

1.1 INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la construcción, el hormigón juega un papel sumamente importante, ya que la mayoría de las obras que nos rodean han sido hechas con éste. Y una de las características que todo trabajador de la construcción busca darle a su hormigón fresco es la trabajabilidad, tanto para el mezclado como para el colado, lográndolo muchas veces agregando agua a la mezcla, variando así la relación agua/cemento con la cual ha sido diseñada, por lo que afecta notoriamente la calidad del hormigón, disminuyendo de forma considerable la resistencia del mismo.

Este problema no es nuevo, ha existido desde que se creó el hormigón, es por eso que ha surgido el diseño de un hormigón de alta fluidez, al que se le ha denominado hormigón autocompactado, que viene a solucionar los problemas de colado en estructuras muy reforzadas o de difícil acceso de vibradores.

En Bolivia se conoce muy poco sobre este tema, por lo que no ha sido muy aplicado, ya que requiere del uso de aditivos químicos y de un estricto control de calidad de sus áridos.

El presente estudio pretende dar a conocer a la industria de la construcción todo lo relacionado a este tipo de hormigones, es decir, sus características, ventajas, aplicaciones, materiales a utilizar, ensayos de laboratorio en el hormigón fresco (equipo, procedimiento y manejo de resultados), y las resistencias logradas con mezclas hechas con materiales y áridos provenientes de plantas procesadoras de nuestro medio (Tarija-Bolivia), las cuales producen agregados mayormente changados.

1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En los últimos años en varios países se está utilizando bastante el hormigón autocompactante en diversas construcciones civiles de gran envergadura gracias a la aparición de aditivos reductores de agua de última generación. Se está utilizando este hormigón por brindar muchas ventajas en la construcción, tanto en lo económico como en lo ambiental.

Para la producción de estos hormigones, los materiales que mejor han tenido resultados son los que han aplicado cemento con adiciones y aditivos de primera calidad, además de agregado grueso de canto rodado y arenas que poseen una cantidad adecuada de finos evitando así la segregación. En Tarija- Bolivia uno de los problemas que existe para el uso de este hormigón es el agregado grueso de canto rodado y otros materiales usados para su producción, este tipo de agregado y materiales no existe en nuestro medio haciendo que la mayoría de las empresas usen para sus construcciones agregados provenientes de plantas, los cuales son mayormente triturados y los materiales son de menor calidad. Además, en Tarija se conoce muy poco sobre este tema, por lo que no ha sido muy aplicado, ya que requiere del uso de aditivos químicos, agregados y materiales de primera calidad y de un estricto control, es por eso que en esta investigación se quiere hacer un análisis técnico de un hormigón en estado fresco y su resistencia a la compresión utilizando agregados provenientes de plantas del medio y materiales dispuestos para comprobar si se puede lograr un hormigón con características que se asemejen a un hormigón autocompactante.

1.3 HIPOTESIS

Con la aplicación de agregados triturados y materiales existentes en el medio se pretende obtener un hormigón con características y valores similares a los de un hormigón autocompactante convencional (con agregados de canto rodado), sobre la base de normativas vigentes y aplicables al mismo.

1.4 ANTECEDENTES

1.4.1 Reseña histórica

El hormigón autocompactante inicia su desarrollo en Japón, a mediados de los años 80, bajo la dirección del Profesor Okamura, de la Universidad de Tokio (Okamura, 1997).

Previamente recibió el nombre de *High Performance Concrete* pasándose a denominar posteriormente Hormigón Autocompactante (*Self-Compacting Concrete*). El objetivo del mismo era buscar un hormigón de calidad, compacto y durable para estructuras fuertemente armadas donde el proceso de vibración era complicado. Además, se pretendía encontrar un hormigón que no dependiese de la mano de obra en el proceso de

ejecución porque, durante varios años, la calidad de las obras estaba disminuyendo debido a una compactación inadecuada por falta de mano de obra cualificada.

A partir de entonces, Ozawa y Maekawa (Okamura, 1997) llevaron importantes investigaciones sobre este tipo de hormigón en la Universidad de Tokio. En 1988, se realizó con éxito el primer prototipo de hormigón autocompactante. Este prototipo funcionó satisfactoriamente desde el punto de vista de la retracción, calor de hidratación, densidad y otras propiedades (Okamura et al., 1996).

A partir de entonces, el hormigón autocompactante se ha puesto en práctica en numerosas obras y en la industria del prefabricado. Se ha llevado a cabo una intensa investigación tanto en instituciones como en empresas a nivel internacional y, debido a este creciente interés científico y técnico, se han organizado congresos y simposios internacionales para el estudio de este hormigón especial.

1.4.2 Campos de aplicación en el mundo

Actualmente la producción de hormigón autocompactante es relativamente baja en comparación con el hormigón convencional. Se puede emplear tanto en obras in situ o en elementos prefabricados, en obra civil o edificación.

Actualmente, en Europa, el uso del hormigón autocompactante está más extendido y desarrollado en el sector de la prefabricación que en el sector de los hormigones colocados in situ. Esto se debe a que las condiciones de trabajo y producción son más favorables para el hormigón autocompactante. En el año 2005, en algunos países europeos, el hormigón autocompactante representaba hasta el 20% del hormigón empleado; en cambio, en Estados Unidos suponía aproximadamente el 75% del hormigón prefabricado, ya que su uso está aceptado en carreteras y puentes (ACHE, 2008).

Las primeras obras in situ de hormigón autocompactante se encuentran en Japón. Una de las más destacadas es el anclaje del puente colgante Akashi Kaikyo, de 1.991 metros de luz. Se utilizaron 290.000 m³ de hormigón autocompactante obteniéndose un rendimiento de 1.900 m³/día, con lo que se redujo el plazo de ejecución en 6 meses

(Okamura, 1997; Bartos et al., 1999; Ouchi, 1999; Skarendhal et al., 2000; Gettu et al., 2004 a). Otra de las obras más significativas realizadas en Japón, fue la construcción de un depósito de gas licuado de la empresa Osaka Gas cuyo periodo de ejecución se redujo de 22 a 18 meses obteniéndose un rendimiento de 200-250 m³/hora (Okamura, 1997; Nishizaki et al., 1999; Ouchi, 1999; Gettu et al., 2004a).

(Figura 1) Puente Akasi Kaikyo (Bahia Osaka)



En Europa, también existen diversos tipos de aplicaciones del hormigón autocompactante desde 1998 como en Suecia, Francia, Reino Unido u Holanda tanto en obras civiles nuevas como en reparaciones de obras antiguas. Por ejemplo, en Suecia, hasta el año 1999, se construyeron tres puentes y varios edificios con hormigón autocompactante o en Francia se emplearon al menos 50.000 m³ de hormigón autocompactante en numerosos proyectos de edificación y obra civil entre los años 1997 y 2000 (Billberg, 1999a; AFGC, 2000; Skarendhal et al., 2002; Gettu et al., 2004a).

1.4.3 Campo de aplicación en Bolivia

En Bolivia la utilización de hormigones autocompactantes no es constante, por distintas razones tales como:

- No existe un buen conocimiento o estudio a profundidad sobre el hormigón autocompactante.
- La producción en grandes cantidades de agregados adecuados para este hormigón en plantas procesadoras es escasa.

- Debido al factor económico es que se utilizan hormigones convencionales en las diferentes obras.

Ready Mix es una empresa consolidada en el Eje Troncal de Bolivia como la empresa líder en la elaboración de hormigones premezclados. Sus operaciones se iniciaron en el año 1995 en las ciudades de La Paz, Cochabamba y Santa Cruz y desde entonces ha participado en grandes proyectos constructivos como represas, puentes, pavimentación de importantes vías y otros proyectos camineros, así como edificaciones y pequeñas construcciones.

Ready Mix es una de las pocas empresas en Bolivia que está implementando la elaboración de hormigones autocompactantes como uno más de sus productos, aun ellos están estudiando las características de dicho hormigón para tener una mejor aceptación por parte de las empresas que hacen uso de sus productos.

1.4.4 Diferencias con el hormigón convencional

- Reología diferente durante la colocación, mostrando un comportamiento no tan variable tanto en el estado fresco como en el estado endurecido.
- Microestructura e interface pasta-árido más densa para una misma relación a/c.
- La permeabilidad a los gases y cloruros es menor.
- Mejor adherencia entre hormigón y barras de acero.
- Mayor sensibilidad de curado por tener más cemento.
- Menor E para igual f_{ck} .
- Mayor retracción endógena.

1.4.5 Dosificaciones tipo

Para este punto, después de revisar la respectiva bibliografía se a encontrada las primeras dosificaciones logradas para un hormigón autocompactante (ver tablas en anexos)

1.4.6 Normativas actuales en distintos países

La reciente Instrucción Española de Hormigón Estructural (EHE-08) aprobada en el Real Decreto 1247/2008 del 18 de julio, incluye el Anexo 17 que es específico para la utilización del hormigón autocompactante.

En febrero de 2007, AENOR publicó las cuatro normas UNE existentes de ensayos para la caracterización del comportamiento en estado fresco del hormigón autocompactante, las cuales son las siguientes:

- UNE 83361:2007. Hormigón autocompactante. Caracterización de la fluidez. Ensayo de escurrimiento.
- UNE 83362:2007. Hormigón autocompactante. Caracterización de la fluidez en presencia de barras. Ensayo del escurrimiento con el anillo japonés.
- UNE 83363:2007. Hormigón autocompactante. Caracterización de la fluidez en presencia de barras. Método de la caja en L.
- UNE 83364:2007. Hormigón autocompactante. Determinación del tiempo de flujo. Ensayo del embudo en V.

Antes de la publicación de las normas anteriores, se han utilizado las normas italianas, que se publicaron en marzo de 2003, y son:

- UNI 11040-Marzo 2003. Especificaciones, características y control.
- UNI 11041-Marzo 2003. Determinación de la trabajabilidad y del tiempo de escurrimiento.
- UNI 11042-Marzo 2003. Determinación del tiempo de flujo en embudo.
- UNI 11043-Marzo 2003. Determinación del escurrimiento por confinamiento en un recipiente en L.

En la actualidad, existen diversas guías o recomendaciones que han publicado diversos organismos entre las que destacan las siguientes:

- *Durability of Self-Compacting Concrete*. State of the Art Report of RILEM Technical Committee 205-SCC (De Schutter et al., 2007).
- *Self-Consolidating Concrete*. American Concrete Institute (ACI) 237R-07. (ACI, 007).
- *Guía Práctica para la Utilización del Hormigón Autocompactante*. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA) (Fernández et al., 2005).
- *Guía Interna para el uso del Hormigón Autocompactante en hormigón prefabricado/pretensado*. Instituto Americano de Hormigón Prefabricado (PCI) (PCI, 2003).
- *Especificaciones y Directrices para Hormigón Autocompactable*. Federación Europea dedicada a sistemas específicos de hormigón y productos químicos especializados para la construcción (EFNARC) (EFNARC, 2002).
- *Hormigón Autocompactable: Recomendaciones Provisionales*. Asociación Francesa de Ingenieros Civiles (AFGC) (AFGC, 2002).
- *Self-Compacting Concrete*. State of the Art Report of RILEM Technical Committee 174-SCC (Skarendahl et al., 2000).

1.5 OBJETIVOS

Los objetivos del presente proyecto de investigación de Ingeniería Civil son los siguientes:

1.5.1 Objetivo General

Analizar técnicamente las propiedades de un hormigón autocompactante fresco y su resistencia a la compresión, aplicando agregados chancados y materiales existentes en el medio, para lograr una dosificación óptima.

1.5.2 Objetivos Específicos

Se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Realizar los ensayos preliminares en laboratorio de los agregados tomando en cuenta las normas vigentes en nuestro medio, para así poderlos caracterizar.
- Construir los equipos necesarios que ayuden con la caracterización del HAC durante los ensayos (anillo japonés, caja en L, en embudo en V)
- Ejecutar los siguientes ensayos de laboratorio:
 - Ensayo de flujo de asentamiento y de T50cm para evaluar el flujo libre de HAC en ausencia de obstrucciones.
 - Ensayo de anillo en J para determinar la capacidad de paso del HAC.
 - Ensayo de embudo en V para determinar la capacidad de relleno del HAC.
 - Ensayo de caja en L para determinar la capacidad de fluidez del HAC.
- Se realizará la clasificación del hormigón autocompactante para su aplicación
- Analizar los resultados obtenidos de los ensayos realizados en laboratorio para determinar sus propiedades en estado fresco y en la etapa inicial de endurecido del HAC.

1.6 JUSTIFICACION

En estos últimos años se está utilizando en gran parte del mundo en las construcciones de grandes magnitudes (puentes, túneles, caminos, edificios, etc.) el hormigón autocompactante, esto debido a que ha demostrado tener grandes ventajas, realizándose las obras en menor tiempo que el previsto, además de ser aplicable en obras de arquitectura compleja en comparación con el uso de un hormigón convencional que no lograría estos trabajos.

En Bolivia el uso de este novedoso hormigón es mínimo en comparación con otros países, esto debido a que no existe un conocimiento a profundidad sobre dicho hormigón, además hay que mencionar que tampoco se producen áridos y materiales adecuados para la producción de dicho hormigón.

Los materiales utilizados mayormente para el HAC son áridos de canto rodados de un tamaño máximo de 19 mm, arenas con grandes cantidades de finos, también utilizan cementos con adiciones, los cuales dan mejor resultado. En nuestro medio (Tarija-Bolivia) no existen dichos materiales, la mayoría de las plantas de áridos producen agregados chancados y otros materiales utilizados para la producción de un hormigón

autocompactante, es por esto que se hace importante realizar un análisis técnico empleando materiales dispuestos en nuestro medio para así verificar si se puede obtener un hormigón que se asemeje a un hormigón autocompactante convencional.

1.6.1 Académica

Ampliar el conocimiento del estudiante sobre los hormigones autocompactantes (H.A.C) y sobre los ensayos de laboratorio que se realizan en este proyecto, los cuales enriquecerán y beneficiarán las fuentes de conocimiento de la misma universidad

1.6.2 Social –Institucional

La contribución a nuestra universidad (UAJMS) con nueva información sobre la dosificación de Hormigones Autocompactantes (HAC) es muy importante puesto que en la actualidad muchos otros países trabajan con esta nueva tecnología y es justo que nuestra sociedad en conjunto con los diferentes proyectistas incursionen en este nuevo campo de la ingeniería. Además, siendo la universidad uno de los pilares fundamentales para el desarrollo de nuestra región es importante que cuente con estudios y datos sobre dichos hormigones.

1.7 ALCANCE DEL LA INVESTIGACION

La elaboración de este proyecto de investigación tiene el siguiente alcance:

- Analizar las propiedades del hormigón fresco, las cuales son: Su capacidad de relleno, capacidad de paso y resistencia a la segregación para caracterizarlo como un hormigón autocompactante.
- Se realizará un análisis de todas las características de los agregados, respetando las normativas vigentes, además de hacer un estudio con los resultados obtenidos durante los ensayos que se realicen, elaborando también tablas gráficas y las curvas correspondientes.
- Con la fabricación de los equipos (anillo japonés, caja en L, embudo en V) para la caracterización de las propiedades del H.A.C. se podrá alcanzar resultados

con un mínimo porcentaje de error, ya que por distintas razones, tales como el material con el que se los construyan podría no ser el mismo que se usa para los equipos hechos en fábrica.

También, es importante mencionar que las medidas de los equipos empleados en esta investigación podrían tener una leve variación a los estándares que se usan en fábrica.

- Pese a que los aditivos superplastificantes dispuestos en nuestro medio son de menor calidad en comparación con los disponibles en otros países desarrollados se pretende obtener resultados casi similares a los de los países europeos, los cuales cuentan con una amplia gama de productos de primera calidad y equipos más sofisticados de control.
- Hacer un análisis comparativo de costos entre hormigón autocompactante logrado y el convencional.
- Se elaborará las conclusiones y recomendaciones pertinentes, basadas en los resultados obtenidos y que a su vez sirvan a futuro como guía para otros proyectistas de nuestro medio y de Bolivia en general.

3.1 CONSTRUCCIÓN DE LOS EQUIPOS

Para la construcción de los equipos se tomará en cuenta las normas, especificaciones y características de los materiales como el tamaño máximo de los agregados y las propiedades de trabajabilidad que se requieren para el hormigón autocompactante. A continuación se describirán todas las particularidades que tendrán dichos equipos:

3.1.1 Anillo japonés

La construcción del anillo japonés fue realizada tomando en cuenta las medidas recomendadas por (EFNARC, 2002), la cual nos recomienda que sea de un material no absorbente, que tenga un espaciamiento entre barras 3 veces más que el tamaño del agregado,

El anillo que se construirá tendrá las siguientes características:

- Sección rectangular de 25 mm x 38 mm (1" x 1.5")
- Un anillo de 343 mm (13.5") de diámetro exterior y 266 mm (10.5"), de diámetro interior, en el cual se disponen de 16 barras verticales roscadas de armadura de 100 mm de altura y 10 mm (3/8") de espesor de barras, con una apropiada separación entre ellas.
- Un espacio entre las barras de 48 mm que representa 3 veces el tamaño máximo del agregado

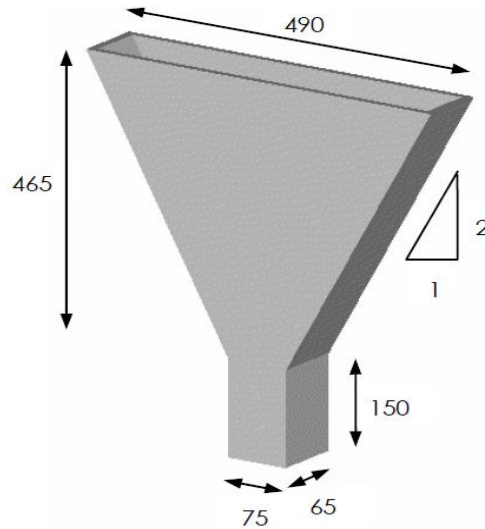
El anillo japonés que se fabricara será adecuado para un agregado de un tamaño máximo de 19 mm. (3/4")

3.1.2 Embudo en V

El embudo en V a construir es el modelo propuesto por (EFNARC, 2002) es de sección rectangular, de un material no absorbente y sus características son las siguientes:

- De un material de acero plancha de 2 mm de espesor.
- Sección rectangular superior de 490 mm x 65 mm.
- De sección rectángulas de salida de 75 mm x 65 mm.
- Una altura de cono de 465 mm.
- Altura de la sección de salidas de 150 mm.

- En la parte inferior presentara una compuerta con una facilidad de apertura.



(b) Sección rectangular

(Figura 27) Modelo de embudo V a construir (JSCE, 1998; EFNARC, 2002)

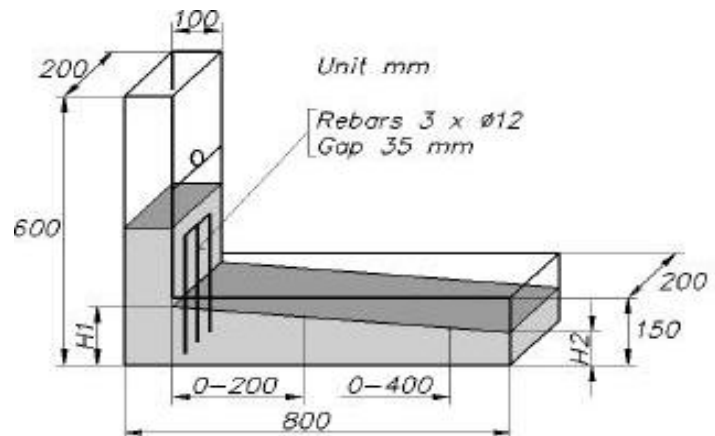
La sección de salida (75 mm x 65 mm) que presenta el cono a construir representa a una distancia de 3 veces más que el tamaño máximo de agregado como nos recomienda las especificaciones de EFNARC, el agregado a utilizar es de un tamaño de 19 mm (3/4")

3.1.3 Caja en L

De igual manera la caja en L que se va construir será de un material no absorbente el modelo es el que presenta EFNARC 2002 y consta de las siguientes características:

- Se construirá de una plancha de acero de 2 mm de espesor.
- Un depósito vertical de 200 mm x 100 mm, de altura de 600 mm.
- Un canal de abierto de 150 mm x 200 mm y una longitud de 700 mm, medido desde el depósito vertical.
- Una rejilla de 3 obstáculos separados a una distancia de 35 mm, el diámetro de las barras de 12 mm (1/2"), La rejilla se ubicara en el comienzo del canal.

- Presentará una compuerta de fácil apertura para la salida inmediata del hormigón

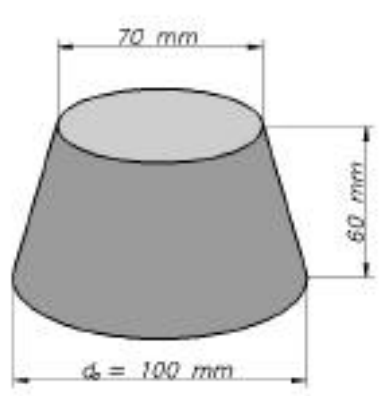


(Figura 28) Modelo de caja en L a construir (EFNARC, 2002)

3.1.4 Cono de flujo para la pasta y el mortero

El cono de flujo que se va a construir para el ensayo de la pasta de hormigón y el mortero es el modelo presentado por EFNARC y tiene las siguientes medidas y características:

- La construcción será en un material no absorbente plancha de 1 mm de espesor
- Diámetro superior de 70mm
- De diámetro inferior de 100 mm
- Y una altura de 60 mm

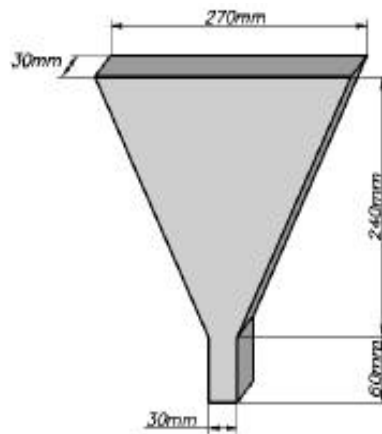


(Figura 29) Cono de flujo a construir para la pasta y el mortero (EFNARC, 2002)

3.1.5 Embudo V para mortero

El embudo en V que se va a construir para la determinación del flujo del mortero es idéntico al utilizado en el hormigón, el modelo que se va a construir es el propuesto por EFNARC y presenta las siguientes características:

- De un material de acero plancha de 1mm de espesor
- Sección rectangular superior de 270 mm x 300 mm
- De sección rectángulas de salida de 30 mm x 30 mm
- Una altura de cono de 240 mm
- Altura de la sección de salidas de 60 mm
- En la parte inferior presentara una compuerta con una facilidad de apertura



(Figura 30) Embudo en V a construir para el mortero (EFNARC, 2002)

3.2 MATERIALES A UTILIZAR

Los materiales a utilizar para este hormigón autocompactante serán los mismos que los empleados en los hormigones de compactación convencional de nuestro medio, y que deberán cumplir con los requisitos normativos de calidad vigentes.

La cantidad de finos (partículas que pasan por el tamiz 0'125 mm) suficiente para alcanzar la propiedad de autocompactabilidad como nos indica en la teoría para nuestro hormigón nos proporcionará solamente el cemento y los finos de la arena (material que pasa el tamiz Nro. 100), por tanto no se utilizará ningún tipo de adición o fillers, esto por motivos económicos.

Se utilizará un solo tipo de aditivo que será el superplastificante reductor de agua de alto rango, para esta investigación tampoco se usará un aditivo modulador de viscosidad.

3.2.1 Cementos a utilizar

Para la realización de toda la etapa experimental se hará uso del cemento Portland (El Puente IP-30), ya que éste es el más convencional en nuestro medio además para esta investigación ya se ha dicho que se utilizará los materiales convencionales comerciales existentes en el medio.

La cantidad de cemento en nuestro hormigón autocompactante oscilará entre los 350 kg/m³ y 450 kg/m³ según la teoría estudiada anteriormente. Varios autores nos indican que no se deberán superar los 500 kg/m³ de cemento porque puede haber problemas de retracción por el excesivo calor de hidratación. Se puede disminuir la cantidad de 350 kg/m³ si se usa un cemento con adiciones activas (EFNARC, 2002).

.

3.2.2 Elección del superplastificante a utilizar

Uno de los requisitos más importantes e indispensables para lograr la autocompactabilidad de nuestro hormigón es el aditivo superplastificante reductor de agua de alto rango.

Teniendo en cuenta que el aditivo superplastificante o reductor de agua de alto rango que ha tenido buenos resultados en los productos de Ready Mix y además es el que se encuentra en nuestro medio, se va utilizar el producto de SIKA VISCOCRETE 5-800.

Este producto superplastificante sirve para producir hormigones extremadamente fluidos y cohesivos a la vez. No contiene cloruro o cualquier otro ingrediente u elemento promotor de la corrosión, por lo que puede ser utilizado sin restricción en el hormigón armado y pretensado es un producto líquido de color café claro, con una densidad de 1.06 a 0.05 g/cm³ y PH 6.5 +- 0.5.

La cantidad de aditivo a usar en función a las características del hormigón a producir es de 0.5 a 2 % del peso del cemento.

3.2.3 Agregados

Se realizarán diversas pruebas a los agregados para asegurarse de su aceptación durante el proceso de ejecución de los ensayos que correspondan y así poder utilizarlos en el hormigón autocompactante. Además existen especificaciones para determinar este factor, tanto para el agregado fino como para el grueso. En este aspecto para este proyecto se utiliza la norma ASTM para la caracterización de las propiedades de los agregados.

Los yacimientos que se encuentran disponibles en Tarija son los que aparecen en la siguiente tabla, en la cual se muestran las características de los mismos:

(Tabla 17)

Agregados existentes en Tarija

YACIMIENTOS	AGREGADOS	CARACTERÍSTICAS
Rincón de la Victoria	Grueso	P.E. 2.61
Zona la Ventolera	Grueso y fino	Fino Mod. 2.6 P.E. 2.62 Grueso P.E. 2.64
Zona de Zunchuhuayco	Fino	Fino Mod. 2.97 P.E. 2.6
Tolomosita	Grueso y fino	Fino Mod. 2.58 P.E. 2.61 Grueso P.E. 2.61
Rancho	Grueso	P.E. 2.60

3.2.3.1 Agregado fino a utilizar

Se definirá como agregado fino al material que pasa por el tamiz de 5 mm de abertura (tamiz No 4) según la norma ASTM.

El agregado fino a utilizar será extraído del depósito de áridos de READY MIX, los cuales son utilizados para producir hormigones convencionales.

Se toma la decisión de escoger el agregado fino de los depósitos de Ready Mix por tener buenos resultados gracias a las favorables características encontradas y estudiadas en el Laboratorio de Hormigones de SOBOCE ubicado en Tarija, lugar en donde estos agregados cumplieron con la norma ASTM C33.

El contenido de arena que se utilizará para la elaboración de nuestro hormigón estará entre un 65-55% (**Anexo 17 de la EHE-08**) de la cantidad de agregado total.

3.2.3.2 Agregado grueso a utilizar

Se definirá como agregado grueso al material que queda retenido en el tamiz de 5 mm de abertura (Tamiz No 4) según la norma ASTM C33.

Este agregado implica las mayores exigencias en cuanto a materiales para la confección de nuestro hormigón autocompactante.

Para poder llegar al objetivo planteado de esta investigación se utilizará agregados gruesos existentes en plantas de Tarija, los cuales son chancados de un tamaño máximo de 19 mm (3/4"). Para poder regular la curva granulométrica combinada de los agregados y que cumpla con los límites de curvas establecidos por las normas se añadirá también agregados de 9.5 mm (3/8"). El agregado de 9.5 mm es procedente de la planta de áridos de la Empresa ERIKA ubicada en la zona del Rancho a 16 km de la ciudad de Tarija. La planta produce material chancado extrayendo la materia prima del río Guadalquivir, y el agregado de 19 mm es procedente del depósito de áridos de Ready Mix.

Se escoge trabajar con estos materiales por tener una producción continua sin grandes variaciones en cuanto a sus características físico-mecánicas, comparando con diferentes agregados procedentes de otras plantas existentes en Tarija.

Para utilizar el agregado de 19 mm se tamizará manualmente haciendo pasar por el tamiz 3/4", esto para poder evitar agregados de un tamaño superior los cuales han pasado casualmente en los tamices de las plantas.

3.3. ENSAYOS DE LABORATORIO PARA LA CARACTERIZACIÓN DE LOS AGREGADOS

3.3.1 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 el agregado fino como para el agregado grueso se coloca la muestra durante 24 horas en un horno a temperatura constante de 105 a 110 grados centígrados, se coloca con una balanza al 0,10% de precisión una cantidad de muestra, la cual está establecida en la tabla que se ve a continuación:

(Tabla 18) Medidas de muestra de agregados

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

Una vez sacada la muestra del horno se la deja enfriar hasta que la misma se pueda manipular con la mano, luego se pesa y se calcula el % de humedad con la siguiente formula:

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

Donde:

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

Wh = Masa original, en gramos.

W_s = masa de la muestra seca, en gramos.

3.3.2 Granulometría de los agregados

3.3.2.1 Límites granulométricos del agregado fino

La granulometría del agregado fino dentro de los límites de la norma ASTM C 33, generalmente es satisfactoria para la mayoría de los concretos. Los límites de la norma ASTM C 33 con respecto al tamaño de las Cribas se indican a continuación:

(Tabla 19) límites granulométricos de agregado fino

Tamaño de la malla	Porcentaje que pasa en peso
9.52 mm (3/8")	100
4.75 mm (No.4)	95 a 100
2.36 mm (No.8)	80 a 100
1.18 mm (No.16)	50 a 85
0.60 mm (No.30)	25 a 60
0.30 mm (No.50)	10 a 30
0.15 mm (No.100)	2 a 10

3.3.2.2 Límites granulométricos del agregado grueso

El agregado grueso deberá estar graduado dentro de los límites establecidos en la norma ASTM C33 en función al tamaño máximo de los agregados, las cuales se indican en la siguiente tabla:

(Tabla 20) Requisitos de granulometría para los agregados gruesos (ASTM C 33)

Número de Tamaño	Tamaño nominal (mallas con aberturas cuadradas)	Cantidades menores que pasan cada malla de laboratorio (aberturas cuadradas), por ciento en peso												
		(100 mm) 4 pulg	(90 mm) 3.5 pulg	(75 mm) 3 pulg	(63 mm) 2.5 pulg	(50 mm) 2 pulg	(37.5 mm) 1.5 pulg	(25.0 mm) 1 pulg	(19.0 mm) ¾ pulg	(12.5 mm) ½ pulg	(9.5 mm) 3/8 pulg	(4.75 mm) No.4	(2.36 mm) No.8	(1.18 mm) No.16
1	90 a 37.5 mm	100	90 a 100	----	25 a 60	----	0 a 15	----	0 a 5	----	----	----	----	
2	63 a 37.5 mm	----	----	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	----	0 a 5	----	----	----	----	
3	50 a 25.0 mm	----	----	----	100	90 a 100	35 a 70	0 a 15	----	0 a 5	----	----	----	
357	50 a 4.75 mm	----	----	----	100	95 a 100	----	35 a 70	----	10 a 30	----	0 a 5	----	
4	37.5 a 19.0 mm	----	----	----	----	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	----	0 a 5	----	----	
467	37.5 a 4.75 mm	----	----	----	----	100	95 a 100	----	35 a 70	----	10 a 30	0 a 5	----	
5	25.0 a 12.5 mm	----	----	----	----	----	100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5	----	----	
56	25.0 a 9.5 mm	----	----	----	----	----	100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5	----	
57	25.0 a 4.75 mm	----	----	----	----	----	100	95 a 100	----	25 a 60	----	0 a 10	0 a 5	
	mm													
6	19.0 a 9.5 mm	----	----	----	----	----	----	100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5	----	
67	19.0 a 4.75 mm	----	----	----	----	----	----	100	90 a 100	----	25 a 55	0 a 10	0 a 5	
7	12.5 a 4.75 mm	----	----	----	----	----	----	----	100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	
8	9.5 a 2.36 mm	----	----	----	----	----	----	----	----	100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	

Para nuestro estudio se usarán las limitaciones de número de tamaño 67 de límite 19 a 4.75 mm para la grava de 19 mm ($\frac{3}{4}$ ").

3.3.3 Módulo de fineza

El módulo de finura (FM) del agregado grueso o del agregado fino se obtiene, conforme a la norma ASTM C 125, sumando los porcentajes acumulados en peso de los agregados retenidos en una serie especificada de mallas y dividiendo la suma entre 100. Las mallas que se emplean para determinar el módulo de finura son la de 0.15 mm (No.100), 0.30 mm (No.50), 0.60 mm (No.30), 1.18 mm (No.16), 2.36 mm (No.8), 4.75 mm (No.4), 9.52 mm (3/8"), 19.05 mm (3/4"), 38.10 mm (1½"), 76.20 mm (3"), y 152.40 mm (6").

El módulo de finura es un índice de la finura del agregado, entre mayor sea el módulo de finura, más grueso será el agregado. Diferentes granulometrías de agregados pueden tener igual módulo de finura. El módulo de finura del agregado fino es útil para estimar las proporciones de los agregados finos y gruesos en las mezclas de concreto. Según la norma ASTM la arena debe tener un módulo de fineza no menor de 2.3 ni mayor a 3.1

Se estima que la arena comprendida entre los módulos 2.2 y 2.8 producen concretos de buena trabajabilidad y reducida segregación, y la que se encuentra entre 2.8 y 3.1 son las más favorables para los concretos de alta resistencia.

3.3.4 Porcentaje de finos que pasa el tamiz No 200

Es un ensayo importante en la confección de hormigones, ya que indica el porcentaje de material fino en el agregado. Parámetro que deberá ser controlado, ya que el exceso producirá efectos perjudiciales en el hormigón.

El procedimiento para determinar el porcentaje de finos se lo debe realizar en función a las especificaciones establecidas por la norma (ASTM C117).

El método establece el procedimiento mediante tamizado húmedo para determinar el contenido de material fino compuesto por partículas inferiores a 0.075 (TAMIZ 200) para los áridos.

$$\text{Contenido material fino} = \frac{\text{masa inicial de la muestra seca} * 100}{\text{masa de la muestra lavada y seca}}$$

3.3.5 Peso específico y absorción del agregado

Se define como la relación entre el peso del material y el volumen que ocupa el peso específico, no influye grandemente en las condiciones de resistencia o expansión del hormigón, más bien tiene influencia sobre el peso que tendrá el hormigón mismo.

Para la dosificación del hormigón el valor que generalmente se aplica es el peso específico bruto para muestra saturada con superficie seca (Gbs). El procedimiento para determinar el peso específico y absorción del agregado grueso se lo debe realizar en función de las especificaciones establecidas por la norma (ASTM C127) para el agregado grueso “método del cesto” y (ASTM C128) para el agregado fino “método del picnómetro”.

3.3.6 Peso Unitario

El peso unitario también denominado densidad aparente se denomina como el peso de una unidad de volumen cuando el agregado se encuentra a humedad de ambiente.

Esta prueba se realizará 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. Debe ser estanco, con tapa, fondo firme y parejo, con precisión en sus dimensiones inferiores y suficientemente rígidas para mantener su forma al ser maltratado.

Los recipientes con que cuenta el laboratorio de hormigones de SOBOCE 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 siguiente.

(Tabla21) Capacidad de recipientes

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

Teniendo el volumen y el peso del recipiente el cual se obtiene de la calibración, se procede a hacer el ensayo al agregado, tanto en la forma compacta, como en el estado suelto llenando el recipiente en tres capas. La muestra debe secarse en un horno a temperatura comprendida entre 105 °C y 110 °C. Para obtener un buen resultado hasta lograr el peso constante, la fórmula para calcular dicho peso unitario es el siguiente

$$PU = \frac{\text{Peso Agregado}}{\text{Volumen recipiente}}$$

3.4 COMPOSICIONES INICIALES DE LA MEZCLA A UTILIZAR

Para este proyecto se utilizara como referencia la composición de la mezcla propuesta por EFNARC, 2002, se utilizara esta composición por que nos da un detalle más amplio de los parámetros de cada material utilizado, para la elaboración de nuestro hormigón autocompactante, a continuación se presenta un listado de los parámetros de los materiales.

- Árido grueso entre el 28% a 35% por volumen de mezcla
- Relación agua/finos = 0,80 – 1,1 en volumen.
- Contenido total de finos de 160 a 400 L (400 a 600) kg/m³
- Contenido de arena más del 40% del mortero (volumen)
- Arena 50% que el volumen de la pasta.
- Arenas más del 50% por el peso del árido total.

- Agua libre menor a 200 L.
- Pasta mayor al 40% del volumen de la mezcla.
- Cantidad de cemento 350 a 450 kg/m³
- Contenido de aditivo superplastificante entre 0,6% a 2%
- Relación agua cemento entre 0,28 – 0,40 en pesos.

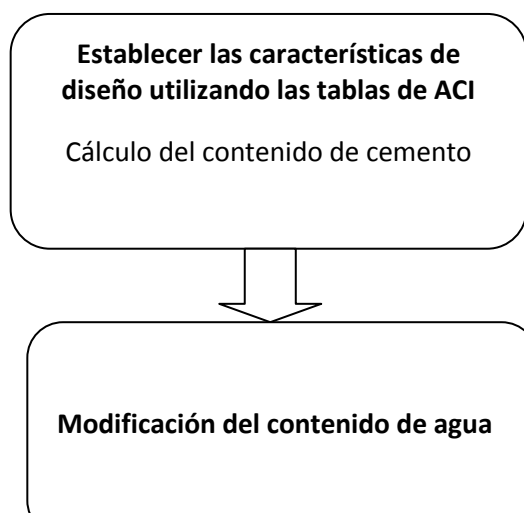
3.5 DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE

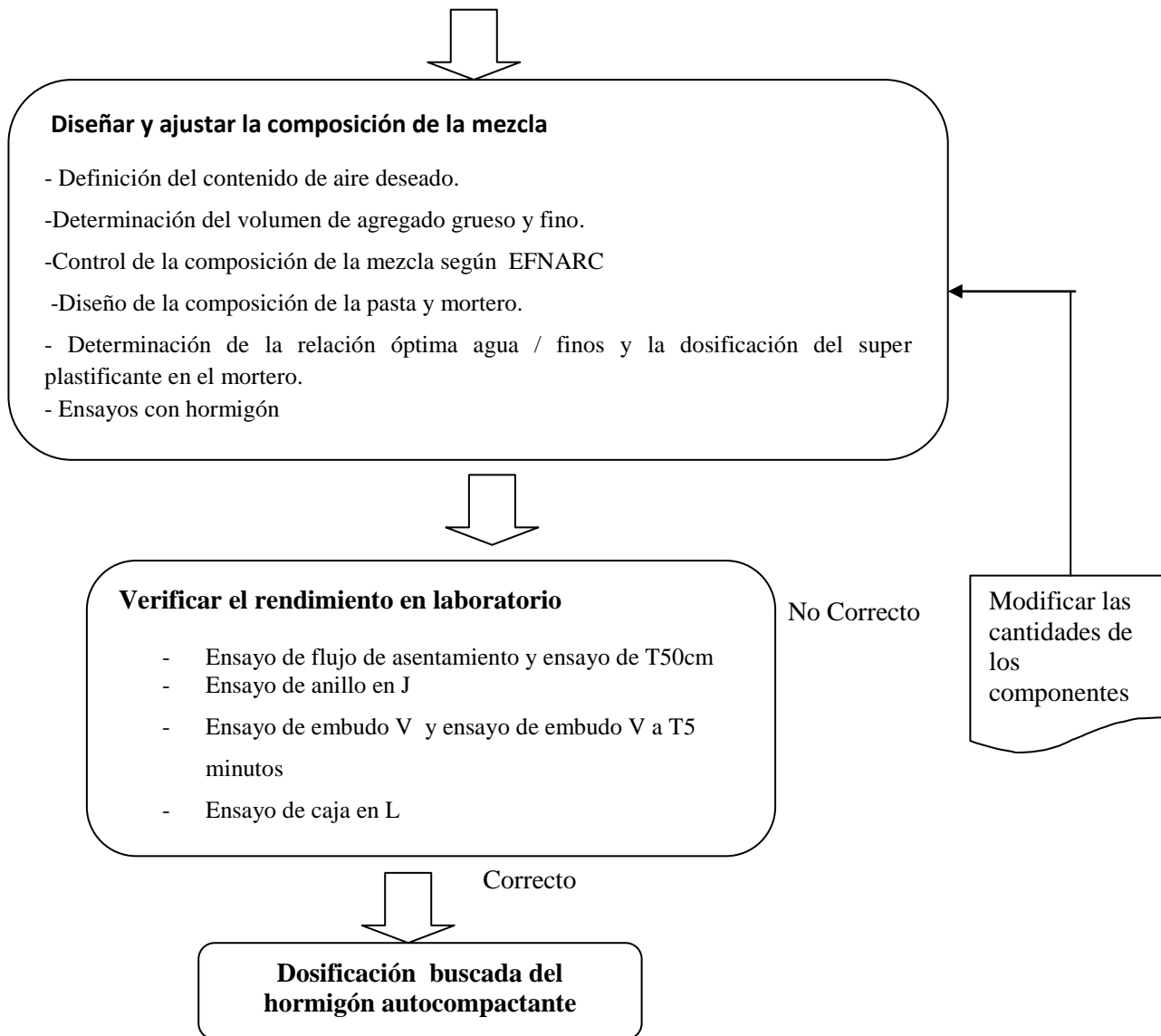
Un hormigón autocompactante debe cumplir simultáneamente sus propiedades en estado fresco por lo que su dosificación debe de estudiarse cuidadosamente. En la bibliografía existente se han identificado tres factores que influyen principalmente en el estado fresco del hormigón y son los siguientes:

- a) Volumen de árido grueso.
- b) Uso de aditivos superplastificantes y moduladores de la viscosidad, que como ya se ha dicho si se usa más de un tipo de aditivo se deben realizar pruebas de compatibilidad entre ambos y, entre el aditivo y el cemento.
- c) Las propiedades en estado fresco de la pasta y mortero.

La selección y el ajuste del diseño de la mezcla pueden efectuarse siguiendo el diagrama ilustrado a continuación.

PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DE LA MEZCLA SEGÚN EL MÉTODO GENERAL





3.5.1 Establecer las características de diseño utilizando las tablas de ACI

Se iniciará con el diseño del hormigón autocompactante utilizando el método de dosificación del ACI para hormigones convencionales. Con ayuda de las tablas se establece los siguientes parámetros.

- En primer lugar, se establece una resistencia media a la que se desea llegar (f_{ck})

- b) Cálculo de la resistencia característica (f_{ck}) utilizando la siguiente tabla 11.12 de ACI

Resistencia de diseño cuando no hay datos que permitan determinar la Desviación Estándar (a)	
Resistencia específica f_{ck} en (kg/cm²)	Resistencia de diseño de la mezcla f_{cm} en (kg/cm²)
Menos de 210 kg/cm ²	$f_{ck} + 70$ kg/cm ²
De 210 a 350 kg/cm ²	$f_{ck} + 85$ kg/cm ²
Más de 350 kg/cm ²	$f_{ck} + 100$ kg/cm ²

- c) Cálculo de asentamiento (s) con la tabla 11.4 de ACI

Asentamientos recomendados para diversos tipos de construcción y sistemas de colocación y compactación				
Consistencia	Asentamiento mm.	Ejemplo de Tipo de construcción	Sistema De colocación	Sistema de compactación
Muy seca	0-20	Prefabricados de alta resistencia, revestimiento de pantallas de cimentación	Con vibradores de formaleta; hormigones de proyección neumática (lanzados)	Secciones sujetas a vibración extrema, puede requerirse presión
Seca	20-35	Pavimentos	Pavimentadoras con terminadora vibratoria	Secciones sujetas a vibración intensa
Semi - seca	35-50	Pavimentos, fundaciones en hormigón simple	Colocación con máquinas operadas manualmente	Secciones simplemente reforzadas, con vibración
Media	50-100	Elementos compactados a mano, losas muros, vigas	Colocación manual	Secciones medianamente reforzadas, sin vibración
Húmeda	100-150	Elementos estructurales esbeltos	Bombeo	Secciones bastante reforzadas, sin vibración
Muy húmeda	150 o más	Elementos muy esbeltos, pilotes fundidos "in situ"	Tubo-embudo Tremie	Secciones altamente reforzadas, sin vibración (Normalmente no adecuados para vibrarse)

- d) Cálculo de asentamiento (s) con la tabla 11.13 de ACI

Correspondencia entre la Resistencia a la Compresión a los 28 días de edad y la relación Agua-Cemento para los cementos colombianos, Pórtland tipo I, en hormigones sin aire incluido			
Resistencia a la compresión Kg/cm²	Relación agua-cemento en peso		
	Límite superior	Línea media	Límite inferior
140	-	0,72	0,65

175	-	0,65	0,58
210	0,7	0,58	0,53
245	0,64	0,53	0,49
280	0,59	0,48	0,45
315	0,54	0,44	0,42
350	0,49	0,40	0,38

e) Requerimiento de agua tabla 11.6 de ACI

Requerimiento aproximado de agua de mezclado para diferentes asentamientos y tamaños máximos de agregado, con partículas de forma redondeada y textura lisa, en hormigón sin aire incluido									
Asentamiento		Tamaño máximo del agregado, en mm (pulg.)							
		9,51 3/8"	12,70 1/2"	19,00 3/4"	25,40 1"	38,10 1 1/2"	50,80 2"	64,00 2 1/2"	76,10 3"
mm	pulg.	Agua de mezclado, en Kg/m ³ de hormigón							
0	0	213	185	171	154	144	136	129	123
25	1	218	192	177	161	150	142	134	128
50	2	222	197	183	167	155	146	138	132
75	3	226	202	187	172	160	150	141	136
100	4	229	205	191	176	164	154	144	139
125	5	231	208	194	179	168	156	146	141
150	6	233	212	195	182	172	159	150	146
175	7	237	216	200	187	176	165	156	148
200	8	244	222	206	195	182	171	162	154

3.5.1.1 Cálculo del contenido de cemento

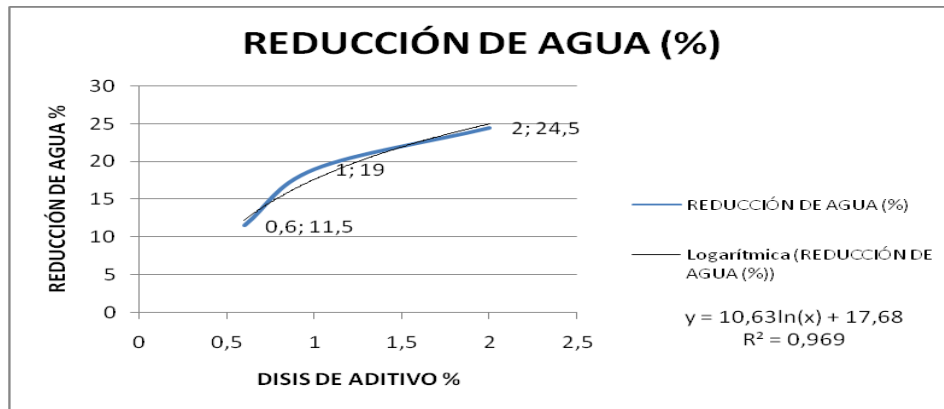
La cantidad de cemento se asumirá en el margen de 350 a 450kg/m³ según lo que nos dice las normas, siempre respetando los límites para no tener algunos problemas

3.5.2 Modificación del contenido de agua

Una vez establecido los parámetros de diseño se realiza una modificación al contenido de agua, se hace la modificación porque se usará un aditivo reductor de agua (VISCOCRETE 5-800), la modificación del contenido de agua se la realizará mediante una ecuación generada por la gráfica de proporción de aditivo versus el porcentaje de reducción de agua. La gráfica con su respectiva ecuación se muestra a continuación:

Figura 31

Modificaciones del contenido de agua



Estableciendo el porcentaje de aditivo se puede calcular con la ecuación el porcentaje de agua que lograría reducir, y este porcentaje es el que se lo restará al agua encontrada mediante tablas de ACI. Una vez encontrado el nuevo contenido de agua se calculará la relación de a/c para utilizar en las primeras pruebas de dosificación del hormigón autocompactante.

3.5.3 Diseño y ajuste de la composición para la mezcla

a) Definición del contenido de aire deseado (principalmente un 2%)

El contenido de aire puede establecerse en general en un 2 por ciento, o un valor superior que se especifica cuando quiere diseñarse hormigón resistente a los ciclos hielo-deshielo.

b) Determinación del volumen de agregado grueso y fino

Para encontrar el contenido de agregado grueso y arena se tendrá que utilizar el método de mínimos vacíos, que consiste en hacer varios pesos unitarios combinando los agregados en distintos porcentajes, hasta llegar a la óptima de combinación de los agregados (grava y arena), de esa manera se encontrará los porcentajes de estos últimos para nuestro hormigón autocompactante.

c) Control de la composición de la mezcla según EFNARC

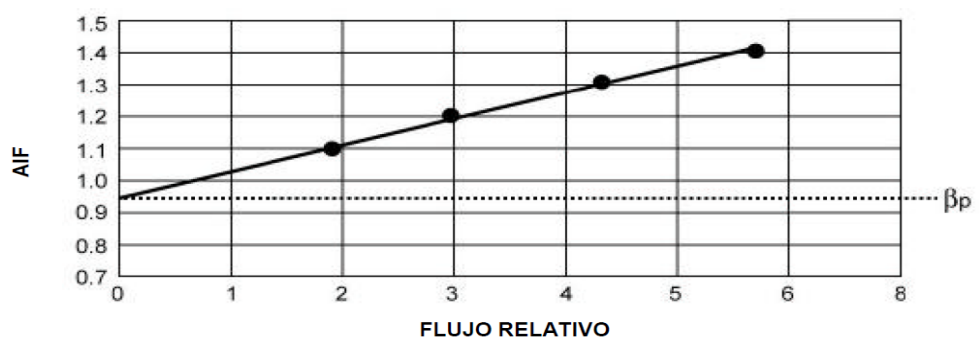
Una vez teniendo todas las cantidades de materiales para la dosificación se realiza un control de la composición de la mezcla, basándose en las especificaciones de EFNARC. En caso que no cumpliera con los requisitos se tendrá que realizar las modificaciones de los materiales que no cumplan con los parámetros.

d) Diseño de la composición de la pasta

Inicialmente la relación agua / finos para un flujo cero (β_p) se determina en la pasta, con la proporción elegida de cemento, incluye los finos (finos de la arena menores a 0.125mm).

Los ensayos de cono de flujo con relaciones agua / finos en volumen se realizan 1,1, 1,2, 1,3 y 1,4 para conocer los resultados habituales. El punto de intersección con el eje se designa como valor β_p . Este valor β_p suele utilizarse para el control de calidad respecto a la demanda de agua en nuevos lotes de cemento.

En la siguiente figura se da un ejemplo propuesto por (EFNARC), mostrando como se encuentra la relación A/F para un flujo cero.



(Figura 32) Determinación de la relación agua/ finos (EFNARC-2002)

e) Determinación de la relación óptima agua / finos y la dosificación del superplastificante en el mortero según Okamura.

Los ensayos con el cono de flujo y el embudo V para el mortero se efectúan con distintas relaciones agua / finos en el margen de [0,8 – 0,9] y dosificaciones de superplastificante. El superplastificante se utiliza para equilibrar la reología de la pasta.

Los valores requeridos son un flujo de 24 a 26 cm en el cono de flujo y un tiempo 7 a 11 segundos, en el Embudo V para morteros. Cuando se alcanza el objetivo de flujo y el tiempo del embudo V es inferior a 7 segundos, debe disminuirse la relación de agua / finos. Cuando se cumple el objetivo de flujo y el tiempo del embudo V es superior a 11 segundos, hay que aumentar la relación de agua / finos.

Si no pueden cumplirse estos criterios, la combinación concreta de materiales no es la adecuada. Un ensayo con un superplastificante distinto será la alternativa preferida. La segunda alternativa es un nuevo aditivo y como último recurso, un cemento diferente. (EFNARC-2002)

f) Ensayos con hormigón

La composición del hormigón ya está determinada y finalmente se ha seleccionado la dosificación de superplastificante basándose en los ensayos con hormigón.

3.5.4 Verificar el rendimiento en laboratorio

3.5.4.1 Ensayo de flujo de asentamiento y ensayo de T50cm

a) Equipamiento

- Molde en forma de un cono truncado, con las siguientes dimensiones internas: 200 mm de diámetro en la base, 100 mm de diámetro en la parte superior y una altura de 300 mm.

- Placa de asiento cuadrada de un material rígido no absorbente, de por lo menos 700x700 mm, marcada con un círculo que indica la ubicación central del cono de asiento, y otro círculo concéntrico de 500 mm de diámetro.
- Pala.
- Regla.
- Cronómetro (opcional).

(Figura 33)



Aspecto de un hormigón autocompactante donde se ha producido segregación del árido grueso en el centro y de pérdida de agua en el frente de avance del ensayo.

(Figura 34)



Ensayo de flujo asentamiento

a) Procedimiento

Se requieren 6 litros de hormigón para realizar el ensayo, que se toman como muestra de manera normal. Humedezca la placa de asiento y el interior del cono de asentamiento.

Coloque la placa de asiento sobre un terreno uniforme y estable y coloque el cono de asiento en el centro de dicha placa y manténgalo sujeto hacia abajo con firmeza. Llene

el cono con la pala. No tiene que compactarlo, tan sólo nivelar el hormigón de la parte superior del cono.

Quite el hormigón sobrante de alrededor de la base del cono. Eleve el cono verticalmente y permita que el hormigón fluya hacia el exterior libremente. De manera simultánea, inicie el cronómetro y registre el tiempo que requiere el hormigón para alcanzar el círculo de 500 mm. (Éste es el período T50.)

Mida el diámetro final del hormigón en dos direcciones perpendiculares. Calcule el promedio de los dos diámetros medidos. (Se trata del flujo de asentamiento en mm.) Observe cualquier borde del mortero o la pasta de cemento sin árido grueso en el límite del charco de hormigón.

c) Observaciones del ensayo

Cuanto mayor sea el valor del flujo de asentamiento (FA), mayor será su capacidad para llenar el encofrado por su propio peso. Se requiere un valor de *por lo menos* 650 mm para HAC. No existe un consejo generalmente aceptado sobre las tolerancias razonables sobre un valor específico, aunque 50 mm, como en la tabla alemana relacionada, puede ser adecuado.

El período T50 es una indicación secundaria del flujo. Un período inferior indica una mayor fluidez. La investigación Brite EuRam sugirió que un tiempo de 3-7 segundos es aceptable en aplicaciones de ingeniería civil, mientras que 2-5 segundos es correcto para las aplicaciones en edificación.

En el caso de una segregación grave la mayor parte del árido grueso permanecerá en el centro del charco de hormigón y el mortero y la pasta de cemento en la periferia del hormigón. En caso de una segregación menor puede producirse un borde de mortero sin árido grueso en el límite del charco de hormigón. Si no se produce ninguno de estos fenómenos, no es una garantía de que no se producirá segregación, puesto que se trata de un aspecto relacionado con el tiempo que puede producirse después de un período más extenso.

3.5.4.2 Ensayo de anillo en J

a) Equipamiento

- Molde SIN piezas de pie, en forma de un cono truncado, con unas dimensiones internas de 200 mm de diámetro en la base, 100 mm de diámetro en la parte superior y una altura de 300 mm.
- Placa base de asiento de un material rígido no absorbente, de por lo menos 700x700 mm, marcada con un círculo que indica la ubicación central del cono de asiento, y otro círculo concéntrico de 500 mm de diámetro.
- Pala
- Regla
- Anillo J
- Cuchara



(Figura 35) Combinación de ensayos extensión de flujo y anillo J

b) Procedimiento

Se requieren 6 litros de hormigón para realizar el ensayo, que se toman como muestra de manera normal. Humedezca la placa base de asiento y el interior del cono de asentamiento.

Coloque la placa de asiento sobre un terreno estable y coloque el Anillo J centrado en la placa base y el cono centrado en el Anillo J y manténgalo sujeto hacia abajo con firmeza. Llene el cono con la pala. No tiene que compactarlo, tan sólo nivelar el hormigón de la parte superior del cono con la llana.

Quite el hormigón sobrante de alrededor de la base del cono. Eleve el cono verticalmente y permita que el hormigón fluya hacia el exterior libremente. Mida el diámetro final del hormigón en dos direcciones perpendiculares. Calcule el promedio de los dos diámetros medidos (en mm).

Mida la diferencia de altura entre el hormigón justo en el interior de las barras y el que se encuentra justo en el exterior de las mismas. Calcule el promedio de la diferencia de altura en cuatro lugares (en mm). Observe cualquier borde del mortero o la pasta de cemento sin árido grueso en el límite del charco de hormigón.

c) Observaciones del ensayo

Hay que tener en cuenta que, a pesar de que estas combinaciones de ensayos miden el flujo y la capacidad de paso, los resultados no son independientes. El flujo medido se ve afectado por el grado en que el movimiento del hormigón está bloqueado por las barras de refuerzo.

El alcance del bloqueo se ve mucho menos afectado por las características de flujo y podemos decir que, de manera clara, cuanto mayor sea la diferencia de altura, *menor* será la capacidad de paso del hormigón.

El bloqueo y/o segregación también puede detectarse visualmente, con frecuencia de manera más fiable que mediante el cálculo.

3.5.4.3 Ensayo de embudo V y ensayo de embudo V a T5 minutos

a) Equipamiento

- Embudo en V.
- Balde (12 litros).
- Pala.
- Cronómetro.

b) Procedimiento para el tiempo de flujo

Se requieren unos 12 litros de hormigón para realizar el ensayo, tomados como muestra de manera normal. Fije de manera firme el embudo V sobre el suelo. Humedezca las superficies interiores del embudo.

Mantenga la trampilla abierta para permitir el drenaje del agua sobrante. Cierre la trampilla y coloque un balde debajo. Llene completamente el aparato con hormigón sin compactarlo o presionarlo, sólo tiene que nivelar el hormigón de la parte superior. Abra la trampilla 10 segundos después del llenado y permita que el hormigón salga por su propio peso. De manera simultánea, inicie el cronómetro y registre el tiempo.

Active el cronómetro al abrir la trampilla y registre el tiempo hasta que se complete la descarga (**el tiempo de flujo**). Se considera que se ha completado cuando se ve la luz desde la parte superior a través del embudo. El ensayo completo debe realizarse en 5 minutos.

- Procedimiento del tiempo de flujo en T5 minutos

No limpie ni humedezca de nuevo las superficies interiores del embudo. Cierre la trampilla y vuelva a llenar el embudo V después de medir el tiempo de flujo. Coloque un balde debajo. Llene el aparato completamente con hormigón sin compactarlo o presionarlo, sólo tiene que nivelar el hormigón de la parte superior con la llana.

Abra la trampilla 5 minutos después del segundo llenado del embudo y deje que el hormigón fluya hacia el exterior por su propio peso. De manera simultánea, active el cronómetro al abrir la trampilla y registre el período de la descarga hasta su conclusión (**el tiempo de flujo a T5 minutos**). Se considera que ha concluido cuando se ve la luz desde la parte superior a través del embudo.

c) Observaciones del ensayo

Este ensayo mide la facilidad para fluir del hormigón, un tiempo de flujo más breve indica una mayor fluidez. Para el HAC, un período de flujo de 10 segundos se considera adecuado. La forma de cono invertido restringe el flujo y los tiempos de flujo

prolongados pueden indicar la susceptibilidad de la mezcla al bloqueo. Después de 5 minutos de reposo, la segregación del hormigón mostrará un flujo menos continuo con un aumento en el período de flujo.

3.5.4.4 Ensayo de caja en L

a) Equipamiento

- Caja en L de un material rígido no absorbente.
- Pala
- Cronómetro



(Figura 36) Caja en L

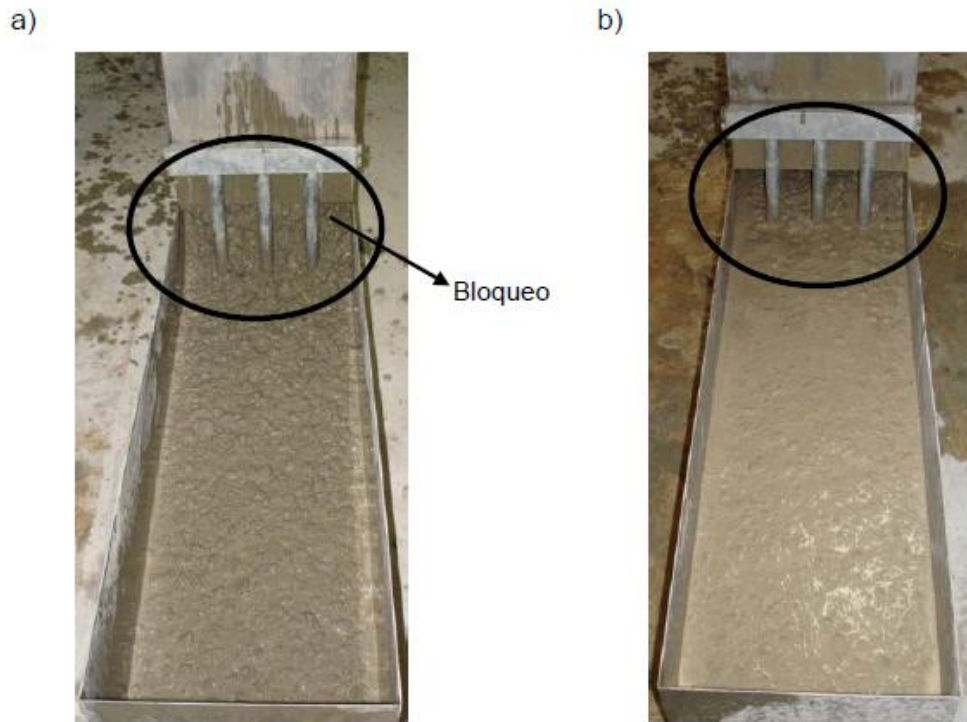
b) Procedimiento

Se precisan unos 14 litros de hormigón para realizar el ensayo, tomados como muestra de manera normal. Coloque el aparato sobre terreno firme y uniforme; asegúrese de que la compuerta deslizante puede moverse con libertad y luego ciérrela. Humedezca las superficies interiores del aparato y elimine el agua sobrante.

Llene la sección vertical del aparato con la muestra de hormigón. Déjelo reposar durante 1 minuto. Eleve la compuerta deslizante y deje que el hormigón fluya hacia la sección horizontal. De manera simultánea, active el cronómetro y registre los tiempos que requiere el hormigón para alcanzar las marcas de 200 y de 400 mm.

Cuando el hormigón deje de fluir, se miden las distancias “H1” y “H2”. Calcule $H2/H1$, **la relación de bloqueo**. Todo el ensayo ha de realizarse en menos de 5 minutos.

(Figura 37)



Resultado final del ensayo de la caja en L: a) hormigón autocompactante que presenta bloqueo, y b) hormigón autocompactante con una capacidad de paso adecuada

c) Observaciones del ensayo

Si el hormigón fluye tan libremente como el agua, en descanso estará horizontal, de modo que $H2/H1 = 1$.

En consecuencia, cuanto más cerca esté el valor de este ensayo, la “relación de bloqueo”, a la unidad, mejor será el flujo del hormigón. El equipo de investigación de la UE sugirió un valor mínimo aceptable de 0,8. Los períodos T20 y T40 pueden ofrecer una indicación sobre la capacidad de fluir, pero no hay un acuerdo general sobre los valores adecuados. Un bloqueo eficiente del árido grueso detrás de las barras de refuerzo puede detectarse visualmente.

3.6 MEZCLADO

Para iniciar la mezcla de todos los elementos que conforman el hormigón autocompactante, 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 75 litros, lo suficiente para llenar 2 carretillas, y fabricar los 6 cilindros



(Figura 38)

Mezcladora para hormigones

Antes de poner a rotar la mezcladora se coloca el agregados grueso, y parte del agua de mezclado, 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. Todos los componentes se deja batir por 2 minutos y se luego se introduce el aditivo (VISCOCRETE 5-800), 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. Una vez llegado al tiempo de mezclado se debe reposar durante 1 min, luego del reposo se debe continuar mezclando 1min mas. Es importante tapar la entrada de la mezcladora durante los minutos de reposo para prevenir la evaporación.

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 de ensayos para caracterizar el hormigón autocompactante,

3.7 ELABORACIÓN DE PROBETAS

La mezcla usada en los ensayos de extensión de flujo, la caja tipo “L” y el embudo en V no debe ser reutilizada. Pero para hacer las probetas del ensayo a compresión se debe tomar mezcla de la misma masada (del concreto ensayado en estado fresco). El concreto se debe colocar en el cilindro en una solo capa y sin picar ni compactar, y al final se debe enrasar el concreto. Luego se procede al curado primario de los cilindros, sumergiéndolos en agua durante un período de 48 horas a una temperatura de 68 a 78 °F (de 20 a 26 °C), dicha temperatura por tratarse de un concreto de alta resistencia.

(Figura 39) Elaboración de probetas



3.7.1 Llenado de probetas

Por último, se realiza un curado final a los especímenes, el cual debe iniciar a más tardar 30 minutos después de retirados los moldes de los cilindros. Los especímenes se sumergen en tanques de almacenamiento de agua o cuartos húmedos (que cumplan con la norma ASTM C-511) a una temperatura de $73 \pm 3^{\circ}\text{F}$ ($23 \pm 2^{\circ}\text{C}$), según norma ASTM C-31).

Cuando se coloquen las capas de azufre en las caras (inferior y superior) del cilindro, éstas deberán estar libres de humedad, para evitar la formación de vapor o bolsas de espuma (ASTM C-617).

La ASTM C-31 en el inciso 9.1.3.1 nos indica que si la temperatura ambiente se encuentra entre los 68 y los 86 °F (20 y 30 °C), los cilindros pueden mantenerse a la humedad ambiente.

3.8 CARACTERIZACIÓN DE LOS HORMIGONES AUTOCOMPACTANTES EN ESTADO ENDURECIDO

Los hormigones autocompactantes se pueden considerar de una forma similar a los hormigones convencionales pudiéndose aplicar las mismas formulaciones del hormigón convencional, pero teniendo en cuenta que son aproximativas.

Debido a las diferencias en dosificación entre el hormigón autocompactante y el convencional, en los últimos años se han realizado diversas investigaciones sobre las propiedades en estado endurecido del hormigón autocompactante. Hay que destacar que cuando se compara un hormigón autocompactante con uno convencional en estado endurecido, se hace con hormigones de resistencias similares.

3.9 ENSAYOS DE RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

Se procede a someter los cilindros a compresión, rompiendo 3 probetas a distintas edades (7, 14, 28, y 56 días).

(Tabla 22)

**Tolerancias permisibles para las edades de los cilindros
Sometidos a prueba de compresión**

Edad de la prueba	Tolerancia permisible
24 horas	± 0.50 horas o ± 2.10 %
3 días	± 2.00 horas o ± 2.80 %
7 días	± 6.00 horas o ± 3.60 %
28 días	± 20.00 horas o ± 3.00 %
90 días	± 2.00 días o ± 2.20 %

Fuente: Norma ASTM C-39 inciso 7.3

2.1 EL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE (HAC)

2.1.1 Definición

Es el hormigón que puede fluir por su propio peso y llenar completamente el encofrado, incluso en presencia de un armado denso, sin necesidad de ninguna vibración y que al mismo tiempo mantiene la homogeneidad.

2.1.2 Ventajas

- Una construcción más rápida.
- Reducción de la mano de obra necesaria para la puesta en ejecución.
- Un mejor acabado superficial.
- Mayor facilidad de colocación.
- Mejora de la durabilidad.
- Mayor libertad y posibilidades en el diseño.
- Secciones de hormigón más reducidas.
- Reducción de los niveles de ruido con la ausencia de vibraciones.
- Un entorno de trabajo más seguro.

2.1.3 Área de aplicación

El HAC puede utilizarse en aplicaciones de prefabricación y en obra civil o edificación, puede fabricarse en planta dosificadora en obra o en planta amasadora y ser transportado a obra en camiones. También puede aplicarse por bombeo o bien por vertido en estructuras horizontales o verticales.

Al diseñar la mezcla, es preciso tener en cuenta el tamaño y la forma de la estructura, así como también la dimensión y densidad del armado. Todos estos aspectos influyen en los requisitos específicos del HAC.

Debido a las características de fluidez del HAC, puede ser difícil su puesta en obra a no ser que se delimite mediante un encofrado. El H.A.C ha permitido ejecutar estructuras de hormigón de una calidad que era imposible con la tecnología del hormigón existente.

2.1.4 Clases de HAC

Así como ocurre con la definición de trabajabilidad del hormigón, el concepto de HAC debe asociarse y referirse al tipo de estructura a la que se destine el material, en este sentido también varía la zona de autocompactabilidad. En efecto, la capacidad de pasaje dependerá del espaciado de barras del elemento que está siendo llenado, el grado de resistencia a la segregación dependerá de los métodos de colocación y transporte y del tamaño, en particular la altura del elemento a llenar. En este sentido se han definido varias clases de HAC según sus aplicaciones.

Recientemente en las “European Guidelines for Self Compacting Concrete” se han propuesto diferentes clases de HAC en base al ensayo de escurrimiento, las mismas se sintetizan en la Tabla 1 indicando el rango de valores y algunos ejemplos de aplicación.

La capacidad de pasaje, la viscosidad y la resistencia a la segregación se toman en cuenta sólo si se considera específicamente necesario. La viscosidad puede valorarse a través del T_{50} en el ensayo de escurrimiento o del tiempo de vaciado del embudo en V (T_V); al respecto también se indican en la misma recomendación diferentes clases de HAC en base a los resultados de estos dos últimos datos.

(Tabla 1)

Clases de HAC en European Guidelines for Self Compacting Concrete

Clase	Escurrimiento	Aplicaciones	
SF1	550-650 mm	Losas de viviendas, túneles, pilotes y fundaciones.	
SF2	660-750 mm	Muros, columnas.	
SF3	760-850 mm	Estructuras densamente armadas.	

Clase	T_{50}	T_V	Aplicaciones
VS1/VF1	< 2 s	< 8 s	Estructuras muy armadas, con requisitos de terminación o riesgos de exudación o segregación.
VS2/VF2	> 2 s	9 – 25 s	Cuando se requiera mejorar la resistencia a la segregación.

2.2

PROPIEDADES DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE

2.2.1 Propiedades del HAC en estado fresco

La consistencia del HAC es superior que la clase de consistencia más elevada de un hormigón convencional y puede caracterizarse por las siguientes propiedades en estado fresco:

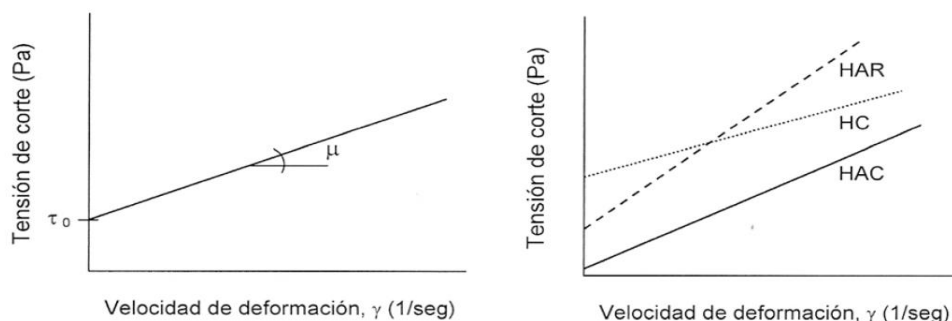
- Propiedades reológicas
- Capacidad de relleno
- Capacidad de paso
- Resistencia a la segregación
- Fiabilidad
- Tiempo abierto

2.2.1.1 Propiedades reológicas del H.A.C

Los estudios reológicos han permitido comprender el comportamiento del HAC y de ese modo han contribuido a un diseño más racional de este nuevo hormigón. En la figura siguiente se comparan en forma esquemática curvas de flujo de un HAC, un hormigón convencional (HC) y un hormigón fluido de alta resistencia (HAR).

Un HAR posee habitualmente mayor viscosidad plástica que un HC, en gran parte debido a su menor relación agua/ligante, y también presenta menor umbral de cizallamiento. Por su parte un HAC posee tensión umbral casi nulo y una viscosidad suficiente para garantizar el transporte, llenado y consolidación del hormigón sin que segregue.

(Figura 2) Propiedades reológicas



2.2.1

.2

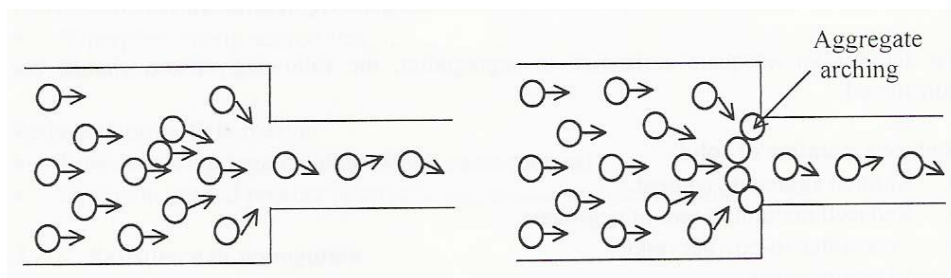
Capacidad de relleno

Se refiere a la Capacidad del HAC para rellenar completamente todas las zonas del encofrado así como recubrir y fluir a través de las armaduras, sin formación de vacíos (perfecta compactación) y sin la necesidad de vibrado ni otros métodos de compactación externos.

2.2.1.3 Capacidad de paso

Es la capacidad para fluir libremente del HAC a través del armado, ofreciendo un perfecto relleno, sin indicios de bloqueo del árido grueso ni otros fenómenos relacionados con la pérdida de homogeneidad (segregación y exudación).

(Figura 3) Mecanismo de bloqueo



2.2.1.4 Resistencia a la segregación

La resistencia a la segregación es la capacidad del hormigón de mantenerse homogéneo sin que se produzca la separación de los áridos o exudación del agua. Esta propiedad del hormigón está relacionada con la estabilidad y con la viscosidad de la mezcla porque si se tiene una viscosidad adecuada, la composición de la mezcla se mantiene homogénea

2.2.1.5 Fiabilidad

Es la capacidad del hormigón de mantener sus características en estado fresco dentro de Los rangos especificados cuando se producen pequeñas variaciones en las propiedades de los componentes, la variación de la temperatura o una combinación de ambos (ACHE, 2008).

2.2.1.6 Tiempo abierto

Se define tiempo abierto al lapso de tiempo desde la fabricación durante el cual se mantienen las características de autocompactabilidad de dicho hormigón (ACHE, 2008). Al igual que en el hormigón convencional influyen la temperatura, las condiciones climáticas o los aditivos, entre otros factores.

2.2.2 Propiedades Estructurales

El hormigón autocompactante y el hormigón vibrado convencional, tienen propiedades comparables con fuerzas similares de compresión y si hay diferencias, quedan cubiertas por las normas de seguridad en las que se basan los códigos de diseño. No obstante, la composición del HAC no difiere mucho del hormigón convencional.

La durabilidad, es decir, la capacidad de la estructura de hormigón para resistir las agresiones medio ambientales durante su vida de diseño sin perder las propiedades de los requisitos de trabajo, normalmente se considera mediante la especificación de los tipos de ambiente. Esto condiciona los valores límites de la composición del hormigón y el recubrimiento mínimo del armado.

En el diseño de estructuras de hormigón, los técnicos precisan unas propiedades del hormigón, que no siempre están en sus especificaciones. Las más relevantes son:

- Resistencia a compresión
- Resistencia a tracción
- Módulo de elasticidad
- Fluencia
- Retracción
- Coeficiente de dilatación térmica
- Adherencia a las armaduras
- Resistencia al cortante en juntas frías
- Resistencia al fuego
- Durabilidad

2.2.2.1 Resistencia a compresión

El hormigón autocompactante con una relación agua / cemento similar a la de un hormigón vibrado convencional tendrá normalmente un valor de resistencia a la compresión ligeramente superior, debido a que la falta de vibrado da una mayor interfase entre el árido y la pasta endurecida. El desarrollo de las resistencias será similar, por lo que un ensayo de evolución de resistencias será una forma efectiva de controlar este parámetro, independientemente de que se usen sistemas de curado acelerado.

Algunas de las propiedades del hormigón están relacionadas con la resistencia a la compresión del hormigón, que es la única propiedad estructural que se especifica y se ensaya de forma sistemática.

2.2.2.2 Resistencia a tracción

El hormigón autocompactante debe ser suministrado con una resistencia a la compresión especificada. Para una clase y un curado del hormigón dados, puede asumirse con seguridad una resistencia a tracción con el mismo valor que la de un hormigón convencional, puesto que el volumen de la pasta (cemento + finos + agua) no tienen un efecto significativo en el valor de la resistencia de tracción.

En el diseño de las secciones de hormigón armado, el diagrama de resistencia a tracción del hormigón se usa para la evaluación del momento de fisuración en elementos pretensados, para el diseño de la armadura de control del estado límite de fisuración y de la separación resultante de fisuraciones térmicas por retracción a edades tempranas, para representar los diagramas momentos - deformaciones, para el diseño de pavimentos de hormigón en masa y para hormigón armado con fibras.

2.2.2.3 Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad (E, relación entre tensión y deformación), se usa en el cálculo de la deformación elástica, y es a menudo un parámetro de control en el diseño de elementos de hormigón armado, y de elementos pretensados y postensados.

En la medida en que la mayor parte del volumen en el hormigón son los áridos, el tipo y la cantidad de áridos empleados, así como el valor de su módulo elástico, tienen una

gran influencia. La selección de un árido con un valor E elevado incrementará el módulo de elasticidad E del hormigón. Sin embargo, el incremento del volumen de pasta podría disminuir el valor de E. Puesto que a menudo el HAC tiene un mayor contenido de pasta que el hormigón vibrado convencional, cabe esperar ciertas diferencias y el valor E será menor, pero esto se puede cubrir adecuadamente mediante los coeficientes de seguridad

Si el HAC tiene un módulo E menor que el hormigón vibrado convencional, esto afectará la relación entre la resistencia a compresión y la flecha debida al pretensado o post-tensado. Por esta razón, debe haber un control meticuloso del valor de la tensión en el momento que se tesan o destesan los cables o las barras de pretensión y postensión.

2.2.2.4 Fluencia

Se define la fluencia como el incremento gradual de deformación en función del tiempo para una tensión constante aplicada, considerando otras deformaciones dependientes del tiempo no asociadas a las cargas aplicadas, por ejemplo: retracción, expansión y deformaciones térmicas.

La fluencia en secciones a compresión reduce las fuerzas de tensión en elementos de hormigón pretensado y causa una lenta transferencia de carga desde el hormigón hasta la armadura. La fluencia en tracción puede ser beneficiosa puesto que ésta en parte disminuye las tensiones inducidas por otros movimientos de retracción, por ejemplo: la fisuración por secado y los movimientos de origen térmico.

La fluencia tiene lugar en la pasta de cemento y está influenciada por la porosidad, la cual está directamente vinculada con la relación agua-cemento. Durante la hidratación, la porosidad de la pasta de cemento se reduce, por lo que, para un hormigón dado, la fluencia se reduce cuando la tensión aumenta.

El tipo de cemento es importante si la edad de entrada en carga está determinada. Cementos que hidraten más rápidamente tendrán mayor resistencia a la edad de entrada en carga, una menor relación tensión – deformación y una menor fluencia. Como los

áridos restringen la deformación del cemento, a mayor volumen de áridos y mayor módulo E del árido, menor será la fluencia.

Debido a un mayor volumen de pasta de cemento, el coeficiente de deformación esperado para el HAC será mayor que el de un hormigón convencional de igual resistencia, pero estas diferencias son pequeñas y quedan cubiertas por los factores de seguridad de las tablas y formularios proporcionada en la Euronorma.

2.2.2.5 Retracción

La retracción es la suma de la retracción autógena y de la retracción por evaporación de agua. La retracción autógena tiene lugar durante el fraguado y es originada por el consumo interno de agua durante la hidratación. El volumen de los productos resultantes de la hidratación es menor que el volumen original del cemento deshidratado y del agua y esta reducción de volumen causa esfuerzos de tracción que originan la retracción autógena.

La retracción por evaporación de agua está causada por la pérdida de agua del hormigón a la atmósfera. Generalmente esta pérdida de agua procede de la pasta de cemento, pero en algunos pocos tipos de áridos la mayor pérdida de agua procede de los áridos. La retracción por evaporación de agua es relativamente baja y las tensiones que induce en parte se equilibran por la aportación de las tensiones de fluencia.

Los áridos reducen la retracción de la pasta de cemento, por lo que para un mayor volumen de áridos con mayor módulo E de los mismos, menor será la retracción por evaporación de agua. Una disminución del tamaño máximo de los áridos, que implica un mayor volumen de pasta, incrementa la retracción por evaporación de agua.

Como la resistencia de compresión del hormigón depende de la relación agua-cemento, en el HAC con una menor relación agua-cemento, se reduce la retracción por evaporación de agua y la retracción autógena puede ser mayor que ésta.

Ensayos realizados en fluencia y retracción de diferentes tipos de HAC y un hormigón de referencia demuestran que:

- La deformación causada por retracción puede ser mayor.

- La deformación causada por fluencia puede ser menor.
- El valor de la suma de deformaciones (retracción y fluencia) son prácticamente similares.

Debido al obstáculo que representan las armaduras en la sección transversal la tensión de retracción causará tracción en el hormigón y compresión en el armado.

2.2.2.6 Coeficiente de dilatación térmica

El coeficiente de dilatación térmica del hormigón es la deformación producida en éste después del cambio de una unidad de temperatura cuando el hormigón no tiene impedimentos ni internos (por las armaduras) ni externos.

El coeficiente de dilatación térmica del hormigón varía con la composición, la edad y el contenido de humedad. Como la masa de hormigón comprende los áridos, usando áridos con un menor coeficiente de dilatación térmica se reducirá el coeficiente de dilatación térmica del hormigón resultante. Reduciendo el coeficiente de dilatación térmica se obtiene una reducción proporcional en el control de fisuración producido por las armaduras.

Mientras que el rango del coeficiente de dilatación térmica es de 8 a 13 microcontracciones/K, en la PNE-EN 1992 se establece que, a falta de información más precisa, deberá de tomarse de 10 a 13 microcontracciones/K. Estos mismos valores se asumirán para el HAC.

2.2.2.7 Adherencia en las armaduras, el pretensado y los cables

El hormigón armado se basa en una unión efectiva entre el armado y el hormigón. La adherencia del hormigón debe ser suficiente para prevenir el fallo de la unión. La efectividad de la adherencia está afectada por la forma de las barras embebidas y la calidad del hormigón como recubridor. Se necesita un recubrimiento adecuado del hormigón para facilitar una buena transferencia de las tensiones de enlace entre el acero y el hormigón.

Una deficiente adherencia está originada a menudo por un recubrimiento bajo de las barras durante la colocación o por exudación y segregación del hormigón antes de su endurecimiento, lo que reduce la calidad del contacto en la parte inferior de la superficie de las armaduras. La fluidez y cohesión del HAC minimiza estos efectos negativos, especialmente para la parte superior de las barras en grandes secciones de hormigón armado

2.2.2.8 Capacidad de esfuerzo cortante entre capas de hormigonado

La superficie del HAC endurecido después del vertido y fraguado será más bien lisa e impermeable. Sin tratamiento alguno de la superficie después de la primera capa, la capacidad de esfuerzo cortante entre la primera y la segunda capa puede ser menor que la de un hormigón convencional vibrado y puede, por lo tanto, ser insuficiente para soportar alguna fuerza a cortante.

2.2.2.9 Resistencia al fuego

El hormigón es incombustible y no propaga las llamas. No produce humo, gases tóxicos o emisiones cuando está expuesto al fuego y no contribuye a la carga de fuego, el hormigón tiene una relación baja de transferencia de calor, por lo que se convierte en un buen corta fuegos para compartimientos adyacentes y bajo unas condiciones normales de incendio, el hormigón mantendrá prácticamente su resistencia. La Comisión Europea ha dado al hormigón la máxima designación posible de fuego, A1.

La resistencia al fuego del HAC es similar a la de un hormigón convencional. En general un hormigón con una menor permeabilidad será más resistente al escamado pero los daños dependerán del tipo de árido, de la calidad del hormigón y del contenido de humedad .El HAC puede alcanzar con facilidad los requisitos de alta resistencia y baja permeabilidad y se comportará de modo parecido a cualquier hormigón habitual de alta resistencia bajo condiciones de fuego.

El uso de fibras de polipropileno en el hormigón ha demostrado cierta efectividad en cuanto a mejora de la resistencia al escamado. Se cree que esto sucede debido a que las fibras se funden y son absorbidas por la matriz de cemento. Los vacíos de las fibras

sirven de cámara de expansión para el vapor, reduciendo entonces el riesgo de escamado. Las fibras de polipropileno se han usado satisfactoriamente en HAC.

2.2.2.10 Durabilidad

La durabilidad de una estructura de hormigón está íntimamente ligada a la permeabilidad de la capa superficial, la que limita la entrada de sustancias que pueden iniciar o propagar posibles acciones degradantes (CO₂, cloruro, sulfato, agua, oxígeno, alcalinos, ácidos, etc.). En la práctica, la durabilidad dependerá del material seleccionado, la composición del hormigón, así como del grado de supervisión durante la colocación, compactación, acabado y curado.

Una falta de compactación de la capa superficial, debido a las dificultades de vibración en zonas estrechas entre el encofrado y las barras de armado u otros intersticios (p.e. conductos de post-tensión) ha sido reconocida como un factor determinante de la baja durabilidad de las estructuras de hormigón armado expuestas a ambientes agresivos. El desarrollo inicial del HAC en Japón surgió básicamente para resolver estas situaciones.

La compactación del hormigón convencional se realiza por la vibración (o apisonado), que es un proceso discontinuo. En el caso de vibraciones internas, aún cuando se ejecuten correctamente, el volumen de hormigón respecto al área de influencia del vibrador no recibe la misma energía de compactación. De forma similar, en el caso de vibraciones externas, el resultado de compactación es esencialmente heterogéneo, dependiendo de la distancia de la fuente de vibrado.

El resultado de la vibración es, por tanto, un hormigón con una estructura de compactación irregular y, por lo tanto, con distintas permeabilidades, lo que aumenta la entrada selectiva de sustancias agresivas. Naturalmente, las consecuencias de un vibrado incorrecto (coqueras, segregación, exudación, etc.) tiene un efecto mucho más negativo en la permeabilidad, y por tanto, en la durabilidad.

El HAC con las propiedades adecuadas estará libre de estos defectos y resulta un material de permeabilidad baja y uniforme, ofreciendo menos puntos débiles para acciones de deterioro ambiental y, por lo tanto, mejor durabilidad. La comparación de la permeabilidad entre el HAC y un hormigón vibrado convencional dependerá de los materiales seleccionados y de la relación efectiva de agua-cemento o agua-cementante.

2.3 COMPONENTES DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE

Básicamente son los mismos que se utilizan en la elaboración del hormigón convencional, trayendo como consecuencia que al utilizarse los mismos materiales locales que se utilizan en la elaboración del hormigón tradicional, resulte ventajoso económicamente, pues no hay que incurrir en gastos extras de transporte. Sin embargo, en la elaboración del hormigón autocompactante se utilizan componentes adicionales, tales como los agentes modificadores de viscosidad y los finos minerales, necesarios para evitar la segregación y exudación del hormigón durante su colocación y para obtener la cohesión necesaria de la mezcla.

En cuanto al cemento y a los áridos, a excepción de la limitante del tamaño máximo del árido, éstos no tienen que cumplir con requisitos específicos adicionales a los que se exigen para la elaboración del hormigón convencional, lo cual también es otra ventaja. Otro componente en la elaboración del hormigón autocompactante son los superplastificantes, su uso es fundamental e imprescindible para su elaboración, existiendo en el mercado una gran gama de tipos y variedades. En la figura 4 pueden compararse las proporciones entre el hormigón autocompactante y el hormigón convencional y en la figura 5 la composición esquemática del hormigón autocompactante.

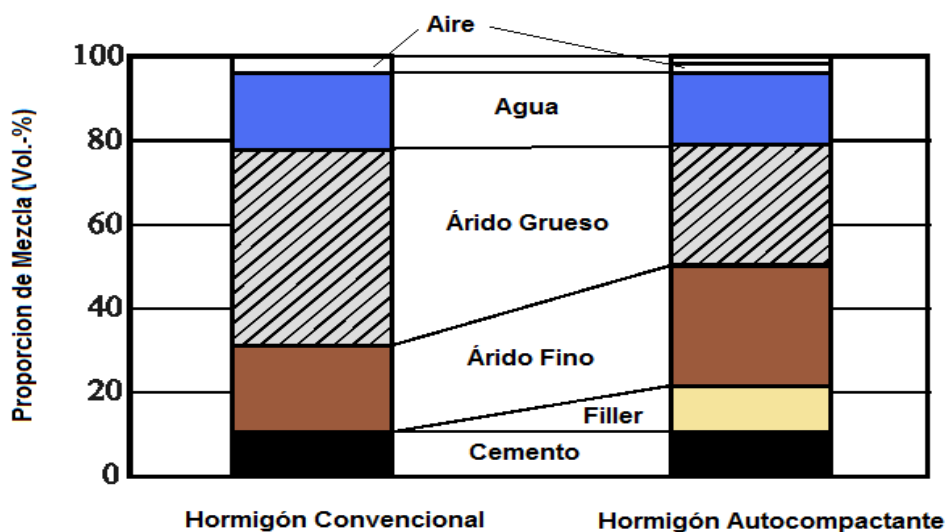


Figura 4. Comparación de proporciones entre una mezcla de hormigón convencional

y una de hormigón autocompactante. (Holschemacher y Klug, 2002).

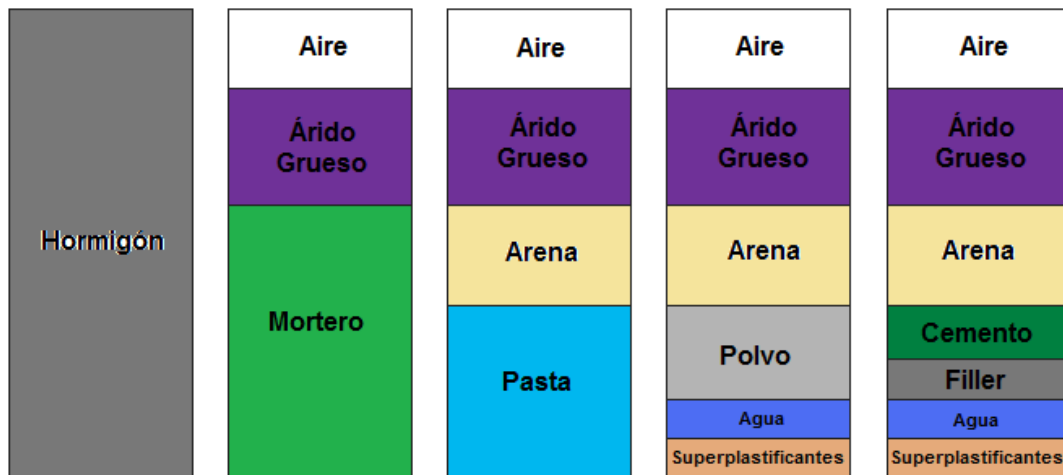


Figura 5. Composición esquemática del hormigón autocompactante (Brouwers y Radix, 2005).

Dada la importancia de todos estos componentes en la elaboración del hormigón autocompactante, a continuación se detallan cada uno de ellos.

2.3.1 Cemento

El cemento comúnmente utilizado para la elaboración del hormigón autocompactante, el mismo que se utiliza en la elaboración del hormigón convencional, por lo tanto, es un cemento sin requisitos específicos en cuanto a sus características o tipo. Se pueden usar todos los cementos que cumplan con la normativa UNE-EN 197-1 para la elaboración del hormigón autocompactante (EFNARC, 2006).

Sin embargo, existen cementos no convencionales que por sus características son muy apropiados para elaborar hormigón autocompactante, como el cemento con alto contenido de belita (40%-70%) que hace que se obtengan mayores resistencias a largo plazo y un menor calor de hidratación (Uomoto y Ozawa, 1999). Esto último es muy significativo, pues en la elaboración de hormigón autocompactante se utilizan generalmente grandes cantidades de cemento, lo cual favorece enormemente la retracción y la consecuente fisuración del hormigón, de allí la importancia de utilizar un cemento de bajo calor de hidratación. Por otro lado, la utilización de cementos más

finos, debido a su mayor velocidad de hidratación, contribuye a ganar resistencia en el hormigón (Neville, 1997).

La cantidad de cemento utilizada para la elaboración del hormigón autocompactante, es generalmente mayor que la del hormigón convencional y oscila de acuerdo a algunos investigadores e institutos de investigación, entre un mínimo de 350 Kg/m³ y un máximo de 550 Kg/m³ (Khayat et al., 1999), (EFNARC, 2002), (Gomes,2002), (Fernández, 2007). Estas cantidades de cemento hacen que se deba tener especial atención cuando sus contenidos se sitúen en los extremos, ya que cantidades mayores de 450 Kg/m³ pueden aumentar considerablemente la retracción y el calor de hidratación y cantidades menores de 350 Kg/m³, solo podrían tener un uso adecuado si se incluyen adiciones en la dosificación de las mezclas

2.3.2 Agregados

Al igual que para el caso de cemento, los agregados normalmente usados son los mismos que se utilizan para elaborar el hormigón convencional, sin necesidad de tener que cumplir algún tipo de exigencia adicional, salvo lo relativo a su tamaño máximo, el cual no debe ser mayor de 20 mm.

El objetivo de limitar el tamaño máximo del árido es obtener una mayor uniformidad en el movimiento y un menor riesgo de bloqueo en el flujo de la mezcla. En la prefabricación de elementos de hormigón, los mejores resultados se obtienen con un tamaño máximo del árido de 12 mm.



Figura 6. Agregados grueso tradicional con un tamaño máximo entre 8 y 16 mm. (Rizwan, 2006).

Los agregados ocupan típicamente las tres cuartas partes del volumen en el hormigón autocompactante, deben estar libres de suciedad, ser durables y no deben tener sustancias que reaccionen químicamente con el cemento. Se clasifican en agregado grueso (pedrín o grava) y agregado fino (arena de río, o triturada).

Las principales características de los agregados que afectan la calidad del hormigón son: forma geométrica, granulometría, propiedades mecánicas e interacción química con la pasta.

La granulometría y la forma de los agregados, especialmente de los agregados gruesos influyen directamente en la capacidad de paso y en la fluidez de las mezclas del hormigón autocompactante. En la medida en que los áridos tiendan a ser esféricos, como los áridos rodados, menores serán los bloqueos y mayor la fluidez, ya que se reduce el rozamiento entre ellos. (EFNARC, 2006).

La clasificación entre agregado fino y agregado grueso, se realiza con base a su tamaño de la siguiente manera: el fino es el que pasa a través del tamiz número 4 (4.75 mm.), según la ASTM C-33 y el agregado grueso es el que queda retenido en dicho tamiz.

Las partículas menores a 0,125 mm, no se consideraran como parte de los agregados sino como parte del contenido total de finos del hormigón autocompactante y se tomarán en cuenta para el cálculo de la relación agua/finos. (EFNARC, 2006).

Una adecuada distribución granulométrica del agregado, debe lograr el máximo acomodamiento y por lo tanto alta compactación de las partículas para obtener la máxima densidad unitaria y un mínimo consumo de agua, así como una mayor contribución a la capacidad resistente. Normas de distintos países establecen límites de graduación continua completa como la ASTM C-33.

La forma ideal de los agregados es la redondeada para los cantos rodados y la cúbica para los triturados. Estos últimos tienen una mayor adherencia, aunque los lisos redondeados requieren menos agua para obtener un hormigón de elevada fluidez.

2.3.2.1 Agregado fino

No existen limitaciones en cuanto a la naturaleza de las arenas empleadas. Sobre su distribución de tamaños, es necesario emplear arenas continuas, sin cortes en su granulometría, y preferiblemente sin formas lamosas (típico de las arenas silíceas machacadas).

Su cantidad deberá estar en consonancia con la cantidad de grava. Generalmente el contenido de la arena puede representar el 60% o el 50% de la cantidad de árido total, en función de la naturaleza y cantidad de la adición empleada de cemento y de las características de la grava.

Es preferible que un cierto porcentaje de finos pase por el tamiz 100 (por parte de las arenas) ya que esto puede reducir la demanda de adición de cemento para corregir los 500-550 Kg/m³ de finos demandados.

2.3.2.2 Agregado grueso

Las mayores exigencias en cuanto a materiales para la elaboración del hormigón autocompactado están en la grava. A pesar de que no existe limitación en cuanto a su naturaleza, si existen limitaciones con el tamaño máximo y el coeficiente de forma. El tamaño máximo del árido se limita a 25.4 mm. (1”), aunque es preferible limitarlo a 20 mm. (3/4”). Evidentemente, el tamaño máximo del árido deberá guardar relación con la distancia entre armaduras, pero dado el caso que fuere posible trabajar con tamaños superiores a 25.4 mm., no deberá excederse de éste, ya que implica un elevado riesgo de bloqueo y segregación de la masa. De todas formas, los mejores resultados globales se consiguen empleando tamaños entre 9 y 16 mm. (3/8” y 5/8”).

2.3.3 Adiciones

Constituyen los distintos tipos de finos que se emplean en la elaboración del hormigón, con la finalidad de obtener características específicas y que son generalmente utilizados como material reemplazante del cemento con el objeto de reducir costos y mejorar la trabajabilidad de las mezclas (Figura 7). Quedan definidos por el tamaño máximo de sus partículas, las cuales varían normalmente entre 80 y 125 micras, (EFNARC, 2005) ó menores de 125 micras (EHE-08). Se pueden clasificar como predominantemente

inertes, tales como los filleres calizos, filleres de cuarzo, polvo de mármol o polvo de granito o predominantemente reactivas, como las puzolanas, las cenizas volantes, el humo de sílice, la cáscara de arroz y el metacaolin. Las adiciones más utilizadas son el polvo calizo, el polvo de cuarzo, el humo de sílice, las cenizas volantes y las escorias de alto horno.

El objetivo principal al utilizarlos es el de proporcionarle a la mezcla la cohesión adecuada para evitar la segregación de los áridos gruesos y la exudación del agua durante su colocación, así como también mejorar sus propiedades tanto en estado fresco como en su estado endurecido (Gomes, 2002). Mejoran el comportamiento de la microestructura interna del hormigón, aumentan la viscosidad de las mezclas y disminuyen su permeabilidad. Suministradas en cantidades apropiadas mejoran tanto la trabajabilidad como la durabilidad, sin afectar de las resistencias iniciales y mejorando en líneas generales sus propiedades mecánicas. (De Holanda, 2006).

También permiten reducir el contenido de cemento de la pasta, pero incrementando su volumen para lograr la deseada trabajabilidad de las mezclas de hormigón autocompactante, disminuyendo de esta manera la retracción, el calor de hidratación y evitando la fisuración interna (Mata, 2004).



Figura 7. Distintos tipos de adiciones utilizados en la elaboración del hormigón autocompactante.

2.3.4 Agua

Al igual que en la elaboración de los hormigones convencionales el agua de amasado del hormigón autocompactante para que sea apta debe de estar limpia y encontrarse

libre de impurezas para no producir alteraciones en la hidratación del cemento, retrasos en el fraguado y en su endurecimiento, ni permitir reducciones en sus resistencias o afectar su durabilidad. Su misión, aparte de la hidratación del cemento y de los demás componentes activos, es de actuar como lubricante haciendo que la masa en estado fresco sea trabajable y también la de crear espacios en la pasta para albergar los productos resultantes de la hidratación del cemento.

Hay que tener presente que el uso de aguas de amasado con impurezas actuarán sobre el hormigón de forma diferente, pues dependerá del tipo de cemento usado y de la cantidad utilizada en la dosificación. Algunas impurezas presentes en el agua, como los cloruros pueden dar lugar a eflorescencias en el hormigón y provocar la corrosión de las armaduras.

Hay la convicción que las aguas potables, aptas para la bebida, a excepción de algunas aguas minerales, lo son también para el amasado del hormigón, aunque pueden existir aguas no potables que sean aptas para la elaboración del hormigón.

Por regla general las aguas que son inodoras, incoloras e insípidas y que no forman espumas o gases cuando son agitadas, pueden ser utilizadas como aguas de amasado para el hormigón. Sin embargo deberán evitarse aquellas aguas que contengan azúcares, taninos, materia orgánica, aceites, sulfatos, sales alcalinas, gas carbónico, así como productos procedentes de residuos industriales (Fernández, 2007).

2.3.5 Agentes reductores de agua de alto rango (Superplastificantes).

Los superplastificantes o agentes reductores de agua de alto rango son el producto de la evolución de aquellos primeros reductores a base de ligno-sulfatos que se utilizaban en la década de los treinta del siglo pasado y que permitían en ese entonces reducir hasta en un 10% el agua de las mezclas de hormigón (Tabla 2).

Posteriormente fueron evolucionando hasta llegar a los superfluidificantes o superplastificantes de última generación, imprescindibles hoy en día en la elaboración del hormigón autocompactante.

Tabla 2.

Evolución de los agentes reductores de agua
(Izquierdo, 2001)

Desarrollo histórico de los aditivos reductores de agua			
1930	1970	1990	2000
Ligno-sulfonatos	Melamina y Naftaleno	Polímeros vinílicos	Policarboxilatos
Reducción de agua hasta un 10% Tendencia a producir retrasos en el fraguado cuando se utiliza en altas dosis	Reducción de agua hasta un 20% Melaminas aumentan resistencias a edades tempranas y pueden dar una pérdida muy rápida de la trabajabilidad de las mezclas Naftalenos pueden ocluir aire, aunque en cantidades no muy elevadas	Reducción de agua hasta un 30% Confieren mayor tiempo de manejabilidad al hormigón y mayor trabajabilidad que las melaminas.	Reducción de agua hasta un 40% Otorgan a las mezclas de una gran fluidez durante largos periodos de tiempo, muy superior a los que confieren los reductores basados en polímeros vinílicos.

En la figura 8 se observa como es el comportamiento y el porcentaje de reducción de agua entre estos superplastificantes de última generación en base a policarboxilato y los plastificantes y superplastificantes tradicionales. A medida que se aumenta la dosis aumenta la reducción de agua, sin embargo a igualdad de dosis el efecto de los superplastificantes de última generación es muy superior. En la figura 9.

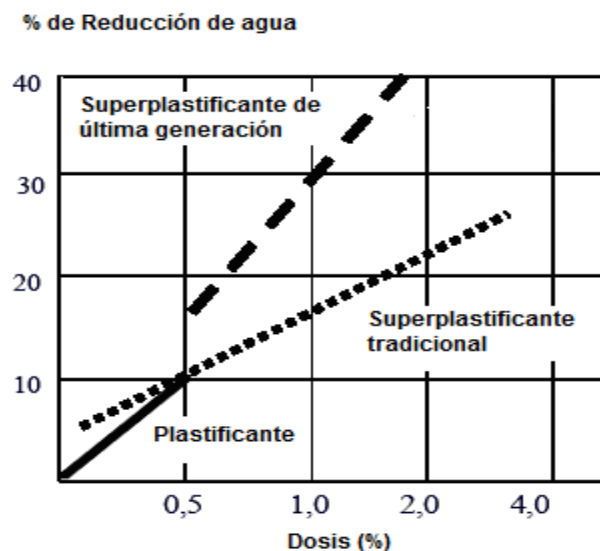


Figura 8. Porcentaje de reducción de agua de los plastificantes, superplastificantes tradicionales y los superplastificantes de última generación según la dosis empleada (De la Peña y Vernal, 2005).

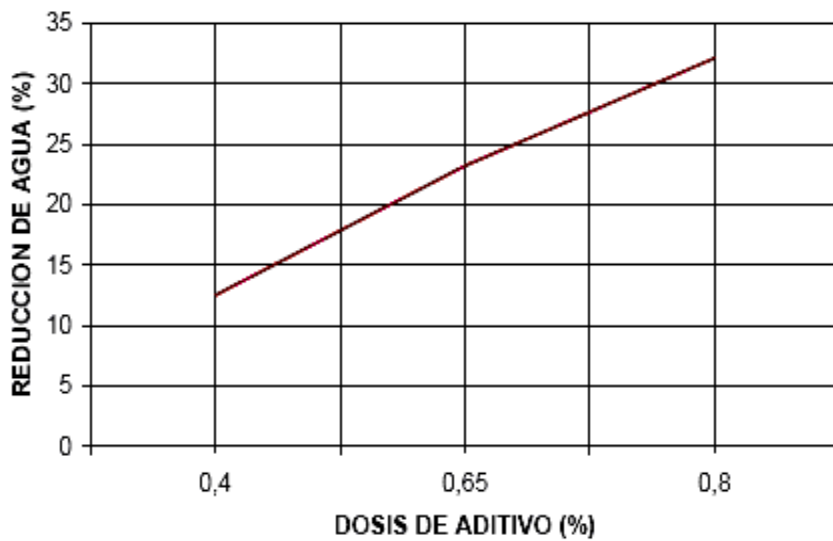


Figura 9. Reducción de agua con distintas dosis de un superplastificante de última generación a base de policarboxilatos en un hormigón con 350 Kg./m³ de cemento. (De la Peña y Vernal, 2005).

Se observa en este caso particular, como es la reducción de agua con distintas dosis de un superplastificante de última generación en base a policarboxilatos, en un hormigón con 350 Kg/m³ de cemento.

Estos superplastificantes basados en policarboxilatos, actúan sobre las partículas de cemento impidiendo la floculación, mediante repulsión electrostática y otorgándole a la pasta de cemento una alta fluidez y una elevada capacidad de dispersión, (Figura 10), que debe mantener el tiempo necesario para permitir al hormigón ser transportado y colocado y suministrarle una gran resistencia a la segregación (Gettu y Agulló, 2004).

Esta alta fluidez que se consigue en la pasta con el superplastificante se logra con una mínima disminución de su viscosidad si se compara con el drástico descenso de ella, si la fluidez se buscara añadiendo agua a la mezcla, (Okamura, 1997), tal y como se muestra en la figura 10.

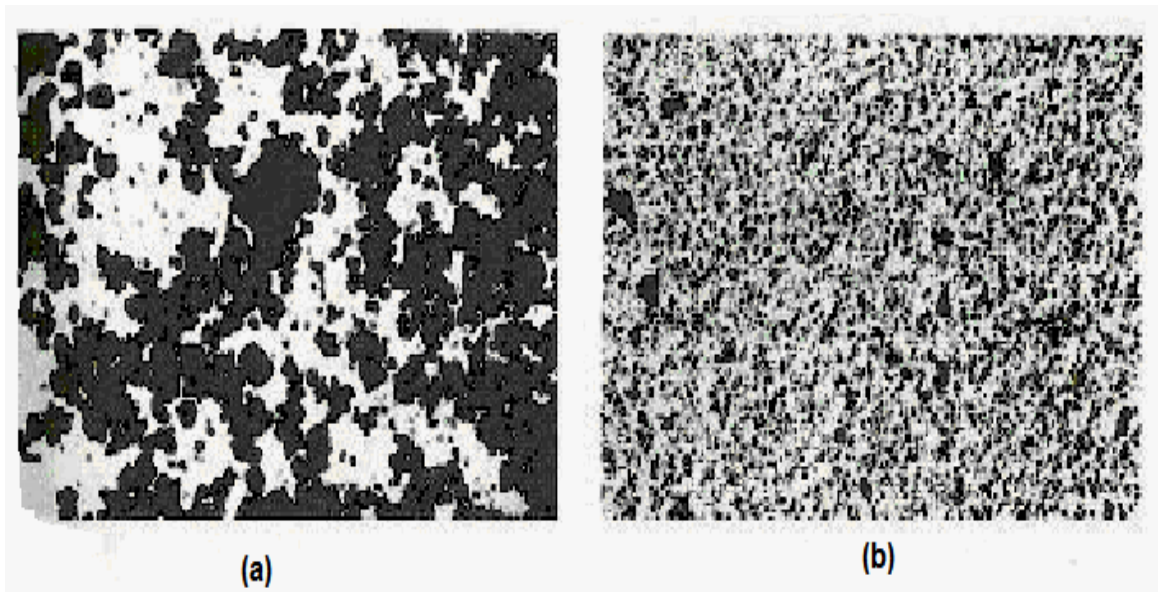


Figura 10. Microfotografía de partículas de cemento en una solución de agua/cemento sin aditivo superplastificante (a) y con aditivo superplastificante (b). (Mehta y Monteiro, 1994).

En la figura 11 se muestra la gran fluidez que suministra el superplastificante a una mezcla de cemento y agua.

Por otro lado está el hecho que producir un hormigón con menor cantidad de agua, mediante el uso de estos aditivos, significa lograr mayores resistencias, menor permeabilidad y hormigones más duraderos (De la Peña y Vernal, 2005).

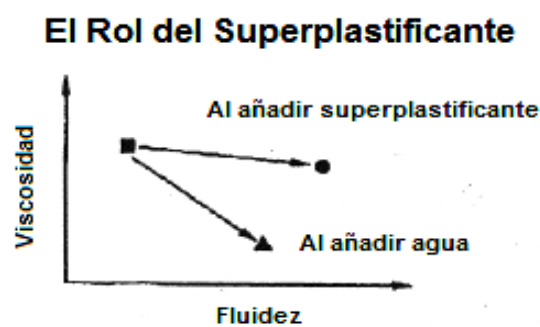
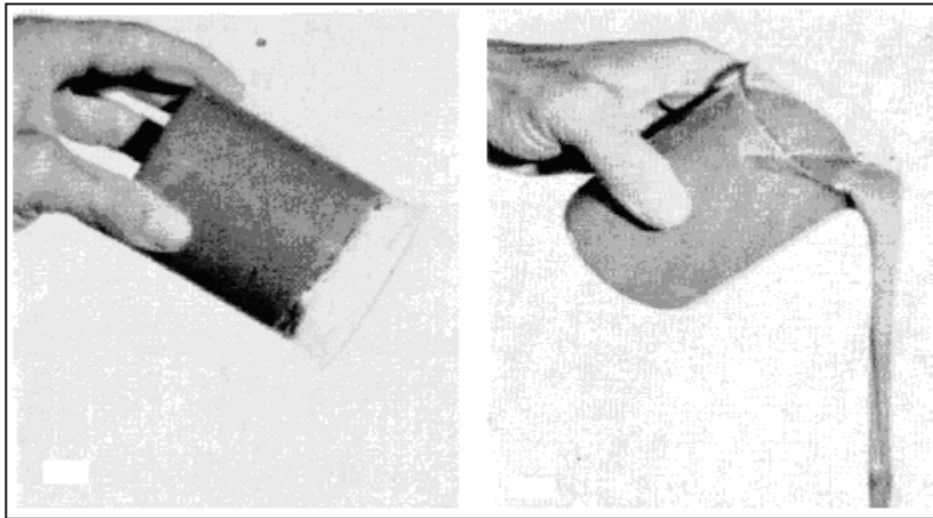


Figura 11. Efecto del superplastificante y del agua sobre la viscosidad. (Okamura, 1997).



(a)

(b)

Figura 12 .Efecto del superplastificante sobre el cemento: (a) Cemento y agua
(b) Cemento, agua y superplastificante. (Ramachandran, 1984).

En lo que respecta a la resistencia, al ser estos superplastificantes de última generación de uso obligado en la elaboración del hormigón autocompactante y conociendo que estos hormigones también cumplen con la ley de Abrams, donde la resistencia es proporcional a la relación agua/cemento, al utilizar estos agentes reductores de agua, menor será dicha relación, por lo que se obtendrán mayores resistencias para un contenido de cemento y una trabajabilidad dada.

2.3.6 Agentes modificadores de viscosidad.

En la elaboración de hormigón autocompactante, la propiedad más buscada es como su propio nombre lo indica, la autocompactibilidad. Sin embargo, una pequeña variación en las cantidades o en las características del material que lo componen, puede afectar de manera importante esa propiedad. La variable más influyente en ello es el contenido de agua de los finos, ya que cualquier variación resulta en una variación del contenido de agua del hormigón mismo. Para solventar este problema, se emplean agentes modificadores de viscosidad, muy efectivos en cuanto al control de las variaciones en el contenido de agua del hormigón, aumentando notablemente la cohesión del hormigón e inhibiendo de esta manera, la exudación y la segregación de la mezcla.

Los agentes modificadores de la viscosidad son aditivos químicos, polímeros solubles en agua de alto peso molecular, que inducen al hormigón una viscosidad de moderada a alta, lo que hace que se comporte de manera pseudoplástica, mejorando sus propiedades en estado fresco, generando un hormigón de gran estabilidad ante la exudación y la segregación, y en el caso de esta última incluso cuando se aumenta accidentalmente en la mezcla su contenido de agua o la altura de caída del hormigonado. (Gettu y Agulló, 2004).

Estos agentes modificadores de viscosidad, desarrollados inicialmente para su utilización en hormigones colocados bajo agua (Córdoba, 2007), utilizados conjuntamente con superplastificantes de última generación, hace que se pueda lograr al mismo tiempo, hormigones autocompactantes con una elevada estabilidad y de una gran fluidez, consiguiéndose con ello una gran facilidad para el mezclado, gran capacidad de bombeo y excelente colocación.

El uso de agentes modificadores de viscosidad en la dosificación de las mezclas no siempre es imprescindible para la elaboración del hormigón autocompactante. Su uso está supeditado al hecho de que los finos presentes en la mezcla no sean capaces de generar suficiente cohesión a la mezcla. Aunque queda claro que su utilización contribuye de gran forma a homogeneizar la calidad del hormigón y a facilitar su producción, al lograr con su empleo que el hormigón sea menos sensible a pequeños cambios del contenido de agua, del módulo de finura de la arena, del contenido de la arena o de la cantidad de superplastificante, haciéndolo mucho más resistente a estos cambios. Sin embargo su uso no debe considerarse como una forma de evitar una buena formulación de la mezcla y de hacer una selección minuciosa de los constituyentes del hormigón autocompactante.

2.4 MÉTODOS DE ENSAYO PARA CARACTERIZAR EL HAC

Ante el surgimiento del HAC fue necesario desarrollar nuevos métodos de ensayo de tipo ingenieril para su caracterización en estado fresco.

Se han desarrollado muchos métodos de ensayo distintos para intentar caracterizar las propiedades de HAC. Hasta el momento, no hay un único método o combinación de

métodos de haya obtenido una aprobación universal y cada uno de ellos tiene sus partidarios. De igual manera, no se ha hallado un método único para caracterizar todos los aspectos de trabajabilidad relevantes, de modo que cada diseño de mezcla deberá contrastarse con más de un método de ensayo para los distintos parámetros de trabajabilidad.

En las Tablas 3 y 4 se presentan listas de métodos de ensayo alternativos para los distintos parámetros. (Especificaciones de EFNARC-2002)

(Tabla 3)

Lista de métodos de ensayo para las propiedades de trabajabilidad del HAC

	Método	Propiedad
1	Ensayo de flujo de asentamiento con cono Abrams	Capacidad de relleno
2	Flujo de asentamiento $T_{50\text{ cm}}$	Capacidad de relleno
3	Anillo J	Capacidad de paso
4	Embudo V	Capacidad de relleno
5	Embudo V a $T_{5\text{ minutos}}$	Resistencia a la segregación
6	Caja en L	Capacidad de paso
7	Caja en U	Capacidad de paso
0	Caja de relleno	Capacidad de paso
9	Ensayo de estabilidad GTM	Resistencia a la segregación
10	Orimet	Capacidad de relleno

Es preciso evaluar los tres parámetros de trabajabilidad en el diseño inicial de la mezcla de HAC para garantizar que se satisfacen todos los aspectos. Debe emplearse un ensayo a escala completa para verificar las características autocompactantes del diseño elegido para una aplicación concreta.

En cuanto al control de calidad en la obra, dos métodos de ensayo suelen bastar para monitorizar la calidad de producción. Las combinaciones más frecuentes son las de flujo de asentamiento con Cono de Abrams y Embudo V o flujo de asentamiento y Anillo J. Con una calidad constante de las materias primas, puede bastar un único método de ensayo aplicado por un técnico especializado y experimentado

(Tabla 4)

Propiedades de trabajabilidad del HAC y métodos de ensayo alternativos (EFNARC)

Propiedad	Métodos de ensayo		
	Laboratorio (diseño de mezcla)	Campo (Control de Calidad)	Modificación del ensayo según el tamaño máx. de los áridos
Capacidad de relleno	1 flujo de asentamiento 2 flujo asentamiento T_{50cm} 4 Embudo V 10 Orimet	1 flujo de asentamiento 2 flujo asentamiento T_{50cm} 4 Embudo V 10 Orimet	Ninguno Máx. 20 mm
Capacidad de paso	6 Caja en L 7 Caja en U 8 Caja de relleno	3 Anillo J	Distintas aperturas en caja en L, caja en U y anillo J
Resistencia a la segregación	9 Ensayo GTM 5 Embudo V a T_5 minutos	9 Ensayo GTM 5 Embudo V a T_5 minutos	Ninguno

2.4.1 Ensayo de extensión de flujo

El ensayo de extensión de flujo, o slump flow en inglés, es el método más simple y el más utilizado, debido a la sencillez del equipo que se precisa. Está basado en el aparato y procedimiento del ensayo del cono de Abrams, el cual es probablemente el ensayo más universal para la determinación de la docilidad o trabajabilidad del hormigón fresco.

Este ensayo difiere del convencional en que la muestra de hormigón se coloca sin ningún tipo de compactación. Además, en este caso la altura del asentamiento no constituye una medida representativa, siendo el diámetro final de extensión (D_f) la medida fundamental que se obtiene como resultado (así se ven en las siguientes figuras).

Adicionalmente, también suele medirse el tiempo que tarda la muestra desde el inicio del levantamiento del cono hasta alcanzar un diámetro de 500 mm (T_{50}), y más ocasionalmente, el tiempo final de extensión de flujo (T_f), hasta que la muestra deja de moverse.

(Figura 13)

(Figura 14)



(a) Cono y base



(b) Diámetro final de extensión

El objetivo de este ensayo es evaluar la habilidad o facilidad de fluir del hormigón. Se puede también valorar cualitativamente, en términos visuales, la presencia de segregación, que se manifestaría por la presencia de una aureola de pasta o mortero alrededor del perímetro de la extensión del flujo y/o la presencia de áridos gruesos acumulados irregularmente, sobre todo en el centro.

a) Variantes

En otra variante, se ha realizado este ensayo con el cono de Abrams invertido, es decir, con la apertura de menor diámetro sobre la base. Así se evita la necesidad de tener una persona sujetando el cono, lo cual se hace normalmente pisando las asas de la base para que la presión del hormigón no lo levante. Con el cono invertido, el propio peso del hormigón lo mantiene estable. En cualquier caso, se deben determinar las correlaciones entre los distintos parámetros medidos antes de comparar los resultados obtenidos con las diferentes variantes.

b) Valores típicos recomendados

El valor de la extensión de flujo (D_f), es útil para evaluar la capacidad de deformación del hormigón autocompactante. Algunos autores la han relacionado con la tensión umbral de corte del hormigón, bajo la hipótesis de que éste se comporta como un fluido de Bingham (Sedran y De Larrard, 1999).

Se recomiendan medidas de D_f de entre 60 y 80 cm, presentando las mezclas en ese rango una buena habilidad o facilidad para el relleno (Hayakawa et al., 1993; Taniguchi et al., 1994; Nagai et al., 1999; AFGC, 2000; EFNARC, 2002; Brite EuRam, 2000; Gomes et al, 2002).

El T50 y el Tf se emplean para caracterizar la viscosidad y cohesión. En general, mayor tiempo significa mayor viscosidad y cohesión del hormigón. Sin embargo, estos tiempos por sí solos no puede representar directamente la viscosidad, y puede tan solo valorarla cuando el valor de extensión de flujo de las mezclas que se evalúan es constante.

En cuanto a los valores de T50, la EFNARC (2002) y Brite EuRam (2000) sugieren que un tiempo de 3-7 segundos es aceptable en aplicaciones de ingeniería civil, mientras que 2-5 segundos sería correcto para las aplicaciones en edificación. Sin embargo, en general se aceptan tiempos entre 1 y 10 segundos para mezclas de las que se espera una viscosidad moderada sin que se presente segregación y con un comportamiento favorable frente al bloqueo (Bartos y Grauers, 1999; Tviksta, 2000; Gomes et al., 2002).

c) Observaciones

Se trata de un procedimiento simple y rápido de ensayo, aunque resulta difícil de realizar por un solo operador, en especial si quiere medirse el período T50. Puede emplearse en la obra, aunque el tamaño de la placa base de asiento es ligeramente pesado y difícil de manejar, y es esencial un terreno nivelado. Es el ensayo utilizado con más frecuencia y ofrece una buena evaluación de la capacidad de relleno. En Japón ya ha sido adoptado como norma (JSCE-F503, 1990).

No presenta indicaciones de la capacidad del hormigón para pasar por entre la armadura sin bloqueos, para lo cual debería ser utilizado conjuntamente con otros ensayos que se presentarán más adelante. Aunque se utiliza para evaluar la resistencia a la segregación, la observación visual, sin embargo, no es adecuada para una estimación cuantitativa y fiable del fenómeno (Rooney, 2002).

Para poder comparar resultados debe utilizarse el mismo tipo de superficie base, porque el rozamiento del hormigón con dicha superficie afecta tanto al diámetro de extensión como a los valores de T50 y Tf.

2.4.2 Anillo J

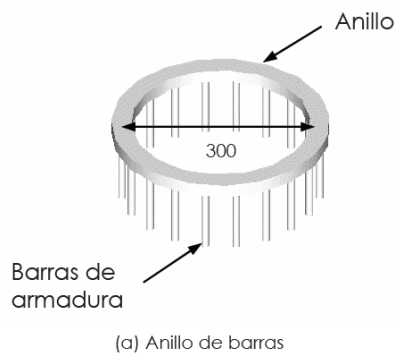
El anillo japonés, o J-Ring en inglés, es un aparato que se utiliza en combinación con otros ensayos, como son el de extensión de flujo, Orimet (que se describe más adelante)

o embudo-V, a efectos de evaluar conjuntamente las habilidades de fluir y de pasar entre barras de armadura (EFNARC, 2002).

El aparato consiste en un anillo de 300 mm de diámetro, en el cual se disponen barras verticales de armadura de 100 o 120 mm de altura, con una apropiada separación entre ellas. Normalmente, se considera adecuado el uso de un espacio entre las barras igual o superior a tres veces el tamaño máximo del árido (EFNARC, 2002).

El procedimiento consiste en realizar el ensayo con el que se combine, pero dejando después fluir el hormigón horizontalmente sobre una superficie plana de manera que tenga que atravesar las barras del anillo para extenderse.

(Figura 15)



(Figura 16)



Una vez cesa el flujo, se miden las alturas de hormigón justo dentro y fuera del anillo para evaluar el bloqueo. Ocasionalmente, también puede medirse el diámetro final de extensión, como la media de dos diámetros perpendiculares.

a) Variantes

La combinación de barras y espacio entre ellas varían mucho según los autores. En general se recomienda una separación de unas 3 veces el tamaño máximo de árido, si bien la especificación alemana (Bramshuber y Uebachs, 2002) reduce este valor a aproximadamente 2,5 veces existe un caso particular que es el de Brite EuRam (2000), que recomienda este ensayo únicamente para HAC reforzado con fibras, en cuyo caso sugiere un espacio libre entre barras de 1 a 3 veces la longitud de dichas fibras.

b) Valores típicos recomendados

A pesar de que estas combinaciones de ensayos miden el flujo y la capacidad de paso, los resultados no son independientes. El flujo medido se ve afectado por el grado en que el movimiento del hormigón está bloqueado por las barras de refuerzo.

El alcance del bloqueo se ve mucho menos afectado por las características de flujo y podemos decir que, de manera clara, cuanto mayor sea la diferencia de altura, menor será la capacidad de paso del hormigón.

La diferencia entre las alturas en las caras interior y exterior del anillo no debería superar los 10 mm (EFNARC, 2002). El bloqueo y/o segregación también puede detectarse visualmente, con frecuencia de manera más fiable que mediante el cálculo.

c) Observaciones

Estas combinaciones de ensayos se consideran que tienen un gran potencial, aunque no existe una perspectiva general sobre cómo deberían interpretarse exactamente los resultados (EFNARC, 2002). Sin embargo, como ya se ha dicho en el apartado anterior, a pesar de que se pretende medir simultáneamente la fluidez y la capacidad de paso, los resultados no son independientes, pues muy a menudo el material que atraviesa las armaduras tiene propiedades diferentes al original (más pasta, menor cantidad de árido grueso).

Al igual que el ensayo de extensión de flujo, estas combinaciones presentan la desventaja de no estar limitadas, y por lo tanto no reflejan el modo en que el hormigón se desplaza y autocompacta en la práctica.

La opción combinada con Orimet tiene la ventaja de ser un ensayo dinámico y que también refleja la colocación en la práctica, aunque tiene como inconveniente la exigencia de dos operarios.

2.4.3 Embudo V

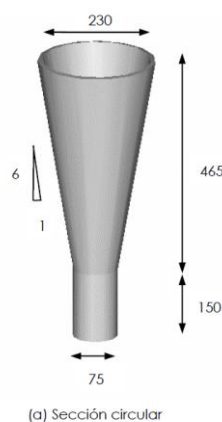
Este ensayo, denominado *V-funnel* en inglés, fue desarrollado por Ozawa en la Universidad de Tokio. Estudios experimentales pusieron de manifiesto que en el flujo de hormigón por un embudo, ir reduciendo la sección transversal de la salida aumentaba el riesgo de bloqueo por el contacto entre los áridos gruesos, siendo un indicativo de la necesidad de mejorar la viscosidad.

El ensayo tiene por tanto como objetivo evaluar la habilidad de fluir del hormigón en áreas restringidas en dirección vertical y bajo su propio peso, cualificando la tendencia a la segregación y al bloqueo, mediante observación de la variación de la velocidad de flujo.

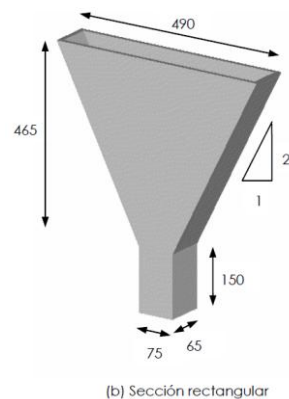
El embudo-V, normalmente de acero, tiene forma de V con una apertura en el fondo, donde se coloca una compuerta de rápida apertura, para interferir lo menos posible en el momento de la descarga. La geometría de la sección transversal puede ser de forma circular o rectangular, siendo la segunda la más utilizada.

Las dimensiones y geometrías típicas se exponen a continuación. (Figura 17 y 18)

(Figura 17)



(Figura 18)



El ensayo de embudo V descrito se utiliza para determinar la capacidad de relleno (fluidez) del hormigón con un tamaño de árido máximo de 20 mm. El embudo se llena con aproximadamente 12 litros de hormigón y se mide el tiempo necesario para fluir a través del aparato.

Después del proceso, el embudo puede volver a llenarse con hormigón, que se deja aposentar durante 5 minutos. Si el hormigón muestra segregación, entonces el tiempo de flujo aumentará significativamente (EFNARC, 2002).

a) Variantes

Si bien las dimensiones representadas en las figuras están bastante aceptadas (JSCE, 1998; EFNARC, 2002), en algunos trabajos se han utilizado embudos con dimensiones ligeramente mayores, con el ancho y altura de la parte trapezoidal igual a 51,5 cm y 45 cm, respectivamente, en lugar de 49 cm y 42,5 cm (Skarendahl y Petersson, 2000; Gomes, 2002).

Las dimensiones de la sección del canal de salida dependen del tamaño máximo del árido, recomendándose una dimensión mínima superior a 3 veces el tamaño máximo del árido. Esto conduce, en el caso de hormigones autocompactantes (cuyo tamaño máximo de árido no supera en general los 20 mm) a dimensiones mínimas del orden de 6,5 a 7,5 cm, siendo la sección de 6,5 × 7,5 cm la más utilizada.

b) Valores típicos recomendados

El tiempo de flujo en segundos (T_v) es la principal medida obtenida de este ensayo. Es aconsejable medir el tiempo de flujo al menos 2 veces en menos de 5 minutos, y obtener la media. Para el embudo de sección rectangular con $b = 7,5$ cm, Ozawa et al. (1994) han obtenido tiempos de 6 a 10 s para el HAC. Para $b = 6,5$ cm, los tiempos de flujo óptimos se mueven de 6 a 15 s (Sakata et al., 1996; EFNARC, 2002; Gomes et al., 2002).

Se puede observar la naturaleza del flujo del hormigón a través del fondo para tener una idea del bloqueo producido. Respecto a la estabilidad, un flujo continuo sin interrupción se traduce en ausencia de segregación y/o bloqueo.

c) Observaciones

El método se ha mostrado eficiente para evaluar la habilidad de fluir del hormigón en áreas restringidas en la dirección vertical. Sin embargo, el ensayo no puede cualificar bien la tendencia a la segregación y bloqueo entre las armaduras. Asimismo, el resultado no refleja la habilidad de fluir en dirección horizontal o contraria a la gravedad. Por lo tanto, el tiempo de flujo obtenido en este ensayo no es suficiente para cuantificar las propiedades necesarias que garanticen las prestaciones del hormigón como autocompactante, por lo que deberá ser complementado con otros ensayos.

2.4.4 Caja en L

La caja en L, denominada en inglés como L-Box, es un aparato bien conocido para la caracterización del HAC. Consta de un depósito vertical que conecta con un canal horizontal a través de una abertura en la que se colocan barras de armadura (Gomes et al., 2002). Esto se puede apreciar en las figuras que aparecen sobre este acápite.

El ensayo consiste en llenar el depósito y dejar fluir el hormigón hacia el canal a través de las armaduras. Se determinan el tiempo que tarda el hormigón en llegar a una distancia de 200 mm (T20) y de 400 mm (T40), y las alturas H1 y H2 que se alcanzan en ambos extremos de la parte horizontal, con la mezcla ya en reposo. La razón H2/H1 se define como el coeficiente de bloqueo (CB).

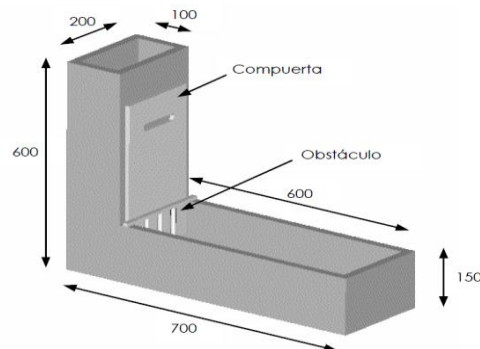
La prueba permite determinar valores que cuantifican el bloqueo y estimar la fluidez del hormigón tras pasar por los obstáculos. También permite evaluar cualitativamente la resistencia a la segregación mediante la observación visual.

(Figura 19)



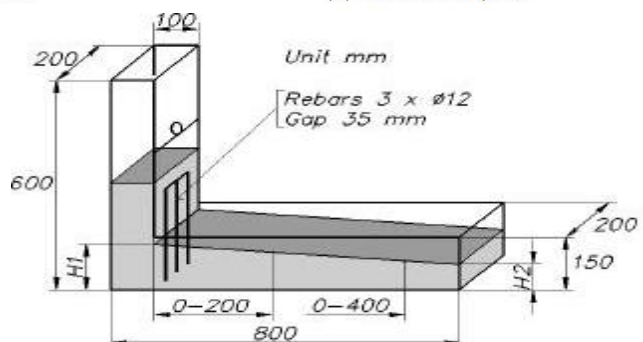
(a) Configuración

(Figura 20)



(b) Dimensiones típicas

(Figura 21)



Dimensiones según EFNARC (2002)

a) Variantes

Lamentablemente, no existe un acuerdo sobre los materiales y dimensiones. La especificación de EFNARC (2002), sugiere una pequeña variación de la longitud del canal, que sería de 800 mm en lugar de 700 mm. Sin embargo la JSCE (1990) propone unas dimensiones bastante diferentes, con un aparato más pequeño.

Otros investigadores utilizan una versión mayor de la Caja en L (p.e., Beaupré et al., 1999), si bien la diferencia más significativa es la colocación de 5 rejillas, separadas por 110 mm a lo largo del canal, constituidas por 4 barras horizontales de 20 mm de diámetro. Cuando se utiliza este aparato, sólo se miden las alturas a lo largo del canal sin ninguna determinación de tiempos.

En cuanto a las características del obstáculo, en general, se acepta que el tipo de barras y los espacios o separación entre ellas varíen dependiendo del tamaño máximo del árido y de las condiciones reales de aplicación del hormigón. La AFGC (2000) recomienda el uso de barras de 14 mm de diámetro, y un espacio de 39 mm entre las barras, que se puede aumentar hasta 58 mm para aplicaciones con poca armadura.

Por otro lado, Billberg (1999) recomienda en el uso de 3 barras de 12 mm, lo cual se traduce en un espacio de 34 mm entre barras. Esto prácticamente coincide con la especificación de EFNARC (2002), que utilizaría igualmente barras de 12 mm, Pero con un espacio libre entre ellas de 35 mm. También se considera apropiado utilizar un espacio mínimo entre barras igual a tres veces el tamaño máximo del árido (EFNARC, 2002; Gomes et al., 2002).

b) Valores típicos recomendados

Los tiempos medidos en la caja en L (es decir, T20 y T40) cuantifican la velocidad de flujo a través de la barrera. No obstante, cabe reseñar que estos tiempos no son representativos de la fluidez del hormigón cuando ocurren efectos de bloqueo, resultando que las mezclas que atraviesan la armadura tienen más pasta que el hormigón retenido en la caja. Para un hormigón en el que no se presente bloqueo se recomiendan tiempos en los siguientes rangos: $T20 < 1,5$ s y $T40 < 2,5$ s (Bartos y Grauers, 1999; Gomes et al., 2002).

Por otro lado, el coeficiente de bloqueo ($CB = H2/H1$), es un buen indicador de la habilidad para pasar por aperturas estrechas, que incluye la capacidad de deformación y la resistencia al bloqueo. Debería ser superior a 0,80 para que se considere satisfactoria la resistencia al bloqueo del hormigón (AFGC, 2000; Gomes et al., 2002). Sin embargo, hormigones con coeficientes más bajos, como 0,60, han dado resultados aceptables en aplicaciones estructurales (Tviksta, 2000).

El ensayo permite también evaluar la resistencia al bloqueo y la estabilidad de la muestra de hormigón, por observación visual. En los casos en que se aglomeren o acumulen áridos detrás de la rejilla de armadura, se considera que se produce bloqueo. Por otro lado, cuando se observan granos del árido grueso distribuidos por la superficie del hormigón a lo largo de toda la extensión de la parte horizontal, el hormigón se considera estable, es decir, resistente a la segregación.

c) Observaciones

El uso de este ensayo es muy frecuente. Es muy adecuado para el laboratorio y quizá también para la misma obra. Evalúa conjuntamente la capacidad de relleno y de paso del HAC, y cualquier falta grave de estabilidad (segregación) puede detectarse visualmente.

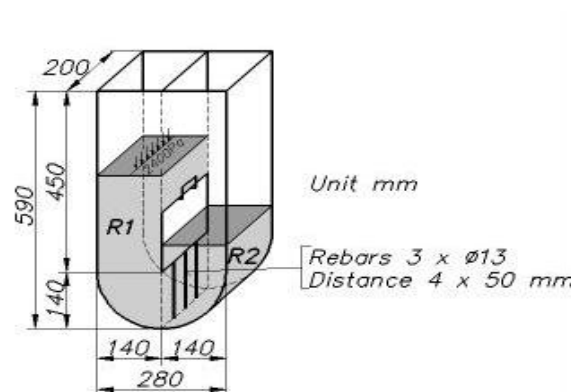
Los tiempos T20 y T40, como ya se ha comentado, no siempre son representativos de la fluidez del hormigón. Además, la medida de dos tiempos tan cortos obliga el uso de dos cronómetros, y está influida significativamente por los criterios y reflejos del operario. Por este motivo, en algunas ocasiones, se ha optado por medir solamente el tiempo que tarda el hormigón en tocar la pared final del canal.

Con los ensayos mencionados anteriormente se pueden caracterizar su autocompactabilidad del HAC, cumpliendo los 3 requisitos fundamentales como ser de capacidad de relleno, capacidad de paso a través de las armaduras y la resistencia a la segregación, además como ya mencionado se pueden combinar dos de los ensayos como el anillo j con el embudo V, o con el ensayo de extensión de flujo y anillo japonés.

Además de estos equipos existen otros más que pueden complementar aun más la caracterización del HAC y a continuación se menciona resumidamente

2.4.5 Método de ensayo de Caja en U

Este ensayo fue desarrollado por el Technology Research Centre (Centro de Investigación Tecnológica) de Taisei Corporation en Japón (4). En ocasiones el aparato se denomina ensayo “en forma de caja”. El ensayo se utiliza para medir la capacidad de relleno del hormigón autocompactante. El aparato consiste de un recipiente dividido por una pared intermedia en dos compartimientos, que aparecen como R1 y R2 en la presente figura:



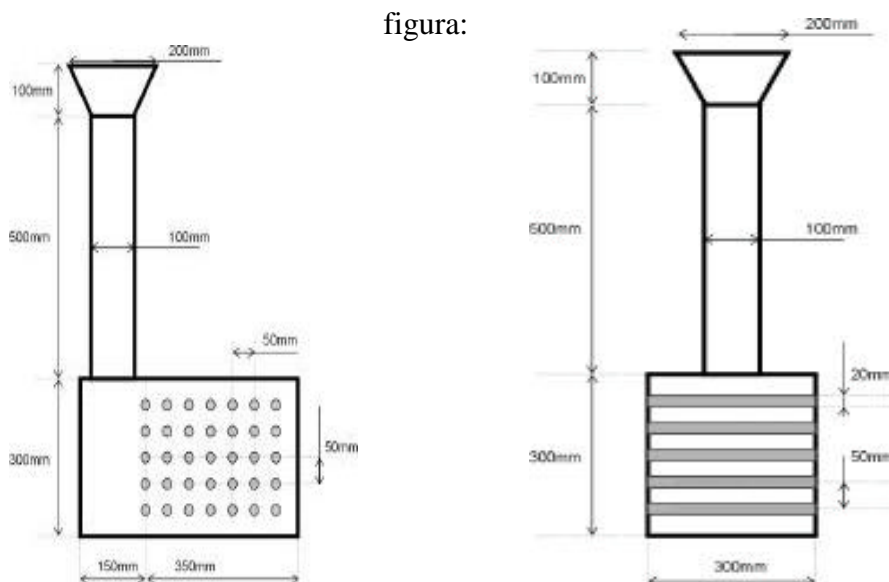
(Figura 22) Dimensiones de la caja en U

Se coloca una compuerta deslizante entre ambas secciones. Se instalan barras de refuerzo que presentan un diámetro nominal de 13 mm en la compuerta, con espacios entre ejes de 50 mm. De este modo se crea un espaciado libre de 35 mm entre las barras.

La sección del lado izquierdo se llena con aproximadamente 20 litros de hormigón y a continuación se eleva la compuerta y el hormigón fluye *hacia arriba* hasta la otra sección. Se mide la altura del hormigón en ambas secciones.

2.4.6 Método de ensayo de caja de relleno

Este ensayo también se conoce como “Ensayo Kajima”. El ensayo se utiliza para medir la capacidad de relleno del hormigón autocompactante con un tamaño máximo de áridos de 20 mm. El aparato consiste de un recipiente transparente con una superficie uniforme y lisa. Dentro del recipiente se disponen 35 obstáculos de PVC con un diámetro de 20 mm y una distancia entre ejes de 50 mm que se ven en la siguiente figura:



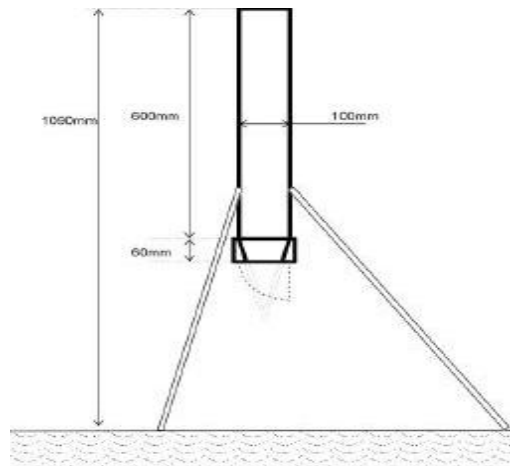
Dimensiones de la caja de relleno (**Figura 23**)

En el lado superior hay un conducto de llenado (diámetro de 100 mm y altura de 500 mm) con un embudo (altura de 100 mm). El recipiente se llena de hormigón a través de este conducto de llenado y la diferencia de altura entre ambos lados del recipiente es una medida de la capacidad de relleno.

2.4.7 Ensayo de Orimet

El Orimet se desarrolló en la Universidad de Paisley como un método para evaluar mezclas de hormigón fresco de elevada fluidez en las obras de construcción. El equipamiento aparece en la siguiente ilustración:

Dimensiones del equipo de Orimet (**Figura 24**)



El ensayo se basa en el principio de un reómetro de orificio. El Orimet consiste en un conducto de vertido vertical provisto de un orificio en forma de cono invertido variable en el extremo inferior, el de la descarga, con una trampilla de liberación rápida para cerrar dicho orificio.

Normalmente el orificio presenta un diámetro interno de 80 mm, que es adecuado para evaluar mezclas de hormigón con un tamaño de árido que no supera los 20 mm. Puede substituirse por orificios de otros tamaños, normalmente de 70 mm a 90 mm de diámetro.

El funcionamiento consiste simplemente en llenar el Orimet con hormigón para abrir de inmediato la trampilla y medir el tiempo necesario para que se vea la luz en la parte inferior del conducto (cuando se mira desde arriba).

2.5 MÉTODOS DE DOSIFICACIÓN

2.5.1 Ensayos previos sobre pasta y morteros

Muchos de los métodos de dosificación propuestos establecen la optimización de la Pasta, mortero y esqueleto granular por separado así como sus proporciones entre ellos. La optimización de la pasta y del mortero es muy importante porque sirve de base para la dosificación del hormigón autocompactante. Debe de ser fluida y cohesiva para evitar la segregación de los áridos y exudación del agua.

Para la evaluación de la pasta y mortero de hormigones autocompactantes existen diversos métodos entre los que destacan los siguientes:

2.5.1.1 Ensayo de flujo de morteros

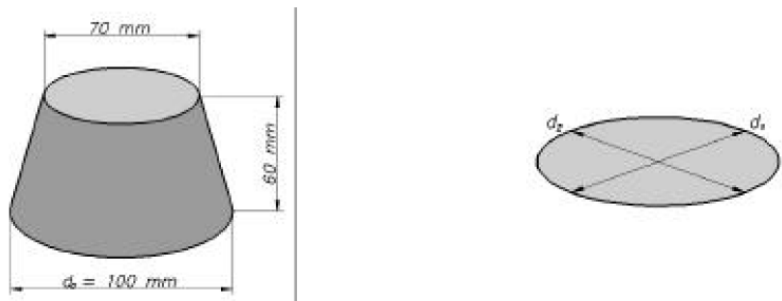
Fue propuesto por Okamura (Okamura et al., 2000) para morteros. El procedimiento del ensayo es idéntico al ensayo de escurrimiento para hormigones, pero se emplea un molde con menores dimensiones como se puede observar en la figura 25. Los parámetros que se miden son los diámetros d_1 y d_2 de la huella del hormigón. El resultado del ensayo se expresa mediante el parámetro p/m que se calcula según las expresiones:

Definición de p/m :

$$p/m = (d/d_0)^2 - 1$$

donde:

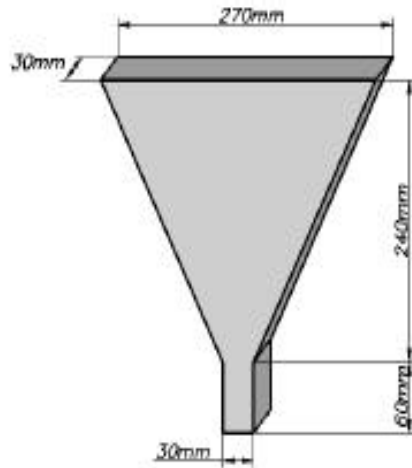
$$d = \frac{1}{2} (d_1 + d_2)$$



(Figura 25) Cono de flujo para la pasta y mortero

2.5.1.2 Ensayo embudo en V del mortero

Fue propuesto por Okamura (Okamura et al., 2000) para morteros. El procedimiento del ensayo es idéntico al ensayo del embudo en V para hormigones, pero empleando un molde con menores dimensiones como se puede observar en la figura. Se mide el tiempo, t , que tarda en fluir la muestra a través del embudo.



(Figura 26) Embudo en V para mortero

2.5.2 Método general de dosificación

El método general de dosificación fue propuesto por Okamura y Ozawa en 1998. Probablemente sea el método más usado. Se considera al hormigón dividido en dos fases. La primera sería el árido grueso y, la segunda el mortero incluyendo la pasta de cemento y los áridos finos. El procedimiento es el siguiente (ACHE, 2088):

1. Se fija el contenido de árido grueso en el 50% del volumen de sólidos total del hormigón.
2. Se fija el árido fino en el 40% sobre el volumen de mortero.
3. La relación agua/(cemento+filler) se asume en el rango de 0,9 a 1% en volumen, dependiendo de las propiedades del cemento y adiciones empleadas.
4. La cantidad de superplastificante y la relación agua/conglomerante se ajusta mediante ensayos sobre la pasta.
5. El procedimiento concluye cuando se alcanza un diámetro de 650 mm en el ensayo de escurrimiento sobre hormigón.

2.5.3 Método de dosificación EFNARC

EFNARC no presenta ningún modelo de dosificación en particular, únicamente da una serie de pasos para la dosificación del hormigón autocompactante, especificando las siguientes condiciones:

- Relación en volumen agua/finos: 0,80-1,10.

- Contenido de finos: 400-600 kg/m³.
- Granulometría de la arena situada entre 0,125 y 4 mm.

El proceso de dosificación se establece según los siguientes pasos:

1. Se fija el contenido de aire deseado.
2. Se fija la relación agua/cemento dependiendo de los requisitos del hormigón.
3. Se determina el volumen del árido grueso en función de su densidad situándolo entre el 50% y el 60%.
4. La cantidad de arena viene determinada en función de las propiedades de la pasta y se sitúa en un rango entre el 40-50% del volumen del mortero.

2.6 COMPOSICIONES ORIENTATIVAS DE LA MEZCLA

El requerimiento de trabajabilidad en el hormigón al momento de ser vertido depende del tipo de construcción, de la complejidad del encofrado y del diseño estructural. Todo esto afecta el grado de congestionamiento que pueda tener la mezcla al pasar por una zona de refuerzo.

El grado de capacidad de llenado, habilidad de paso y resistencia a segregarse del HAC son variables para cada aplicación. Por ejemplo, la habilidad de paso solo es importante en estructuras reforzadas y en secciones que limitan el fluido del hormigón.

Se tiene varias composiciones de la mezcla, estos según a la experiencia adquirida por varios investigadores del HAC, pero la mayoría se han fundamentado en las primeras investigaciones realizadas, normativas y especificaciones (EFNARC, ANEJO 17 o la directriz Europea para el HAC).

EFNARC-2002 nos proporcionan un listado para la composición inicial del hormigón autocompactante y se presenta a continuación:

- Árido grueso entre el 28% a 35% por volumen de mezcla
- Relación agua/finos = 0,80 – 1,1 en volumen.
- Contenido total de finos de 160 a 400 L (400 a 600) kg/m³
- Contenido de arena más del 40% del mortero (volumen)

- Arenas más del 50% por el peso del árido total.
- Agua libre menor a 200 L.
- Pasta mayor al 40% del volumen de la mezcla.
- Cantidad de cemento 350 a 450 kg/m³
- Contenido de aditivo superplastificante entre 0,6% a 2%
- Relación agua cemento entre 0,28 – 0,40 en pesos.

Según la directriz europea para el HAC se tiene la siguiente tabla para la composición del HAC:

(Tabla 5)

Material	Contenido en peso (kg/m ³)	Contenido en volumen (l/m ³)
Cemento	380 – 600	
Pasta		300 – 380
Agua	150 – 210	150 – 210
Árido grueso	750 – 1000	270 – 360
Árido fino (arena)	48 – 55% del peso total del árido	
Volumen agua / Volumen de cemento		0,85 – 1,10

En el Anejo 17 de la Instrucción EHE-08, en su Artículo 71.3.2º, se definen unos rangos típicos de los materiales constituyentes del hormigón autocompactante y están recogidos en la siguiente tabla:

Material	Contenido
Filler (*)	≤ 250 kg/m ³
Cemento	250 - 500 kg/m ³
Finos totales (cemento+filler+adiciones)	450 - 600 kg/m ³
Pasta (cemento+filler+adiciones+agua)	> 350 l/m ³
Árido grueso (tamaño máximo: 25 mm)	≤ 50 %
(*) Incluyendo la adición caliza del cemento y partículas de los áridos < 63 µm NOTA: las limitaciones de contenido de agua y cemento quedarán precisadas según las condiciones de exposición definidas en la Instrucción.	

(Tabla 6)

Rangos típicos para la dosificación de un HAC según la Instrucción EHE-08 (ACHE, 2008).

2.7 EXIGENCIAS DE AUTOCOMPACTABILIDAD POR DISTINTOS AUTORES

En el hormigón autocompactante, se tienen que cumplir simultáneamente los tres requisitos principales de autocompactabilidad que se evalúan a través de los ensayos descritos anteriormente.

En el Anejo 17 de la Instrucción EHE-08, en su Artículo 31.5°, se especifican los rangos admisibles de los parámetros de los ensayos normalizados y que se recogen en la Tabla 8. Es importante destacar que se tienen que cumplir simultáneamente para así obtener los requisitos de autocompactabilidad.

(Tabla 7)

Rango admisible de los ensayos normalizados (Instrucción EHE-08)

Ensayo	Parámetro medido	Rango admisible
Escurrecimiento	T_{50}	$T_{50} \leq 8 \text{ seg}$
	d_f	$550 \text{ mm} \leq d_f \leq 850 \text{ mm}$
Embudo en V	T_V	$4 \text{ s} \leq T_V \leq 20 \text{ s}$
Caja en L	C_{bL}	$0,75 \leq C_{bL} \leq 1,00$
Escurrecimiento con anillo japonés	d_{JF}	$\geq d_f - 50 \text{ mm}$

En la Tabla 8 se recogen los rangos recomendados de los ensayos que no están normalizados en España.

En la Tabla 9 se recogen los rangos recomendados para los diferentes ensayos de estado fresco por la EFNARC.

(Tabla 8)

Rango admisible de los ensayos no normalizados (ACHE, 2008)

Ensayo	Parámetro medido	Rango admisible
Caja en U	h (altura de relleno)	≥ 300 mm
	Δh (diferencia de altura)	≤ 30 mm
Orimet	T (tiempo de flujo)	$T \leq 6$ s
Recipiente (<i>fill box</i>)	F (coeficiente de relleno)	$F \geq 90\%$
Estabilidad con el tamiz	porcentaje de lechada tamizada	$\leq 30\%$
Tubo en U	RS (relación de segregación)	$\geq 0,90$
Columna	% de segregación	$< 10\%$

(Tabla 9)

Parámetros de los ensayos en estado fresco (EFNARC, 2002)

Ensayo	Unidad	Margen habitual de valores	
		Mínimo	Máximo
Escurrimiento	mm	650	800
T_{50}	segundos	2	5
Anillo japonés	mm	0	10
Embudo en V	segundos	6	12
Embudo en V en 5 min	segundos	0	3
Caja en L	$H2/H1$	0,8	1
Caja U	$(H2-H1)$ mm	0	30
Caja de relleno	%	90	100
Ensayo de estabilidad	%	0	15
Orimet	segundos	0	5

2.8. GUÍA PARA LA SOLUCIÓN DE PROBLEMAS

Las causas para no cumplir los requisitos especificados pueden ser muy diversas. En las tablas posteriores se presenta una lista de las posibles causas de incumplimiento de los requisitos de los distintos ensayos.

Cuando un ensayo presenta resultados fuera del margen debido puede ser por distintos motivos. La posible causa puede averiguarse con mayor certidumbre comprobando el valor de otros métodos de ensayo y verificando subjetivamente las características de trabajabilidad. De este modo puede descubrirse la mejor medida posible para solucionar un problema.

La tabla 9 ofrece una lista de posibles medidas correctoras y el efecto que suelen producir en el hormigón. Es evidente que dicho efecto dependerá del alcance de la medida y de la composición y trabajabilidad reales de la mezcla de hormigón. Toda acción puede tener efectos positivos y negativos en las distintas características del hormigón. Si los resultados del ensayo entre lotes o cargas distintas difieren considerablemente, el motivo puede estar en la variación de alguno de los siguientes elementos:

- Características del cemento
- Características de las adiciones
- Granulometría de los áridos
- Contenido de humedad de los áridos
- Temperatura
- Procedimiento de mezcla, período del ensayo

El uso de un agente modificador de la viscosidad (VEA) puede suprimir en cierta medida algunas de estas variaciones. Para comprender estas tablas se aplican las siguientes definiciones:

- “Valor umbral” es la fuerza (tensión de corte) que debe ejercerse sobre un material para iniciar el flujo.
- “Viscosidad” es una medida de la resistencia de un material para fluir debido a la fricción interna (y es la relación de esfuerzo aplicado respecto a la tasa de corte).

Se produce un “bloqueo” cuando un material no puede fluir a través de una apertura específica (u orificio) Debido al interbloqueo de las partículas de árido.

(Tabla 10)

Localización de fallos en caso de resultados demasiado bajos

		Resultado inferior a		Possible causa
1	Flujo de asentamiento con cono Abrams	mm	650	a Viscosidad demasiado alta c Valor umbral demasiado alto
2	T _{50cm} flujo de asentamiento	seg	2	b Viscosidad demasiado baja
3	Anillo J	mm	10	a Viscosidad demasiado alta c Valor umbral demasiado alto
				d Segregación f Bloqueo
4	Embudo V	seg	6	b Viscosidad demasiado baja
5	Aumento en embudo V a T _{5 minutos}	seg		g Resultado dudoso
6	Caja en L (h2/h1)		0,8	a Viscosidad demasiado alta c Valor umbral demasiado alto
				f Bloqueo
7	Caja en U (h2-h1)	mm	0	g Resultado falso
8	Caja de relleno	%	90	a Viscosidad demasiado alta c Valor umbral demasiado alto
9	Test de estabilidad GTM	%	5	a Viscosidad demasiado alta f Bloqueo

Fuente: EFNARC-2002

(Tabla 11)

Localización de fallos en caso de resultados demasiado altos

			Resultado superior a		Possible causa
1	Flujo de asentamiento con cono Abrams	mm	750	b	Viscosidad demasiado baja
				d	Segregación
2	T _{50cm} flujo de asentamiento	seg	5	a	Viscosidad demasiado alta
				c	Valor umbral demasiado alto
3	Anillo J	mm		b	Viscosidad demasiado baja
				d	Segregación
4	Embudo V	seg	12	a	Viscosidad demasiado alta
				c	Valor umbral demasiado alto
				f	Bloqueo
5	Aumento en embudo V a T _{5minutos}	seg	3	d	Segregación
				e	Pérdida rápida de trabajabilidad
				f	Bloqueo
6	Caja en L (h2/h1)		1	g	Resultado falso
7	Caja en U (h2-h1)	mm	30	a	Viscosidad demasiado alta
				c	Valor umbral demasiado alto
				f	Bloqueo
8	Caja de relleno	%	100	g	Falso resultado
9	Test de estabilidad GTM	%	15	d	Segregación

Fuente: EFNARC-2002

(Tabla 12)

Posibles medidas de corrección a partir de los fallos identificados

		Efecto en:					
Posible acción		capacidad de relleno	capacidad de paso	resistencia a segregación	Resistencia mecánica	retracción	fluencia
a	Viscosidad demasiado alta						
a1	Aumento del contenido de agua	+	+	-	-	-	-
a2	Aumento del volumen de pasta	+	+	+	+	-	-
a3	Aumento del superplastificante	+	+	-	+	0	0
b	Viscosidad demasiado baja						
b1	Reducción contenido de agua	-	-	+	+	+	+
b2	Reducción del volumen de pasta	-	-	-	-	+	+
b3	Reducción del superplastificante	-	-	+	-	0	0
b4	Aumento del agente modificador de la viscosidad	-	-	+	0	0	0
b5	Uso de polvo más fino	+	+	+	0	-	-
b6	Uso de arena más fina	+	+	+	0	-	0
c	Valor umbral demasiado alto						
c1	Aumento del contenido de agua	+	+	-	+	0	0
c2	Aumento del volumen de pasta	+	+	+	+	-	-
c3	Aumento del superplastificante	+	+	+	+	-	-
d	Segregación						
d1	Aumento del volumen de pasta	+	+	+	+	-	-
d2	Aumento volumen de mortero	+	+	+	+	-	-
d3	Reducción contenido de agua	-	-	+	+	+	+
d4	Uso de polvo más fino	+	+	+	0	-	-
e	Pérdida rápida de trabajabilidad						
e1	Uso de un tipo de cemento reactivo más lento	0	0	-	-	0	0
e2	Aumento del retardador	0	0	-	-	0	0
e3	Uso superplastificante distinto	?	?	?	?	?	?
e4	Sustituir cemento por adición	?	?	?	?	?	?
f	Bloqueo						
f1	Reducción del tamaño máximo de árido	+	+	+	-	-	-
f2	Aumento del volumen de pasta	+	+	+	+	-	-
f3	Aumento del volumen de mortero	+	+	+	+	-	-
g	Resultado falso						
	Condiciones de comprobación	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.	n.p.

+	Suele ofrecer un mejor resultado para el hormigón.
0	No suele tener un resultado significativo.
-	Suele ofrecer un peor resultado para el hormigón.
?	El efecto no puede predecirse.
n.p.	No procede.

2.9 CLASIFICACIÓN USADA EN LA ESPECIFICACIÓN DEL HAC

Cuando se clasifiquen las propiedades del HAC deben aplicarse las Tablas de la 13 a la 16, clasificación es la propuesta por las recomendaciones europeas (EFNARC, 2002).

a) Clases de asentamiento

(Tabla 13)

Clasificación europea en función del ensayo de escurrimiento (df) (EFNARC, 2002)

Clase	Asentamiento en mm
SF1	de 550 a 650
SF2	de 660 a 750
SF3	de 760 a 850

b) Clases de viscosidad

(Tabla 14)

Clasificación europea en función del ensayo del embudo en V (TV)
(EFNARC, 2002)

Clase	T ₅₀₀ , s	Tiempo del ensayo del embudo en V en s
VS1/VF1	≤ 2	≤ 8
VS2/VF2	> 2	de 9 a 25

c) Clases de capacidad de paso (Ensayo de la caja en L)

(Tabla15)

Clasificación europea en función del ensayo de la caja en L (CbL)
(EFNARC, 2002).

Clase	Capacidad de paso
PA1	≥ 0,80 con 2 obstáculos de barras
PA2	≥ 0,80 con 3 obstáculos de barras

d) Clases de resistencia a la segregación (segregación en tamiz)

(Tabla 16)

Clasificación europea en función de la resistencia de segregación
(EFNARC, 2002)

Clase	Capacidad de paso
SR1	≤ 20
SR2	≤ 15

2.9.1 Clases de consistencia

2.9.1.1 Escurrimiento

El valor del ensayo de asentamiento describe el flujo de una mezcla fresca y no confinada. Es un ensayo delicado que normalmente será especificado para todos los HAC, como ensayo inicial de que la consistencia del hormigón fresco cumple con las especificaciones. Las observaciones visuales durante el ensayo y/o durante la medida del tiempo T_{500} pueden dar información adicional sobre la segregación y la uniformidad de cada entrega.

Los valores normales para los distintos tipos de asentamiento y su campo de aplicaciones se describen a continuación:

SF1 (550 – 650 mm) es apropiado para:

- Estructuras en masa o poca densidad de armaduras que sean llenadas desde la parte superior con desplazamiento libre desde el punto de entrega (p.e. losas de cimentación o pavimentos).
- Hormigones de relleno por bombeo (p.e. encofrados de túneles)
- Elementos suficientemente pequeños que no precisen largos flujos horizontales (p.e. pilares y algunas cimentaciones profundas)

SF2 (660 – 750 mm) es adecuado para muchas aplicaciones normales (p.e. muros, pilares).

SF3 (760 – 850 mm) se elabora normalmente con una limitación del tamaño máximo de los áridos (menor de 16 mm) y se usa para aplicaciones verticales en estructuras muy armadas, estructuras de formas complejas, o rellenos bajo los encofrados. El SF3 da normalmente un mejor acabado superficial que el SF2 para aplicaciones verticales pero la segregación es más difícil de controlar.

Valores mayores de 850 mm pueden especificarse en algunos casos especiales, pero deberán extremarse las precauciones, considerando la segregación y el tamaño máximo de los áridos será normalmente menor de 12 mm.

2.9.1.2 Viscosidad

La viscosidad puede ser estimada a partir del tiempo T_{500} durante el ensayo de asentamiento o calculada mediante el tiempo de flujo del embudo en V. El tiempo obtenido no mide la viscosidad del HAC pero está relacionado con éste describiendo el índice de flujo. El hormigón con una baja viscosidad tendrá un flujo inicial muy rápido y luego se detendrá. Un hormigón de alta viscosidad continuará fluyendo más tiempo.

La viscosidad (alta o baja) se especificará únicamente en casos especiales como los que se indican más adelante. Será útil durante el desarrollo del proceso de mezcla y puede ser de ayuda medir y registrar el tiempo T_{500} mientras se hace el ensayo de asentamiento como método de confirmación de la uniformidad del HAC por amasadas.

VS1/VF1 tiene una buena capacidad de llenado aún con alta densidad de armaduras. Es capaz de autonivelarse y generalmente tiene mejor acabado superficial. Aún así, es más propenso a presentar exudación y segregación.

VS2/VF2 no hay una clase superior pero con el aumento del tiempo de flujo es más probable que presente efectos de tixotropía, que pueden ayudar en la limitación de la presión a los encofrados o mejorar la resistencia a la segregación. Por lo contrario, podemos experimentar efectos negativos en el acabado superficial (coqueras) o los efectos por paradas o retrasos entre tongadas sucesivas (juntas frías).

2.9.1.3 Capacidad de paso

La capacidad de paso describe la capacidad de la mezcla fresca de fluir a través de espacios confinados y aperturas estrechas así como zonas densamente armadas sin segregación, pérdida de uniformidad o bloqueo. En la definición de la capacidad de paso, es necesario considerar la geometría y la densidad de las armaduras, el flujo/capacidad de relleno y el tamaño máximo de los áridos.

La dimensión definitiva es la del hueco más pequeño (hueco de confinamiento) a través del cual el HAC debe fluir continuamente para llenar el encofrado. Este hueco está normalmente, aunque no siempre, relacionado con la separación de las armaduras. A

menos que el armado sea denso, el espacio entre barras del armado y la superficie del encofrado (recubrimiento) no se considera habitualmente, puesto que el HAC puede bordear las barras y no necesita fluir de forma continua a través de estos espacios de recubrimiento.

A continuación se dan algunos ejemplos de especificación de la capacidad de paso:

PA1 estructuras con huecos de 80 mm a 100 mm (p.e. edificación, estructuras verticales).

PA2 estructuras con huecos de 60 mm a 80 mm (p.e. estructuras de obra civil) mayor de 100 mm no se requiere especificación alguna de la capacidad de paso.

Para estructuras complejas, con separaciones menores de 60 mm, se precisarán ensayos previos específicos con maquetas.

2.9.1.4 Resistencia a la segregación

La resistencia a la segregación es fundamental para la homogeneidad y calidad in situ del HAC. Éste puede sufrir segregación durante la colocación y también después de la aplicación y antes del fraguado. La segregación que se produzca después de la colocación será más perjudicial en elementos altos y en pavimentos, ya que ello puede producir defectos superficiales como fisuración o debilitar la superficie.

En los casos de ausencia de experiencias previas, se dan las siguientes directrices generales en cuanto a clases de resistencia a la segregación:

La resistencia a la segregación es un parámetro importante para mayores clases de asentamiento y/o menores clases de viscosidad, o si las condiciones de aplicación promueven la segregación. Si no es de aplicación a ninguno de estos casos, no es preciso especificar la clase de resistencia a la segregación.

- SR1 es aplicable generalmente a losas esbeltas y para aplicaciones verticales con un recorrido de flujo menor de 5 metros y una separación de las armaduras mayor de 80 mm.
- SR2 es la recomendada para aplicaciones verticales si el recorrido de flujo es mayor de 5 metros y la separación de armado mayor de 80 mm en orden de prevenir la segregación durante el recorrido del flujo.
- SR2 podrá usarse también en aplicaciones muy altas con una separación de armadura menor de 80 mm si la distancia de recorrido de flujo es menor de 5 metros, pero si la distancia de flujo es mayor de 5 metros se recomienda especificar un valor de SR menor en un 10%.

4.1 ENSAYOS PARA LA CARACTERIZACIÓN LOS AGREGADOS

En los siguientes cuadros se mostraran los resultados obtenidos de los distintos ensayos realizados en laboratorio para caracterizar a los agregados basándonos en las normativas vigentes.

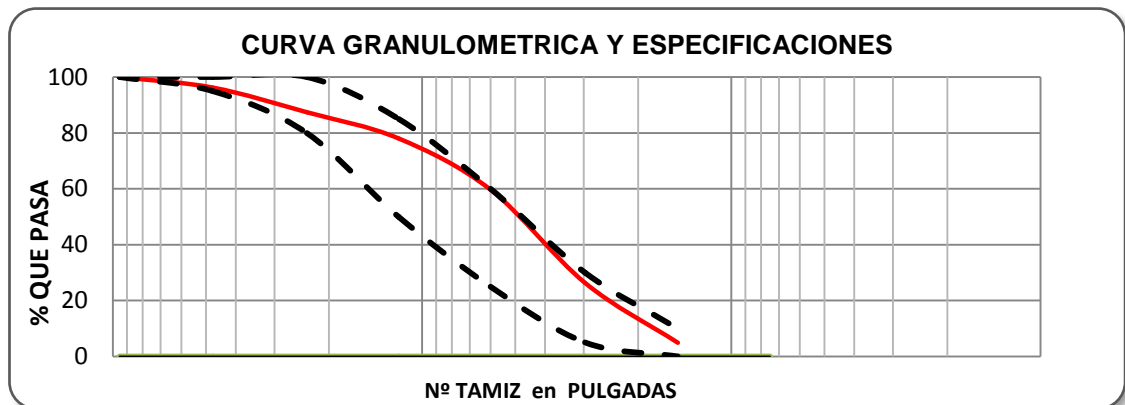
Se estudiaron dos tipos de arenas la que mejor resultado en sus propiedades tuvieron es la arena 1 la cual presenta un modulo menor y que contiene cantidad de finos más que la arena 2.

4.1.1 Granulometría de los agregados

(Tabla 23) Granulometría del agregado fino

ANÁLISIS GRANULOMETRICO DEL AGREGADO FINO 1 C33							
Peso Total Seco (gr.)		746,70					
Tamices	Abertura (mm.)	Peso Retenido (grs.)	Retenido Acumulado		% que Pasa del Total	Especificaciones ASTM	
			(grs.)	(%)			
3/8"	9,53	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
Nº 4	4,75	28,00	28,00	3,75	96,25	95	100
Nº 8	2,36	65,50	93,50	12,52	87,48	80	100
Nº 16	1,19	70,30	163,80	21,94	78,06	50	85
Nº 30	0,600	136,90	300,70	40,27	59,73	25	60
Nº 50	0,297	249,20	549,90	73,64	26,36	5	30
Nº 100	0,149	159,80	709,70	95,04	4,96	0	10
BASE	0,000	36,80	746,50	99,97	0,03		

(Figura 40) Curva granulométrica de agregado fino

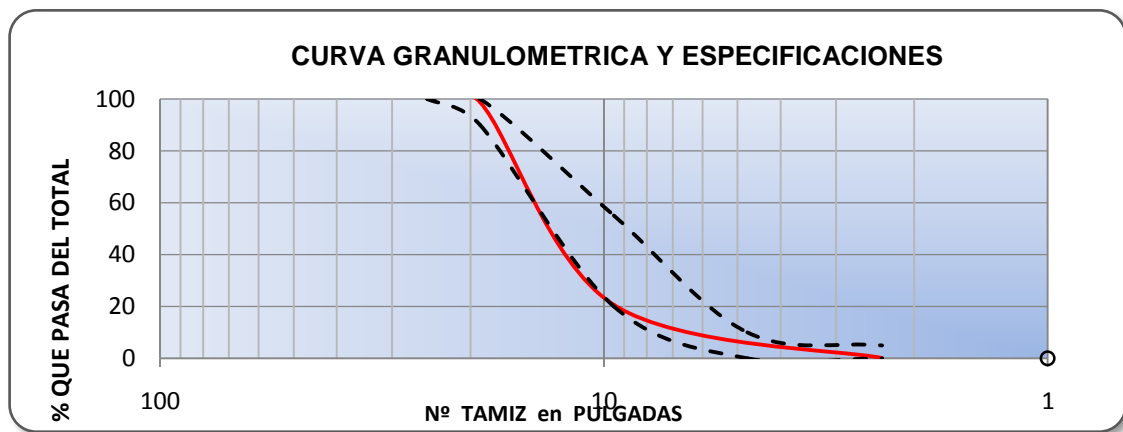


(Tabla 24) Granulometría del la grava de 19 mm

GRANULOMETRICO DEL AGREGADO GRUESO 19mm ASTM C 33

Peso Total Seco (gr.) =		14051,0					
Tamices	Abertura (mm.)	Peso Retenido (grs.)	Retenido Acumulado		% que Pasa del Total	Especificaciones ASTM	
			(grs.)	(%)			
1"	25	0,00	0,00	0,00	100,00	100	100
3/4"	19,00	0,00	175,00	1,25	98,75	90	100
1/2"	12,50	0,00	7752,00	55,17	44,83		
3/8"	9,50	0,00	11152,00	79,37	20,63	20	55
Nº 4	4,75	0,00	14010,00	99,71	0,29	0	10
Nº 8	2,36	0,00	14031,00	99,86	0,14	0	5
base			14051,00	100,00	0,00		

(Figura 41) Curva granulométrica de la grava 19 mm

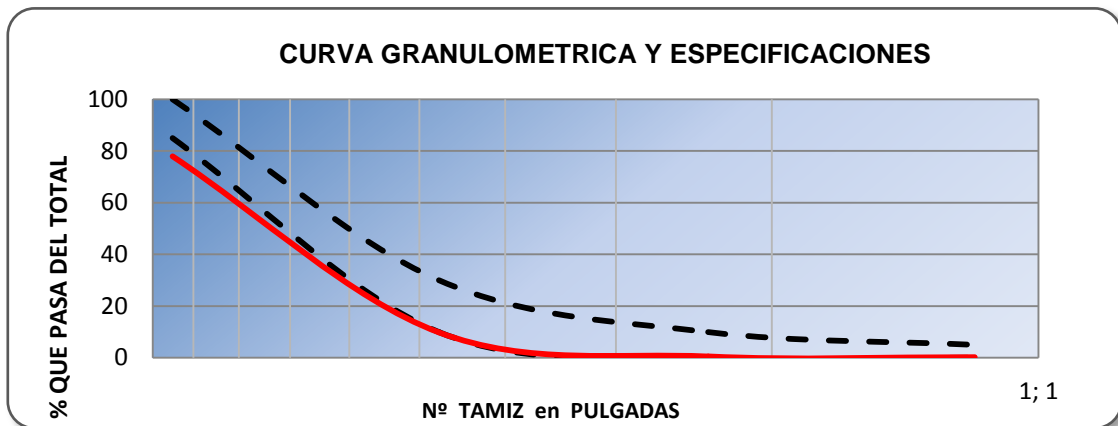


(Tabla 25) Granulometría de la grava de 9.5 mm

GRANULOMETRICO DEL AGREGADO GRUESO 9,5 mm ASTM C 33

Peso Total Seco (gr.) =		7815,0					
Tamices	Abertura (mm.)	Peso Retenido (grs.)	Retenido Acumulado		% que Pasa del Total	Especificaciones ASTM	
			(grs.)	(%)			
3/8"	9,50	1720,00	1720,00	22,01	77,99	85	100
Nº 4	4,75	5331,00	7051,00	90,22	9,78	10	30
Nº 8	2,36	724,00	7775,00	99,49	0,51	0	10
Nº 16	1,18	23,00	7798,00	99,78	0,22	0	5
base		17,00	7815,00	100,00	0,00		

(Figura 42) Curva granulométrica de la grava 9.5 mm



4.1.2 Granulometría de agregados combinados.

Para poder obtener la curva granulométrica combinada se aplicó el ensayo de vacíos mínimos, este ensayo se lo realiza mediante varios ensayos de pesos unitarios. Se combinaron los agregados en porcentajes hasta obtener la combinación más óptima, lo óptimo de la combinación será el momento en que las partículas de los dos agregados combinados lleguen a tener vacíos mínimos.

La primera combinación que se realizó fue la de los agregados gruesos de 19 y 9.5 mm, la combinación óptima resultante fue de un 60% de agregado de 19mm con un 40% de agregado de 9.5 mm.

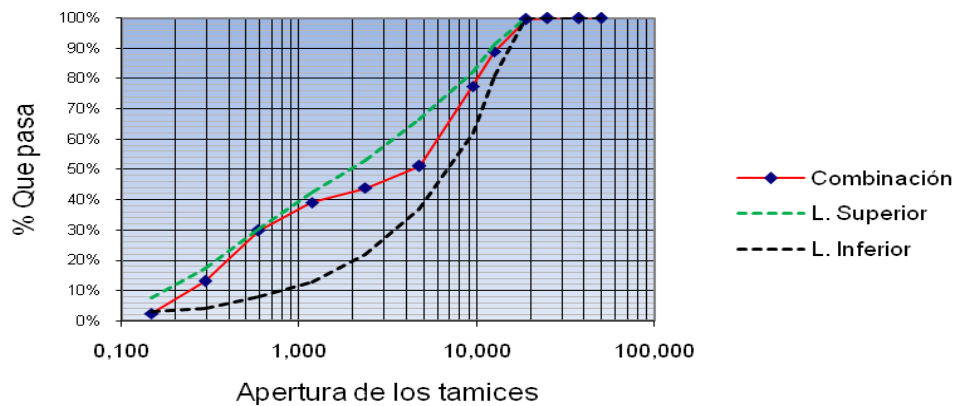
Luego se mezcló en esos porcentajes anteriores los agregados gruesos para obtener un solo agregado grueso. Una vez teniendo el nuevo agregado se realizó el mismo procedimiento del ensayo de pesos unitarios anteriormente hechos, se hizo la combinación con el agregado fino y la nueva combinación de agregado grueso. El resultado que se logró fue 50% de arena con un 50% de las gravas combinadas.

Todo el procedimiento de los ensayos de vacíos mínimos está en **Anexos 7**, a continuación se mostrará la curva granulométrica de la combinación de gravas y arena con los límites respectivos de curvas combinadas.

(Tabla 26) Granulometría de agregados combinados (grueso y fino)

Malla	Apertura mm	% Pasa Acumulado	LIMITES	
			Superior	Inferior
2"	50,000	100,0%	100%	100%
1 1/2"	37,500	100,0%	100%	100%
1"	25,000	100,0%	100%	100%
3/4"	19,000	99,8%	100%	100%
1/2"	12,500	89,0%	92%	81%
3/8"	9,500	77,5%	83%	62%
# 4	4,750	51,1%	67%	37%
# 8	2,360	43,9%	53%	22%
# 16	1,180	39,1%	43%	13%
# 30	0,590	29,9%	31%	8%
# 50	0,295	13,2%	18%	4%
# 100	0,148	2,5%	8%	3%
# 200	0,074	0,0%		
< 200				

(Figura 43) Curva granulométrica de agregados combinados



4.1.3 Caracterización de los agregados utilizados

En la siguientes tablas se presentan todas las características físicas y mecánicas de los agregados empleados en nuestra investigación (arena 1 grava 19mm y grava de 9.5mm). Se ha desechado una arena nombrada como la arena 2 por no presentar cantidades de finos. Además su módulo de finura era muy alto.

Las planillas correspondientes de todos los ensayos realizados para la caracterización de los agregados se encuentra en **Anexos 8** al igual que la arena que se ha desechado.

(Tabla 27) Características físico – mecánica de la arena 1

Modulo de finura	2.47			
%de humedad	1.96			
% de finos tamiz 200	Norma ASTM	Observaciones		
0.77	0-5	cumple		
PESO UNITARIO				Promedio
Peso unitario suelto kg./m ³	1668,79	1681,51	1676,13	1675,47
Peso unitario compactado kg./m ³	1747,06	1753,42	1755,87	1752,12
PESO ESPECIFICO MÉTODO DEL “PICNÓMETRO”				Promedio
% de absorción		1,28	1,26	1,27
Peso específico bruto, base muestra s.s.s., G _{bs}		2655,34	2652,52	2653,93
Peso específico bruto, base muestra secada al horno, G _b		2621,88	2619,63	2620,75
Peso específico aparente, G		2712,64	2708,72	2710,68

(Tabla 28) Características físico – mecánica de la grava 19mm (3/4”)

Modulo de finura	7.35			
%de humedad	0.59			
% de finos tamiz 200	Norma ASTM	Observaciones		
0.26	0-0.5	cumple		
PESO UNITARIO				Promedio
Peso unitario suelto kg./m ³	1543,55	1558,59	1567,10	1560,49
Peso unitario compactado kg./m ³	1616,98	1632,03	1619,16	1626,64
PESO ESPECIFICO MÉTODO DEL “CESTO”				Promedio
% de absorción		1,88	1,78	1,81
Peso específico bruto, base muestra s.s.s., G _{bs}		2593,19	2595,30	2591,09
Peso específico bruto, base muestra secada al horno, G _b		2545,38	2549,88	2544,94
Peso específico aparente, G		2673,19	2671,20	2668,08

(Tabla 29) Características físico – mecánica de la grava 9.5 mm (3/8”)

Modulo de finura	6.12			
%de humedad	1.95			
% de finos tamiz 200	Norma ASTM	Observaciones		
0.34	0-0.5	cumple		
PESO UNITARIO				Promedio
Peso unitario suelto kg./m ³	1501,39	1510,69	1501,39	1504,49
Peso unitario compactado kg./m ³	1628,46	1636,58	1616,98	1627,34
PESO ESPECIFICO MÉTODO DEL “CESTO”				Promedio
% de absorción	2,62	2,56	2,56	2,58
Peso específico bruto, base muestra s.s.s., G _{bs}	2580,65	2583,98	2587,32	2583,98
Peso específico bruto, base muestra secada al horno, G _b	2514,84	2519,38	2522,64	2518,95
Peso específico aparente, G	2691,99	2693,37	2697,10	2694,15

4.2 RESULTADOS DE LA DOSIFICACIÓN DEL HAC

Para llegar a este resultado se ha tenido que realizar varias pruebas hasta buscar un hormigón con las características de autocompactabilidad. Se ha partido desde la dosificación de la pasta y del mortero para comenzar luego las pruebas en el hormigón.

Todas las tablas y los pasos a seguir se encuentran en el **Anexo 8**. En el siguiente cuadro se encuentra la dosificación lograda y que cumple con las tres propiedades que son: capacidad de paso, capacidad de relleno y la resistencia a la segregación.

(Tabla 30) Resultados de la dosificación del hormigón autocompactante

PRUEBA 9 PARA TODOS LOS ENSAYOS

Se utilizara 15 lts. de hormigón para hacer los ensayos.

0,015 m³

COMPONENTES	DISEÑO TEÓRICO	M. Lab Kg
		Cemento Kg
Agua L	83,0	1,245
Arena kg	1.146,5	17,198
Grava 19 mm (kg)	198,1	2,972
Grava 9,5 mm (kg)	603,9	9,058
Aditivo	1,30%	
(viscocrete 5-800) gr		83,8500
Relacion a/c		0,360

ENSAYOS DE HORMIGON FRESCO					
Extención de Flujo T50cm					
tiempo	d1 cm	d2 cm	media 65-80 (cm)		
3			71		
Cumple	70	72	Cumple		
Ensayo de Anillo J					
h1 cm	h2 cm	h2/h1	d1 cm	d2 cm	media 50-80 (cm)
10	10	1			66,5
		Cumple	66	67	Cumple
Ensayo de Embudo en v					
Tiempo(5min)	tiempo 6-12 (s)				
5	7				
cumple	Cumple				
Caja en L					
T20<1,5 s	T20<2,5 s	h1 cm	h2 cm	h2/h1<1cm	
1,2	2	6,5	6	0,9	
Cumple	Cumple			Cumple	

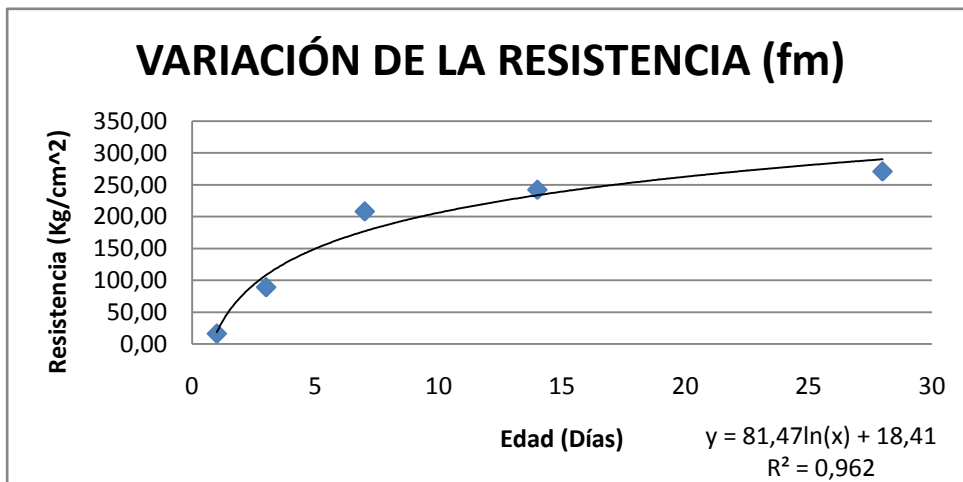
4.3 RESULTADOS DE LOS ENSAYOS A COMPRESIÓN

En la siguiente tabla se mostrara los resultados obtenidos en los ensayos a compresión de las probetas, y una grafica de la variación de la resistencia media (f_{cm}) a distintas edades

(Tabla 31) Resistencia media (f_{cm}) del hormigón HAC

Edad	Carga (KN)	Res. fci	Res. fcm
		(kg/cm ²)	(Kg/cm ²)
1	27,80	16,05	16,24
	28,28	16,32	
	28,25	16,31	
	28,20	16,28	
3	154,45	89,15	89,10
	154,54	89,20	
	154,37	89,10	
	154,11	88,96	
7	356,80	205,95	208,14
	357,00	206,07	
	364,60	210,45	
	364,00	210,11	
14	420,67	242,82	242,19
	419,75	242,29	
	419,29	242,02	
	418,60	241,62	
28	471,15	271,96	270,96
	468,12	270,21	
	469,60	271,06	
	468,83	270,62	

(Figura 43) Curva de variación de la resistencia media (f_{cm}) a distintas edades



5.1. Análisis de resultados

5.1.1 Prueba de flujo 1

Para la primera prueba de flujo que se realizó con un contenido de 1% de viscoconcreto 5-800 y una relación de agua/cemento de 0.40, se observó que la mezcla no fluía.

5.1.2 Prueba de flujo 2

Para esta prueba se tuvo que aumentar el superplastificante de un 1% a un 1,10% y mantener la relación agua cemento se ha alcanzado un flujo de 55 y no ha cumplido con los requerimientos que está entre 65 y 80.

5.1.3 Prueba de flujo 3

Para la tercera prueba de flujo se tuvo que subir 1.5% de aditivo, en esta mezcla se observó una gran segregación como se ve en la siguiente fotografía:



Foto 1 Segregación del hormigón

5.1.4 Prueba de flujo 4

Ya que se tubo segregación de la mezcla en la anterior prueba, cuando se aumento el aditivo en un 1.5% entonces se tuvo que bajar a un 1.20%

Se obtuvo la mezcla buscada un flujo de 66.5, con esta dosificación se realizara las demás pruebas del hormigón buscando sus propiedades de capacidad de relleno,

capacidad de paso y la resistencia a la segregación con los ensayos del anillo japonés, caja en L y embudo V la mezcla resultante se ve en la foto 2



Foto 2 Prueba de extensión de flujo

5.1.5 Prueba 5 para todos los ensayos

Para la realización de todos los ensayos se utilizaron 15 litro de hormigón los resultados que nos dieron son los siguientes:

Extensión de Flujo T50cm					
tiempo 2 a 5 s	d1 cm	d2 cm	media 65-80 (cm)		
4	66	67,5	66,75		
Cumple			Cumple		
Ensayo de Anillo J					
h1 cm	h2 cm	h2/h1 <1	d1 cm	d2 cm	media 50-80 (cm)
9	12,5	1,39	40	38	39
		bloqueo			bajo
Ensayo de Embudo en v					
Tiempo(5min)	tiempo 6-12 (cm)				
0	0				
Caja en L					
T20<1,5 s	T20<2,5 s	h1 cm	h2 cm	h2/h1<1cm	
2	1	2	2	1	
BLOQUEO	Cumple			Cumple	

Analizando los datos se puede observar que se ha cumplido con el ensayo de flujo T50 con tiempo de 4s los parámetros requeridos es de 2 a 5 s y cumple, un flujo promedio de 66.75 la parámetros son de 65 a 80 y también cumple, pero en el ensayo de anillo J nos da un coeficiente de bloqueo de 1.39 y la norma nos dice que debe ser aproximadamente un bloqueo de 1 entonces no ha cumplido este requerimiento, por lo tanto esta mezcla no es apta.

5.1.6 Prueba 6 para todos los ensayos

Para la prueba 6 se ha tenido que aumentar el superplastificante a 1.30% y se tiene los siguientes resultados:

Extensión de Flujo T50cm					
tiempo 2 a 5 s	d1 cm	d2 cm	media 65-80 (cm)		
3			68,5		
Cumple	68	69	Cumple		
Ensayo de Anillo J					
h1 cm	h2 cm	h2/h1 <1	d1 cm	d2 cm	media 50-80 (cm)
9	10,5	1,2	45	48	46,5
		bloqueo			bajo
Ensayo de Embudo en v					
Tiempo(5min)	tiempo 6-12 (cm)				
Caja en L					
T20<1,5 s	T20<2,5 s	h1 cm	h2 cm	h2/h1<1cm	

En un análisis de los datos de esta prueba se puede observar que se ha cumplido con el ensayo de flujo T50 con tiempo de 3s, los parámetros requeridos son de 2 a 5 s, los cuales sí se cumplen, existe un flujo promedio de 68.5, los parámetros son de 65 a 80 y también los cumple, pero en el ensayo de anillo J nos da un coeficiente de bloqueo de 1.2 y la norma nos dice que debe ser aproximadamente 1. Además observando en el alrededor de la mezcla se observa que existen indicios de segregación, los cuales no son adecuados.

En la siguiente fotografía se puede apreciar un bloqueo en el anillo J:



Foto 3 bloqueo en el anillo J

5.1.7 Prueba 7 para todos los ensayos

Analizando las anteriores pruebas donde no era tanto el problema del superplastificante si estaba en las cantidades de agregados entonces se tuvo que modificar en el siguiente porcentaje:

- De un 60% de grava 19 mm disminuir a un porcentaje de 35%
- La grava de 9.5 mm de un 40% se aumento a un 65%
- se aumento el cemento a 420 kg/m³ para tener más pasta para evitar el bloqueo

Extensión de Flujo T50cm					
tiempo 2-5 (cm)	d1 cm	d2 cm	media 65-80 (cm)		
3	64	68	66		
Cumple			Cumple		
Ensayo de Anillo J					
h1 cm	h2 cm	h2/h1 <1	d1 cm	d2 cm	media 50-80 (cm)
10	11	1,1	38	40	39
		bloqueo			bajo
Ensayo de Embudo en v					
Tiempo(5min)	tiempo 6-12 (s)				
0	0				
Caja en L					
T20<1,5 s	T20<2,5 s	h1 cm	h2 cm	h2/h1<1cm	

Se puede analizar viendo los datos que en el ensayo de extensión de flujo se han cumplido los parámetros, pero en el anillo J aun existe bloqueo de 1.1.

5.1.8 Prueba 8 para todos los ensayos

Aun existe en la prueba 7 indicios de bloqueo entonces se siguió cambiando las proporciones de los agregados y se presenta a continuación.

-De un 35 % de grava 19 mm disminuir a un porcentaje de 25%

-La grava de 9.5 mm de un 65% se aumento a un 75%

La cantidad de aditivo fue de 1.25% y una relación a/c se aumenta 0.42 el cemento se aumento a 430 kg/m³ y los resultados fueron los siguientes:

Extensión de Flujo T50cm					
tiempo 2-5 (cm)	d1 cm	d2 cm	media 65-80 (cm)		
4	65	65,5	65,25		
Cumple			Cumple		
Ensayo de Anillo J					
h1 cm	h2 cm	h2/h1 <1	d1 cm	d2 cm	media 50-80 (cm)
10,5	10	0,95	65	64	64,5
		Cumple			Cumple
Ensayo de Embudo en v					
Tiempo(5min)	tiempo 6-12 (s)				
6	8				
cumple	Cumple				
Caja en L					
T20<1,5 s	T20<2,5 s	h1 cm	h2 cm	h2/h1<1cm	
1,2	2	6	5,5	0,91	
Cumple	Cumple			Cumple	

Observando los resultados en la tabla que cumplió los requisitos de extensión de flujo de t de 4s un diámetro de 65, en el anillo J también cumplió el bloqueo de 0.95 que es aproximado a 1 una extensión de flujo 64.5 la norma nos dice de 50 a 80 que es lo ideal y por lo tanto cumplió, en el embudo el tiempo salida fue de 8 s la norma nos dice que tiene que ser entre 6 y 12s por lo tanto nuestro hormigón cumplió, el tiempo T5min no fue superior a T en el embudo y eso nos indica que no existirá segregación.

Los resultados de la caja en L fueron de 0.91 de bloqueo que es cercano 1 por lo tanto cumple el bloqueo, presenta un T40 de 2s la norma nos dice que tiene que ser menores a 2.5s cumple, el T20 fue de 1.5s

Se ha podido verificar todas las propiedades del hormigón autocompactable en su estado fresco

5.1.9 Prueba 9 para todos los ensayos

En esta prueba se va tratar de mejorar a un mas las propiedades del HAC aumentando el aditivo Superplastificante Viscocrete 5- 800 a un 1.30% y manteniendo la relación a/c los resultados adquiridos son:

ENSAYOS DE HORMIGON FRESCO					
Extención de Flujo T50cm					
tiempo 2-5 (cm)	d1 cm	d2 cm	media 65-80 (cm)		
3	70	72	71		
Cumple			Cumple		
Ensayo de Anillo J					
h1 cm	h2 cm	h2/h1	d1 cm	d2 cm	media 50-80 (cm)
10	10	1	66	67	66,5
		Cumple			Cumple
Ensayo de Embudo en v					
Tiempo(5min)	tiempo 6-12 (s)				
5	7				
cumple	Cumple				
Caja en L					
T20<1,5 s	T20<2,5 s	h1 cm	h2 cm	h2/h1<1cm	
1,2	2	6,5	6	0,9	
Cumple	Cumple			Cumple	

Observando los resultados en la tabla que cumplió los requisitos de extensión de flujo de t de 3s un diámetro de 71, en el anillo J también cumplió el bloqueo de 1 que igual a 1, con una extensión de flujo 66.5 la norma nos dice de 50 a 80 que es lo ideal y por lo tanto sí cumple, en el embudo el tiempo salida fue de 7 s, la norma nos dice que tiene

que ser entre 6 y 12s, por lo tanto nuestro hormigón cumplió con lo requerido, el tiempo T_{5min} no fue superior a T en el embudo y eso nos indica que no existirá segregación.

Los resultados de la caja en L fueron de 0.92 de bloqueo que es cercano 1 por lo tanto cumple el bloqueo, presenta un T_{40} de 2s la norma nos dice que tiene que ser menores a 2.5s cumple, el T_{20} fue de 1.5s.

Se ha podido verificar todas las propiedades del hormigón autocompactante en su estado fresco y de esta muestra se realizó probetas para ver su resistencia a la compresión en su En esta prueba se ha mejorado notablemente sus propiedades del HAC cumpliendo todas sus propiedades de autocompactabilidad.

Para los dos resultados anteriores podemos identificar al hormigón según la normativa de EFNARC-2002, clasificándolos según sus propiedades de escurrimiento, capacidad de paso y resistencia a la segregación.



Foto 4 Ensayo de anillo J



Foto 5 resultado del ensayo de caja en L



Foto 6 resultado de ensayo del embudo en V

5.2 CLASIFICACIÓN SEGÚN EFNARC DEL HAC

5.2.1 Ensayo del escurrimiento

El valor que tenemos de escurrimiento es de 710 mm se clasifica como SF2 según EFNARC los parámetros son SF2 (660 – 750 mm) es adecuado para muchas aplicaciones normales (p.e. muros, pilares vigas de puentes)

5.2.2 Viscosidad

Se puede estimar mediante el valor de T5 min en el ensayo de embudo en V nuestro valor que tenemos es de 5 s y el valor de salida inicial es de 7 entonces la diferencia entre T5min y T es 2 s y se puede clasificar según la tabla:

Clase	T ₅₀₀ , s	Tiempo del ensayo del embudo en V en s
VS1/VF1	≤ 2	≤ 8
VS2/VF2	> 2	de 9 a 25

VS1/VF1 tiene una buena capacidad de llenado aún con alta densidad de armaduras. Es capaz de autonivelarse y generalmente tiene mejor acabado superficial. Aún así, es más propenso a presentar exudación y segregación.

Clase	T ₅₀₀ , s	Tiempo del ensayo del embudo en V en s
VS1/VF1	≤ 2	≤ 8
VS2/VF2	> 2	de 9 a 25

5.2.3 Capacidad de paso

Nuestro valor de capacidad de paso se ha obtenido del ensayo de de la caja en L que es de un valor de 0.92 según la tabla que presenta EFNARC

Clase	Capacidad de paso
PA1	≥ 0,80 con 2 obstáculos de barras
PA2	≥ 0,80 con 3 obstáculos de barras

Se puede clasificar como un PA1 su aplicación en estructuras con huecos de 80 mm a 100 mm (p.e. edificación, estructuras verticales)

5.3 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA FCK DEL HAC

Todos los datos obtenidos del ensayo a compresión estarán sujetos a variación la media de los datos no nos indicara realmente si es la fuerza a compresión exacta, se tendrá que calcular un coeficiente de variación para encontrar la resistencia característica (Fck) para el cálculo del coeficiente de variación se calculara antes la desviación estándar con la siguiente fórmula:

-Para un número de muestras menores a treinta

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x - \bar{x})^2}{n - 1}}$$

Donde:

x = Resistencia a la compresión de la muestra

\bar{x} = Resistencia a la compresión promedio

n = número de muestras

Coefficiente de variación

$$CV = \frac{\sigma}{\bar{x}}$$

Edad	VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA (FCK)					Res. Fck(Kg/cm ²)
	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia (Kg/cm ²)	Resistencia (Kg/cm ²)	fcm*(1-1,64*CV)
1	28,28	16,32	16,24	7,3E-03	0,130	16,02647673
	28,25	16,31		4,5E-03		
	28,20	16,28		1,6E-03		
					0,00800	
3	154,45	89,15	89,10	2,4E-03		88,92939238
	154,54	89,20		9,6E-03		
	154,37	89,10		2,0E-28	0,106	
	154,11	88,96		2,2E-02		
7	356,80	205,95	208,14	4,8E+00		204,0926395
	357,00	206,07		4,3E+00		
	364,60	210,45		5,3E+00	2,471	
	364,00	210,11		3,9E+00		
14	420,67	242,82	242,19	4,0E-01		241,3653292
	419,75	242,29		9,9E-03		
	419,29	242,02		2,8E-02	0,501	
	418,60	241,62		3,2E-01		
28	471,15	271,96	270,96	9,9E-01		269,7311892
	468,12	270,21		5,7E-01	0,750	
	469,60	271,06		1,1E-02		
	468,83	270,62		1,2E-01		

Analizando los resultados de los ensayos a compresión se ha podido observar que la resistencia media a los 28 días $f_m = 270.96 \text{ kg/cm}^2$ y una resistencia $F_{ck} = 269.73 \text{ kg/cm}^2$ la resistencia proyectada fue de 250 kg/cm^2 y a cumplido

5.4 ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS

Se realizara un análisis de precios unitarios de un hormigón convencional y un hormigón autocompactante de igual resistencia que es de 270 kg/cm^2 dicha resistencia fue el que nos dio la rotura de probetas proyectada a los 28 días

PRECIO UNITARIO DE UN H. CONVENCIONAL

Descripción del servicio	UNIDAD	REND	P.U.(BS)	COSTO TOTAL
--------------------------	--------	------	----------	-------------

a) MATERIALES

CEMENTO	Kg	320	1.06	339.2Bs
ARENA	m ³	0.30	72	21.60 Bs
GRAVA 3/4"	m ³	0.274	110	30.19 Bs
GRAVA 3/8"	m ³	0.091	121	11.07 Bs
AGUA	lt	192	0.05	9.60 Bs
ADITIVO	lt			
TOTAL MATERIALES				411.66Bs

b) MANO DE OBRA

ALBAÑIL	Hr	10	7	70,00 Bs
AYUDANTE	Hr	20	5	100,00 Bs
TOTAL MANO DE OBRA				170 Bs

c) HERRAMIENTAS

MEZCLADORA	Hr	1	30	30
VIBRADORA	Hr	0.6	15	9
GENERALES	%	6	170	10.20

TOTAL HERRAMIENTAS	49.20
---------------------------	--------------

COSTO TOTAL DEL ITEM = 630.86 Bs

**PRECIO UNITARIO DE UN HORMIGON AUTOCOMPACTANTE
HORMIGON CON 1.30% VISCOCRTE 5-800**

Descripción del servicio	UNIDAD	REND	P.U.(BS)	COSTO TOTAL
--------------------------	--------	------	----------	-------------

d) MATERIALES

CEMENTO	Kg	424	1.06	424.44Bs
ARENA	m3	0.402	72	28.8 Bs
GRAVA 3/4"	m3	0.074	110	8.14 Bs
GRAVA 3/8"	m3	0.217	121	26.25Bs
AGUA	lt	171	0.05	7.55 Bs
ADITIVO	lt	5	85	425
TOTAL MATERIALES				Bs 920.74

e) MANO DE OBRA

ALBAÑIL	Hr	10	7	70,00 Bs
AYUDANTE	Hr	20	5	100,00 Bs
TOTAL MANO DE OBRA				170 Bs

f) HERRAMIENTAS

MEZCLADORA	Hr	1	30	30
VIBRADORA	Hr	0.6	15	9
GENERALES	%	6	170	10.20
TOTAL HERRAMIENTAS				49.20

COSTO TOTAL DEL ITEM = 1139.94 Bs

En el análisis de precios unitarios para establecer los costos por m³ de hormigón convencional y de hormigón autocompactante en el cual se utiliza un aditivo superplastificante se puede apreciar que el precio unitario de un hormigón autocompactable realizado con agregado chancado con respecto del precio unitario de un hormigón convencional, difiere en dos aspectos: el primero en la cantidad de agua empleada pero su influencia en el precio unitario es muy despreciable, el segundo es que al usar un aditivo en el hormigón aumenta su precio unitario considerablemente

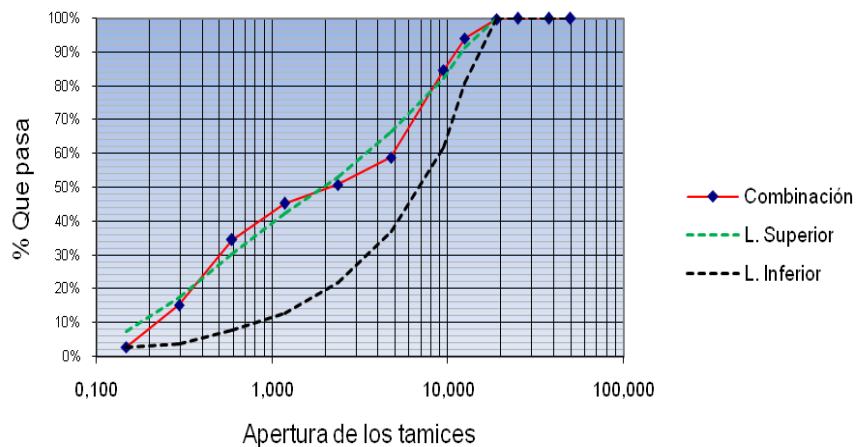
Pese al mayor costo directo de los materiales, el uso del hormigón autocompactado permite notables ahorros en la obra, producto de la facilidad de hormigonado, de la menor necesidad de personal, de la calidad de la terminación y del menor desgaste de equipos y moldaje. Por otro lado, abre notables perspectivas para el diseño de formas complejas que hasta ahora hacían difícil su materialización.

CONCLUSIONES

1.- Se ha podido llegar a los objetivos planteados y también se verificó la hipótesis que se ha tenido en este proyecto, dando como conclusión que se obtuvo un hormigón con características similares a las de un hormigón autocompactante convencional cumpliendo con sus propiedades en estado fresco y su resistencia a la compresión

2.- La combinación final de los agregados nos genera una curva, la cual no entro en los límites establecidos, esto nos demuestra que estas curvas que son para hormigones convencionales no son definitivas para un hormigón autocompactante, sino que nos sirve como referencial. Hoy en día no existen referencias de límites de curvas para combinaciones de agregados para hormigones autocompactantes,

Si se observa en la grafica el desfase que se tiene es la parte de agregado fino que requirió nuestro hormigón para poder cumplir con las propiedades de autocompactabilidad, en la curva también se demuestra que utilizando agregado grueso chancado a requerido de mayor agregado fino para evitar su segregación.



3.- El uso de un superplastificante de mejor calidad es uno de los requisitos principales para producir hormigones autocompactantes con agregados de nuestro medio, además ayuda en mucho a poder compensar alguna falencia ya sea en el cemento o los agregados, en muchos casos a mejora la resistencia del hormigón.

4.- En cuanto a la resistencia a la compresión de 270 kg/cm² de nuestro hormigón autocompactante fue un poco bajo para la cantidad de cemento que se utilizo de 430kg/m³, esta cantidad se utiliza para obtener una pasta la cual pueda evitar el roce entre las partículas del agregado grueso chancado.

Las razones por lo que la resistencia no fue mayor, es que el porcentaje de agregado grueso de 26.9 % utilizado para nuestro hormigón, fue menor a lo establecido por las recomendaciones, esto se puede verificar en tabla de control de la composición de la mezcla (parámetros establecidos por EFNARC-2002).

También se puede observar en la tabla que la cantidad de agua de 213 l/m³ utilizada para nuestro hormigón excede al contenido de agua establecido por la norma que es un mínimo de 200 l /m³ esto hace que la resistencia pueda bajar.

CONTROL DE LA COMPOSICIÓN DE LA MEZCLA (EFNARC- 2002)

Parámetros para el HAC	Resultados	Unidades	Obser.
Árido grueso entre el 28 %a 35% por volumen de mezcla	26,9	%	Muy poco
contenido total de finos de 160 a 400 l (400 a 600) kg/m ³	242,892	kg/m ³	Cumple
contenido de arena más del 40% del mortero (volumen)	50,288	%	Cumple
Arena del 40 al 60 % del agregado		%	Cumple
Arenas más del 50% por el peso del árido total	57,796	%	Cumple
Agua libre menor a 200 L	213	Litros	Excesiva agua
Pasta mayor al 40% del volumen de la mezcla	47,040	%	Cumple
Cantidad de cemento 350 a 450 kg/m ³	430	kg/m ³	Cumple
Contenido de aditivo superplastificante entre 0,6% a 2%	1,000	%	Cumple

5.- Como conclusión general se puede establecer que para una dosificación de hormigón autocompactante utilizando agregados gruesos de nuestro medio el cual es chancado se deberá colocar en porcentajes menores y además estos agregados requieren mayores cantidades de agua en comparación a un hormigón autocompactante utilizando agregados de catos rodados.

6.- Para mejorar la resistencia del hormigón utilizando agregados y materiales de nuestro medio, nos puede servir de mucha ayuda la utilización de adiciones inertes o puzolamicos que puede mejorar las propiedades del hormigón fresco y reducir las cantidades de cemento

7.- En esta investigación se ha podido verificar también, la variación de los equipos en las dimensiones y el espaciamiento entre barras (anillo japonés y caja en L) que resulta ser 3 veces mayor el tamaño máximo del agregado grueso como nos indica varios autores.

El espaciamiento se verifico cuando utilizamos la caja en L que tenía un espaciamiento entre barras en un principio de 35mm y para los ensayos se estaba utilizando agregados de 19 mm, con este espaciamiento se tuvo muchas dificultades para el paso del agregado. Observando estas dificultades se modifico el espaciamiento del equipo a 3 veces mayor que el agregado de 19mm que resulta ser un espaciamiento entre barras de 57mm. Y Con esta modificación se logro realizar los ensayos.

8.- Analizando el costo unitario del hormigón autocompactante elaborado con canto triturado y un hormigón convencional, el costo es más elevado del autocompactante, por utilizar aditivos y cantidades de cemento mayores que las de un convencional, pero se ha visto también que si se utiliza el hormigón autocompactante en una construcción, reducirá el tiempo previsto de la construcción. Además que presentara varias ventajas como constructivas, ambientales y económico

Recomendaciones

1.- Para realizar la dosificación de un HAC se recomienda tener muy en cuenta la absorción y humedad de los agregados ya que una pequeña variación puede causar diferencias en el contenido del agua.

2.- Para la realización de cada ensayo siempre se deberá sacar antes las humedades de los áridos que se van a utilizar, esto para evitar algunos inconvenientes en la dosificación como pueden ser exceso de agua o por lo contrario falta de la misma.

3.- Se recomienda trabajar con agregados que estén superficialmente secos ya que esto nos ayuda a reducir problemas en el contenido de agua. Para que los áridos estén adecuados, se los debe hacer reposar por lo menos 24 horas humedeciéndoles con agua y cubriendo con paños para que no pierda humedad.

4.- Es muy importante al pesar, revisar las cantidades adecuadas para la dosificación ya que si se pesa mal, se tendrá problemas en la misma.

6.- Para los ensayos de flujo de asentamiento, caja en L, anillo japonés y embudo en V por lo menos se requiere de 3 personas con experiencia, ya que uno solo no podrá lograr el resultado esperado.

7.- El tiempo de mezclado de un hormigón autocompactante se ha visto que deberá ser mayor al de un tiempo de mezclado de un hormigón convencional.

8.- Siempre para cada ensayo se deberá humedecer y recoger constantemente los excesos de agua ya que estos pueden provocar engaños de segregación.

BIBLIOGRAFIA

BURÓN MAESTRO Manuel “Hormigón Autocompactante Criterios de Utilización”
.Madrid, 2003.

CARMONA MENA José “Variación en las características de fluidez en mezclas de concreto mediante la modificación de aditivo y agua para la obtención de un concreto autocompactable”, Instituto tecnológico de costa rica escuela de ingeniería en construcción, Septiembre de 2004.

Departamento técnico de Sika S. A. “Concreto autocompactante” Revista de productos Sika (Guatemala), 2003

Directrices Europeas para el Hormigón Autocompactante “Especificaciones, producción y uso”, febrero de 2006.

EFNARC “Especificaciones y directrices para el Hormigón autocompactable- HAC”, febrero 2002

Fernández Vilanova Ángel tesis doctoral “INFLUENCIA DE LA DOSIFICACIÓN Y EMPLEO DE DIFERENTES TIPOS DE CEMENTO Y ADICIONES EN LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE”.
Madrid, 2009

Ing. Fave P. Carlos A, tesis de magister “hormigón autocompactante desarrollo y caracterización, Facultad de Ing. U.N.C.P.B.A, Agosto de 2003.

MENDEZ ALVARES Carlos Eduardo, “Metodología, diseño y desarrollo del proceso de investigación”, Tercera edición, Editorial Mc Graw Hill, Colombia, 2001.

MUÑOZ CHUTÁN Rudy Artemio, Tesis “Concreto Autocompactado experiencia en Guatemala”, Guatemala, Noviembre 2004

NÚÑEZ. BERMEJO ESTER B. tesis doctoral “DOSIFICACIÓN, PROPIEDADES Y DURABILIDAD EN HORMIGÓN AUTOCOMPACTANTE PARA EDIFICACIÓN”, universidad politécnica de Madrid, MADRID 2009

SIKA “Manual de especificaciones” 1999-200

SOPORTE ELECTRÓNICO

Centro de investigaciones “<http://www.frlp.utn.edu.ar/lemac>”

http://www.concretonline.com/index.php?option=com_content&task=view&id=4193&Itemid=36

Propiedades y usos del Hormigón

<http://facingyconst.blogspot.com/2006/07/propiedades-y-uso-del-hormign.html>

Sika Argentina “<http://www.Sika.com.bo>”

Sika España “<http://www.Sika.com.bo>”

Sika Chile “<http://www.Sikachile.com.bo>”

