tipo de agregado y del cemento a utilizar, que en este caso tratamos con un cemento que se lanzará al mercado, un cemento que cumple con la norma ASTM C-150, y por lo tanto es necesario realizar varias pruebas de concreto para ajustar la dosificación.

Las cantidades de aditivo que se le deben agregar al concreto son basados en la cantidad de cemento que éste tiene dosificado, se dice, por ejemplo, que si al concreto se le debe agregar 5cm^3 de aditivo (de ahora en adelante se llamará 5cc, por ejemplo) quiere decir que se le agregan 5cc por cada kilogramo de cemento contenido en la mezcla.

En este estudio se evalúa la influencia del aditivo súper plastificante, y para dar inicio a las pruebas es necesario conocer sus características. Este aditivo tiene la propiedad de que con su empleo se reduce hasta un 30% el volumen de agua en la mezcla, brindándole gran plasticidad, más cohesión, y además, no produce

¹ Anexo I: Aditivos para desarrollar un concreto autocompactante

problemas de segregación. Para efectos del presente estudio, se consideran reducciones de agua en el rango de 0 a 15 %, que para el diseño original que contiene 200 litros, significaría una cantidad de 170 litros de agua en la mezcla, como reducción máxima. De acuerdo con las especificaciones, la dosis adecuada para este aditivo se encuentra entre 0,5% y 1,4% del peso del cemento. Con una densidad de 1,15 kg/L la dosis mínima de 0,5% corresponde a 4 centímetros cúbicos de aditivo por kilogramo de cemento por metro cúbico de concreto, y la dosis máxima en este estudio se debe determinar conforme se van realizando las pruebas y se compruebe, por medio análisis cualitativo y cuantitativo, la cantidad que se considere inadecuada para continuar con el estudio. Esta cantidad se establece cuando los resultados de las pruebas tienden a llevar al concreto a condiciones que no corresponden a un concreto autocompactable, por ejemplo, disminución de resistencias, segregación, exudación, etc. Se deben hacer las pruebas con las diferentes dosis para determinar la cantidad más adecuada de aditivo que permita elaborar una mezcla que cumpla con los requerimientos de un concreto autocompactable.

Como forma de ilustración se muestran las figuras que corresponden a los aditivos que se utilizarán.



Figura 6. Aditivo Glenium 3030



Figura 7. Aditivo Rheomac VMA 358

Mezcla de concreto

Ensayos

La metodología que se usa en estos apartados debe ser la misma para todas las pruebas de concreto que se hagan en este proyecto, ya que a diferencia de la mayoría de las pruebas que se le hacen a los agregados, que no se repiten constantemente, en el proceso de mezclado se tiene que hacer el mismo procedimiento durante todas las muestras que se obtengan para garantizar el resultado, el proceso es repetitivo y se deben tomar las mismas precauciones.

En este momento, ya aceptados el agregado fino y grueso, el cemento, el agua y los aditivos, es decir, se conocen bien las características de los componentes de la mezcla, se procede a la dosificación inicial, partiendo del diseño previamente establecido, al que se le ha considerado la reducción en la cantidad de cemento y de agua en un 15%. La dosificación de este concreto se presenta en la tabla 9.

Cemento (kg)=	280
G/A (%) =	52,5
Agua (L)=	170
Aditivo de línea 322R(cc)=	7

Para efectos del presente estudio, se realizaron un total de 30 pruebas, en donde se realizan las diferentes combinaciones posibles variando la cantidad de aditivo súper plastificante y la cantidad de agua, de manera que se puedan realizar gráficos que demuestren el comportamiento de la mezcla a los tres y siete días de edad, y una proyección a los 28 días, donde se puede determinar la relación que existe entre la cantidad de agua, la resistencia y la cantidad de aditivo. De esta forma se determina la dosificación de aditivo y agua que permitan realizar un concreto que presente la fluidez y resistencia necesaria para utilizarlo como un concreto autocompactable.

Para los diferentes ensayos tanto de los componentes de la mezcla como para el concreto fresco y endurecido, se tiene la siguiente figura que resume la importancia de la influencia de los diferentes factores en las propiedades del concreto.

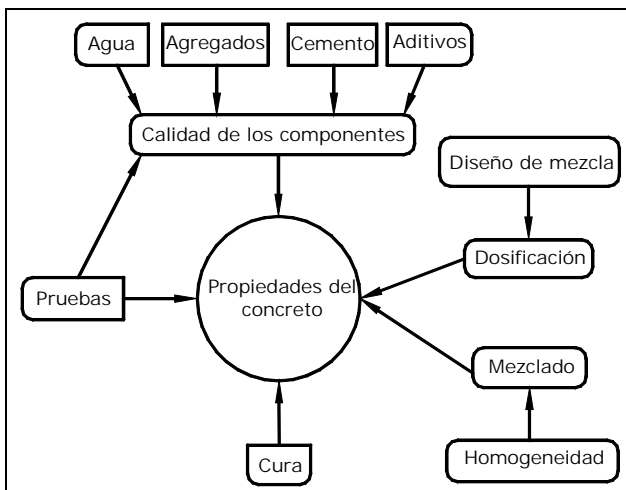


Figura 8. Influencia de los factores que intervienen en la mezcla de concreto.

Con base en el gráfico patrón de evolución de resistencia proporcionado por la compañía, se puede observar que a los tres días se debe tener un 50% de la resistencia especificada a los 28 días, y a los 7 días de edad, debería ser aproximadamente de un 70%. Esta información corresponde de una proyección que proviene de los datos que a través de los años la empresa ha adquirido como estadística y que demuestra que para cilindros fallados a los tres días cuyas

resistencias se encuentren en un rango de 10% por arriba y por debajo de la resistencia patrón, su resistencia a los 28 días evoluciona adicionalmente en un rango que oscila entre 15 y 25%, dando como resultado resistencias entre 55% y 85% a los 7 días; y para el caso de los cilindros fallados a los siete días, la resistencia se ve incrementada en un rango que se encuentra entre 40% y 50%, dando como resultado resistencias entre 100 y 130% a los 28 días. Esta información se ilustra en la figura 9.

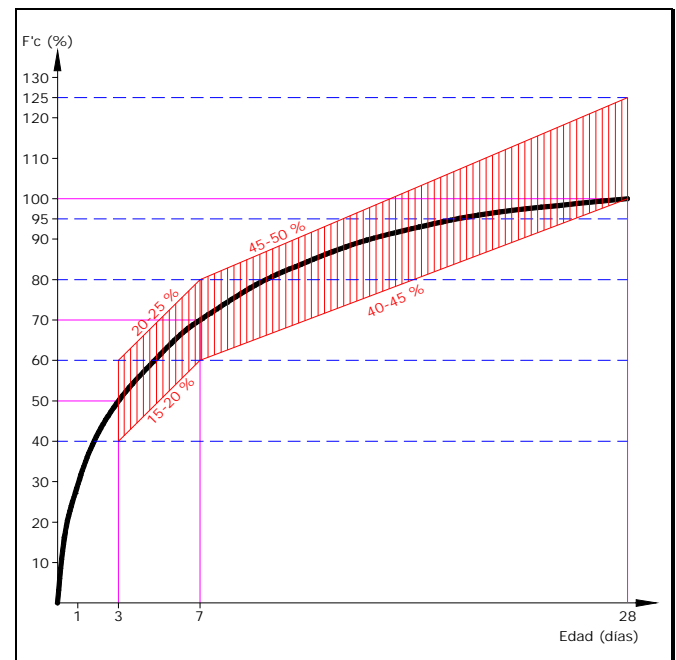


Figura 9. Gráfico patrón de resistencias en el concreto.

La Figura 10 muestra las cantidades de los materiales por batida de 35 litros.



Figura 10. Agregados, cemento y agua de la mezcla.

Mezclado

Para iniciar la mezcla de todos los elementos que conforman el concreto, se debe seguir lo establecido en la norma ASTM C 192, del método para mezclado de concreto en el laboratorio. En este caso se utilizará el método para mezclado con máquina. En el laboratorio se cuenta con una máquina eléctrica con capacidad de 35 litros, lo suficiente para llenar un carretillo, realizar un revenimiento, y fabricar los 3 cilindros, tal mezcladora se muestra en la siguiente figura:



Figura 11. Mezcladora mecánica.

Los materiales a mezclar son los componentes del concreto que se va a preparar: agregados, aditivos, cemento y agua en las cantidades y calidades que sean necesarias para la prueba. Se debe tener cuidado a la hora de añadir los aditivos, el momento y el método utilizado pueden tener efectos importantes en las propiedades del concreto, como, por ejemplo, el tiempo de fraguado y el contenido de aire. El método seleccionado debe ser uniforme para todas las mezclas de la prueba y deben tratar de reproducir la práctica de campo.

Antes de poner a rotar la batidora se coloca el agregado grueso, y parte del agua de mezclado con el aditivo. Este aditivo será el Pozzolith 322 R, el cual, al ser líquido, puede ser añadido en forma de solución a la mezcla, utilizando la misma agua del diseño. De acuerdo con la norma, siempre que sea posible se diluye el aditivo en el agua de mezclado antes de añadirlo.

Se pone en marcha la mezcladora y luego se agregan el agregado fino, el cemento y parte del resto de agua, en este orden, si no es posible realizar esta operación mientras la mezcladora está girando, se pueden agregar estos componentes deteniendo la mezcladora después de que se hace girar con el agregado grueso y parte del agua de mezclado.

Se deja batir por 2,5 minutos y se introduce el segundo aditivo: Rheomac VMA 358, que presentará un comportamiento de amarre entre las partículas. Se podrá observar como el concreto se mantiene unido y a simple vista parece que es más pastoso. Este aditivo se debe introducir de manera que se distribuya por toda la mezcla, ya que se presenta en una cantidad muy pequeña y se debe utilizar parte del agua restante para enjuagar el envase y asegurarse de que se vierte todo su contenido.

Se continúa batiendo hasta un tiempo de 2,5 minutos más y se vierte el tercer aditivo: Glenium 3030, debe ser cuidadosamente colocado, de igual forma que el aditivo anterior, su estado es menos viscoso que el VMA y su característica principal es la de fluidificar el concreto, de manera que se pueda ver que el concreto se suelta y empieza a caer como en forma de lluvia desde las aspas de la batidora, su fluidez se ha alcanzado.

Se le debe introducir el resto del agua de diseño y una vez añadidos todos los materiales se mezcla durante 3 minutos, que se sigue con otros 3 minutos de reposo y finalmente 2 minutos más de mezclado. Es importante tapar la entrada de la mezcladora durante los minutos de reposo para prevenir la evaporación. Se deben tomar precauciones, para compensar la pérdida de mortero retenido en la mezcladora, de modo que la mezcla queda correctamente dosificada. Es difícil recuperar todo el mortero de la mezcladora, por lo que existe un método para asegurar proporciones finales en la mezcla más cercanas a las nominales: dosificar la mezcla de ensayo previendo un exceso de mortero en la misma, que compense el que en promedio se adhiera a la mezcladora, ésta se debe limpiar antes de ser utilizada en la mezcla del ensayo.

El concreto se vierte entonces en un carretillo e inmediatamente se le calcula la temperatura de acuerdo con la norma ASTM C 1064. Seguidamente se le deben hacer las pruebas correspondientes, las cuales se explican en las siguientes secciones.

Fluidez del asentamiento

Inmediatamente después de pasado el tiempo de mezclado, se debe medir su asentamiento. En este caso, el asentamiento se mide en la extensión del diámetro que alcance horizontalmente en la superficie lisa, húmeda y no absorbente. Esta prueba permite estudiar el grado de cohesión del concreto en una situación dinámica que se asemeja más a las posibles condiciones en obra. El molde que se utiliza tiene ciertas variaciones con respecto al cono de Abrams que se utiliza para los demás concretos, y que se describe en la norma ASTM C 143. La superficie sobre la cual fluye el concreto es de acero y con dimensiones de 78 cm x 76 cm.

El molde es metálico y resistente al ataque de la pasta de cemento. Tiene la forma de la superficie lateral de un cono truncado con una base de 20,24 cm de diámetro, y la parte superior de 13,10 cm, con una altura de 19,80 cm. La base y la parte superior son abiertas y paralelas entre sí, y al mismo tiempo perpendiculares al cono. En el molde se colocan ménsulas al pie y sus asas son como se muestran en la figura 12. El interior del molde es relativamente liso y libre de cualquier protuberancia como remaches o cabezas, no presenta abolladuras.

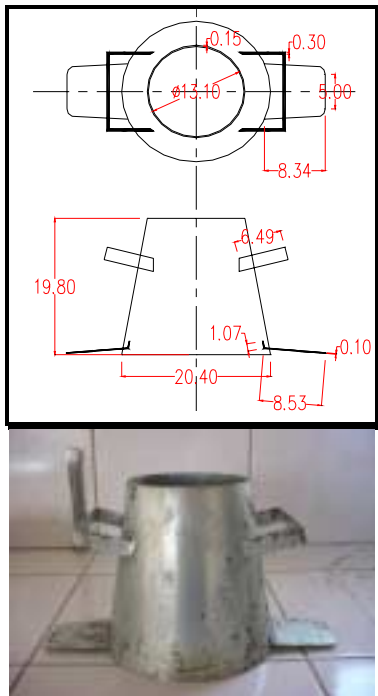


Figura 12. Molde para medir el asentamiento. Medidas en cm.

Se utiliza también una varilla de apisonamiento, recta de acero de sección circular de 16 mm de diámetro y aproximadamente de 600 mm de largo, con el extremo de apisonamiento redondeado en forma semiesférica con un diámetro de 16mm. Es la que se utiliza en el revenimiento que describe la norma.

De acuerdo con las diferentes empresas mundiales fabricantes de aditivos, esta prueba se quiere normalizar, ya que no se encuentra en ninguna especificación de la norma ASTM, y el comité C09 tiene en estudio el desarrollo de las normas que pueden llegar a ser la base para la confección del concreto autocompactable. La prueba que se tiene que ha dado buenos resultados es la determinación del ensayo de la fluidez del asentamiento. En este ensayo, el concreto se coloca sobre la superficie lisa, el molde debe estar firmemente colocado en su sitio durante el llenado mientras que el operador apoya sus pies sobre las ménsulas de la base. De la muestra de concreto obtenida en el carretillo, se utiliza una cuchara para llenar en dos capas el molde.

Se varilla cada capa con 25 golpes de la varilla de apisonamiento, se distribuyen uniformemente los golpes en toda la sección transversal de cada una de las capas. En la capa inferior se necesita inclinar ligeramente la varilla y dar aproximadamente la mitad de los golpes totales cerca del perímetro y seguir progresivamente hacia el centro. Se debe varillar la primera capa a lo largo de toda su profundidad y la segunda de la misma manera, de forma que los golpes no penetren la primera capa.

Antes de varillar la segunda capa, mientras se está llenando, se debe amontonar un poco de concreto en la parte superior de forma que sobresalga del cilindro. A la hora de terminar con los golpes de la segunda capa se debe limpiar la superficie superior del cono con la varilla haciendo movimientos rotativos. Se remueve el concreto alrededor de la base del cono para impedir obstáculos a la hora del deslizamiento. Se remueve el cono inmediatamente en dirección estrictamente vertical. Es importante aclarar que todo el proceso desde que se empieza a llenar el cono hasta que se levanta sin ninguna interrupción debe durar un tiempo no mayor de 2,5 minutos.

Inmediatamente se mide la extensión de la fluidez horizontalmente como lo muestra la figura 13.



Figura 13. Medición de la fluidez del asentamiento.

Inmediatamente se anota el dato, y desde un lado de la superficie metálica lisa, se levanta una distancia de 1 pulgada y se deja caer libremente 15 veces, a una velocidad de un golpe por segundo. Se mide de nuevo el diámetro que se ha generado, el esparcimiento lateral y se anota el resultado.

El dato teórico que debe dar la extensión del concreto antes de los 15 golpes es de 40 – 45cm, y después de los 15 golpes debe medir entre 50 – 65 cm. Sin embargo, el esparcimiento puede ser superior a 65 cm. Es importante dejar claro que el valor de la medida después de los golpes es el más importante.

Cilindros

A la hora de hacer los especímenes se debe tratar de colocar los cilindros en un lugar cercano al lugar donde van a ser almacenados durante las próximas 24 horas. Los cilindros utilizados son metálicos, rígidos, estancos de superficie interior lisa, no absorbente y que no reaccione con el concreto. Son provistos de una base metálica. Los moldes tienen un diámetro de 150 mm y 300 mm de altura, se pueden utilizar para agregados gruesos menores de 50 mm. Tales moldes se presentan en la figura 14.



Figura 14. Molde cilíndrico

Se utiliza la misma barra compactadora que se emplea en la prueba del revenimiento.

Los moldes tienen que ser preparados para poder utilizarlos, deben estar limpios, tanto su superficie interior así como su base deben estar aceitadas, para este fin, sólo se permite el uso de aceites minerales u otros productos destinados a este uso.

Se llenan los cilindros en capas de concreto utilizando una pala pequeña. De acuerdo con la norma ASTM C 192, el número de capas de concreto que debe tener un cilindro de las dimensiones que se están utilizando es 3. A la hora de llenar se debe remover el concreto a fin de que la cucharada sea representativa de la muestra, además así se evita el problema de la segregación. Mientras se llena se debe mover la cuchara alrededor del borde del cilindro mientras se descarga el concreto a fin de que se distribuya correctamente y sin producir segregación dentro del cilindro. Seguidamente se distribuye el concreto usando la barra antes de consolidarlo. A la hora de poner la última capa se debe colocar una cantidad de concreto que llenará exactamente el cilindro después de la compactación.

Para consolidar cada capa, que debe ser de igual volumen aproximadamente, se utilizará el método de la barra compactadora. Cada capa debe compactarse con el número de golpes indicado en la tabla 2 de la norma, en este caso le corresponden 25 golpes, para lo cual se utiliza

la barra. Los golpes deben distribuirse uniformemente en toda la sección transversal del molde. La capa del fondo debe compactarse en toda su profundidad, las que siguen se compactan en toda su profundidad y parte de la inferior en aproximadamente 25mm. Después de que se compacta una capa se debe golpear la parte exterior del molde suavemente de 10 a 15 veces con el mazo de hule para cerrar cualquier vacío dejado por la barra y grandes burbujas que pueden estar atrapadas. Se detalla la superficie del cilindro utilizando una cuchara de albañilería, de manera que la superficie quede perfectamente lisa y al ras con el borde del molde.

Los cilindros se deben llenar en un orden tal que exista uniformidad en los cilindros, esto se logra llenando la primera capa en todos los cilindros en una sola pasada, siguiendo un orden de llenado, compactado y amasado de cada cilindro, luego la segunda y tercera capas se deben realizar de la misma manera, de modo que todos los cilindros presenten el mismo comportamiento. No se deben llenar los cilindros en desorden, cada cilindro tendrá su momento de llenado, compactado y amasado, de modo que el tiempo que pase en regresar al cilindro sea el mismo para todas las probetas.

Una vez elaboradas las probetas, deben protegerse de la pérdida de agua por evaporación, cubriéndola adecuadamente con un material impermeable.

Las probetas deben retirarse del molde después de transcurridas 24 +/- 8 horas, y se almacenarán hasta el momento de ensayo en la cámara húmeda, donde no exista vibración. En la cámara los cilindros se deben mantener siempre con toda su superficie húmeda las 24 horas.

Tiempo de fraguado

Esta prueba, establecida en la norma ASTM C403, se le hace al concreto luego de que se coloca en el carretillo, y lo que se contempla aquí es el tiempo para determinar el tiempo de fraguado por resistencia a la penetración. Los tiempos de fraguado inicial y final del concreto se determinan con base en un ensayo de velocidad de endurecimiento, realizado por medio de agujas de resistencia a la penetración, en el mortero de la mezcla de concreto. Podrá usarse esta prueba para determinar los efectos de variables tales como la temperatura, el cemento, las

proporciones de la mezcla, aditivos y las características de endurecimiento del concreto.

El tiempo de fraguado inicial es el tiempo requerido, después del contacto inicial del cemento y el agua, para que el mortero cernido del concreto alcance una resistencia a la penetración de 3,5 MPa (500 psi), o bien, cuando la aguja penetra una profundidad de 25 +/- 2mm

El tiempo de fraguado final es el tiempo requerido, después del contacto inicial del cemento y el agua, para que el mortero alcance una resistencia a la penetración de 28 MPa (4000psi).

Se utiliza un recipiente rígido, impermeable, no aceitado, de sección cilíndrica, la mínima dimensión lateral es de 15 cm y la altura de por lo menos 15 cm, una aguja para determinar la resistencia a la penetración tipo resorte, no mayor de 9cm, y una pipeta.

Se prepara una muestra representativa del concreto, que tenga un volumen suficiente de mortero como para llenar el recipiente de ensayo hasta una profundidad de por lo menos 14 cm. Se extrae todo el mortero posible de la mezcla de concreto pasándolo a través del cedazo No. 4 (4,76mm) sobre una superficie no absorbente.

Se mezcla de nuevo el mortero por métodos manuales sobre la superficie no absorbente, se coloca en el recipiente y se compacta con la barra compactadora, sujetándola de forma tal que el extremo semiesférico penetre en el mortero. Al compactar se golpea el mortero una vez por cada 6,45cm² de superficie de la probeta y se distribuyen los golpes uniformemente en la sección transversal de la probeta. Después de completar la compactación con barra, se golpean suavemente los lados del recipiente que contiene la probeta, con la barra compactadora, para cerrar los vacíos dejados por ésta y se nivela aún más la superficie de la probeta. Terminada la preparación de la probeta, la superficie del mortero debe estar por lo menos 10 mm por debajo del borde superior del recipiente con el fin de proveer un espacio para la recolección y extracción del agua de exudación y evitar el contacto entre la superficie del mortero y la tapa protectora.

Para evitar que la probeta se evapore excesivamente, se le coloca una cubierta de material adecuado, como una tapa ajustada impermeable. Debe protegerse del sol. Se extrae el agua de exudación de la superficie de la probeta de mortero por medio de una pipeta o un

instrumento adecuado, a intervalos de media hora y justamente antes de realizar un ensayo de penetración. Para facilitar la recolección del agua de exudación, se inclina la probeta cuidadosamente hasta un ángulo de alrededor de 12° con la horizontal, colocando un taco debajo de uno de sus lados 2 minutos antes de extraer el agua de exudación.

Se introduce una aguja de tamaño apropiado en el aparato de resistencia a la penetración dependiendo del estado de endurecimiento del mortero y se pone en contacto con la superficie de carga de la aguja con la superficie del mortero. Se aplica una fuerza vertical hacia abajo, en el aparato, de manera gradual y uniforme hasta que la aguja penetre en el mortero a una profundidad de 2,5 cm, indicados por la marca. El tiempo requerido para dicha penetración es de aproximadamente 10 segundos. Se anota la fuerza requerida y el tiempo de aplicación, medido como el tiempo que transcurre después del contacto entre el cemento y el agua. En los ensayos de penetración siguientes se tiene cuidado de evitar zonas donde el mortero ha sido perturbado por ensayos previos. La distancia libre entre las impresiones de la aguja debe ser por lo menos 2 diámetros de la aguja usada pero no menos de 10 mm. La distancia libre entre cualquier impresión de la aguja usada no debe ser menor de 2,5 cm.

Se realizan ensayos de penetración a intervalos de 1 hora para mezclas y temperaturas normales, realizando el ensayo inicial después de 2 ó 3 horas.

Se hacen por lo menos 6 denominaciones de resistencia a la penetración en cada ensayo de velocidad de endurecimiento y los intervalos de tiempo entre las determinaciones de resistencia a la penetración deben ser tales que se tenga una curva satisfactoria de velocidad de endurecimiento, es decir, con puntos de separaciones iguales. Se continúan los ensayos hasta alcanzar una resistencia a la penetración de por lo menos 28 MPa

La resistencia a la penetración se calcula como sigue:

$$R_p = \frac{P_p}{B_p}$$

Donde:

R_p = resistencia a la penetración, Kg/cm^2

P_p = fuerza requerida para lograr una profundidad de penetración de 2,5 cm de la aguja, Kg .

B_p = área de la superficie de carga de la aguja, cm^2

Se representa la información en un gráfico con la resistencia a la penetración en MPa en las ordenadas, y el tiempo transcurrido en horas y minutos en las abscisas. Se colocan por separado los resultados de los 6 o más ensayos de velocidad de endurecimiento. Ahí mismo se calculan los tiempos de fraguado inicial y final de acuerdo con lo antes mencionado, se pasa una línea horizontal en los valores de la resistencia a la penetración igual a 3,5 y otra en el dato 28, siendo estos valores los tiempos de fraguados inicial y final, respectivamente.

Resistencia a la compresión

Esta prueba se sigue de acuerdo con la norma ASTM C 39. Las caras de compresión deben ser rematadas de tal forma que se logre el paralelismo entre las caras del cilindro. Las superficies de compresión deben ser visiblemente planas, sin grumos, ralladuras o defectos visibles.

En esta parte se aplica una carga axial de compresión a los cilindros de concreto hasta que fallen. El esfuerzo de compresión del espécimen es calculado dividiendo la carga máxima obtenida entre la sección del cilindro.

Los resultados que se tengan de esta prueba son usados para el control de calidad, en las operaciones de proporcionamiento y mezclado, así como para evaluar la efectividad de los aditivos.

La máquina que se utiliza para fallar los cilindros es hidráulica, con la graduación en la velocidad de aplicación de carga, con suficiente espacio para acomodar correctamente el cilindro, y con capacidad de carga de 500 kilolibras, como se muestra en la figura 15.



Figura 15. Máquina para ensayos a compresión

Los cilindros se colocan en la máquina de ensayo, se centran cuidadosamente y se comprimen. Tanto las superficies rematadas de los cilindros y los planos de la máquina deben estar exentos de polvo, grasa y de cualquier otro material extraño.

Para máquinas mecánicas hidráulicas la carga debe aplicarse a una velocidad constante dentro del rango de 0,14 MPa/seg a 0,35 MPa/seg. Durante la aplicación de la primera mitad de la carga prevista puede usarse una velocidad de carga más alta.

Cada una de las cargas que indica la máquina se anota y se divide entre el área del cilindro que corresponde a $175,715 \text{ cm}^2$, dando esto un resultado de resistencia por cada centímetro cuadrado, luego hay que anotar este resultado dividido por la resistencia de diseño para determinar el porcentaje de la resistencia a que se desea llegar. Para los cilindros que se fallan a tres días, el rango de resistencia que se espera está entre 45 y 55% de la resistencia a 28 días; a los cilindros que se fallan a los 7 días se espera una resistencia entre 65 y 75% y a los de 28 días se espera que alcancen más del 100%. Todos estos datos son anotados en una hoja electrónica en Excel.

Prueba industrial

Cuando se han realizado todas las pruebas del diseño del concreto autocompactable, se han

fallado los cilindros, y se ha tomado la decisión de cuál es el diseño que dará los mejores resultados, se lanzará el concreto a una obra de gran magnitud en el país, a fin de poner en práctica el desarrollo en el laboratorio.

El departamento comercial de la empresa se encarga de buscar y coordinar con algún cliente el día y la hora en la que será posible llevar el concreto a la obra. Se le hace saber al Departamento de Aseguramiento de la Calidad quién será el cliente y cuándo será la entrega del producto. Una vez confirmado por el cliente se prepara la mezcla.

El cliente que decidió adquirir el primer viaje de concreto especial fue la empresa constructora EDICA Ltda., esta empresa tiene gran importancia en el área de los concretos premezclados dentro de la empresa Cemex, debido a que tiene a su cargo obras de gran magnitud, y ocupa en Costa Rica, un lugar muy importante entre las empresas más grandes.

La obra donde se llevará el concreto se encuentra ubicada en San José, en el condominio Brisas del Oeste, una construcción que cuenta con 4 condominios de 10 niveles cada uno. En este momento se encuentra construyendo el 3º piso en el cual se utilizará el concreto, específicamente en tres muros pequeños, cuyas características se detallan en la tabla 10.

TABLA 10. ELEMENTOS A CHORREAR			
Muro #	Largo (m)	Altura (m)	Espesor (m)
1	1	2,4	0,2
2	2	1,5	0,2
3	1	2,4	0,2

De acuerdo con la tabla 10 los elementos son pequeños, en comparación con la magnitud de la obra, su contenido de acero comprende varillas # 5, con aros #4, #3 y #2, dentro de un espacio de 20 cm. La altura a la que se dejará caer el concreto es desde el borde superior de la formaleta.

La chorrea se hará con grúa, utilizando un cono de 0.8 m^3 de capacidad, para un total de 6 m^3 solicitados por el cliente. La formaleta que se

utiliza es compuesta por moldes Symons Steel ply.

A la hora de salir el concreto de la planta se le deben incorporar los aditivos correspondientes, la dosis del primero de ellos, el 322R, es incorporada de forma automática desde la parte de dosificación de concretos mientras se cargan los agregados y el cemento en la mezcladora. Al salir debe pasar por control de calidad, donde se introduce el aditivo VMA. Se debe dejar por lo menos 3 minutos mezclando a la máxima velocidad, luego se vierte el tercer aditivo, Glenium, y se deja batir por otros 3 minutos nuevamente. El concreto está listo para ir a la obra, se le debe sacar una muestra de 30 litros para sacarle 6 cilindros y una fluidez del asentamiento, estos cilindros se fallarán de la siguiente manera: 1 cilindro a 3 días, 2 cilindros a 7 días y a 28 días se proyectan con base en las estadísticas y análisis antes mencionados.

El concreto autocompactable, por ser un concreto especial, debe ser tratado como tal, hay que tomar en cuenta que no es un concreto igual a los demás, no se le puede trabajar como los tradicionales concretos que diariamente se comercializan. Su colocación en la formaleta debe ser preferiblemente con cierta presión, esto se logra satisfactoriamente con una bomba telescópica, o colocándolo en caída libre desde una altura mínima de 1 metro sobre la parte superior de la formaleta, sin embargo, para situaciones donde el elemento que se vaya a chorrear está muy congestionado de varillas, y se quieren satisfacer las altas exigencias del acabado, se debe utilizar con presión. Su colocación debe ser más rápida que la de los concretos tradicionales. La superficie interna de las paredes del muro deben estar lisas y ligeramente húmedas. No se debe colocar el concreto desde un solo punto, si bien es cierto que su característica de fluidez lo autonivela, no es correcto aplicar esto en grandes distancias horizontales mayores a 1,5 metros, se debe ir llenando uniformemente, así el concreto podrá alcanzar los rincones que son más difíciles para otro concreto.

El concreto autocompactable está diseñado para que se utilice en el momento que llega a la obra, se debe disponer de espacio suficiente para el equipo y circulación de los camiones, el camión debe llegar a la obra y colocar el concreto de forma continua sin

interrupción. Es incorrecto que el concreto tenga que esperar para ser utilizado.

La figura 16 muestra el lugar donde fue utilizado el concreto autocompactable en la obra Condominio Brisas del Oeste.



Figura 16. Chorrea en Brisas del Oeste

Resultados

Agregados

Se presentan a continuación los resultados obtenidos de los ensayos realizados a los agregados.

CUADRO 1. ENSAYO DE IMPUREZAS ORGÁNICAS EN LA ARENA

FECHA	HORA	PROCEDENCIA	COLOR RESULTANTE	OBSERVACIONES
25-Feb-2004	11:00	La Mina	entre 2 y 3	La arena es aceptable

En la siguiente figura se demuestra el resultado del cuadro anterior:



Figura 17. Colorimetría de la arena.

CUADRO 2. DETERMINACIÓN DE LOS PESOS UNITARIOS EN LA PIEDRA DE 12,5mm

Muestra No.:	<input type="text"/>	Tajo:	<input type="text"/>
Fecha ensayo:	<input type="text"/>	Tipo de agregado:	Piedra de 12,5 mm
		Planta:	<input type="text"/>

Masa unitaria suelta

MUESTRA	1	2	3	PROMEDIO
Peso de la muestra seca P1. (g).	13396,8	13391,7	13414,5	13401
Volumen definido del recipiente. V (m ³).	0,0093885	0,0093885	0,0093885	0,0093885
Masa unitaria (kg/m ³). MU: = P1/V.	1426,94	1426,39	1428,82	1427,38

Masa unitaria compacta

MUESTRA	1	2	3	PROMEDIO
Peso de la muestra seca P1. (g).	14330,3	14383,9	14436,2	14383
Volumen definido del recipiente. V (m ³).	0,0093885	0,0093885	0,0093885	0,0093885
Masa unitaria (kg/m ³). MU: = P1/V.	1526,37	1532,08	1537,65	1532,03

CUADRO 3. PESO UNITARIO SUELTO DE LA ARENA

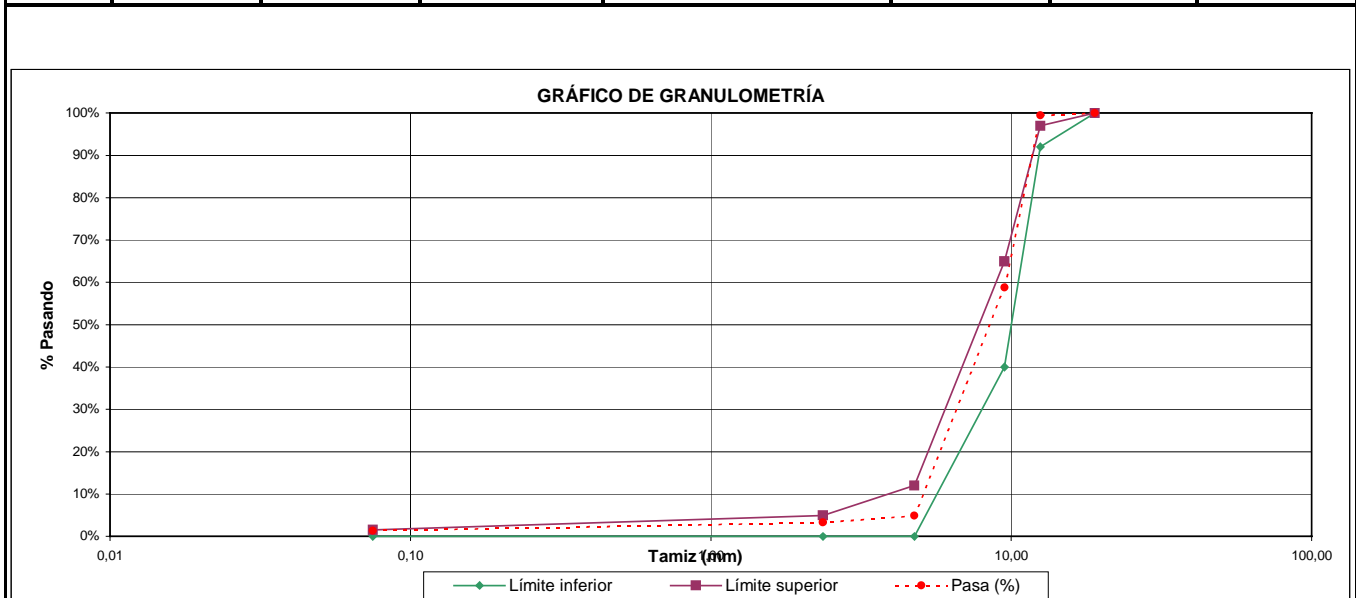
Muestra No.:	<input type="text"/>	Procedencia:	Guápiles
Fecha ensayo:	<input type="text"/>	Tipo de agregado:	Arena lavada
		Planta:	PP

Masa unitaria suelta

MUESTRA	1	2	3	PROMEDIO
Peso de la muestra seca P1. (g).	4529,3	4540,7	4575,1	4548
Volumen definido del recipiente. V (m ³).	0,0028	0,0028	0,0028	0,0028
Masa unitaria (kg/m ³). MU: = P1/V.	1617,61	1621,68	1633,96	1624,42

CUADRO 4. GRANULOMETRÍA DE LA PIEDRA DE 12,5 mm CON LÍMITES DE CEMEX

Muestra: _____		Planta: _____					
Descripción: _____		Mina: _____					
ABERTURA DEL TAMIZ		Masa Retenida (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje Pasa (%)	NORMA	
(mm)	(Denom. Estándar)					Límite Inferior	Límite Superior
19,00	3/4"	0,0	0,0%	0,0%	100,0%	100%	100%
12,50	1/2"	16,5	0,6%	0,6%	99,4%	92%	97%
9,50	3/8"	1196,5	40,6%	41,2%	58,8%	40%	65%
4,76	N° 4	1587,6	53,9%	95,1%	4,9%	0%	12%
2,36	N° 8	47,4	1,6%	96,7%	3,3%	0%	5%
0,08	N° 200	56,1	1,9%	98,6%	1,4%	0%	1,5%
Fondo		39,9	1,4%	100,0%	0,0%		



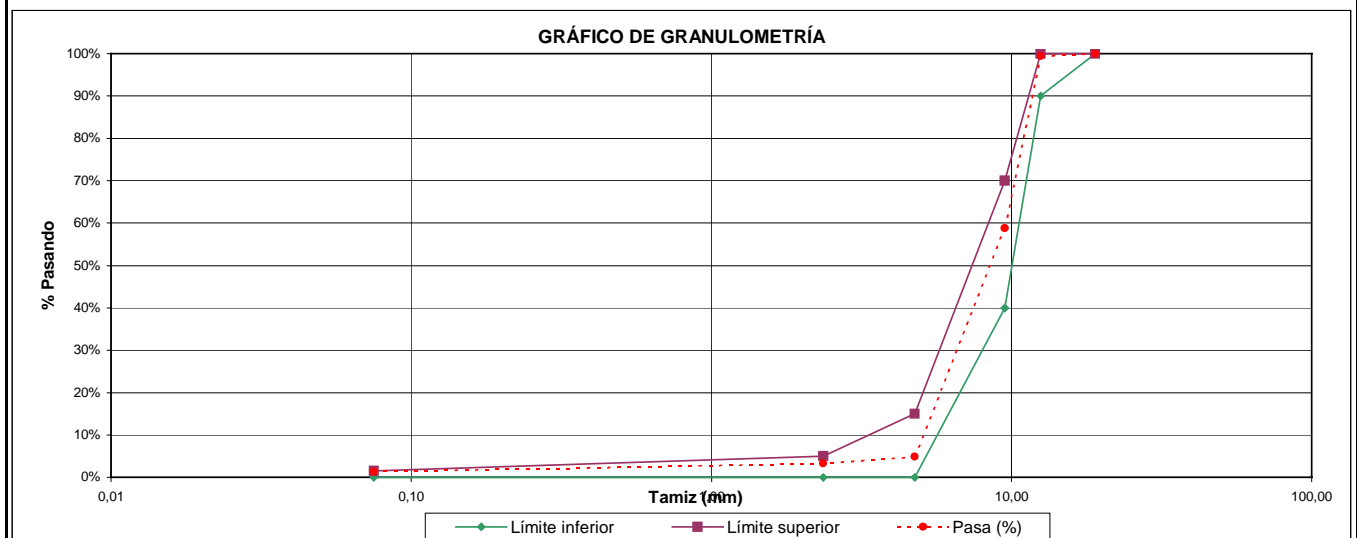
Masa inicial húmeda (g): 3000,1
 Masa inicial seca (g): 2944,3
 Humedad (%): 1,9%
 Tamaño máximo: _____
 Tamaño máximo nominal: _____

Sumatoria masas retenidas (g): 2944,0
 Fondo después de tamizado (g): 13,2
 Masa final seca después de lavado sobre tamiz 0.075 mm (g): 2917,6

CUADRO 5. GRANULOMETRÍA PIEDRA DE 12,5 mm CON LÍMITES DE ASTM

Muestra: _____	Planta: _____
Descripción: _____	Mina: _____

ABERTURA DEL TAMIZ		Masa Retenida (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje Pasa (%)	NORMA	
(mm)	(Denom. Estándar)					Límite Inferior	Límite Superior
19,00	3/4"	0,0	0,0%	0,0%	100,0%	100%	100%
12,50	1/2"	16,5	0,6%	0,6%	99,4%	90%	100%
9,50	3/8"	1196,5	40,6%	41,2%	58,8%	40%	70%
4,76	N° 4	1587,6	53,9%	95,1%	4,9%	0%	15%
2,36	N° 8	47,4	1,6%	96,7%	3,3%	0%	5%
0,08	N° 200	56,1	1,9%	98,6%	1,4%	0%	1,5%
Fondo		39,9	1,4%	100,0%	0,0%		

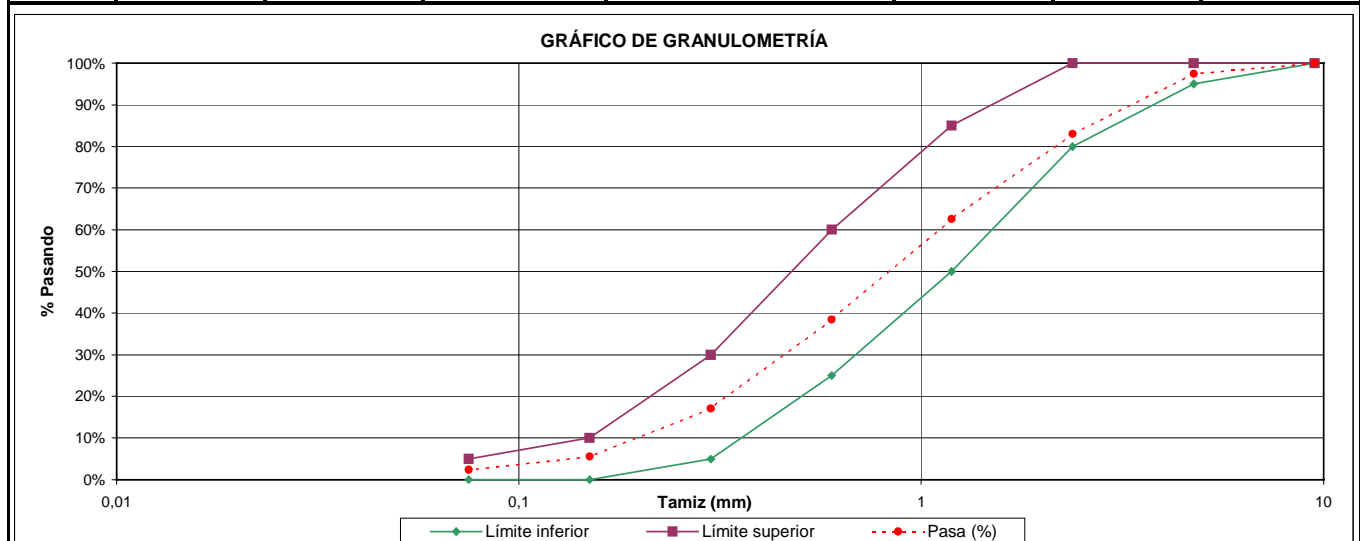


Masa inicial húmeda (g): <u>3000,1</u>	Sumatoria masas retenidas (g): <u>2944,0</u>
Masa inicial seca (g): <u>2944,3</u>	Fondo después de tamizado (g): <u>13,2</u>
Humedad (%): <u>1,9%</u>	Masa final seca después de lavado sobre tamiz 0.075 mm (g): <u>2917,6</u>
Tamaño máximo: _____	
Tamaño máximo nominal: _____	

CUADRO 6. GRANULOMETRÍA DE LA ARENA LAVADA

Muestra: _____	Planta: _____
Descripción: _____	Mina: _____

ABERTURA DEL TAMIZ		Masa Retenida (g)	Porcentaje Retenido (%)	Porcentaje Retenido Acumulado (%)	Porcentaje Pasa (%)	NORMA	
(mm)	(Denom. Estándar)					Limite Inferior	Limite Superior
9,5	3/8"	0,0	0,0%	0,0%	100,0%	100%	100%
4,76	N° 4	25,4	2,6%	2,6%	97,4%	95%	100%
2,38	N° 8	143,5	14,4%	17,0%	83,0%	80%	100%
1,19	N° 16	203,5	20,5%	37,5%	62,5%	50%	85%
0,6	N° 30	239,1	24,1%	61,6%	38,4%	25%	60%
0,3	N° 50	212,3	21,4%	82,9%	17,1%	5%	30%
0,15	N° 100	115,0	11,6%	94,5%	5,5%	0%	10%
0,075	N° 200	31,0	3,1%	97,6%	2,4%	0%	5%
Fondo		23,7	2,4%	100,0%	0,0%		



Masa inicial húmeda (g): <u>1071,2</u>	pH: _____
Masa inicial seca (g): <u>993,8</u>	Sumatoria masas retenidas (g): <u>993,5</u>
Modulo de finura: <u>2,96</u>	Fondo después de tamizado (g): <u>0,6</u>
Materia orgánica: _____	Masa final seca después de lavado sobre tamiz 0.075 mm (g): <u>970,7</u>
Humedad (%): <u>7,8%</u>	

Resultados en el concreto fresco y endurecido.

CUADRO 7. RESUMEN DE TODAS LAS PRUEBAS

Muestra	Aditivo(cc)	Agua(L)	Resistencia diseño(MPa)	extensibilidad (mm)	carga 3d (kN)	Resist. % 3 días	carga 7d (kN)		Resist. % 7 días	Resist. % 28 días
CAC-01	4	170	21	450	194	54	313	300	85	123
CAC-02	5	170	21	495	207	58	332	333	92	134
CAC-03	6	170	21	500	160	44	337	362	97	141
CAC-04	7	170	21	525	238	66	276	338	85	124
CAC-05	4	175	21	460	187	52	299	301	83	121
CAC-06	5	175	21	520	256	71	323	329	90	131
CAC-07	6	175	21	530	273	76	344	327	93	135
CAC-08	7	175	21	560	224	62	314	271	81	118
CAC-09	4	180	21	510	204	57	294	290	81	118
CAC-10	5	180	21	530	228	63	305	325	88	127
CAC-11	6	180	21	540	210	58	308	315	87	126
CAC-12	7	180	21	565	174	48	273	291	78	114
CAC-13	4	170	28	525	245	51	371	380	78	113
CAC-14	5	170	28	555	335	70	453	432	92	134
CAC-15	6	170	28	560	426	89	485	457	98	142
CAC-16	7	170	28	570	368	77	457	459	95	138
CAC-17	4	175	28	535	252	53	355	358	74	108
CAC-18	5	175	28	560	244	51	386	387	81	117
CAC-19	6	175	28	565	195	41	411	421	87	126
CAC-20	7	175	28	580	243	51	347	377	75	109
CAC-21	4	180	28	570	236	49	339	333	70	102
CAC-22	5	180	28	575	234	49	355	393	78	113
CAC-23	6	180	28	590	264	55	389	395	82	119
CAC-24	7	180	28	600	176	37	344	313	68	99
CAC-25	0	170	21	370	189	52	349	325	94	136
CAC-26	0	175	21	390	196	54	337	310	90	130
CAC-27	0	180	21	420	201	56	326	295	86	125
CAC-28	0	170	28	380	266	55	433	445	91	133
CAC-29	0	175	28	430	215	45	369	391	79	115
CAC-30	0	180	28	490	198	41	286	294	61	88

CUADRO 8. DIFERENCIA PORCENTUAL DE LA EXTENSIBILIDAD Y LA RESISTENCIA CON RESPECTO A UN CONCRETO SIN ADITIVO SÚPER PLASTIFICANTE TOMANDO EN CUENTA LA CANTIDAD DE AGUA

		Agua (L)	Aditivo (cc)			
			4	5	6	7
Concreto 21 MPa	Extensibilidad	170	21	34	35	42
		175	18	33	36	44
		180	21	26	29	35
	Resistencia	170	-13	-2	5	-12
		175	-9	1	5	-12
		180	-7	2	1	-11
Concreto 28 MPa	Extensibilidad	170	38	46	47	50
		175	24	30	31	35
		180	16,3	17	20	22
	Resistencia	170	-20	1	9	5
		175	-7	2	11	-6
		180	14	25	31	11

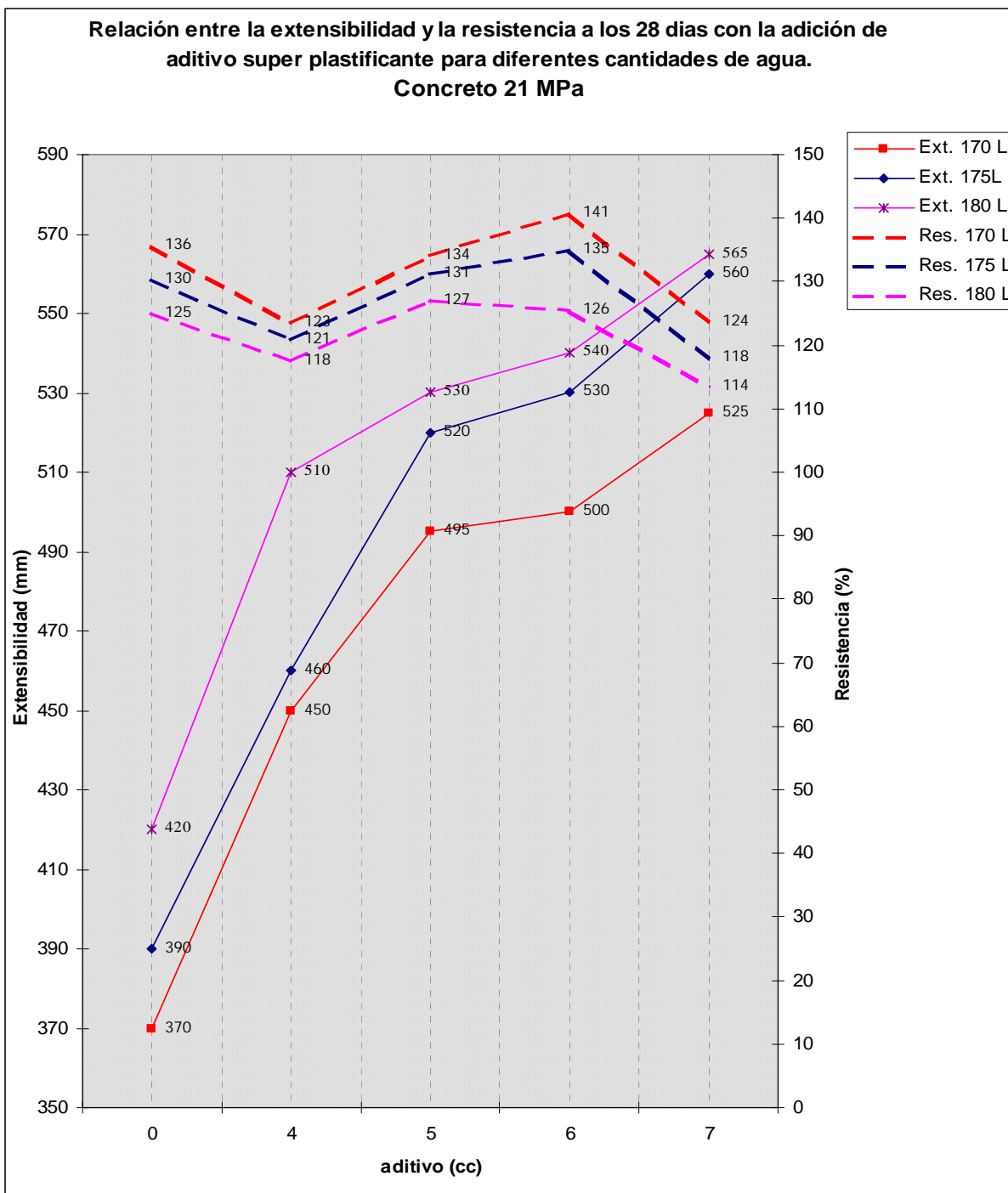


Figura 18. Relación de la extensibilidad y la resistencia con la adición de aditivo súper plastificante para el concreto de 21 MPa. Referencia: cuadro 7

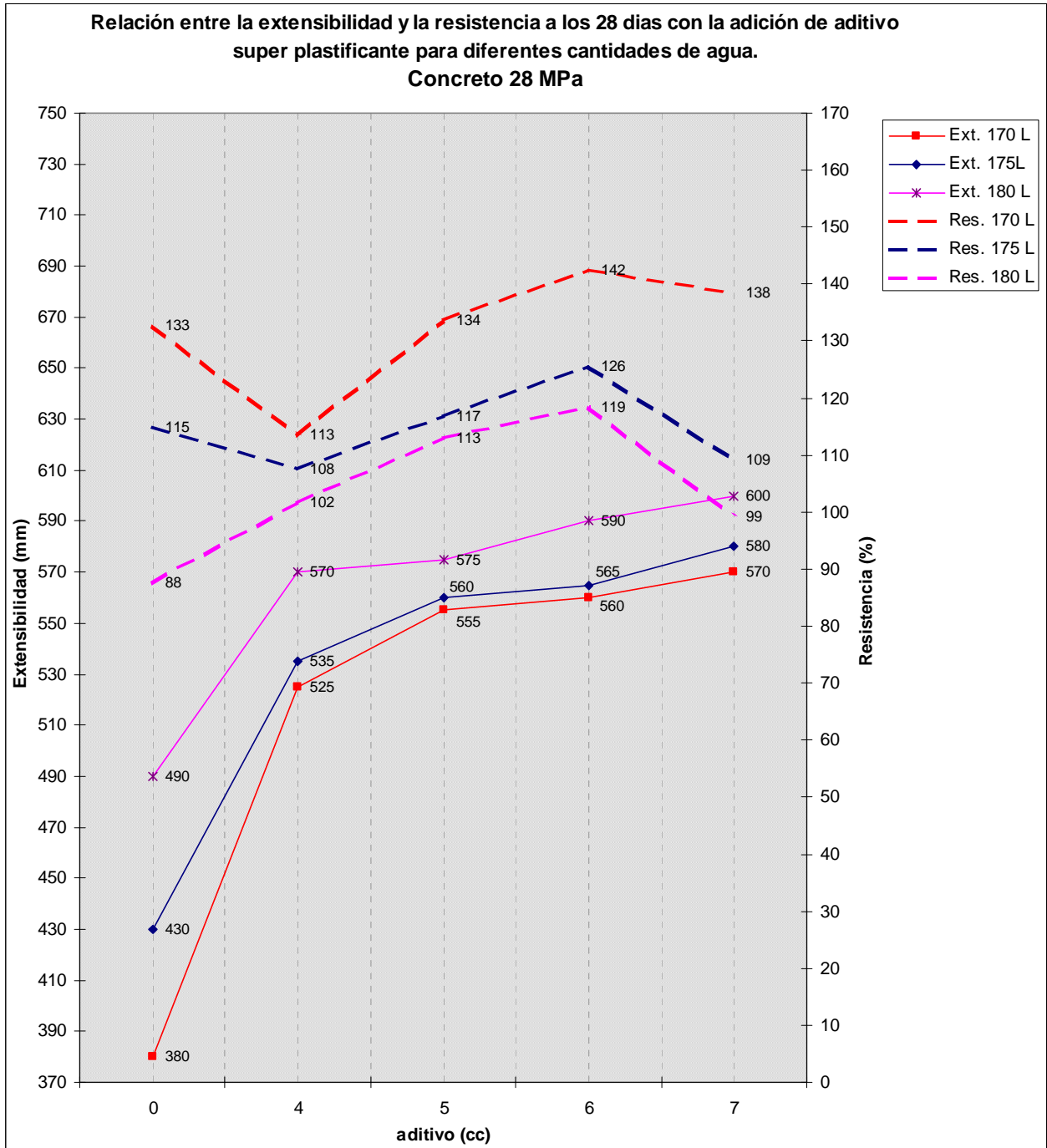


Figura 19. Relación de la extensibilidad y la resistencia con la adición de aditivo súper plastificante para el concreto de 28 MPa. Referencia: cuadro 7

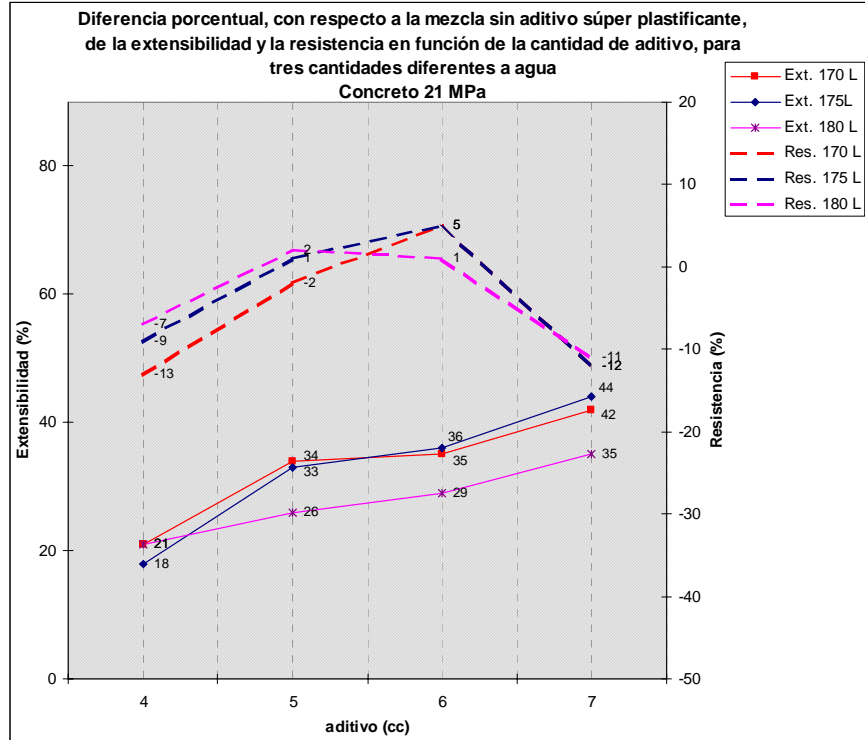


Figura 20. Diferencias porcentuales con respecto a la mezcla sin aditivo súper plastificante. Concreto 21 MPa. Referencia: cuadro 8

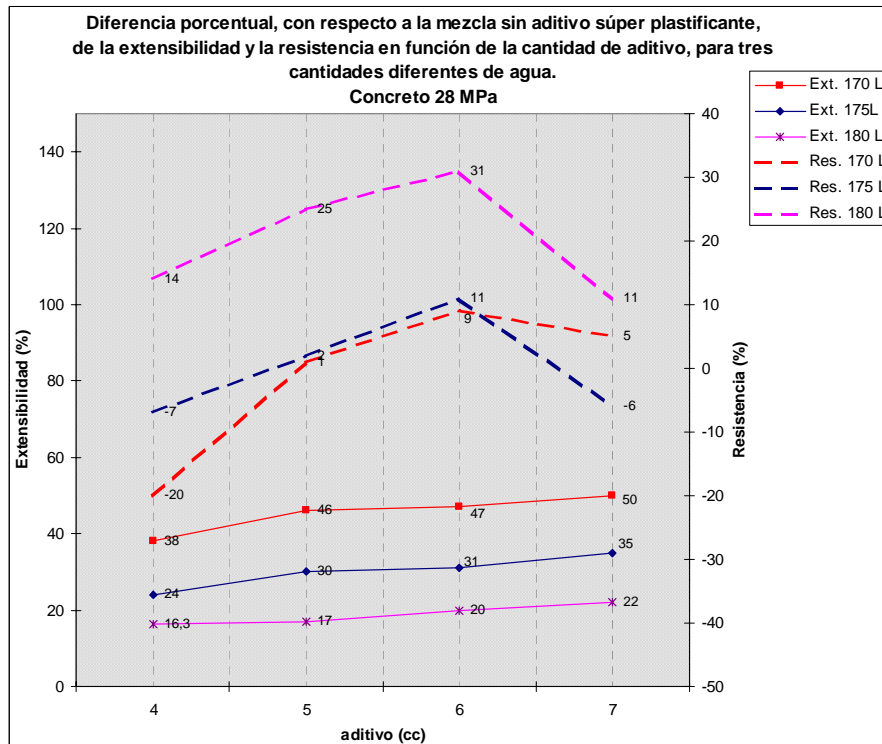


Figura 21. Diferencias porcentuales con respecto a la mezcla sin aditivo súper plastificante. Concreto 28 MPa. Referencia: cuadro 8

CUADRO 9. RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DEL CONCRETO SIN ADITIVO.

Diseño : 21 MPa		RESULTADOS <table border="1"> <tr> <th>RP (MPa)</th> <th>T(horas)</th> </tr> <tr> <td>3,5</td> <td>5,00</td> </tr> <tr> <td>28</td> <td>9,00</td> </tr> </table>		RP (MPa)	T(horas)	3,5	5,00	28	9,00	AGUJAS	
RP (MPa)	T(horas)										
3,5	5,00										
28	9,00										
Hora de Inicio: 06:00 a.m.		NUMERO	AREA (cm²)								
Temperatura: 25 °C		1 (1/40)	0,16129								
		2 (1/20)	0,32258								
		3 (1/10)	0,64516								
		4 (1/4)	1,6129								
		5 (1/2)	3,2258								

Horas	Hora de ensayo	Resistencia (Lb)	Aguja #	Esfuerzo (Lb / in ²)	Esfuerzo (MPa)
5	11:00 a.m.	25	2	500,00	4
6	12:00 a.m.	42	2	840,00	6
7	01:00 p.m.	78	2	1560,00	11
8	02:00 p.m.	140	2	2800,00	20
8,75	02:45 p.m.	200	2	4000,00	28
9	03:00 p.m.	200	2	4000,00	28

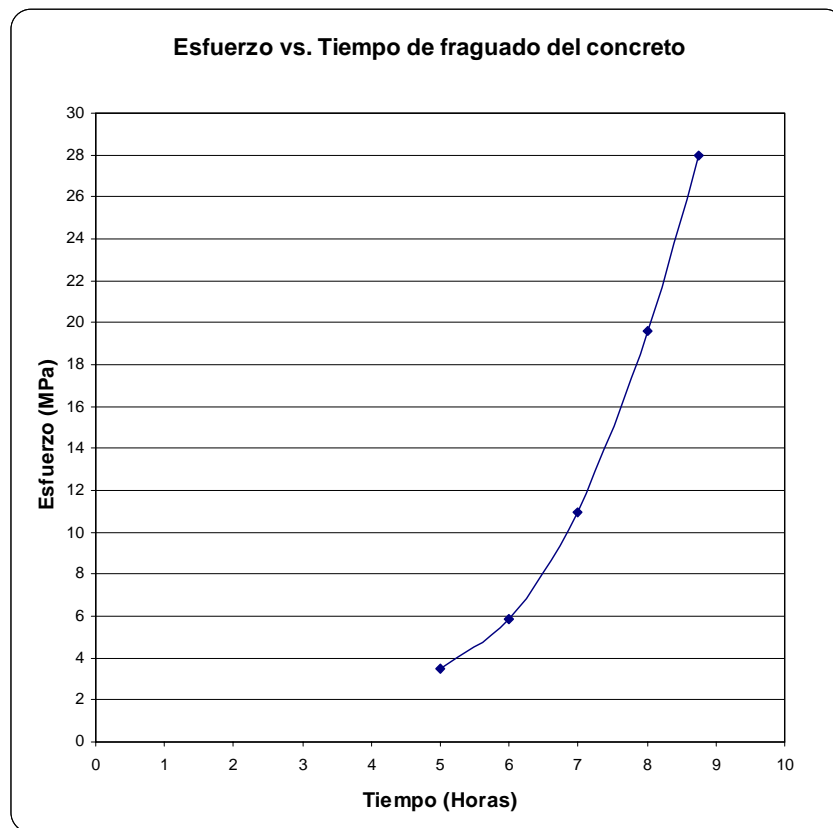


Figura 22. Gráfico de tiempo de fraguado. Concreto 21 MPa sin aditivo súper plastificante. Referencia: cuadro 9.

CUADRO 10. RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DEL CONCRETO 28MPa CON ADITIVO SÚPER PLASTIFICANTE.

Diseño : 28 MPa con aditivo súper plastificante		AGUJAS	
Hora de Inicio: 10:00 a.m.		NUMERO	AREA (cm²)
Temp. Mortero: 25 °C		1 (1/40)	0,16129
		2 (1/20)	0,32258
		3 (1/10)	0,64516
		4 (1/4)	1,6129
		5 (1/2)	3,2258
RESULTADOS			
		RP	Tiempo
		(MPa)	(h)
		3,5	5,25
		28	9,25

Horas	Hora de ensayo	Resistencia (Lb)	Aguja #	Esfuerzo (Lb / in ²)	Esfuerzo (MPa)
5	03:00 p.m.	24	2	480,00	3
5,5	03:30 p.m.	26	2	520,00	4
6	04:00 p.m.	32	2	640,00	4
6,5	04:30 p.m.	52	2	1040,00	7
7	05:00 p.m.	54	2	1080,00	8
8	06:00 p.m.	71	2	1420,00	10
8,5	06:30 p.m.	90	2	1800,00	13
8,75	06:45 p.m.	106	2	2120,00	15
9	07:00 p.m.	150	2	3000,00	21
9,25	07:15 p.m.	200	2	4000,00	28



Figura 23. Gráfico de tiempo de fraguado. Concreto 28 MPa con aditivo súper plastificante. Referencia: cuadro 10.

CUADRO 11. RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DEL CONCRETO 21MPA CON ADITIVO SÚPER PLASTIFICANTE.

Diseño : 21 Mpa. Con aditivo súper plastificante		AGUJAS	
Hora de Inicio: 08:00 a.m.		NUMERO	AREA (cm2)
Temp. Mortero 24,5 °C		1 (1/40)	0,16129
		2 (1/20)	0,32258
		3 (1/10)	0,64516
		4 (1/4)	1,6129
		5 (1/2)	3,2258
RESULTADOS			
RP (MPa)	Tiempo (h)		
3,5	6,50		
28	8,50		

Horas	Hora de ensayo	Resistencia (Lb)	Aguja #	Esfuerzo (Lb / in2)	Esfuerzo (MPa)
3	11:00 a.m.	0	2	0,00	0
4	12:00 a.m.	0	2	0,00	0
5	01:00 p.m.	6,25	2	125,00	1
5,5	01:30 p.m.	12,5	2	250,00	2
6	02:00 p.m.	18	2	360,00	3
6,5	02:30 p.m.	25	2	500,00	4
7	03:00 p.m.	35	2	700,00	5
7,5	03:30 p.m.	50	2	1000,00	7
8	04:00 p.m.	100	2	2000,00	14
8,5	04:30 p.m.	200	2	4000,00	28



Figura 24. Gráfico de tiempo de fraguado. Concreto 21 MPa con aditivo súper plastificante. Referencia: cuadro 11.

CUADRO 12. CONTROL DEL CONCRETO ENSAYO INDUSTRIAL

Cliente : <u>EDICA LTDA. Proyecto Condominio Brisas del Oeste</u>	
Mixer #:	<u>96</u>
Diseño :	<u>21 MPa</u>
Hora salida planta:	<u>04:40 p.m.</u>
Hora en la obra:	<u>05:10 p.m.</u>
Tiempos de descarga:	<u>05:30 p.m.</u> primera chorrea con cono de 0,8 m3
	<u>05:43 p.m.</u> regresa a mixer
	<u>05:47 p.m.</u> segunda chorrea
	<u>06:10 p.m.</u> regresa a mixer
	<u>06:12 p.m.</u> tercera chorrea
	<u>07:10 p.m.</u> fin de chorrea en muro en estudio
Revenimiento salida:	<u>30 cm - 57 cm</u>
Revenimiento de llegada:	<u>25 cm - 55 cm.</u>
Hora de la prueba:	<u>05:25 p.m.</u>
USO DE ADITIVO EN CAMPO	
Cantidad utilizada	<u>1 galón</u>
Tipo de aditivo:	<u>Pozzolith 322 N</u>
Porque lo utilizo?	<u>El concreto presenta condiciones no favorables, mucho tiempo en el camión provoca fraguado.</u>
TOMA DE CILINDROS	
Muestra N°	<u>ACIN-01</u>
	<u>1 a 1 día = 80 kN (22%)</u>
	<u>1 a 3 días = 203 kN (55%)</u>
	<u>2 a 7 días = 308 kN (84%)</u>
	<u>2 a 28 días(proyectado) = 120 %</u>
Comentarios	
<u>El concreto se desborda de la formaleta en forma de lluvia.</u>	

Análisis de los resultados

Las pruebas realizadas a los agregados dieron muy buenos resultados, esto se debe a que la empresa Cemex tiene controles diarios que exigen que estas condiciones se presenten.

El ensayo de colorimetría de la arena resultó aceptable. Su color se encuentra entre 2 y 3, esto significa que las sustancias orgánicas que contiene la arena no son lo suficientemente dañinas como para rechazar su utilización en el concreto.

El ensayo de los pesos unitarios, tanto suelto como compacto es utilizado en muchos métodos para el proporcionamiento de las mezclas de concreto, además de ser un dato útil a la hora de cotizar la materia prima.

Los resultados de las granulometrías de los agregados se consideran satisfactorios. Hay que señalar que se presentan dos granulometrías para el agregado grueso, esto se debe a que en la empresa se tienen límites inferiores y superiores diferentes a los de ASTM, en un sentido tal que el límite inferior es ligeramente mayor que el de la norma y el límite superior es ligeramente inferior al de la norma. Esto significa que los límites son ligeramente más cerrados, es decir, más restringidos que los de la norma, para asegurarse que el material está dentro de los límites establecidos, así, si la gráfica del porcentaje pasando de las mallas de un material tiende a salirse, se pueden tomar medidas correctivas a pesar de que el material está dentro del rango permitido, muchas veces sucede que el material sale de los límites de Cemex, pero se encuentra justo dentro de los límites establecidos por ASTM, lo cual hace llamar la atención y estar alerta por posteriores llegadas de material, para revisarlo y comprobar que es adecuado, y no constituye una sorpresa en la que hay que apresurarse para tomar decisiones, o suspender el recibimiento de material hasta que se encuentre una solución.

La piedra de 12,5mm en este caso resultó caer dentro de los límites de Cemex, excepto el material pasando la malla de 12,5mm que se sale del límite superior en un 2,4%, es decir, pasa más material que el permitido por Cemex en esa malla. La piedra tiene un pequeño porcentaje adicional de finos. Pero, si se observa la gráfica con límites ASTM la piedra presenta un adecuado porcentaje pasando por todas las mallas.

En el mismo gráfico se adjuntan otros cálculos, como lo es la humedad y el ensayo de material más fino que la malla No. 200 (ASTM C 117)

Lo mismo le sucede a la granulometría de la arena, que se encuentra dentro de los límites y se puede utilizar sin ningún problema. En este caso hay que hacer notar que Cemex no restringe más estos límites, debido a que la arena se obtiene de un proceso natural, es arena lavada. Por otro lado, en el caso de la piedra existen máquinas que la quiebran y determinan los diferentes tamaños, por lo que es necesario que ese proceso sea estrictamente controlado y se restrinjan los límites. Además, es difícil que la arena se rechace por granulometría, es más probable que se rechace por el resultado de su colorimetría.

Se tienen en estudio dos concretos convencionales, de resistencias de 21 MPa y de 28 MPa modificados por un aditivo súper plastificante. En cada uno de ellos se tiene un gráfico que determina la relación de la resistencia y la extensibilidad con respecto a la cantidad de aditivo súper plastificante, a través de distintas pruebas experimentales realizadas en el laboratorio de Cemex Concretos, donde se evalúa la influencia del incremento del aditivo y tres distintos rangos de agua como factores modificadores de resistencia y fluidez.

Concreto 21MPa

En el gráfico del concreto de 21 MPa se puede apreciar un comportamiento de acuerdo con lo esperado, en cuanto a las características de extensibilidad. En general, conforme la dosis de aditivo aumenta se presenta un comportamiento de incremento tanto en la extensibilidad como en la resistencia. Las pruebas que se trataron sin el aditivo súper plastificante tienen una extensibilidad menor, a pesar de que se aumentó la cantidad de agua, en tres rangos diferentes, iniciando en 170 litros y dando saltos de 5 litros hasta llegar a 180 litros. Las extensibilidades obtenidas en estos casos se encontraron fuera del rango de fluidez por lo que evidencia la necesidad de utilizar aditivo súper plastificante para la mejora de este aspecto. Si se observan las resistencias obtenidas para esta mezcla en los tres rangos de agua se puede ver una alta resistencia producto de la reducción inicial de un 15% de la cantidad de agua respecto al diseño original, el cual contenía un aditivo reductor de agua y retardante de fraguado de menor rango. Al lado de esta reducción de agua se le añade aditivo a las diferentes mezclas con el fin de determinar la dosis más adecuada bajo las condiciones en estudio. Como se mencionó en la metodología, se debe partir de una dosis de aditivo de 4cc. Para cada dosis se evalúa el comportamiento que tiene el concreto para las tres diferentes cantidades de agua.

Al aumentar el contenido de aditivo de 0 a 4cc, la extensibilidad experimenta un aumento considerable con respecto al diseño sin aditivo, manteniéndose con mayor extensibilidad el concreto con 180 litros de agua, siguiendo el de 175 litros, y por último el de 170 litros. Esto es un comportamiento esperado, ya que a mayor cantidad de agua con la misma dosis de aditivo se tiene mayor extensibilidad en promedio. El aumento de la dosis de aditivo de 0 a 4cc corresponde a un 20% en promedio en el aumento de extensibilidad para los tres diferentes rangos de agua. Las resistencias presentan un comportamiento distinto, tienden a disminuir con respecto a la mezcla sin aditivo en un promedio de 9,6%. Se puede apreciar como la mezcla con 170 litros de agua presenta la mayor resistencia, y la de 180 litros presenta la menor resistencia a

lo largo del gráfico. Por otro lado, si se observa el comportamiento que tienen las mezclas al variar el contenido de agua conservando la misma dosis de aditivo se aprecia que se tendrán mayores extensibilidades y menores resistencias. Esto se puede ver en el gráfico donde el aumento en la fluidez es de un 6,5% en promedio y la resistencia presenta una disminución de un 2,5% en promedio, esto conforme se aumenta la cantidad de agua en rangos de 5 litros.

Al evaluar los concretos utilizando 5cc de aditivo, el comportamiento de la fluidez sigue una tendencia ascendente similar a los concretos anteriores. Para una misma cantidad de agua y aumentando de 4cc a 5cc de aditivo, se tiene un aumento en la fluidez, y tomando un promedio de las tres cantidades de agua se tiene que ese aumento es de un 10,6%, presentando la mayor fluidez el concreto con mayor cantidad de agua, y el de 170 litros con la menor fluidez. Sin embargo los tres concretos con este aumento en la dosis de aditivo tienen una extensibilidad que se considera dentro del rango permitido de los concretos autocompactables citado en la metodología. La resistencia experimenta un aumento al pasar de 4cc a 5cc, en todas las cantidades de agua. Con 170 litros se presenta un aumento de 11%, con 175 litros un 10% y con 180 litros un 9%, con respecto a las mezclas realizadas con 4cc.

Observando el comportamiento de las tres mezclas a medida que se aumenta la cantidad de agua y se conserva fija la cantidad de aditivo en 5cc, se aprecia un incremento en la fluidez del 3,5% y una disminución en la resistencia de 3,5% en promedio. Se puede decir que en este caso, el comportamiento de los concretos con la misma cantidad de agua tiende a responder a un aumento en la resistencia y fluidez conforme se aumenta la dosis de aditivo, y por otro lado, a mayores cantidades de agua conservando la misma cantidad de aditivo se disminuye la resistencia y se aumenta la fluidez.

Al realizar las pruebas con 6cc de aditivo, se sigue la tendencia del aumento tanto en la fluidez como en la resistencia. Para el aumento de 5 a 6cc de aditivo, la fluidez aumenta en menor escala que en el caso anterior (de 4 a

5cc), en este caso se presenta un aumento del 2,5% en promedio para la misma cantidad de agua con respecto al caso anterior, el concreto con mayor cantidad es el más fluido, y el de menor cantidad presentó la menor extensibilidad. El comportamiento de las resistencias con respecto al caso anterior es tal que para el concreto con 170 litros de agua se aumenta en un 7%, para 175 litros aumenta un 4% y para 180 litros disminuye en 1%. En este último caso se presenta un cambio que se debe tomar en cuenta para próximas dosis de aditivo, por cuanto la resistencia tenderá a disminuir, debido a que se está alcanzando la dosis máxima de aditivo. Si se conserva la cantidad de aditivo en 6cc y se observa la fluidez del concreto conforme se aumenta la cantidad de agua en rangos de 5 litros cada uno, se nota un aumento del 4% de extensibilidad promedio, y para el caso de las resistencias hay una disminución del 5,5 % promedio. Se puede decir que conservando la cantidad de aditivo y aumentando el contenido de agua, se tendrán menores resistencias y mayor fluidez.

El último caso estudiado, corresponde a un cambio en la dosis que va de 6cc a 7cc de aditivo. Con la misma cantidad de agua se presentan aumentos en la fluidez de un 5% promedio, siempre se conserva el hecho de que al utilizar mayores cantidades de agua se presentará mayor fluidez. La diferencia se produce en la resistencia, las cuales tienen un efecto contradictorio al que se ha venido dando, el aumento del aditivo produjo una reducción de 17%, 17% y 12% para concretos con 170 L, 175 L y 180 L de agua, respectivamente, para un promedio en reducción de resistencia de 15%. Estos datos son respecto al caso anterior (de 5cc a 6cc). Conservando la cantidad de 7cc, y si se aumenta la cantidad de agua en rangos de 5 litros, la extensibilidad se aumenta en un 3,6% promedio y las resistencias disminuyen en 5%.

En este último caso, la reducción en las resistencias se debe a la sobredosis de aditivo, esto produce segregación, exudación y el concreto se vuelve menos manejable. La reducción del agua al 15% del diseño original limita el uso del aditivo en mayores dosis, lo cual significa que no se debe usar en una dosis mayor a 6cc para la reducción de agua considerada. Para este concreto de 21MPa, se tiene que el dato que proporciona la fluidez y resistencia mayores, con las dosis más adecuadas de agua y

aditivo, lo representan 6cc de aditivo utilizando 175 L de agua por metro cúbico de concreto. Estas dosis producen un aumento en la fluidez del 36% y un aumento en la resistencia de 5% con respecto a un concreto con las mismas condiciones de grava, arena y cemento que no tiene aditivo súper plastificante. La dosificación por metro cúbico del concreto con resistencia de 21MPa es la siguiente:

Cemento: 280 kg
G/A : 52,5%
Agua: 175 L
Aditivo retardante: 7cc
Aditivo VMA: 1cc
Aditivo super plastificante: 6cc

Resistencia proyectada a 28 días: 135%

Concreto de 28MPa

El comportamiento de este concreto es muy similar al concreto de 21MPa, por cuanto las tendencias son similares, a pesar de que se trata con resistencias diferentes.

La extensibilidad del concreto sin aditivo súper plastificante presenta menor fluidez, pero presenta buena resistencia por el mismo motivo del concreto 21MPa: reducción del agua de diseño de un 15%. Sin agregar aditivo, se puede ver el efecto del agua, que conforme se agrega al concreto en saltos de 5 litros se generan mayores extensibilidades, aumentando en un 13,6% y por consiguiente se van reduciendo las resistencias en un 22,5% en promedio. Se va añadiendo aditivo de la misma forma que en el concreto 21MPa para determinar las condiciones más adecuadas de dosificación de aditivo y agua.

Empezando por variar el aditivo de 0 a 4cc y si se mantiene la misma cantidad de agua, las extensibilidades de los concretos se ven incrementadas en un promedio de 26% respecto al concreto sin aditivo. Al igual que en el concreto de 21MPa, el valor mínimo de aditivo brinda datos que se encuentran dentro del rango permitido de fluidez. Las resistencias en este caso presentan dos comportamientos, al concreto con 170 litros de agua se le reduce en un 20%, al de 175 litros en un 7% y al de 180 litros se le

aumenta en un 14%. En el gráfico se aprecia cómo se mantiene la tendencia de que para cantidades cada vez mayores de agua se reduce la resistencia y se aumenta la fluidez.

Al conservar la cantidad de aditivo en 4cc, se aprecia en el gráfico que si se añaden cantidades de agua en rangos de 5 litros entre cada mezcla se generan extensibilidades cada vez mayores, con un promedio de un 4,2% de incremento respecto una de otra. Para estas condiciones las resistencias se ven afectadas por una disminución del 5,5% en promedio.

Si se añade 1cc más de aditivo, es decir pasar de 4cc a 5cc, el concreto presentará un aumento en la fluidez de alrededor del 4%, con respecto al concreto con 4cc. El concreto con menor cantidad de agua presenta la menor fluidez, así como el de mayor cantidad de agua presenta mayor fluidez. Este aumento en el aditivo genera incremento en las resistencias de las tres diferentes condiciones de agua en un promedio del 14%. El concreto con 170 litros de agua es el que refleja mayor resistencia, así como el de 180 litros, menor resistencia. Si se conserva la cantidad de aditivo en 5cc y se van agregando 5 litros más de agua por metro cúbico de concreto en cada mezcla, se incrementa la fluidez en un 1,8% y las resistencias se ven reducidas en un 10,5%. Se da la tendencia de que mientras más aditivo se añade, se aumenta la resistencia y fluidez, y por otro lado, se disminuye la resistencia y se aumenta la fluidez conforme se aumenta agua.

Sometiendo al concreto a prueba con un aumento en la dosis de 5cc a 6cc de aditivo sin modificar el contenido de agua, surge un ascenso en la fluidez, que en promedio, es un aumento de menor escala que en el caso de pasar de 4 a 5cc. Se aprecia que la pendiente del gráfico tiende a ser menor, lo que significa un aumento de 1,5% en promedio de las tres situaciones con diferentes cantidades de agua. Así también la resistencia aumenta en 7,6%. Si se le añade agua en intervalos de 5 litros a las mezclas conservando la cantidad de aditivo en 6cc, se tiene que la extensibilidad aumenta en un 2,7%, y las resistencias disminuirán en un 11,5% en promedio.

A partir de esta dosis de aditivo, se marca una diferencia en el comportamiento del concreto, cuando se trabaja con un incremento de 6cc a 7cc, las extensibilidades se ven aumentadas en un promedio del 2%, pero las resistencias se

reducen en un 14%, esto sucede debido a que el concreto presenta una sobredosis de aditivo, lo que produce segregación y mala manejabilidad de la mezcla, y por lo tanto, no se comporta como un concreto autocompactable. De nuevo se aprecia que la cantidad máxima de aditivo para lograr la mayor resistencia y buena fluidez es 6cc. Al realizar las mezclas con una misma cantidad de aditivo de 7cc y aumentando en 5 litros el contenido de agua entre cada mezcla, se aprecia que las extensibilidades son cada vez mayores, con un aumento promedio entre cada mezcla de 2,6%. Las resistencias para este caso se ven reducidas en un promedio de 19,5%.

De este gráfico se concluye que para lograr una buena dosificación de agua y aditivo en la mezcla de 28 MPa, respetando tanto las condiciones de la relación grava – arena como la cantidad de cemento, se debe tomar el valor de 6cc de aditivo y una cantidad de agua de 175 litros, ya que son los datos que se mantienen en un rango promedio donde tanto la fluidez como la resistencia son las adecuadas en el comportamiento de la mezcla. Con respecto a la mezcla sin aditivo, se tiene que la resistencia aumenta en un 11% y la fluidez aumenta en un 31%. Las cantidades coinciden con las del concreto de 21 MPa, lo que demuestra que en los dos concretos en estudio, a pesar de que las resistencias de diseño son diferentes, es posible utilizar la misma dosificación de agua y aditivo para lograr variaciones que permitan alcanzar una fluidez característica de los concretos autocompactables. La dosificación es la siguiente:

Cemento: 310 kg

G/A : 50,5%

Agua: 175 L

Aditivo retardante: 7cc

Aditivo VMA : 1cc

Aditivo súper plastificante: 6cc.

Resistencia proyectada a 28 días: 126%

El cuadro 8 presenta resultados con respecto a un concreto sin aditivo súper plastificante, donde se manifiesta en cantidades porcentuales, ya sea el aumento (en cantidades positivas), o la disminución (en cantidades negativas), de la extensibilidad y la resistencia. Los datos con una misma cantidad de agua reflejan que en la extensibilidad hay tendencia al incremento mientras se agrega aditivo, en cambio

en las resistencias, se puede ver cómo disminuye al llegar a un contenido de aditivo de 7cc. De lo anterior se concluye, en este cuadro, y en sus correspondientes gráficos (figuras 20 y 21), que la muestra que determina los mejores resultados con respecto a la mezcla original es la que contiene 6cc y 175 litros, en ambos diseños, como se concluyó anteriormente.

Tomando en cuenta que el fabricante establece que la reducción máxima de agua con el uso del aditivo súper plastificante es de un 30%, y que el rango de uso se encuentra entre un 0,5% y 1,4% del peso del cemento, se puede determinar el efecto reductor del aditivo a través de las pruebas realizadas. Para este estudio, la reducción de agua fue de un 15%, el resultado de la dosis máxima de aditivo fue de 6cc, y además, la diferencia porcentual de la extensibilidad y la resistencia con respecto a una mezcla sin aditivo es similar de acuerdo con el cuadro 8, por ejemplo, se puede observar que para el concreto de 21 Mpa, tanto para reducciones de agua de 12,5%(175 litros) como de 15 %(170 litros). Lo anterior significa que el 15% y 12,5% de reducción de agua dividido por la cantidad de aditivo máxima experimentada de 6cc, demuestra que el aditivo reduce entre un 2,1% y 2,5% la cantidad de agua por cada centímetro cúbico de aditivo que se utiliza en los concretos.

Con respecto a la prueba industrial, es necesario señalar ciertos factores que perjudicaron el comportamiento de este concreto especial. Si bien es cierto que el colado en elementos como muros delgados o elementos con acceso limitado se realiza fácilmente, las características incrementadas de fluidez requieren consideraciones especiales durante la transportación y colocación, especialmente se puede hablar del incremento de la presión sobre las cimbras. Se tiene que en este caso, en la obra que se estudió, se presentó un problema que impedía cumplir con el objetivo, como es el caso de la utilización del cono para transportar el concreto hacia el elemento. La caída recomendada para este concreto debe ser por lo menos 1 metro de altura sobre la parte superior de la formaleta, donde se genere suficiente peso en la caída y se generen presiones que hagan esparcir adecuadamente el concreto. Con respecto a esto, en la prueba de campo no existió la oportunidad de realizar la chorrea de esta forma, sino que se procedió a realizarla desde la orilla superior de la formaleta. Esto no permite

que el concreto se expanda por su propio peso, y por lo tanto hay que aplicarle vibración. La fluidez del concreto al llegar a la obra fue buena, pero el hecho de tener que esperar que el cono regrese para llenarlo, causó una distorsión enorme y el concreto empezó a comportarse como un concreto normal, disminuyendo su característica tixotrópica.

La forma correcta de tratarlo es utilizándolo inmediatamente después de que llega a la obra, aplicarle presión, y dejarlo fluir sin interrupción.

Conclusiones

Se pudo obtener con satisfacción un concreto autocompactable de resistencia 21 MPa y otro de resistencia 28 MPa por medio del desarrollo de todas las pruebas necesarias dentro del laboratorio utilizando tres rangos de agua diferentes.

A medida que se le incorpora aditivo súper plastificante a una mezcla, independientemente del contenido de agua, se llegará a un contenido de aditivo máximo donde la mezcla comenzará a cambiar sus características, principalmente se reduce la resistencia como resultado de una alta segregación y exudación.

La prueba de la fluidez del asentamiento constituyó la prueba que marcó gran diferencia entre todas las demás. Con ella, se determinó si los concretos alcanzan la característica de los concretos autocompactables, en cuanto a la fluidez. Los concretos para ser considerados autocompactables debieron presentar una extensibilidad entre 45 y 65cm.

Los tiempos de fraguado resultantes en los concretos presentan una diferencia con respecto a los concretos sin aditivo súper plastificante. Como resultado del uso del aditivo se produce un incremento en el tiempo de fraguado independientemente de la resistencia del concreto. Para el concreto de 21 MPa con aditivo se da un incremento del 30% en el fraguado inicial y una disminución del 5% en el final; para el concreto de 28 MPa ocurre un aumento del 5% en el tiempo inicial y de 3% en el final. Estas diferencias no son significativas en el comportamiento del concreto, por lo que no tiene influencia en un posible retardo o aceleramiento de fragua para las dosis en que se trabajó.

Se determinó que para los concretos de resistencia 21 MPa y 28 MPa en estudio, el comportamiento en sus características de fraguado, extensibilidad, manejabilidad y resistencia siguen una tendencia similar. Aunque se le agregue cada vez más aditivo súper

plastificante, ambos concretos presentan las mismas condiciones en cuanto a la dosis más adecuada, la cual fue de 0,7% del peso del cemento. Esta dosis de aditivo en los dos concretos generó mejoras en la resistencia y fluidez. En este estudio, en el concreto de 21 MPa se aumentó la resistencia en un 5%, y la fluidez en un 36%. En el de 28 MPa se aumentó la resistencia en un 11% y la fluidez en un 31%.

Es posible lograr concretos con mayor resistencia si se reduce su relación agua-cemento, reduciendo el contenido de agua hasta un 30%. En este trabajo, al realizar los experimentos con una reducción de agua hasta el 15% se obtuvo como dosis máxima de aditivo súper plastificante un 0,7% del peso del cemento, que equivale a 6cc por kilogramo de cemento. Al llegar a utilizar 7cc de aditivo por kilogramo de cemento, las resistencias disminuyeron, en gran parte, por efecto de la cantidad de agua. Si se realizaran pruebas donde se utilizara mayores rangos de disminución del agua, sería posible utilizar mayores cantidades de aditivo. Es decir, el contenido de aditivo a utilizar está estrechamente ligado con la reducción de agua, y en este estudio se pudo determinar en los tres rangos de agua considerados, la cantidad de aditivo más adecuada para lograr un concreto autocompactable a partir de concretos previamente establecidos.

A partir de consideraciones tales como la reducción máxima de agua permitida por el aditivo de un 30%, los rangos de uso de aditivo establecidos por el fabricante (de 0,5% a 1,4% del peso del cemento) y las diferentes pruebas realizadas a los concretos en este estudio, se determinó que el poder reductor de agua mediante este aditivo súper plastificante se encuentra dentro de un rango de 2,1% y 2,5% por cada centímetro cúbico de aditivo por kilogramo de cemento añadido a la mezcla.

Por otro lado, como recomendación para otros estudios, se pueden modificar las características de los concretos estudiados variando aun más la cantidad de aditivo modificador de viscosidad, logrando obtener más cohesión en las mezclas, reducciones cada vez mayores de la relación agua – cemento y así obtener concretos con consistencia manejable y con altas resistencias, siempre resistentes a la segregación. Es claro que al realizar una modificación en la cantidad del aditivo VMA, se deben realizar numerosas pruebas ya que se cambian las condiciones que se estudiaron en este trabajo, en cuanto a los otros aditivos.

El agregado grueso utilizado en este proyecto, se clasifica según su forma, como angular, con bordes bien definidos. Esto puede provocar restricción del flujo del concreto, por lo que es conveniente realizar pruebas con agregado redondeado con el fin de obtener mayores extensibilidades, y menores esfuerzos cortantes a través del refuerzo u otros obstáculos que se presenten en la colocación del concreto.

Con base en las resistencias obtenidas a los 7 y 28 días, es factible obtener mezclas más económicas reduciendo aún más la cantidad de cemento, ya que los datos revelan que las resistencias obtenidas alcanzan hasta un 40% más arriba que la resistencia patrón.

Estos concretos tratados con aditivos súper plastificantes, considerados aditivos de la nueva generación, son especiales y por lo tanto deben ser tratados como tales. Para obtener los más óptimos resultados en obra, tales como rapidez en colocación, ausencia de vibración, reducción de problemas por refuerzo congestionado, entre otros, lo mejor es que el concreto sea utilizado en el momento de llegar a la obra, de forma continua, por medio de bombas que le apliquen presión, o ya sea que se deje caer desde una altura por lo menos de un metro desde la parte superior del elemento.

Anexos

- I. Aditivos utilizados para desarrollar un concreto autocompactante. Autores: MBT Technologies, SIKA Ecuatoriana S.A.
- II. Datos de mezclas preestablecidos. Fuente: Archivo Cemex Concretos.

Referencias

ANEFHOP Y OFICEMEN. **MANUAL DE CONSEJOS PRÁCTICOS SOBRE HORMIGÓN.** México, Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto, 38p.

ASTM International. 2002. **ANNUAL BOOK OF ASTM STANDARDS 2002.** Volume 04.02, U.S.A. Baltimore, MD, 818

Flor de María. Muñoz Umaña. 1998. **COMPONENTES PRINCIPALES DE LAS MEZCLAS DE CONCRETO.** Costa Rica. Editorial Universidad de Costa Rica, 138p.

Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. 1974. **PRÁCTICAS RECOMENDABLES PARA DOSIFICAR CONCRETOS DE PESO NORMAL.** México: Editorial IMCYC, 47p.

Comisión Venezolana de Normas Industriales. **NORMA VENEZOLANA COVENIN.** Venezuela: editorial Fondorama.

En este trabajo se desarrollan pruebas a un concreto de 21 MPa y a otro de 28 MPa, de conformidad con ASTM, las cuales consisten en determinar la influencia que sobre sus características tiene el uso de un aditivo súper plastificante en tres rangos de agua diferentes para obtener concretos autocompactables.