

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

**EMPLEO DE NUEVAS TECNOLOGÍAS PARA EL DESARROLLO DE ALTAS
RESISTENCIAS INICIALES EN CONCRETOS PREFABRICADOS**

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Civil**, que presentan los bachilleres:

Stevens Ninanya Calderón

Elvis Melgar Vásquez

Asesores: Ing. Laura Navarro

Ing. Luciano López

Lima, octubre de 2016

ÍNDICE

1. PRESENTACIÓN DEL PROYECTO	1
1.1 RESUMEN DEL PROYECTO	
1.2 HIPÓTESIS	
1.3 OBJETIVOS	
1.4 ALCANCE DEL PROYECTO	
1.5 METODOLOGÍA	
1.6 INTRODUCCIÓN	
1.7 ESTADO DEL ARTE	
2. MARCO TEÓRICO	7
2.1 CONCRETO PREFABRICADO	
2.2 CONCRETO AUTOCOMPACTADO	
2.3 BENEFICIOS Y LIMITACIONES	
2.4 MATERIALES	
2.4.1 CEMENTO	
2.4.2 AGREGADOS	
2.4.3 ADITIVOS QUÍMICOS	
2.5 PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO	
2.5.1 REOLOGÍA	
2.5.2 MÉTODOS DE MEDICIÓN	
2.6 PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO	
2.7 CALORIMETRÍA	
2.8 CURADO TÉRMICO	
3. PARÁMETROS DE ESTUDIO	29
3.1 INFLUENCIA DE LOS MATERIALES CONSTITUYENTES	
3.2 REQUERIMIENTOS TÉCNICOS	
3.3 MÉTODOS DE DISEÑO	

4. ESTUDIO EXPERIMENTAL	43
4.1 MEZCLAS DE PRUEBA	
4.2 PROTOCOLO DE PRUEBA	
4.3 PLAN EXPERIMENTAL	
5. DISEÑOS DEFINITIVOS	61
5.1 PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO	
5.2 PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO	
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS	70
6.1 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO	
6.2 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO	
6.3 ANÁLISIS DE LOS COSTOS	
7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	93
7.1 CONCLUSIONES RESPECTO A LAS PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO	
7.2 CONCLUSIONES RESPECTO A LAS PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO	
7.3 CONCLUSIONES RESPECTO A LOS COSTOS	
7.4 CONCLUSIONES GENERALES	
7.5 RECOMENDACIONES	
7.6 LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	
8. BIBLIOGRAFÍA	102

RESUMEN

El presente proyecto de investigación tiene como finalidad promover la investigación de la aplicación de nuevas tecnologías en concretos prefabricados. La tecnología más importante sobre la que se apoya esta investigación es la aplicación del concreto autocompactado (CAC); según Josep Daczko, el CAC es uno de los desarrollos más importantes en la tecnología del concreto en muchos años. Sus propiedades en estado fresco ayudan a mejorar considerablemente los procesos constructivos. A pesar de ello, para los productores de concreto premezclado el valor agregado del costo directo en los insumos y las variables de diseño, convierten al CAC en una tecnología especial que se produce solo a pedido del contratista. Lo contrario sucede en la industria del concreto prefabricado, existe una tendencia hacia el uso del CAC porque son los responsables de la producción de concreto y de la fabricación del elemento; entonces los beneficios son mayores.

La segunda tecnología consiste en una suspensión de nanopartículas de silicato de calcio hidratado (CSH): Master X- SEED 100 es un aditivo acelerante que permite desarrollar resistencias iniciales entre 6 y 10 horas llegando a duplicar la resistencia del concreto sin aditivos en muchos casos (BASF 2014). Aplicado a los prefabricados reduce el ciclo de fabricación de los elementos prefabricados puede ser menor porque se reduce el tiempo de desencofrado. La última tecnología consiste en la aplicación de un aditivo reductor de agua de alto rango que, además de plastificar la mezcla de concreto, desarrolla resistencias mayores en menos de 24 horas: Master Glenium ACE 407.

CAPÍTULO 1: PRESENTACIÓN DEL PROYECTO

1.1 RESUMEN DEL PROYECTO

El presente proyecto de investigación tiene como finalidad promover la investigación de la aplicación de nuevas tecnologías en concretos prefabricados. La tecnología más importante sobre la que se apoya esta investigación es la aplicación del concreto autocompactado (CAC); según Josep Daczko, el CAC es uno de los desarrollos más importantes en la tecnología del concreto en muchos años. Sus propiedades en estado fresco ayudan a mejorar considerablemente los procesos constructivos. A pesar de ello, para los productores de concreto premezclado el valor agregado del costo directo en los insumos y las variables de diseño, convierten al CAC en una tecnología especial que se produce solo a pedido del contratista. Lo contrario sucede en la industria del concreto prefabricado, existe una tendencia hacia el uso del CAC porque son los responsables de la producción de concreto y de la fabricación del elemento; entonces los beneficios son mayores. La segunda tecnología consiste en una suspensión de nanopartículas de silicato de calcio hidratado (CSH): Master X-SEED 100 es un aditivo acelerante que permite desarrollar resistencias iniciales entre 6 y 10 horas llegando a duplicar la resistencia del concreto sin aditivos en muchos casos (BASF 2014). Aplicado a los prefabricados reduce el ciclo de fabricación de los elementos prefabricados puede ser menor porque se reduce el tiempo de desencofrado. La última tecnología consiste en la aplicación de un aditivo reductor de agua de alto rango que, además de plastificar la mezcla de concreto, desarrolla resistencias mayores en menos de 24 horas: Master Glenium ACE 407.

Primero, el informe detalla la investigación bibliográfica y el sustento teórico (Capítulos 1,2 y 3) basado en las normas del American Concrete Institute (ACI), American Society for Testing Materials (ASTM), normativa europea (UNE, EFNARC) y otros. El capítulo 4 comprende las mezclas de prueba donde se evalúan los materiales, propiedades y requerimientos para desarrollar un CAC; esto con la finalidad de encontrar un diseño patrón. Luego, los capítulos 5 y 6 exponen seis diseños definitivos: M1 es el diseño patrón; M2, M3 y M4 son diseños con tres dosis diferentes de Master X-SEED 100; M5 aplica dosis de Master Glenium ACE 407; y M6 es el diseño patrón con curado térmico. En todas las mezclas se miden las propiedades en estado fresco del CAC mediante equipos normados, la reología mediante el uso de un reómetro, el proceso de hidratación del cemento mediante un calorímetro y la resistencia a compresión a edades tempranas (6 , 8, 10 y 24 horas) y edades posteriores (3, 7 y 28 días). Asimismo, se realiza un análisis de resultados

y de costos. Por último, el Capítulo 7 resume las conclusiones y recomendaciones más importantes como aporte a las siguientes líneas de investigación.

1.2 HIPÓTESIS

1. El uso de aditivos superplastificantes permite desarrollar concretos de alto desempeño con bajas relaciones agua/cemento.
2. El uso del reómetro simplifica los ensayos convencionales para caracterizar concretos autocompactados.
3. El uso de aditivos acelerantes reduce el tiempo de desencofrado, tiempo y temperatura de curado térmico, y cantidad de cemento en concretos prefabricados.

1.3 OBJETIVOS

Objetivo General.-

El objetivo general del proyecto es contribuir con la investigación de la tecnología del concreto en el Perú mediante la aplicación de aditivos químicos de última generación.

Objetivos específicos.-

- Desarrollar concretos de alto desempeño y resistencia inicial en elementos prefabricados
- Estudiar la reología del concreto autocompactado
- Incentivar el uso de nuevas tecnologías para optimizar procesos

1.4 ALCANCE DEL PROYECTO

El alcance del proyecto comprende el estudio y la aplicación de nuevas tecnologías, aditivos químicos y equipos, en la industria del concreto prefabricado. Es importante acotar lo anterior pues los requerimientos técnicos parten de la necesidad que pretenden satisfacer. Primero, se desarrolla un concreto autocompactado con las especificaciones de la tabla 5.1 y la metodología del comité ACI 237R. Segundo, se desarrollan 6 diseños definitivos con una misma relación agua/cemento (0.40) con la finalidad de cumplir dichas especificaciones, estudiar la reología, reducir la cantidad de cemento y energía mediante la evaluación de la resistencia a compresión, y

determinar su viabilidad económica. Se realizaron los ensayos convencionales para evaluar las propiedades en estado fresco del concreto autocompactado son los siguientes: Slump flow (ASTM C 1611), J – ring (ASTM C 1621) y L – box (ACI 237R); y para medir la reología se utiliza el reómetro ICAR. Para evaluar las propiedades en estado endurecido se realiza el ensayo a compresión (ASTM C39) a edades tempranas (6, 8, 10 y 24 horas) y edades tardías (3, 7 y 28 días); y se debe aclarar que el ensayo de calorimetría (ASTM C1679) en la presente investigación no pretende estudiar los tiempos de fragua, su uso es ilustrativo y cualitativo para diferenciar el efecto de los aditivos químicos en la hidratación del cemento.

1.5 METODOLOGÍA

- A. Investigación bibliográfica
- B. Estudio de la reología del concreto autocompactado, y la influencia de los materiales constituyentes en las propiedades en estado fresco y endurecido
- C. Determinación de los requerimientos técnicos
- D. Desarrollo de mezclas de pruebas
- E. Diseño de mezclas definitivas
- F. Evaluación de las propiedades en estado fresco y endurecido
- G. Análisis de resultados
- H. Conclusiones y recomendaciones

1.6 INTRODUCCIÓN

El concreto autocompactado (CAC) no es una tecnología de este siglo, pero ha evolucionado desde su aparición en la década de 1980. Según el comité ACI 237, es un concreto de alta fluidez y resistente a la segregación, que puede rellenar todos los espacios y pasar a través del refuerzo sin alguna consolidación mecánica (ACI 237-07: 2).

El CAC proporciona diversas ventajas para los usuarios tanto en rentabilidad, calidad y seguridad. Primero, mejora la rentabilidad ya que reduce o elimina el vibrado mecánico, lo que genera ahorros en mantenimiento y operación de los equipos; asimismo, se requiere menos trabajo el acabado superficial del elemento. Por lo tanto, se asegura un elemento de alta calidad ya que rellena todos los espacios, no se producen cangrejeras o imperfecciones en su superficie: como consecuencia de

esto, pueden haber secciones con más refuerzo en el diseño y formas arquitectónicas más sofisticadas. Por último, se genera un ambiente de trabajo más seguro producto de una mayor facilidad de colocación; además de reducir el ruido y polvo durante su producción (ACI 237-07: 2).

A pesar de ello, el CAC no ha tenido mayor aceptación debido al costo – beneficio identificado por los productores de premezclado y concreto en sitio. Según la compañía BASF, los insumos para producir este concreto ascienden hasta un 10% comparado a un concreto convencional (BASF 2014), esto debido a que requiere elevados contenidos de finos y altas dosis de aditivos para garantizar un buen comportamiento. Sin embargo, en la industria de elementos prefabricados hay una tendencia hacia el uso del CAC. Diversos autores señalan que la industria del concreto prefabricado presenta mayor potencial de uso del CAC, puesto que se requiere producir elementos de alta calidad, aumentar la productividad y crear un ambiente de trabajo más seguro (Daczko 2012, Khayat 2008).

El año 2002, el 40% de los elementos prefabricados en Estados Unidos se producía con CAC; mientras que el CAC colocado en obra solo era del 2-4% (Daczko and Vachon 2006). En la actualidad, este valor puede estar cerca al 50%. Son tres las razones por las que el CAC es ampliamente utilizado en los prefabricados:

- El control de calidad es más fácil debido a la repetición de diseños.
- El concreto prefabricado requiere de altas resistencias iniciales con altos contenidos de cemento, por lo que producir CAC no es tan caro comparado a otros escenarios.
- Los productores de prefabricados tienen la labor de producir concreto y colocarlo, entonces aprovechan más de los beneficios directos.

Para una industria que produce grandes cantidades del mismo producto es necesario el constante perfeccionamiento de su tecnología. A través de los años han aparecido nuevos productos que permiten generar un valor agregado en las propiedades en estado fresco y endurecido del concreto. Por un lado, se cuenta con aditivos superplastificantes que incrementan la fluidez del concreto, y aditivos acelerantes o curado térmico que desarrollan altas resistencias iniciales. Es así que, la industria de los prefabricados requiere de esta tecnología para producir elementos de buen acabado superficial y alta resistencia inicial; para de esta manera, desencofrar más rápido e incrementar la productividad. El presente proyecto de investigación incentiva al uso de nuevas tecnologías para potenciar las propiedades mencionadas; y

asimismo, promover la aplicación del CAC como alternativa para satisfacer los requerimientos de los prefabricados y su posible uso en las demás industrias.

1.7 ESTADO DEL ARTE

En los últimos años, el avance en la tecnología del concreto ha seguido dos caminos principales: mejorar la productividad y mejorar su durabilidad. Por ese motivo se continua investigando en cómo mejorar las propiedades del concreto prefabricado, lo cual permite acelerar la producción, mejorar el control de calidad, reducir el consumo de energía, generar menor cantidad de residuos, y en resumen conduce a una construcción más sostenible (AEC 2013: 3).

Con el fin de lograr estas mejoras en la producción de concreto es que se implementó el uso del concreto autocompactado (CAC) en la industria de los prefabricados. El concepto de CAC nace en la década de 1980 en Japón, debido a la falta de personal calificado para realizar una buena consolidación y de esta forma obtener un concreto con mayor durabilidad. Años posteriores, el interés en su investigación se basa en facilitar los procesos constructivos, reducir el tiempo de producción y reducir los costos de trabajo. Lo más notable en el avance de la tecnología del CAC, es el desarrollo de los aditivos reductores de agua de alto rango (HRWR por sus siglas en inglés), que permiten diseñar concretos de alta fluidez con bajas relaciones a/c. Estos aditivos están en constante evolución, uno de los primeros y hasta ahora utilizados son los aditivos en base a los polinaftalenos, pero su uso es limitado debido a que presenta problemas de retraso en el endurecimiento y retraso en ganancia de resistencias tempranas. Existen otros aditivos basados en compuestos de melanina, pero estos presentan problemas de pérdida rápida de fluidez. Sin embargo, los aditivos en base a la tecnología de los polímeros de éter de policarboxilato (PCE por sus siglas en inglés) han podido mejorar efectos colaterales en su fluidez, mantención y estabilidad, siendo los de mejor desempeño en la actualidad. Un ejemplo simbólico de la capacidad de estos aditivos de PCE es su aplicación en la construcción del Burj Dubai, actualmente el edificio más alto del mundo, cuyo concreto contenía un aditivo único que ofrecía una combinación de resistencias tempranas con alta trabajabilidad en temperaturas de colocación mayores a los 45° C (Aldred 2007: 498). Por otro lado, se ha desarrollado tecnologías que permiten acelerar las resistencias iniciales del concreto. Para esto se utilizan procesos de curado térmico con el uso de mantas de fibra de vidrio, el curado a vapor y aditivos acelerantes que permiten ganar altas resistencias a pocas horas.

Para la medición de la trabajabilidad del CAC se emplean ensayos empíricos, en los cuales se simulan condiciones de campo como son el ensayo de la capacidad de relleno, habilidad de paso y resistencia a la segregación. Sin embargo, ya existen equipos portátiles como el reómetro ICAR que permiten medir la reología del concreto en campo, y poder controlar y monitorear las propiedades del CAC (Koehler 2006: 97).

En el Perú, hasta el día de hoy el uso del CAC no está muy difundido. Esta situación puede deberse a la poca información transmitida, la falta de experiencia y falta de personal capacitado en la elaboración y manejo. Sin embargo, la tendencia en los siguientes años es su implementación, por tal motivo es el interés de las empresas de concreto premezclado, de concreto prefabricado, empresas de venta de aditivos y de las universidades promover su investigación y desarrollo.



CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1. CONCRETO PREFABRICADO

De acuerdo a “Precast and Prestressed Concrete Institute” (PCI), el concreto prefabricado es una mezcla convencional de cemento, agua, agregados y aditivos que puede ser vaciado dentro de una ubicación diferente a la posición de servicio del elemento. El concreto es colocado dentro de un encofrado típico de madera o acero, curado usualmente al día siguiente, y transportado a la construcción para ser izados en su posición de servicio. Los beneficios del concreto prefabricado son los siguientes: mayor rapidez de construcción debido a la habilidad para fabricar los elementos mientras los trabajos preliminares están en progreso; alta calidad debido a un mayor control de calidad en planta; flexibilidad estética por su variedad en textura, color y acabados; flexibilidad de diseño; durabilidad y eficiencia de energía (PCI MNL 120 2004: 1A-2).

Existe una necesidad en el concreto prefabricado de desarrollar altas resistencias iniciales que permitan el desencofrado en menor tiempo y la aplicación de esfuerzos de compresión mediante cables tensionados como es el caso del concreto preesforzado. Para ello, en países como EEUU o Canadá usualmente se utiliza el cemento tipo III; y otras veces se realiza el curado térmico mediante la aplicación de vapor por ciclos recomendados. Cualquiera sea el caso, la resistencia a compresión es muy importante ya que está directamente relacionada a propiedades como el módulo de elasticidad, la resistencia a la flexión, la fuerza cortante y adherencia (PCI MNL 2004: 1-19).

Debido a que la producción del concreto prefabricado se realiza bajo condiciones controladas, los productores continúan expandiendo sus bondades para enfrentarse a nuevos retos como la aplicación concreto autocompactado en esta industria.

2.2. CONCRETO AUTOCOMPACTADO

A continuación, se presentan las siguientes definiciones de un CAC:

1. Un concreto que “puede ser compactado dentro de cada esquina de un molde, mediante su propio peso y sin la necesidad de vibrado” (Okamura 1999: 4)
2. “Es un concreto innovador que no requiere de vibración para su colocación y compactación. Es hábil para fluir bajo su propio peso, llenando completamente el molde y logrando una completa compactación, incluso en presencia de congestión de refuerzo. El concreto endurecido es denso,

homogéneo y tienen las mismas propiedades ingenieriles y durabilidad que el concreto vibrado tradicionalmente”. (European Guidelines 2005)

3. “Es altamente fluido, concreto sin segregación que puede extenderse en su lugar, llenar el molde, y encapsular el reforzamiento sin alguna consolidación mecánica”. (ACI 237-07 :2)

2.3 BENEFICIOS Y LIMITACIONES

Beneficios

Es importante indicar que el usuario debe considerar al CAC como una nueva tecnología para completar el proyecto de manera más efectiva y satisfactoria. Por ello, los beneficios que unos pueden obtener del CAC, respecto de otros, dependen del trabajo que se esté realizando; como es el caso de los productores de prefabricado respecto a los de premezclado.

A continuación, se indican tres razones principales por las que el CAC tiene una buena aceptación en esta industria (Daczko 2012: 17):

1. El número de diseños de mezcla por día son limitados, incrementado la repetición; esto hace que el control de calidad sea relativamente más fácil. Por ejemplo, una planta de prefabricados en nuestro país produce en su mayoría dos tipos de diseño: $f'c = 500 \text{ kg/cm}^2$ y $f'c = 400 \text{ kg/cm}^2$.
2. El diseño de concreto para elementos prefabricados apunta a alcanzar altas resistencias tempranas, entonces el incremento de costo para producir un CAC no es tan alto comparado con otros escenarios (premezclado o en obra). El contenido de cemento está por encima de los 400 kg por m^3 de concreto.
3. El productor de prefabricados tiene la ventaja de producir y colocar el concreto, por lo que obtiene los siguientes:
 - Menor mano de obra necesitada para colocar y consolidar el concreto
 - Facilidad de colocación y consolidación en difíciles condiciones como espaciamientos reducidos del encofrado y/o alta congestión de acero de refuerzo
 - Viabilidad de formas arquitectónicas más sofisticadas

- Reducción o eliminación de equipos como equipos vibradores: Un estudio demuestra que se tienen ahorros del 10% en consumo de energía, 20% en costos de los encofrados, 10% en costos de mantenimiento, y 10% en tiempo perdido (Dackzo and Vachon 2006: 640).
- Mejor acabado superficial debido a una alta fluidez
- Mejores condiciones de seguridad: Menor cantidad de trabajadores necesarios en muros para la colocación y consolidación, menores líneas eléctricas para vibración en la planta y menor ruido.
- Menores accidentes
- Reducción en seguros

Adicionalmente, estudios demuestran que los costos de colocación y consolidación pueden reducirse hasta en 40% y los costos de resane (parchar imperfecciones) en 60% (Martin 2002, Adams 2008). Anualmente, los ahorros en reducción de equipos y mantenimiento en una planta tradicional llegan hasta \$140,000 y \$ 20,000, respectivamente (Sompura 2011). Otros beneficios para los productores de prefabricado incluyen salud y seguridad ocupacional: reducción del ruido, ausencia de vibrado, ergonomía, y reducción del peligro. Un estudio demuestra que un vibrador genera en ruido alrededor de 102 dB en la planta; y cuando no hay vibradores el ruido está en el rango de 60 a 80 dB, los cuales son valores aceptables (De Schutter 2008).

Limitaciones

Como en toda tecnología existen algunas restricciones en el uso de CAC, estos se dividen en dos tipos: Restricciones de proyecto y organizacionales (Daczko 2012: 24).

- *Restricciones del proyecto:* Debido a que el CAC es altamente fluido, en proyectos donde se requiere que el concreto soporte su propio peso inmediatamente no es viable su aplicación: Por ejemplo, en elementos con pendiente o inclinados donde se requiere un concreto de consistencia seca.
- *Restricciones organizacionales:* Algunos productores pueden estar limitados a producir CAC de buena calidad debido a la falta de tiempo, equipos, y recursos necesarios: Por ejemplo, para el control de la humedad se requiere un exhaustivo control como el de las plantas de premezclado ya que un cálculo erróneo altera la fluidez del concreto, en el peor de los escenarios puede segregación, y disminuir la resistencia.

El C_3S define la resistencia inicial durante la primera semana, mientras que el C_2S define la resistencia a largo plazo. El productor principal de la hidratación es el hidrato de silicato de calcio (CSH). A continuación, se muestran las etapas de este proceso:

- I. Periodo inicial o preinducción: Cuando se mezcla C_3S con el agua, comienza un periodo donde hay una rápida evolución de calor. Se producen iones Ca y OH incrementando el pH.
- II. Periodo de inducción o durmiente: Existe una necesidad de obtener una cierta concentración de iones antes que se formen los núcleos de cristales que facilitan el crecimiento del CSH. Se genera una barrera protectora de CSH.
- III. Periodo de solidificación: Al finalizar el período de inducción, empieza el fraguado inicial donde el C_3S empieza a hidratarse rápidamente hasta alcanzar un punto de máxima evolución del calor (formación de CH y de CSH).
- IV. Período de desaceleración: La velocidad de reacción empieza a disminuir hasta que llegue a un estado estable.
- V. Período de difusión estacionario: La difusión disminuye hasta que no haya más C_3S que hidratar.

Aluminato tricálcico (C_3A)

Es el más reactivo en presencia de agua debido a su influencia significativa sobre la hidratación inicial causando un fraguado acelerado. Por ello, es necesario añadir el yeso entre 3 – 6% ya que controla la hidratación del aluminato tricálcico. El proceso de hidratación es el siguiente:

- I. Periodo inicial: Se forman cristales de etringita instantáneamente que cubren las partículas de C_3A .
- II. Periodo de retardo: Periodo de reacción lenta en que la etringita continúa formándose. La duración de esta segunda etapa depende de la cantidad de yeso.
- III. Periodo de aceleración: La etringita se hace inestable, reacciona con el C_3A y se convierte a monosulfato (la velocidad de hidratación crece).
- IV. Reacciones a largo plazo: La etringita se transforma totalmente en monosulfoaluminato; y este, con el aluminato y ferroaluminato para producir otros hidratos.

Alumino – Ferrito Tetracálcico (C_4AF)

La hidratación del C_4AF forma sus productos de hidratación en presencia de yeso, es similar a la de C_3A , pero las reacciones son más lentas. No es común que el C_4AF reacciones con la suficiente rapidez como para causar fraguado rápido ya que el yeso controla también su hidratación.

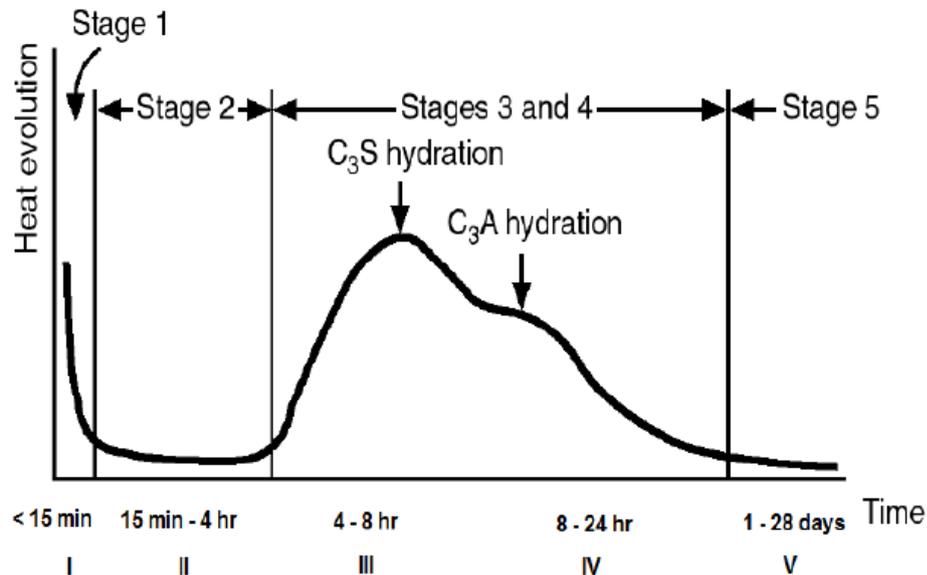


Ilustración 2.1 Hidratación del cemento Portland (Regourd, 1982; Eckart et coll., 1995)

En resumen, los compuestos hidratados son los siguientes:

- Hidrato de silicato de calcio, CSH (ocupa el 60% del volumen de la pasta)
- Hidróxido de calcio, portlandita (ocupa el 25% del volumen de la pasta)
- Etringita (ocupa el 15% del volumen de pasta)

2.4.2. AGREGADOS

Los agregados deben cumplir con los requerimientos de la norma ASTM C 33. En un concreto convencional la composición de los agregados representa entre el 60 al 80% del volumen total del concreto. En un CAC, los agregados requieren de una mínima pasta que rellene los vacíos entre los sólidos y promueva movilidad. Entonces, es importante limitar el contenido de agregados que propicie un balance entre las propiedades frescas y endurecidas de acuerdo a los requerimientos técnicos. Por ejemplo, un bajo volumen de agregados incrementa la retracción de la pasta, mientras que un alto volumen disminuye la fluidez. Para determinar el

contenido óptimo de agregados y pasta, el incremento de la fluidez del concreto no debe generar segregación, si durante la prueba de extensibilidad se forma una torre de agregados, este es un indicio de que se requiere mayor pasta que facilite el movimiento de los agregados (Daczko 2012: 65).

La determinación de las características físicas de los agregados se realiza bajo las siguientes normas:

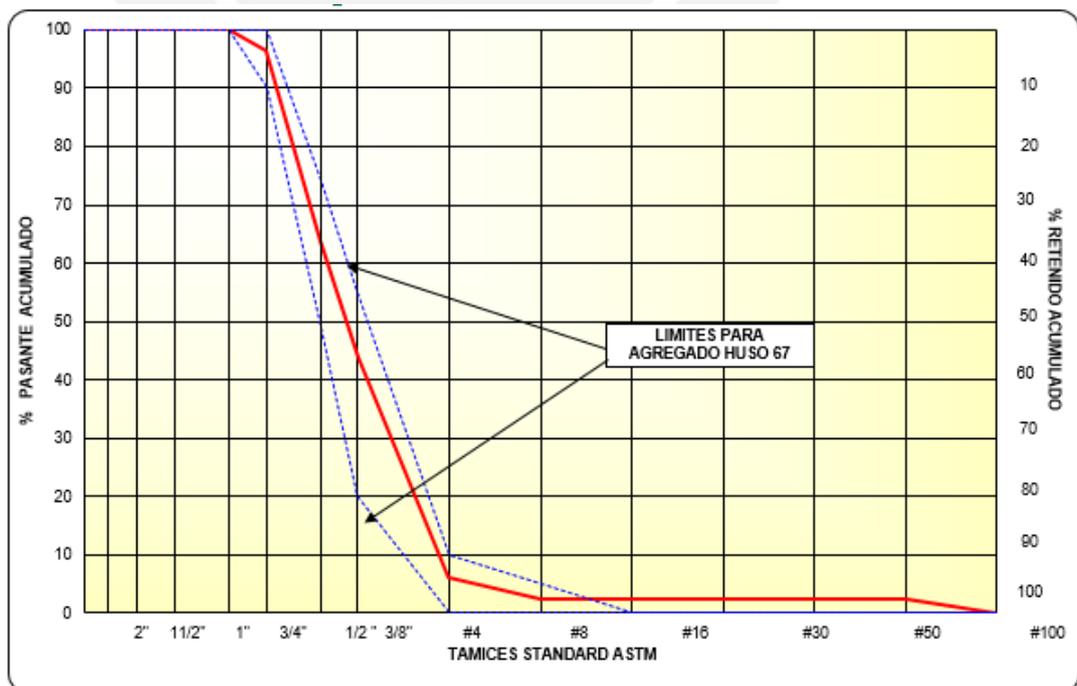
- Material que pasa el tamiz N°200 – ASTM C117
- Contenido de humedad – ASTM C 566
- Módulo de finura – ASTM C 125
- Peso específico y absorción del agregado grueso – ASTM C127
- Peso específico y absorción del agregado fino – ASTM C128



Agregado grueso

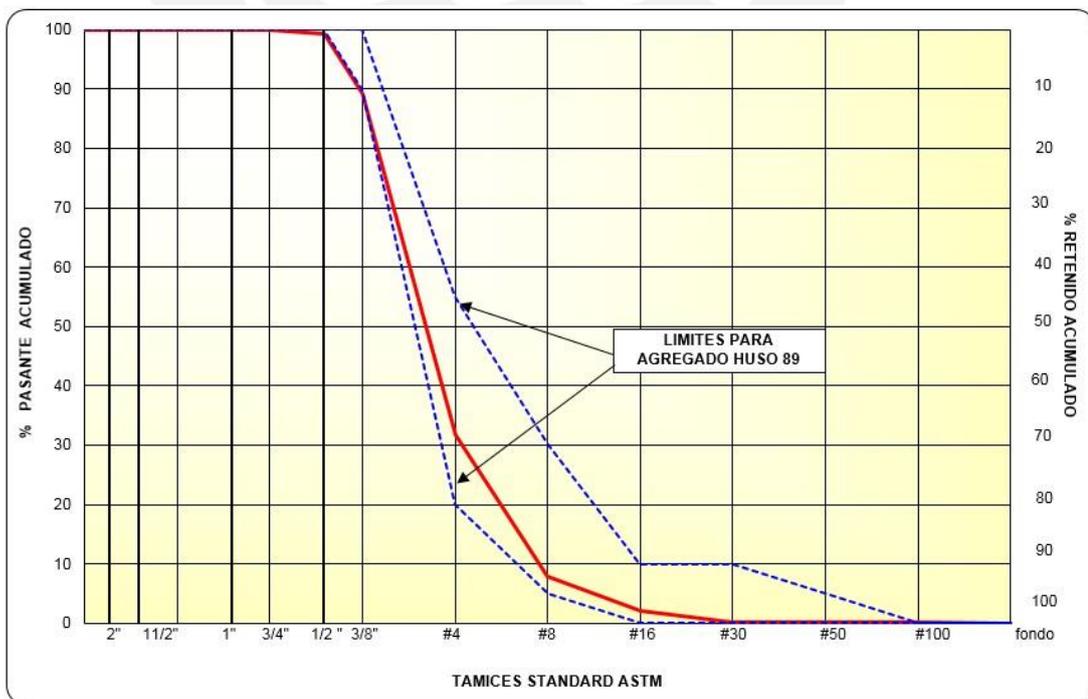
HUSO 67

<p>BASF The Chemical Company</p>		<p>INFORME DE ENSAYO DE AGREGADOS - LABORATORIO DE PERFORMANCE -</p>				
<p>N° SOLICITUD :</p> <p>MUESTRA : AGREGADO PARA CONCRETO</p> <p>PROCEDENCIA : JICAMARCA</p> <p>PETICIONARIO :</p>		<p>TECNICO :</p> <p>FECHA :</p>				
GRANULOMETRIA					CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	
MALLA	PESO RETENIDO en gramos	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMUL.	% PASANTE ACUMUL.	MODULO DE FINEZA	6.41
3"					TAMAÑO MÁXIMO	
2 1/2"		0.0	0.0	100.0	PESO ESPECIFICO SECO	2.68
2"		0.0	0.0	100.0	PESO ESPECIFICO SSS	
1 1/2"		0.0	0.0	100.0	% ABSORCION	1.21
1"	0.0	0.0	0.0	100.0	% PASANTE DE MALLA # 200	0.51
3/4"	60.6	3.7	3.7	96.3	% HUMEDAD NATURAL	0.59
1/2"	528.6	32.5	36.2	63.8	% EQUIVALENTE DE ARENA	
3/8"	326.8	20.1	56.2	43.8	% PARTÍCULAS FRIABLES Y TERRONES DE ARCILLA	
# 4	614.6	37.7	94.0	6.0	% PARTÍCULAS LIGERAS	
# 8	56.8	3.5	97.5	2.5	% INALTERABILIDAD por medio de sulfato de magnesio	
# 16	0.0	0.0	97.5	2.5	PESO UNITARIO SUELTO(kg/m ³)	
#30	0.0	0.0	97.5	2.5	PESO UNITARIO COMPAC (kg/m ³)	
#50	0.0	0.0	97.5	2.5	CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS	
#100	0.0	0.0	97.5	2.5	SALES SOLUB. TOTALES (ppm)	
fondo	41.1	2.5	100.0	0.0	SULFATOS SOLUBLES (ppm)	
		0.0			CLORUROS SOLUBLES (ppm)	
					IMPUREZAS ORGÁNICAS	
					CLORUROS SOLUBLES (mg/Kg)	
					IMPUREZAS ORGÁNICAS	
					Otros	
TOTAL	1628.5	100.0	MODULO FINEZA	6.41	PIEDRA ANGULAR.	



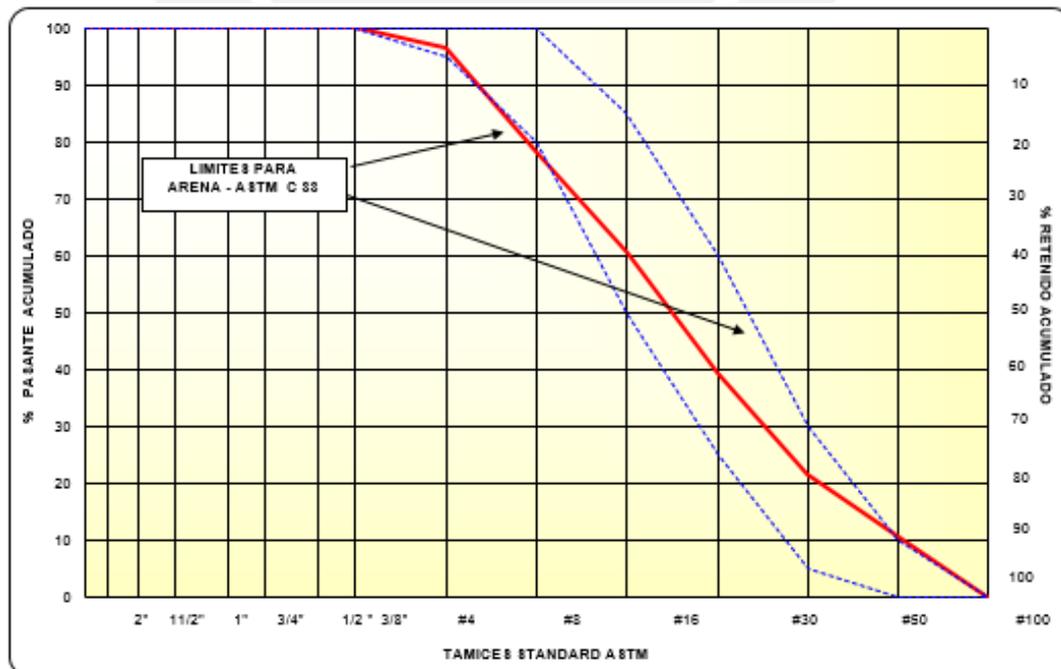
HUSO 89

BASF The Chemical Company		INFORME DE ENSAYO DE AGREGADOS - LABORATORIO DE PERFORMANCE -				
N° SOLICITUD : MUESTRA : AGREGADO PARA CONCRETO PROCEDENCIA : PREANSA PETICIONARIO :		TECNICO : FECHA :				
GRANULOMETRIA					CARACTERÍSTICAS FÍSICAS	
MALLA	PESO RETENIDO en gramos	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMUL.	% PASANTE ACUMUL.		
3"					MODULO DE FINEZA	5.69
2 1/2"		0.0	0.0	100.0	TAMAÑO MÁXIMO	
2"		0.0	0.0	100.0	PESO ESPECIFICO SECO	2.68
1 1/2"		0.0	0.0	100.0	PESO ESPECIFICO SSS	
1"		0.0	0.0	100.0	% ABSORCION	1.93
3/4"		0.0	0.0	100.0	% PASANTE DE MALLA # 200	0.51
1/2"	10.2	0.6	0.6	99.4	% HUMEDAD NATURAL	0.59
3/8"	165.3	10.1	10.8	89.2	% EQUIVALENTE DE ARENA	
# 4	937.5	57.4	68.2	31.8	% PARTÍCULAS FRIABLES Y TERRONES DE ARCILLA	
# 8	390.1	23.9	92.1	7.9	% PARTÍCULAS LIGERAS	
# 16	95.2	5.8	97.9	2.1	% INALTERABILIDAD por medio de sulfato de magnesio	
#30	30.6	1.9	99.8	0.2	PESO UNITARIO SUELTO(kg/m ³)	
#50	1.2	0.1	99.9	0.1	PESO UNITARIO COMPAC (kg/m ³)	
#100	0.0	0.0	99.9	0.1	CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS	
fondo	1.8	0.1	100.0	0.0	SALES SOLUB. TOTALES (ppm)	
		0.0			SULFATOS SOLUBLES (ppm)	
					CLORUROS SOLUBLES (ppm)	
					IMPUREZAS ORGÁNICAS	
					CLORUROS SOLUBLES (mg/Kg)	
					IMPUREZAS ORGÁNICAS	
					Otros	
TOTAL	1631.9	100.0	MODULO FINEZA	5.69	PIEDRA ANGULAR.	



Agregado fino

BASF The Chemical Company		INFORME DE ENSAYO DE AGREGADOS - LABORATORIO DE PERFORMANCE -					
N° SOLICITUD : MUESTRA : ARENA PARA CONCRETO PROCEDENCIA : JICARMARCA PETICIONARIO :						TECNICO : FECHA :	
GRANULOMETRIA					CARACTERÍSTICAS FÍSICAS		
MALLA	PESO RETENIDO en gramos	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMUL.	% PASANTE ACUMUL.	MODULO DE FINEZA	2.93	
					TAMAÑO MÁXIMO		
					PESO ESPECIFICO SECO	2.65	
3"					PESO ESPECIFICO SSS		
2 1/2"		0.0	0.0	100.0	% ABSORCION	1.44	
2"		0.0	0.0	100.0	% PASANTE DE MALLA # 200	4.67	
1 1/2"		0.0	0.0	100.0	% HUMEDAD NATURAL	9.39	
1"	0.0	0.0	0.0	100.0	% EQUIVALENTE DE ARENA		
3/4"	0.0	0.0	0.0	100.0	% PARTÍCULAS FRIABLES Y TERRONES DE ARCILLA		
1/2"	0.0	0.0	0.0	100.0	% PARTÍCULAS LIGERAS		
3/8"	0.0	0.0	0.0	100.0	% INALTERABILIDAD por medio de sulfato de magnesio		
# 4	27.9	3.5	3.5	96.5	PESO UNITARIO SUELTO(kg/m3)		
# 8	149.8	18.7	22.2	77.8	PESO UNITARIO COMPAC (kg/m3)		
# 16	139.0	17.4	39.6	60.4	CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS		
#30	166.2	20.8	60.4	39.6	SALES SOLUB. TOTALES (ppm)	
#50	143.0	17.9	78.3	21.7	SULFATOS SOLUBLES (ppm)	
#100	88.3	11.0	89.3	10.7	CLORUROS SOLUBLES (ppm)	
fondo	85.5	10.7	100.0	0.0	IMPUREZAS ORGÁNICAS	
		0.0			CLORUROS SOLUBLES (mg/Kg)	
					IMPUREZAS ORGÁNICAS Otros	
TOTAL	799.7	100.0	MODULO FINEZA	2.93			



2.4.3 ADITIVOS QUÍMICOS

a. Aditivo reductor de agua de alto rango

Los aditivos reductores de alto rango (HRWRA) pertenecen a la clasificación F según la norma ASTM C494. Su función principal es dispersar las partículas de cemento lo que incrementa la fluidez de la pasta; por lo tanto, se reduce el sangrado y la segregación ya que el uso de agua es menor. En la actualidad, los aditivos basados en la tecnología de los policarboxilatos proveen una alta trabajabilidad extendida. El mecanismo de acción de estos aditivos en el cemento es de dos formas la repulsión electrostática y la acción estérica.

La repulsión electrostática es el mecanismo utilizado por la mayoría de los aditivos reductores de agua, en la cual las moléculas dispersantes atrapan a los granos de cemento y cargan negativamente toda la superficie de estos granos, esto provoca repulsión entre las partículas de cemento. Mientras que la acción estérica es un mecanismo más físico, la presencia de una cadena de moléculas en forma de cepillos en la cara de las partículas de cemento impide que estas se junten.

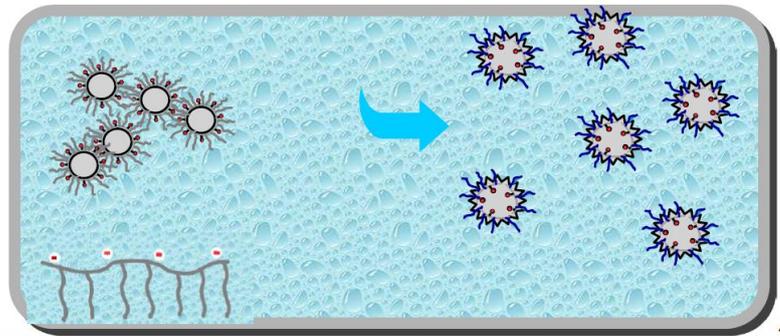


Ilustración 2.2: Mecanismo de acción de los aditivos superplastificantes (Fuente: BASF)

En el presente proyecto se utilizaron aditivos en base a la nueva tecnología de policarboxilatos procedentes de la empresa BASF Construction Chemicals:

Master Glenium SCC 3800

Es un aditivo que alcanza significativamente mayor resistencia en edad temprana, dirigido principalmente para la industria de los prefabricados; sin embargo, su mantención de la trabajabilidad es muy reducida a menos que se utilicen con otros aditivos como es el caso de un retardante para extender las características del concreto en estado fresco.

Master Glenium 3810

Es un aditivo superplastificante reductor de agua de alto rango basado en la tecnología de los policarboxilatos. Este aditivo presenta mayor mantención que el Master Glenium 3800.

Master Glenium ACE 407

Es un aditivo reductor de agua de alto rango para concretos con fraguado rápido, aumenta las resistencias iniciales y finales del concreto. Además, mejora la impermeabilidad y la durabilidad del concreto reduciendo la porosidad, esto implica que también presente un buen acabado superficial.

b. Aditivo reductor de agua de rango medio y retardante

Los aditivos reductores de agua y retardante pertenecen a la clasificación D según la norma ASTM C494. Su función principal es retardar la hidratación del cemento para extender el tiempo de trabajabilidad del concreto.

Master Set 770R

Es un aditivo utilizado para extender el fraguado inicial, la trabajabilidad y para mejorar el acabado superficial. Además, ayuda a prevenir los problemas de segregación y mejora las resistencias a compresión a edades tempranas y finales.

c. Aditivo acelerante

Los aditivos acelerantes pertenecen a la clasificación C según la norma ASTM C494.

Master X Seed 100

Es un agente activador de la hidratación del cemento, que fue elaborado para ser utilizado en la industria del concreto prefabricado; sin embargo, puede ser implementado en pavimentos y en construcciones subterráneas. Es un aditivo basado en la nanotecnología nunca antes utilizada.

La mezcla X-Seed es una suspensión de nanopartículas de hidratos de Silicato de Calcio (CSH). El gel de CSH es el principal responsable de la resistencia del concreto, por lo que al adicionar el aditivo X-Seed 100 a la mezcla estamos añadiendo nanocristales de CSH suspendidos, y que actúan como núcleos de cristalización acelerando la formación de CSH. Al final se desarrolla una estructura cristalina mucho

más uniforme, un rápido endurecimiento y un desarrollo de altas resistencias a edades tempranas.

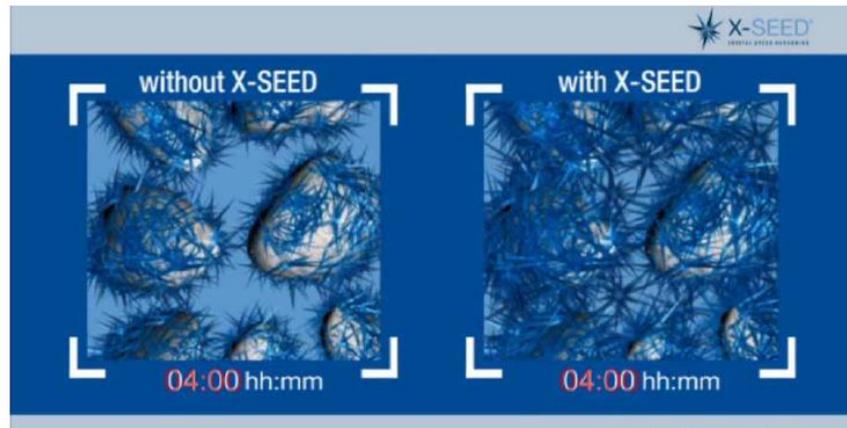


Ilustración 2.3 Generación de CSH (Fuente: BASF)

Beneficios:

- Acelera las resistencias iniciales y no afecta a las resistencias a mayores edades al contrario las puede mejorar. Evita problemas de altos costos y de durabilidad que se generan debido al uso de altas temperaturas para acelerar la ganancia de resistencia.
- Mejora la durabilidad del concreto debido a que la formación uniforme de los cristales forma una estructura más densa restringiendo el ingreso del algún agente dañino para el concreto.
- Mejora la producción ya que reduce el tiempo de desencofrado y no afecta la calidad del producto.
- Permite utilizar menor cantidad de cemento, optimizando el diseño de mezcla. Esto a su vez reduce las emisiones de CO₂ debido a la menor producción de cemento y la posibilidad de utilizar otras adiciones.
- Puede ser utilizado en verano o invierno.

2.5 PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO

Son las propiedades en estado fresco las que diferencian al CAC del concreto convencional.

2.5.1 REOLOGÍA

Es importante conocer su reología, ciencia que estudia la deformación y el flujo de la materia para caracterizarlo (Tattersall 1983). Existen numerosos modelos reológicos, pero la mayoría sugiere que el concreto debería ser reológicamente descrito como un fluido no newtoniano o modelo de Bingham (Sedran 1999, Hackley 2001):

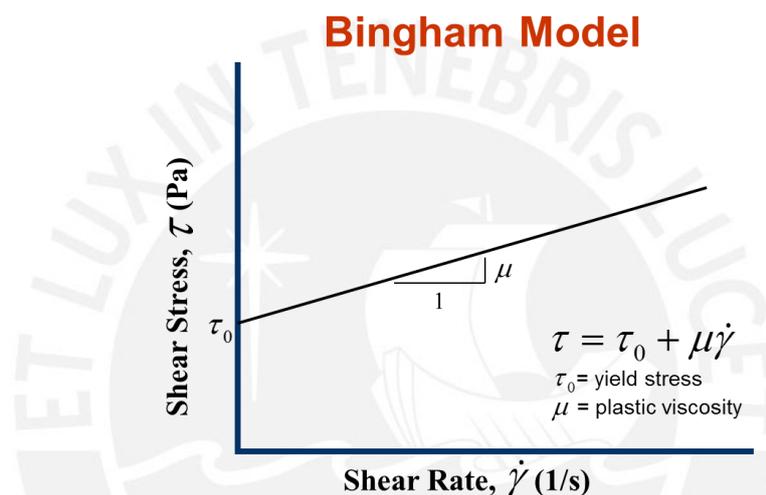


Ilustración 2.4: Modelo de Bingham (Koehler 2005)

En este modelo se proponen dos variables que definen el flujo de un material: el esfuerzo cortante de fluencia (τ_0), que se define como la cantidad de fuerza requerida para iniciar el flujo de un material, y la viscosidad plástica (μ), definida como la resistencia interna del material para fluir. Entonces, se puede estimar lo siguiente:

- Un valor muy pequeño o nulo de τ_0 proporciona una elevada fluidez.
- Un valor moderado de μ proporciona una adecuada resistencia a la segregación de los materiales.

Ambas condiciones deben cumplirse para desarrollar un concreto autocompactado: la fluidez puede obtenerse mediante el uso de aditivos superplastificantes; y la estabilidad, mediante altos contenido de finos o aditivos modificadores de viscosidad. Estos parámetros son medidos mediante el reómetro; la presente investigación hace uso del ICAR Rheometer.



Ilustración 2.5 Reómetro ICAR

El reómetro ICAR puede ser utilizado para medir una curva de flujo y caracterizar la tixotropía, incremento de la viscosidad en el tiempo, y retención de trabajabilidad. El ensayo toma menos de 60 segundos, la veleta rota a una velocidad calibrada para minimizar los efectos de tixotropía, luego disminuye la velocidad poco a poco midiendo el torque resistente en cada punto. El torque (T) y la velocidad de rotación (N) registrado puede ser utilizado para medir el esfuerzo de corte de fluencia (τ_0) como la intercepción del torque en el eje; y la pendiente como el valor de la viscosidad plástica (μ).

$$T = \tau_0 + \mu * N$$

2.5.2 MÉTODOS DE MEDICIÓN

Según el comité ACI 237R -07, las propiedades en estado fresco del CAC son las siguientes:

- **Capacidad de relleno.-** Habilidad del CAC para fluir y rellenos todos los espacios de un molde bajo su propio peso
- **Habilidad de paso.-** Facilidad del CAC para pasar entre los obstáculos y espacios cerrados sin bloqueo
- **Estabilidad.-** Resistencia de la mezcla a la segregación y al sangrado excesivo

Lista de métodos de medición de las propiedades mencionadas:

- Ensayo Slump flow – ASTM C 1611
- Ensayo J-ring – ASTM C 1621
- Ensayo L-box – ACI 237
- Segregación Estática – ASTM C 1610

Índice de estabilidad visual (VSI) según la norma ACI 237R:

- VSI = 0: Altamente estable, no hay evidencia de segregación o sangrado
- VSI = 1: Estable, no hay evidencia de segregación ni halo de mortero (ligero sangrado)
- VSI = 2: Inestable, ligero halo de mortero (<10mm) y concentración de agregados en el centro
- VSI = 3: Altamente inestable, halo de mortero (>10mm) y concentración de

Tabla 2.2 Métodos de medición del CAC (ACI 237R-07)

Método de ensayo	Características	Descripción
Slump flow	Habilidad de relleno	El concreto es colocado en el cono de Abrams sin consolidación alguna. El molde es retirado hacia arriba, y el concreto fluye. El promedio de dos diámetros medidos perpendiculares entre sí representa el esparcimiento, se reporta como el Slump de flujo del concreto. Asimismo, se reporta en Índice de Estabilidad Visual (VSI) y el tiempo (T50) en el que alcanza un diámetro de 500 mm.
	Estabilidad	
Anillo J	Habilidad de paso	Una muestra de concreto fresco es colocado en el cono de Abrams invertido concéntrico con el anillo J. El concreto es colocado sin consolidación ni vibración mecánica alguna. El molde es retirado y el concreto puede pasar a través del anillo J, que consiste en un anillo de acero que contiene barras de refuerzo. El promedio de dos diámetros del esparcimiento resultante, medidos perpendicularmente entre ellos, es reportado como el flujo del CAC en el anillo. También, se mide la diferencia de alturas dentro y fuera del anillo.
Caja L	Habilidad de paso	El equipo de ensayo consiste en una caja de sección rectangular en forma de L, con una sección vertical y horizontal, separada por una puerta deslizante, y se coloca barras de refuerzo vertical. La sección vertical es llenada con CAC, y luego la puerta es levantada para dejar al CAC fluir dentro de la sección horizontal. Cuando el flujo se ha detenido, el volumen del CAC al final de la sección horizontal es expresado como proporción de lo restante en la sección vertical.
Columna de segregación	Estabilidad	Una muestra de concreto fresco es colocado en una molde cilíndrico. El concreto colocado sin vibración ni apisonamiento. El molde es separado en cuatro secciones que representan diferentes niveles de la columna. El concreto de arriba y de abajo es lavado con un tamiz No4 (4.75mm), dejando agregado grueso en el tamiz. La masa de agregado grueso de arriba y de abajo de la columna son determinados, y el porcentaje de segregación es calculado.

2.6 PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO

Las propiedades en estado endurecido de CAC son similares o incluso mejores que la del concreto convencional, ya que se trata de un concreto donde la estabilidad es controlada; entonces los efectos negativos que causan la segregación y el sangrado son mitigados. El comité ACI 237R-07, explica las diferencias en las propiedades mecánicas de un CAC y un concreto convencional:

Resistencia a la compresión

La mezcla desarrollada requiere de una relación agua/ cementante menor a la exigida por el concreto convencional; como consecuencia se desarrollan altas resistencias a compresión. Usualmente en elementos prefabricados, esta relación a/cem se encuentra entre 0.32 a 0.40. Algunas veces se requiere un CAC de mayor performance, entonces se utilizan relaciones a/c más bajas lo que origina que la resistencia a compresión sea mayor a lo especificado en el proyecto. En general, las principales diferencias de un CAC y un concreto convencional se deben por las diferentes proporciones: arena/agregado, tipo y cantidad de material cementicio suplementario y aditivos químicos utilizados. Se puede decir que el CAC posee mayores resistencias porque es más estable y la ausencia de vibrado mecánico hace que la microestructura sea más uniforme y menos porosa la interface pasta, agregado y refuerzo. La resistencia a compresión se evalúa de acuerdo a la norma ASTM C39/C 39M (ACI 237R-07: 12). Cuando un concreto es desarrollado utilizando material cementicio suplementario, se debe medir la resistencia después de los 28 días ya que a edades iniciales la resistencia es menor que la de un concreto que solo utiliza cemento: “Si se desean altas resistencias iniciales, como en concreto prefabricado, el nivel de reemplazo de cemento Portland con material cementicio suplementario será limitado” (Khayat 2008).

Resistencia a la flexión

La resistencia a la flexión depende de la relación a/cem, cantidad de agregado grueso y calidad de la interface entre la pasta y el agregado (ACI 237R-07: 12).

Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad del concreto está relacionado con la resistencia a compresión, tipo y contenido de agregado y peso unitario del concreto. Algunas observaciones han demostrado que para las mismas resistencias a compresión, el módulo de elasticidad del CAC puede ser de 10 hasta 15% menor que el del concreto convencional debido a ajustes en las proporciones (Bennenk 2002). Se puede decir que el módulo de elasticidad disminuye cuando se aumenta la cantidad de pasta, se reduce la cantidad de agregado y disminuye la resistencia (ACI 237R-07: 13).

Retracción autógena, plástica y por secado

Retracción autógena: “Se produce como consecuencia del proceso de hidratación del cemento. Ocurre dentro de la masa de concreto sin contacto con el medio ambiente, por lo tanto es característica de elementos sin pérdida ni aporte de humedad como suele ocurrir en el interior de grandes masas de concreto” (Ottazzi 2012: 51)

La retracción autógena es alta en mezclas con una baja relación agua/cemento, altos contenidos de cemento y materiales cementicios suplementarios que exhiben reactividad puzolanica a edades tempranas (ACI 237R-07: 13).

Retracción plástica: “ Sucede cuando la humedad de la superficie del concreto se evapora a una tasa mayor que el suministro de agua que genera el sangrado, en consecuencia la superficie se contrae más que el concreto debajo de ella” (Ottazzi 2012: 50).

El CAC puede ser propenso al agrietamiento por retracción porque estas mezclas pueden exhibir poco o nada de sangrado superficial. Estudios demuestran que la retracción plástica del CAC puede ser hasta cuatro veces mayor que la del concreto convencional por dos razones: baja relación agua/finos y aditivos superplastificantes que retardan el fraguado (Turcry 2002: 301). Entonces es importante proteger al CAC de la rápida pérdida de humedad.

Retracción por secado: “Se inicia cuando cesa el curado del concreto y se debe principalmente a la pérdida por evaporación del agua del gel de la masa de concreto” (Ottazzi 2012: 51)

La retracción por secado está afectada por las características de los materiales constituyentes: altos volúmenes de pasta y reducciones en el contenido de los agregados conllevan a un mayor potencial de retracción (Daczko 2012: 49).

Creep

“El creep puede definirse como una deformación inelástica del concreto bajo esfuerzos sostenidos” (Ottazzi 2012: 47). Según el comité ACI 237R – 07, mezclas de CAC que usan los mismos materiales y proporciones que un concreto convencional, presentan un similar valor del creep. Asimismo, si el contenido de pasta se incrementa, o la relación agua/cemento incrementa, se debe esperar un incremento de creep (Khayat 2008).

Adherencia al acero

Un CAC provee igual o mejor adherencia que un concreto convencional ya que fluye fácilmente alrededor del refuerzo. El esfuerzo de adherencia del CAC puede ser hasta 40% mayor (Sonebi y Bartos 1999; Chan et al. 2003). Sin embargo, se debe controlar la estabilidad ya que el agua de sangrado puede incrementar la relación a/c debajo de la barra de refuerzo.

Durabilidad

Desarrollar una mezcla de CAC con una resistencia a la compresión equivalente a la mezcla de concreto convencional no es suficiente para alcanzar un similar nivel de durabilidad. Pero cuando se comparan las propiedades de durabilidad basados en el mismo contenido de cemento e igual ratio agua/cemento, la durabilidad del CAC es tan buena como la del concreto convencional (Daczko 2012: 54). En este sentido, se deben tomar las mismas precauciones que para un concreto convencional; como por ejemplo, dotar a la mezcla de un adecuado sistema de burbujas de aire para resistir a ciclos de congelamiento y deshielo. Cuando el CAC está bien diseñado, puede desarrollar una microestructura de poros capilares que reducen el transporte de fluidos (Zhu y Bartos 2003). Esto es muy cierto, ya que su homogeneidad promueve una mejor interface de la pasta y los agregados que mejorara la impermeabilidad.

Estética

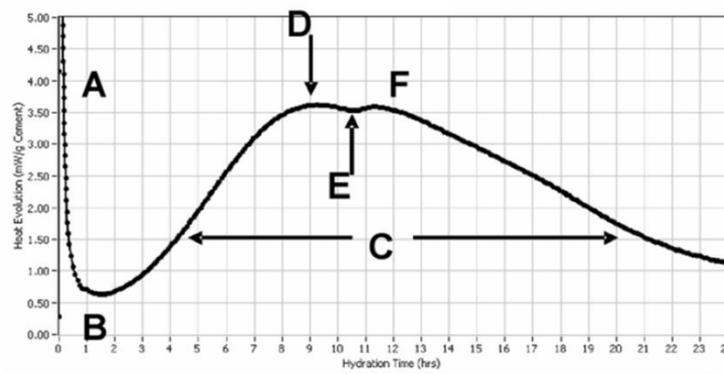
El CAC mejora el acabado superficial del concreto ya que sus propiedades en estado fresco reducen o eliminan imperfecciones como las burbujas superficiales, juntas frías o las cangrejas.

2.7. CALORIMETRÍA

La hidratación del cemento es una reacción exotérmica que consiste en cinco pasos (Young 1985):

- I. Proceso inicial o preinducción
- II. Periodo de inducción
- III. Periodo de aceleración
- IV. Periodo de retardo
- V. Reacciones térmicas a largo plazo

El calorímetro isotérmico es probablemente la mejor forma para estudiar todas las etapas del proceso de hidratación del cemento (Bensled 1987). Mediante este ensayo podemos observar el proceso comprendido entre la etapa II y IV, las reacciones de los componentes principales (C3S, C3A) y el efecto de los aditivos químicos utilizados. El procedimiento para este ensayo se encuentra especificado en la norma ASTM C1679.



NOTE—(A) initial thermal power by dissolution of cement and initial cement hydration; (B) dormant period associated with very low thermal power indicating slow and well-controlled hydration; (C) main hydration peak associated mainly with hydration reactions contributing to setting and early strength development, with maximum at (D); and (E) sulfate depletion point,⁶ followed by (F) accelerated calcium aluminate activity.

FIG. 1 Example of Thermal Power Curve for Isothermal Hydration of Portland Cement

Ilustración 2.6 Hidratación del cemento Portland ASTM 1679



Ilustración 2.7 Equipo de calorimetría I-CAL 400

2.8 CURADO TÉRMICO

El curado térmico para acelerar resistencias (M6) se realiza mediante el equipo CHARI (curado a vapor). Para ello, se utiliza la siguiente normativa:

- UNE-EN 13369 apartado 4.2.1.4 - Hidratación acelerada
- ACI 517 1992 - Curado acelerado para concreto

Según el comité ACI 517, se recomienda iniciar el proceso de curado cuando el fraguado inicial haya ocurrido. La resistencia no incrementara significativamente elevando la temperatura de curado de 60°C a 70°C; por lo que se debe evitar temperaturas de curado cercanas a 70°C porque además no son económicas. Asimismo, la temperatura interna del concreto tampoco debe exceder los 70°C ya que genera reducción en la resistencia final. Por otro lado, los cambios de temperatura durante el precalentamiento y el enfriamiento no deberían ser elevados ya que pueden causar cambios de volumen perjudiciales.

Condiciones:

- **Pre calentamiento:** Después del inicio de fragua, ratio de temperatura máximo (22 – 33 °C)
- **Calentamiento:** Duración entre la 4^{ta} y 10^{ma} hora hasta obtener la resistencia requerida
- **Enfriamiento:** Ratio de temperatura máximo (22 – 33 °C)



Ilustración 2.8 Equipo de curado a vapor CHARI



CAPÍTULO 3: PARÁMETROS DE ESTUDIO

3.1 INFLUENCIA DE LOS MATERIALES

Definiciones

- *Material fino.*- El material fino incluye cemento, fly ash, escoria, finos de los agregados; en general: material que pasa la malla N° 100 (125 μ m).
- *Pasta.*- Es el conjunto de material fino, agua, aditivos químicos y aire.
- *Mortero.*- Es el contenido de pasta más el agregado fino.
- *Robustez.*- Resistencia a la sensibilidad de una mezcla de concreto a fluctuaciones en fluidez, propiedades de las materias primas como el contenido de humedad y la distribución de partículas (Daczko 2012: 145).

Agregados

- *Volumen de agregados*

En relación a la reología del concreto, el incremento del volumen de agregados genera un aumento del esfuerzo de corte y de la viscosidad. Esto se debe a que el aumento del volumen reduce el espacio libre entre los agregados, y esto aumenta la resistencia a fluir debido al rozamiento que se genera entre ellos.

- *La relación arena/agregados*

“El valor óptimo de esta relación para el esfuerzo de corte no es el mismo valor que para la viscosidad” (Tattersall 1991; Szecsy 1997). Sucede que cuando se reduce la cantidad de arena el área superficial de agregado que debe ser cubierto por la pasta disminuye, en ese caso hay mayor cantidad de pasta libre que implica una reducción en la resistencia a fluir. Sin embargo, una reducción de arena menor al valor óptimo genera la disminución de finos que sirven para cubrir los espacios vacíos entre los agregados, en este caso existirá mayor contacto entre las partículas sólidas, aumentando a su vez la resistencia a fluir.

- *El tamaño máximo*

Este valor tiene influencia en la segregación, en la capacidad de paso y en la robustez del concreto. Cuando los agregados son más grandes la tendencia a segregar es mayor y la capacidad de paso disminuye. En cambio, con un tamaño de agregado menor la mezcla es más robusta.

- *Contenido de vacíos*

Cuando tenemos una distribución uniforme de tamaños de agregados, el conjunto de estos será más denso por lo cual habrá menor cantidad de vacíos y se requerirá menor cantidad de pasta.

- *Forma y textura*

El agregado redondeado y equidimensional tiene un mayor “packing density” (menor cantidad de vacíos) que los agregados alargados, irregulares y angulares. Estos agregados angulares requieren de mayor cantidad de pasta, mientras que los agregados redondeados presentan mayor movilidad.

Según Tattersall, la forma del agregado tiene mayor influencia en la viscosidad que en el esfuerzo de corte de la mezcla, mientras que la textura del agregado no tiene mayor influencia en la reología (Tattersall 1991).

Pasta

La pasta es una parte fundamental para el buen comportamiento del concreto autocompactado. Un bajo contenido de pasta presenta baja movilidad de la mezcla e inestabilidad aun cuando el agregado presenta las mejores propiedades. El volumen de pasta deberá ser el necesario para ocupar los vacíos, cubrir el área superficial de los agregados y deberá haber un exceso que evite la colisión entre los agregados, esto mejora la fluidez y disminuye la viscosidad.

La reología de la pasta es una característica más difícil de medir que el volumen de pasta. Esta depende de los materiales utilizados como el cemento, las adiciones, los aditivos superplastificantes y modificadores de viscosidad. La relación del volumen de agua entre el volumen de cementante es el parámetro que nos puede ayudar al control de la reología del concreto. El aumento en cantidad de material cementicio con respecto al volumen de agregados reduce los valores de esfuerzo de corte y viscosidad de la mezcla. Los aditivos superplastificantes y modificadores de viscosidad permiten controlar la reología de la pasta sin la necesidad de alterar la proporciones de la mezcla. Si se desea aumentar la fluidez del concreto se puede adicionar más superplastificante y no altera la viscosidad. Por otro lado, si se desea aumentar la viscosidad se puede adicionar mayor cantidad de modificador de viscosidad o aumentar la cantidad de finos.

Agua

El agua utilizada debe cumplir con los requerimientos de la norma ASTM C 1602. Según Joseph Daczko, el contenido de agua tiene un significativo impacto en la viscosidad de la pasta. Para elementos altamente reforzados, el contenido de agua tiende a ser bajo ya que la viscosidad de la pasta es crítico para evitar el bloqueo de los agregados. Sin embargo, cuando el acabado superficial es crítico, la forma de la estructura es compleja y el acceso limitado; el contenido de agua es alto con el fin de desarrollar superficies lisas y libres de cangrejas (Daczko 2012: 135). El reto es encontrar el contenido óptimo de agua que comprende la suma del agua demandada por los agregados, por el cemento y aditivos. El agua de demanda de los agregados se define como la cantidad de agua requerida para cubrir completamente toda la superficie de las partículas con una capa delgada de pasta y rellenar parcialmente el volumen entre los granos de los finos. Mientras que la cantidad de agua requerida por el cemento y los aditivos, es la necesaria para formar una completa aglomeración de todas las partículas. Es importante resaltar que al adicionar más agua se produce un incremento de la fluidez, pero con una probable segregación.

Cuando se aumenta la relación vol. agua/vol. cementante, debido al aumento de agua los valores de esfuerzo de corte y viscosidad disminuyen. Además, la adición de agua reduce la concentración sólida de mezcla, lo que disminuye la resistencia a fluir. Por otro lado, se debe tener especial cuidado con el uso del agua, ya que en cantidades altas provoca el sangrado del concreto.

Aditivos

- *Reductores de agua de alto rango o superplastificantes*

Los aditivos reductores de agua mejoran la trabajabilidad del concreto al reducir la relación agua/cemento. Según Mork, “los aditivos reductores de agua de alto rango disminuyen el esfuerzo de corte e incrementan la viscosidad plástica” (Mork 1996). Sin embargo, según Smeplass estos aditivos no tienen mayor influencia en la viscosidad (Smeplass 1994).

- *Modificador de viscosidad*

Este aditivo es usado para mejorar la estabilidad al reducir la segregación y el sangrado. Con respecto a la reología, el modificador de viscosidad incrementa ambos valores el esfuerzo de corte y la viscosidad plástica. Además, mejora la tixotropía de la mezcla.

Efectos de los materiales suplementarios

- *Ceniza volante*

Según Tattersall, el reemplazo de cemento por ceniza volante reduce el esfuerzo de corte, mientras que la viscosidad se reduce levemente (Tattersall 1991). Con respecto a la trabajabilidad tiene efectos diferentes. Por un lado, esta se reduce porque al ser una partícula de menor tamaño que el cemento tiene mayor área superficial y esto implica que requiera de mayor agua para humedecer. Por otro lado aumenta la trabajabilidad, porque debido a su forma más redondeada permite que los agregados puedan tener mayor movilidad.

- *Humo de sílice*

Esta adición en pequeñas cantidades puede mejorar la trabajabilidad, pero en altas cantidades puede empeorarla. Similar a la ceniza volante presenta una estructura esférica y es de menor tamaño que el cemento, por lo que demanda de mayor cantidad de agua.

Tabla 3.1 Efectos de las características de los materiales (Daczko 2012: 41)

MATERIALES	Efectos de las características de los materiales		
	Capacidad de relleno	Habilidad de paso	Estabilidad
Finos	Packing density, forma (angular vs redonda) y reactividad de las combinaciones utilizadas pueden impactar la demanda de agua y aditivos.	Mínimos para no impactar la habilidad de paso, solo si ayudan a la capacidad de relleno y estabilidad.	Finura impacta al sangrado y la viscosidad. El nivel de viscosidad afecta el asentamiento de los agregados.
Agregados	Optimized packing density y formas redondeadas incrementan la capacidad de relleno	Partículas más angulares reducen la habilidad de reordenarse mientras fluyen por espacios restringidos. Pequeñas partículas fluyen más fáciles a través de espacios restringidos.	Partículas más pequeñas tienen menor tendencia a asentarse y segregarse. Altos contenidos de finos reducen el sangrado.
Aditivos superplastificantes	Incrementa la fluidez de la fracción de pasta de la mezcla de concreto. Una buena proporción de los materiales de CAC, esta pasta con alta fluidez logran buenas propiedades. En un pobre diseño de CAC, como un inadecuado volumen de pasta, una sobredosis de superplastificante puede ocurrir y resultar en una reducción de estabilidad, incrementando el sangrado y disminuyendo la habilidad paso.		
Aditivos modificadores de viscosidad	Incrementa la viscosidad de la fracción de la pasta de la mezcla de CAC. En un buen diseño de CAC, este tiene una mínima influencia en la capacidad de relleno, alcanzando una buena habilidad de paso y estabilidad. En un diseño pobre de CAC, este incremento de viscosidad en la pasta genera una reducción en la capacidad de relleno y capacidad de paso.		

Tabla 3.2 Efectos de las proporciones de los materiales (Daczko 2012: 42)

MATERIALES	Efectos de las proporciones de los materiales		
	Capacidad de relleno	Habilidad de paso	Estabilidad
Finos	Con un razonable rango de ratio agua/finos, un incremento en el contenido de finos incrementará el volumen de la pasta y su viscosidad, alcanzando la capacidad de relleno, habilidad de paso y estabilidad del CAC. Un incremento muy alto de finos sin incrementar la cantidad agua puede generar mezclas con viscosidades muy altas, reduciendo la capacidad de relleno y habilidad de paso		
Agregados	Un volumen de agregados muy alto relativo al volumen de pasta disminuirá la capacidad de relleno.	Una alta concentración de partículas largas causará bloqueo y reducirá la habilidad de paso. Esta concentración depende de la granulometría de las partículas y las proporciones de la mezcla.	Alto contenidos de agregado fino reducirá sangrado y asentamiento de los agregados
Agua	Un incremento de agua, incrementa el volumen de pasta y la capacidad de relleno siempre que no ocurra segregación	En algunos casos, un incremento de agua puede incrementar la habilidad de paso mediante el incremento de pasta. En otros casos, puede reducir la viscosidad de la pasta mucho y disminuir la habilidad de paso.	Altos contenidos de agua puede incrementar el sangrado y la inestabilidad-

3.2 REQUERIMIENTOS TÉCNICOS

Para poder diseñar un CAC, se requiere conocer su aplicación. A continuación, se presentan recomendaciones de la guía Europea (European Guidelines 2005), guía norteamericana del 1999 (Daczko 2012: 100) y su modificación que fue posteriormente implementado en la norma ACI 237R-07.

Guía europea (2005)

Tabla 3.3 Clases de slump flow

Slump flow (mm)	APLICACIÓN
550- 650	Mínima cantidad de refuerzos, estructuras abiertas, distancias cortas de fluidez. Eje. Losas
660-750	Para aplicaciones normales.
760-850	Alta congestión de refuerzos y formas complejas. Requerimiento de mejor acabado en la superficie. Tener cuidado con el sangrado y la segregación.

Tabla 3.4 Clases de viscosidad

T50 (s)	V-funnel time (s)	APLICACIÓN
≤2	≤8	Buena capacidad de relleno en alta congestión de refuerzo, buen acabado de la superficie. Tener cuidado con el sangrado
>2	9 a 25	Muestra propiedades tixotrópicas, buen comportamiento frente a la segregación pero puede tener problemas en el acabado de la superficie.

Tabla 3.5 Clases de habilidad de paso

Clase	Habilidad de paso	APLICACIÓN
Clase 1	$H2/H1 \geq 0.80$ con dos barras	Estructuras con un espacio de 80-100 mm
Clase 2	$H2/H1 \leq 0.80$ con tres barras	Estructuras con un espacio de 60-80 mm

Guía norteamericana (1999)

Tabla 3.6 Rangos sugeridos de los valores de las propiedades para distintas aplicaciones

APLICACIÓN	Valor del slump flow (mm)
Losa	460-710
Sección arquitectónica	610-710
Muros con mínimo refuerzo	460-660
Columnas o muros estructurales densamente reforzados	610-710

La presente guía fue modificada el 2001, se incorporó a documentos de las industrias como el PCI y el ACI 237R-07. A continuación, se presentan las recomendaciones:

- **Nivel de refuerzo**

El nivel de refuerzo determina el nivel requerido de fluidez y habilidad de paso. Si el nivel de refuerzo es alto, la tabla 3.8 sugiere alta fluidez y alta habilidad de paso, así como, media a alta viscosidad.

- **Complejidad de la forma del elemento**

Esta complejidad se relaciona con la dificultad con la que una mezcla llena los moldes sin dejar imperfecciones en la superficie. Si la complejidad del elemento o estructura es alta, la tabla 3.8 recomienda una alta fluidez con una media a baja viscosidad.

- Un elemento con baja complejidad de forma: Doble T (concreto requiere fluir en un solo sentido)
- Un elemento con media complejidad de forma: Caja (concreto requiere fluir alrededor de las esquinas y contornos)
- Un elemento con alta complejidad de forma: Pared con un revestimiento del encofrado (concreto requiere fluir en la esquinas así como también rellenar alrededor y dentro de espacios no uniformes)

- **Profundidad del elemento**

Un elemento más alto tiene un mayor potencial de segregación. Si la profundidad del elemento es alta, la tabla 3.8 sugiere mantener una media y alta viscosidad para reducir el asentamiento de los agregados y el sangrado. Además, el contratista debe confirmar, mediante ensayos, un alto nivel de estabilidad de mezcla cuando el elemento es alto ya que se pueden presentar problemas de adherencia.

- **Importancia del acabado superficial**

El comité ACI 302.2R presenta cuatro clasificaciones de acabados superficiales: Especial, elaborado, ordinario y áspero (alto, medio o bajo respectivamente). La tabla 3.8 sugiere que para una apariencia superficial de alta calidad, una media a alta fluidez y una media a baja viscosidad proveen los mejores resultados.

- **Longitud del elemento**

Este requerimiento representa la distancia promedio que el concreto debe fluir desde el punto de descarga. Esto depende de la facilidad y accesibilidad con la que el equipo de colocación puede moverse, si es limitado la habilidad de paso del CAC debe ser mayor, si es fácil habilidad de paso del CAC puede ser menor. La tabla 3.8 sugiere una alta fluidez para asegurar un flujo más largo y una viscosidad alta a media para asegurar que el mortero y el agregado no se separen.

- **Espesor de la pared**

El espesor de la pared representa el espacio constante más cerrado entre dos superficies. Mientras el espacio disminuye, la viscosidad se convierte influyente. Una alta viscosidad en un espacio cerrado, hace que el movimiento sea más lento y puede afectar la velocidad de colocación y el acabado superficial.

La tabla 3.8 recomienda una alta fluidez, y una media a baja viscosidad cuando el espesor es muy reducido.

- **Contenido de agregado grueso**

Es difícil alcanzar una alta fluidez sin segregación cuando el contenido de agregado grueso es alto. Lo mismo pasa con la habilidad de paso.

- **Colocación de concreto y energía de colocación**

Se debe conocer el tipo de descarga:

- Descarga continua: Una vez que se ha iniciado el vaciado el molde es llenado íntegramente sin detenerse.
- Descarga discontinua: Requiere varias entregas de concreto, con paradas de concreto entre sucesivos lotes

Características como la retención de trabajabilidad o la tixotropía de la mezcla deben ser consideradas a fin de eliminar líneas de vaciado (juntas frías) u otros efectos

- Altura de vaciado: Asegurar la estabilidad del CAC
- Concreto bombeado: Si el CAC no está proporcionado correctamente, puede segregarse en la línea de bombeo

- **Energía de colocación**

En la tabla 3.8, se recomienda una alta fluidez y una media a baja viscosidad, cuando la energía de colocación es baja. Por ello, se debe notar que si la energía de colocación es alta, una baja viscosidad no es recomendada ya que la segregación puede ocurrir.

Tabla 3.7 Rangos de los valores e los métodos de ensayo

Rangos de los valores de los métodos de ensayo			
Ensayos	Nivel de performance		
	Bajo	Medio	Alto
Slump flow (mm)	500-574	575-675	>675
T50 (s)	<2	2 - 4	>4
L-Box, h2/h1 = 0.80		2 barras	3 barras

Tabla 3.8 Matriz de las propiedades en estado fresco

		Propiedades en estado fresco								
		Fluidez			Habilidad de paso			Viscosidad		
		Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alto	Bajo	Medio	Alta
Nivel de refuerzo	Bajo									
	Medio	X			X			X		
	Alto	X	X		X	X		X		
Complejidad de la forma del elemento	Bajo									
	Medio	X								X
	Alto	X	X							X
Profundidad de la forma del elemento	Bajo									
	Medio									
	Alto							X		
Longitud del elemento	Bajo									
	Medio	X						X		
	Alto	X	X					X		
Importancia del acabado superficial	Bajo									
	Medio	X								X
	Alto	X	X							X
Contenido de agregado grueso	Bajo									
	Medio						X			
	Alto					X	X			X
Energía de colocación	Bajo	X	X							X
	Medio	X								
	Alto							X		

Nota: Los espacios en color plomo son los niveles recomendados

Si no se tiene experiencia previa utilizando CAC para aplicarlo, y se utilizan los ensayos de slump flow, T50 y J-ring, la matriz debe seguirse de la siguiente manera (Daczko 2012: 116):

- Slump flow=650-800 mm
- T50=2-4 s
- J-ring= 40-80 mm de diferencia de slump flow

Asimismo, the National Cooperative Highway Research Program sugiere un CAC adecuado para ser utilizado en concreto prefabricado debería cumplir lo siguiente (NCHRP 2008: Reporte 628):

- L-box = 50%

3.3 MÉTODOS DE DISEÑO

El diseño del CAC requiere considerar los requerimientos del proyecto y las técnicas de colocación para que su uso sea satisfactorio. Para ello, es importante considerar una serie de factores como las propiedades en estado endurecido, características de los materiales, costos, entre otros. Por ejemplo, cuando el requerimiento de slump flow es mayor, también será mayor el costo porque se necesita más pasta para proveer movilidad; esto hace que la demanda de finos y aditivo reductor de agua de alto rango sea mayor. También será necesario utilizar un aditivo modificador de viscosidad y un mayor control de calidad de los recursos. Es importante saber escoger el nivel de performance necesitada y desarrollar una mezcla para lograr dicho objetivo. Cuando el CAC es usado solamente por razones económicas, como reducción del trabajo, no se requiere un slump flow tan alto que cuando se utiliza por requerimientos técnicos. Asimismo, la viscosidad de la mezcla está definida por los requerimientos de las propiedades en estado endurecido (relación agua/cemento) que por las propiedades en estado fresco.

Métodos existentes de diseños de mezclas del CAC

1. El método racional de diseño de mezclas (Okamura 1995: 107-120)

Este método fue presentado por Okamura y Ozawa, los siguientes pasos que deben ser seguidos:

- El contenido de agregado grueso se fija en el 50% del volumen sólido.
- El contenido de agregado fino se fija en el 40% del volumen de mortero.
- La relación agua/finos en volumen se asume que estará entre 0.9 y 1.0, dependiendo de las propiedades de los finos.
- La dosis de superplastificantes y la relación agua/finos final son determinadas a fin de asegurar auto-compactibilidad.

2. El método CBI (Billberg 1999)

Este método fue desarrollado por Billberg, los siguientes pasos que deben ser seguidos:

- Calcular el mínimo volumen de pasta de acuerdo a las propiedades de los agregados, propiedades en estado endurecido y el criterio de la habilidad de paso. Se realizan cálculos para determinar la cantidad de agregado basado en relación entre el tamaño máximo de agregado (TMA) y el más pequeño espacio por donde el concreto debe fluir. Además, es una metodología para establecer el volumen de pasta considerando información pasada y el contenido de vacíos en el esqueleto del agregado.
- Diseñar la pasta basándose en mediciones reológicas del mortero.
- Ensayar y verificar las propiedades en estado fresco y endurecido deseadas

3. El método ICAR (Koehler 2007)

Este método fue desarrollado por Intenational Center for Aggregates Research, los siguientes pasos que deben ser seguidos:

- Seleccionar los agregados y el TMA a ser utilizado, y evaluarlos para determinar “packing density”, forma, angularidad, y determinar el contenido de vacíos para las distintas mezclas.
- Determinar el apropiado volumen de pasta para las correspondientes habilidades de relleno y de paso, esto basado en el contenido de vacíos, la forma y angularidad determinados en el paso anterior, y los requerimientos de robustez.
- Determinar la composición de pasta basado en los requerimientos en las propiedades en estado fresco y endurecido

4. El método ACI (ACI 237R-07 2007: 16)

El comité ACI 237R-07 provee la siguiente guía para proporcionar CACs, los siguientes pasos que deben ser seguidos:

- Determinar el apropiado slump flow basado en la aplicación
- Seleccionar el tamaño máximo y el contenido del agregado grueso basado en los requerimientos de habilidad de paso. Este método propone un contenido inicial de agregado grueso de 50% el volumen sólido absoluto de la mezcla. Este está basado en el método racional mencionado anteriormente.
- Estimar el contenido cementicio/finos requerido basado en los requerimientos de slump flow.
- Calcular los volúmenes de pasta y mortero
- Seleccionar los apropiados aditivos
- Mezclas de prueba
- Ensayar las propiedades en estado fresco y endurecido de la mezcla
- Basado en los resultados, ajustar proporciones, remezclar, y ensayar nuevamente.

CAPÍTULO 4: ESTUDIO EXPERIMENTAL

4.1 MEZCLAS DE PRUEBA

Se aplica el método ACI y la teoría previamente estudiada para cumplir con los objetivos del proyecto.

Existen tres maneras de desarrollar un CAC

- ✓ Alto contenido de finos y aditivos superplastificantes (HRWRA)
- ✓ Bajo contenido de finos, aditivos superplastificantes HRWRA y aditivos modificadores de viscosidad VMA
- ✓ Moderado contenido de finos, aditivos superplastificantes HRWRA y moderada dosis de VMA

Diseño de mezcla prueba “MP 1”

El diseño de la mezcla patrón parte del diseño convencional de un concreto prefabricado. Se tiene como objetivo desarrollar un CAC con dichas proporciones:

1. Determinación del slump flow apropiado: 650 – 800 mm
2. Tamaño máximo de piedra y su contenido del agregado grueso
 - Piedra HUSO 89 (Categoría 2 según el comité ACI 237)
 - Incidencia arena/piedra convencional = 50/50 (Recomendación ACI 237R-07: Cap.4.4.1.1)
3. Estimar el contenido de cemento de acuerdo al slump flow requerido y determinar la cantidad de agua

Tabla 4.1 Rango sugerido de contenido de finos

Slump flow < 550 mm	Slump flow 550 – 600 mm	Slump flow > 650 mm
355-385 kg/m ³	385 – 445 kg/m ³	> 458 kg/m ³

Proporciones del concreto convencional:

- Cantidad de cemento: 510 kg/m³
 - Cantidad de finos: 573 kg/ m³
 - Cantidad de agua: 180 kg/ m³
 - Relación agua/cemento: 0.35
4. Calcular el volumen de pasta y de mortero

Tabla 4.2 Recomendaciones de las proporciones

PARÁMETROS	EFNARC (2002)	ACI 237R - 07	MEZCLA
Relación a/f (en volumen)	0.80 -1.10	-	0.91
Contenido total de finos (kg/m ³)	400-600	458+	600
Agregado grueso (% en vol.)	28-35	-	32.4
Agua(L/m ³)	< 200	-	180
Fracción de pasta (% en vol.)	-	34-40	35.3
Fracción de mortero (% en vol.)	-	68-72	68.2
Cantidad de cemento(kg/m ³)	350-450	-	510
w/cte (relación w/c típicos)	-	0.32-0.45	0.35

5. Seleccionar aditivo

- Aditivo reductor de agua de alto rango: Master Glenium 3800

6. Mezclar

Tabla 4.3 Diseño de mezclas MP-1

MATERIALES	PROCEDENCIA	P. ESP kg/m ³	HUM. %	ABS. %	PESO SECO kg/m ³	VOL. m ³
Cemento tipo I	Cementos Lima	3130			510	0.1629
Adición	Cementos Lima	2740			0	0.0000
Agua	Planta Basf	1000			180	0.1800
Arena	Jicamarca	2650	7.857	1.44	829.24	0.3129
Piedra 89	Jicamarca	2641	0.682	1.93	826.42	0.3129
Master Glenium 3800	BASF	1060			11.89	0.0112
Master X-SEED 100	BASF	1130			0	0.0000
MasterSet 770R	BASF	1120			0	0.0000
Aire						0.0200
TOTAL					2357.55	1.00



Ilustración 4.1 Ensayo Slump flow MP1

El contenido de pasta y mortero se encuentran dentro del rango recomendado; sin embargo, se puede observar que existe burbujeo y descoloración de la pasta por sobredosis. De acuerdo a la hoja técnica del aditivo Master Glenium SCC 3800, el rango de dosificación recomendado para este aditivo es de 500ml a 2000 ml por 100 kg de cemento. Estas dosificaciones pueden ampliarse o reducirse en función de las necesidades de fluidificación, reducción de agua y resistencias iniciales y finales deseadas. En nuestro caso la dosis es de 2200 ml / 100kg de cemento.

Se procede a realizar los siguientes ajustes para obtener el diseño patrón:

- Se incrementará la cantidad de cemento para eliminar el efecto sobredosis de aditivo. La mezcla tendrá mayor pasta que proveerá movilidad a los agregados.
- La extensibilidad se encuentra entre 650 a 700 mm. Se cambia el huso del agregado grueso de 89 a 67 para tener menor área superficial que generara un mayor exceso de pasta; en consecuencia, la fluidez será mayor.
- Se ensayarán combinaciones de aditivos para garantizar el desempeño esperado.



RESUMEN DE MEZCLAS DE PRUEBA:

Tabla 4.4 Resumen de mezclas de prueba

Prueba N°	Descripción	Relación a/f	Contenido de finos(kg/m3)	Agregado Grueso (%)	Agua (l/m3)	Fración de pasta (%)	Fración de mortero (%)	Cantidad de cemento (kg/m3)	A/C	Slump flow +0min (mm)	Slump flow +30min (mm)	VSI	F'c a 24 horas (kg/cm ²)
3	MGSCC 18cc	1.03	541	29.5	180	37.21	70	510	0.35	slump 9 3/4"	---	-	---
4	MGSCC 18cc	1.19	573	26	220	42.22	74	543	0.41	490	---	0	413
5	MGSCC 18cc	1.05	649	24.8	220	44.88	75	620	0.35	560	---	0	470
6	MGSCC 18cc	1.05	649	24.8	220	44.92	75	620	0.35	630	---	1	439
7	MGSCC 18cc	1.18	579	27	220	42.56	73	550	0.4	540	---	0	315
8	MGSCC18cc	1.18	579	27	220	42.56	73	550	0.4	695	---	2	420
9	MGSCC 18cc	1.12	579	27.5	210	41.56	73	550	0.38	450	---	0	---
10	MGSCC18cc	1.12	579	27.5	210	41.56	73	550	0.38	750	585	2	321
11	MGSCC 18cc	1.07	581	26.8	200	40.56	73	550	0.36	400	---	0	372
12	MGSCC18cc	1.18	580	25.9	220	42.56	74	550	0.4	680	500	1	313
13	MGSCC 15cc +MS3cc	1.18	580	25.9	220	42.56	74	550	0.4	500	---	0	---
14	MGSCC 15cc +MS3cc	1.18	580	25.9	220	42.56	74	550	0.4	Seco	---	-	---
15	MGSCC 18cc +MS3cc	1.07	581	26.7	200	40.73	73	550	0.36	500	---	-	---
16	MGSCC18cc + MS3cc	1.12	580	26.2	210	41.73	74	550	0.38	650	500	0	293

- MASTER GLENIUM 3800 SCC → MGSCC

- MASTER SET 770R → MS

Las ilustraciones 4.2, 4.3 y 4.4 corresponden a las mezclas de prueba 8, 12 y 16 respectivamente. Estas mezclas son las que tuvieron mejor performance ya que todas alcanzan la capacidad de relleno requerida (slump flow: 650-800mm).

De estos diseños se puede obtener el siguiente análisis: La mezcla MP8 tiene sangrado excesivo y segregación de la pasta con los agregados; visualmente se puede calificar con un VSI = 2; la mezcla MP12 es más estable (VSI = 1) ya que se incrementó la cantidad de arena para mejorar la viscosidad y reducir el sangrado, pero no tiene buena mantención porque a la hora ha perdido 180 mm de extensibilidad; y en la mezcla MP16 se cumple con las condiciones iniciales de fluidez y estabilidad. A pesar de que en este último diseño se ha utilizado un aditivo retardante de fragua, no se puede apreciar su efecto; entonces se repite el ensayo.

Es importante resaltar que el cambio en la incidencia arena/piedra: 53/47 a 55/45 ayudo a mejorar la estabilidad de los diseños; sin embargo, dicho cambio afecta la fluidez ya que el área superficial que tiene que ser cubierto por la pasta también se ha incrementado.

Antes de continuar con el plan de acción para encontrar el diseño patrón, se realizó el ensayo L-box para determinar la habilidad de paso de la mezcla MP12, dicho valor fue de 0.65 menor al valor de 0.80 especificado. Este es un indicio de que se pueden desarrollar concretos autocompactados con excelente fluidez y estabilidad, pero con habilidad de paso insuficiente.



Ilustración 4.2 Mezcla de prueba MP8



Ilustración 4.3 Mezcla de prueba MP12



Ilustración 4.4 Mezcla de prueba MP16

4.2 PROTOCOLO DE PRUEBA

El protocolo de prueba presenta dos aspectos fundamentales: el tiempo de mezclado y la secuencia de colocación de los materiales.

Por un lado, el tiempo de mezclado depende de factores como la cantidad de mezcla desarrollada, la trabajabilidad del concreto, el tamaño y la granulometría de los agregados, y la capacidad del equipo de mezclado (PCI MNL 116 1999); este tiempo es directamente proporcional a la viscosidad de la mezcla. Se ha observado que para relaciones agua/cemento bajas el tiempo de mezclado puede llegar hasta los 12 minutos.

Por otro lado, la secuencia y la rapidez en que los materiales son adicionados tienen una gran influencia sobre el tiempo requerido de mezclado (de Larrard 2003, Beitzel 2005). No se debe colocar el material cementicio en un inicio ya que se genera una aglomeración de finos que no se mezclan debidamente. Según el comité del ACI 304, recomienda adicionar 10% de agregado grueso y agua en un inicio (ACI 304 2000:11)

Asimismo, el tiempo de la adición de los aditivos es importante. Según Domone, adicionar el aditivo luego de los 30 segundos a 2 minutos del contacto agua y cemento, se obtienen resultados más óptimos de performance (Domone 1999:109-120). Otra buena práctica que se debe realizar con los aditivos es homogenizar el producto antes de su uso, principalmente aquellos que puedan tener problemas de sedimentación.

Para desarrollar el protocolo se pueden seguir muchas recomendaciones; sin embargo, es en la práctica donde se van ajustando los tiempos y secuencias de colocación.

Inicialmente, se parte del siguiente protocolo:

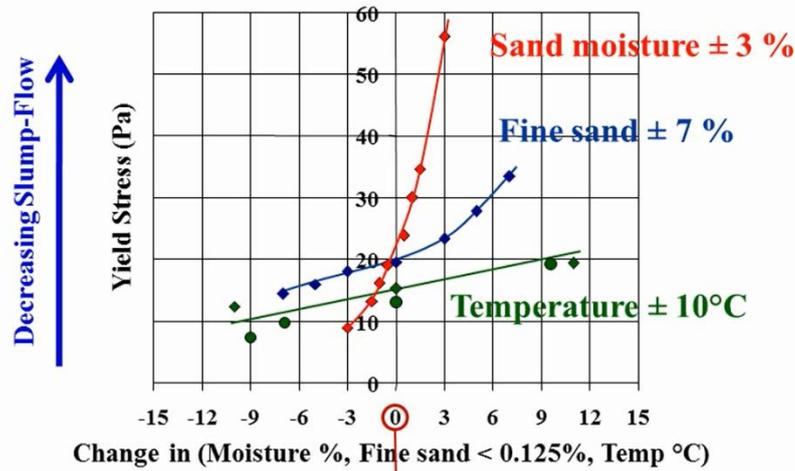
1. El 100% de la piedra y la arena con el 45% del agua de mezclado durante 1 minuto.
2. El 100% del cemento con el 45% del agua de mezclado durante 3 minutos.
3. Se adiciona el aditivo superplastificante con el resto del agua y se mezcla por 7 minutos.



Ilustración 4.5 Mezcla humedad de la arena 12%



Ilustración 4.6 Mezcla humedad de la arena 8%



Correkt Moisture, Temp=20 °C, Sand 7 %<0,125 mm

Ilustración 4.7 Variabilidad del CAC (P.Billberg 2008)

Por un lado, las ilustraciones 4.5 y 4.6 describen la fluidez de un mismo diseño pero con humedades diferentes. La primera presenta una extensibilidad de 550 mm con una humedad de la arena de 12%, mientras que la segunda presenta una extensibilidad de 700 mm con una humedad de la arena de 8%. Por otro lado, la ilustración 4.7 describe la sensibilidad de un CAC frente a cambios en la humedad de la arena, contenido de finos y temperatura del ambiente en términos de slump flow o esfuerzo de corte. Se puede afirmar que un CAC es más robusto cuando se trabaja con humedades bajas, en nuestro caso este valor óptimo sería 8% por que se alcanza la fluidez requerida. Cuando se trabajen con humedades menores a este valor, se espera un concreto más fluido debido a que los superplastificantes trabajan mejor con mayor agua efectiva o libre; lo contrario sucede con humedades mayores a este valor que proporcionan mezclas más secas.

Debido a que el agua de mezclado es afectado principalmente por la humedad de los agregados, se opta por trabajar con porcentajes de la cantidad de agua de diseño para desarrollar el protocolo:

Tabla 4.5 Protocolo de prueba

ITEM	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
A1	AGUA DE MEZCLADO CON LOS AGREGADOS	AGUA RESTANTE
A2	AGUA DE MEZCLADO DESPUES DE AÑADIDO EL CEMENTO	42.5% DEL AGUA DE DISEÑO
A3	AGUA DE MEZCLADO PARA DISOLVER EL ADITIVO	15% DEL AGUA DE DISEÑO
TOTAL		AGUA DE MEZCLADO

ACTIVIDAD	DURACIÓN (min)
1. Se coloca la piedra y la arena	2
2. Se vierte agua A1	
3.- Se coloca el cemento y se vierte agua A2	3
4.- Se coloca el aditivo y se vierte A3	7
Total	12

- A1: Corresponde al agua de mezclado con los agregados, para establecer una misma condición de mezclado independientemente de la humedad de los mismos (la humedad de la arena debe ser máximo 13.6%).
- A2 y A3: Corresponde al 57.5% del agua de diseño. La cual se divide en A2 igual al 42.5% y A3 igual al 15% del agua de diseño.

Es importante realizar la división del agua considerando porcentajes del agua de diseño y mantener la secuencia presentada; esto puede mitigar la variable humedad de los agregados. Sin embargo, es necesario realizar más pruebas y estudios que no son parte del alcance de la presente investigación, pero en nuestra experiencia se obtuvieron buenos resultados.

4.3 PLAN EXPERIMENTAL

Los diseños tienen una buena cantidad de pasta que promueve la capacidad de relleno; sin embargo, se requiere tener una buena capacidad de paso para evitar el bloqueo de los agregados frente a una alta congestión de acero de refuerzo. Es por ello que se plantea realizar una comparación de distintos tamaños de piedra y comprobar la influencia del tamaño de la piedra en la capacidad de paso. Asimismo, se tiene poca mantención de las propiedades en estado fresco del CAC, entonces se plantea comparar la combinación de un aditivo superplastificante de baja mantención (Master Glenium SCC 3800) más un aditivo plastificante retardante (Master Set 770R), y un aditivo superplastificante de mayor mantención (Master Glenium SCM 3810).

Tabla 4.6 Plan experimental

Diseño	Aditivo	Piedra Huso
D1	MG SCC	67
D2	MG SCC + MS	67
D3	MG SCM	67
D4	MG SCM + MS	67
D5	MG SCC	89
D6	MG SCC + MS	89
D7	MG SCM	89
D8	MG SCM + MS	89

Descripción:

- MG SCC: Master Glenium SCC 3800
- MS: Master Set 770R
- MG SCM: Master Glenium SCM 3810

Se realiza una breve comparación entre los diseños D1 y D2 donde se comprueba que la fluidez de la pasta mejora la habilidad de paso (L-Box = 0.8), y el uso del aditivo retardante mejora la mantención de las propiedades autocompactantes de la mezcla. En esta comparación se observa que el diseño D1 no cumple con la fluidez requerida; por lo que se descarta el diseño D5 que utiliza el mismo aditivo superplastificante sin retardo.

Tabla 4.7 Comparación D1 vs D2

Diseños	Aditivos a evaluar	Extensibilidad (0min)	Extensibilidad (30min)	Extensibilidad (60min)	L-BOX	Conclusión
D1	MGSCC19cc	650	520	400	0.65	No califica
D2	MGSCC19cc +MS3cc	700	630	580	0.8	Posible diseño patrón



Ilustración 4.8 Ensayo Slump flow Mezcla D1



Ilustración 4.9 Ensayo Slump flow Mezcla D2



Ilustración 4.10 Ensayo L-box Mezcla D1

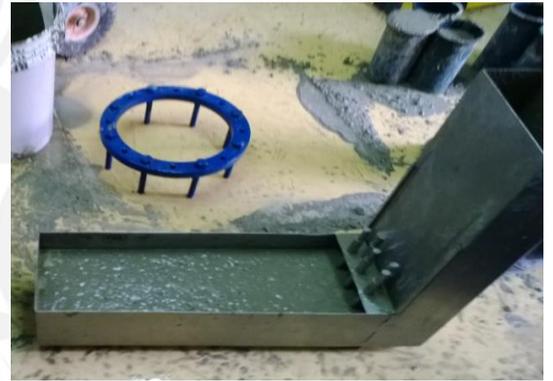


Ilustración 4.11 Ensayo L-box Mezcla D2

De la misma manera, después de evaluar los diseños D3 y D4 se comprobó que el aditivo Master Glenium SCM 3810 no requiere de un aditivo retardante para mantener las propiedades en estado fresco. Por lo tanto, tampoco se va a evaluar el diseño D8 en el plan experimental. Asimismo, es importante resaltar que el cambio de la incidencia arena-piedra en los diseños con piedra huso 89 parte de la influencia del área superficial en el requerimiento de pasta para obtener la misma fluidez.

Tabla 4.8 Diseño de mezclas Plan experimental

		DISEÑO DE CONCRETO AUTOCOMPACTADO LABORATORIO BASF			
PARÁMETRO	UNIDAD	D2:Master Glenium SCC 3800 (19.0cc), MasterSet 770R (3.0cc)	D3:Master Glenium SCM 3810 (16.5cc)	D6:Master Glenium SCC 3800 (19.0cc), MasterSet 770R (3.0cc)	D7:Master Glenium SCM 3810 (16.5cc)
		DOSIFICACIÓN DE MATERIALES POR M3			
Master Glenium SCC 3800	cc/kg cte	19.0	-	19.0	-
Master Glenium SCM 3810	cc/kg cte	-	16.5	-	16.5
Master Set 770R	cc/kg cte	3.0	-	3.0	-
Cemento Sol Tipo I	Kg/m ³	550	550	550	550
Microfiller calizo	Kg/m ³	-	-	-	-
Agua potable	L/m ³	220	220	220	220
Arena Jicamarca		834	838	758	762
Piedra Jicamarca Huso 67	Kg/m3	726	730	-	-
Piedra Jicamarca Huso 89	Kg/m3	-	-	756	760
Incidencia arena -Piedra	%	55-45	55-45	46 - 54	46 - 54
Contenido de aire	%	2.0%	2.0%	2.0%	2.0%
Relación a/c	-	0.40	0.40	0.40	0.40
EPECIFICACIONES TÉCNICAS					
Slump flow inicial	mm.	650-850	650-850	650-850	650-850
Pérdida máxima de sump/hr	mm.	100	100	100	100
L-box	H1/H2	0.80	0.80	0.80	0.80

DISEÑO “D2”

Tabla 4.9 Resultados Diseño D2

DISEÑO DE MEZCLA	Cemento (kg)	A/C	Arena/Piedra	Master Set 770R (cc/kg.cem)	Glenium 3800 SCC (cc/kg.cem)
D2	550	0.4	0.55	3	19
DESCRIPCIÓN DE ENSAYO	MINIMO	MÁXIMO	DATOS	UNIDADES	VERIFICACIÓN
Extensibilidad (0 min)	650	800	725	mm	Cumple
Extensibilidad (60 min)	550	700	628	mm	Cumple
T50 (0 min)	2	5	1.5	s	No cumple
T50 (60 min)	-	-	2	s	-
VSI (0 min)	1	0	1	-	Cumple
L-Box (0 min)	80	100	75	%	No cumple
L-Box (60 min)	50	100	29	%	No cumple
F'c a 24 horas	300	-	322	kg/cm ²	Cumple
				% DE CUMPLIMIENTO	57.14%

Observaciones:

El diseño presenta buenas características en términos de capacidad de relleno y estabilidad, pero la habilidad de paso no cumple con los requerimientos establecidos.

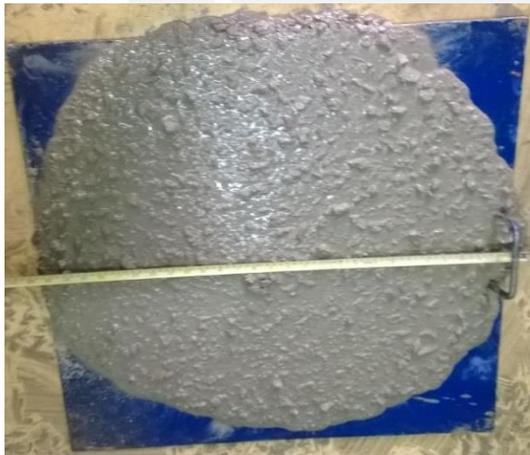


Ilustración 4.12 Slump flow tiempo 0 min

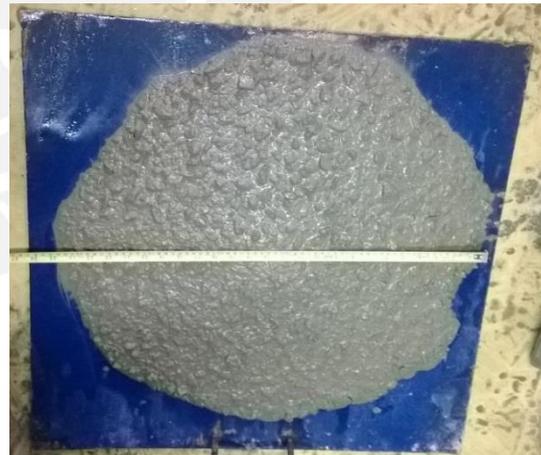


Ilustración 4.13 Slump flow tiempo 60 min

DISEÑO “D3”

Tabla 4.10 Resultados Diseño D3

DISEÑO DE MEZCLA	Cemento (kg)	A/C	Arena/Piedra	Master Set 770R (cc/kg.cem)	Glenium 3810 SCM (cc/kg.cem)
D3	550	0.4	0.55	3	16.5
DESCRIPCIÓN DE ENSAYO	MINIMO	MÁXIMO	DATOS	UNIDADES	VERIFICACIÓN
Extensibilidad (0 min)	650	800	830	mm	No cumple
Extensibilidad (60 min)	550	700	660	mm	Cumple
T50 (0 min)	2	5	1.5	s	No cumple
T50 (60 min)	-	-	2	s	-
VSI (0 min)	1	0	2	-	No cumple
L-Box (0 min)	80	100	72	%	No cumple
L-Box (60 min)	50	100	66	%	Cumple
F'c a 24 horas	300	-	326	kg/cm ²	Cumple
				% DE CUMPLIMIENTO	42.86%

Observaciones:

Se puede apreciar que el aditivo Master Glenium 3810 plastifica más con menos dosis; sin embargo, no es estable (VSI=2) ni tiene habilidad de paso (L-box=0.72).



Ilustración 4.14 Slump flow tiempo 0 min



Ilustración 4.15 Slump flow tiempo 60 min

DISEÑO "D6"

Tabla 4.11 Resultados Diseño D6

DISEÑO DE MEZCLA	Cemento (kg)	A/C	Arena/Piedra	Master Set 770R (cc/kg.cem)	Glenium 3800 SCC (cc/kg.cem)
D6	550	0.4	0.5	3	19
DESCRIPCIÓN DE ENSAYO	MINIMO	MÁXIMO	DATOS	UNIDADES	VERIFICACIÓN
Extensibilidad (0 min)	650	800	750	mm	Cumple
Extensibilidad (60 min)	550	700	605	mm	Cumple
T50 (0 min)	2	5	1.4	s	No cumple
T50 (60 min)	-	-	5	s	-
VSI (0 min)	1	0	2	-	No cumple
L-Box (0 min)	80	100	71	%	No cumple
L-Box (60 min)	50	100	60	%	Cumple
F'c a 24 horas	300	-	361	kg/cm ²	Cumple
				% DE CUMPLIMIENTO	57.14%

Observaciones:

La mezcla tiene alta fluidez pero es inestable; se puede observar agua de exudación en los bordes. Una vez más se puede afirmar que la capacidad de paso no solo depende de la fluidez de la pasta, también depende de su estabilidad y viscosidad.

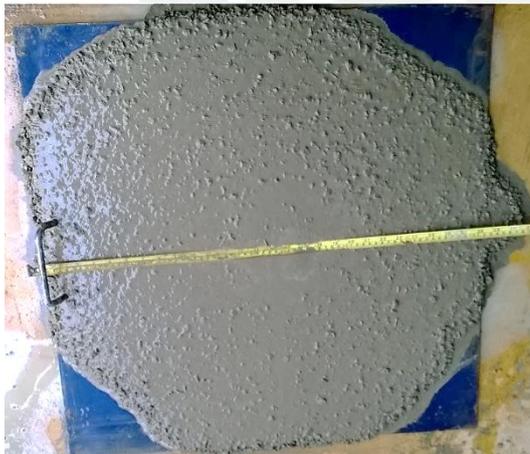


Ilustración 4.16 Slump flow tiempo 0 min



Ilustración 4.17 Slump flow tiempo 60 min

DISEÑO “D7”

Tabla 4.12 Resultados Diseño D7

DISEÑO DE MEZCLA	Cemento (kg)	A/C	Arena/Piedra	Master Set 770R (cc/kg.cem)	Glenium 3810 SCM (cc/kg.cem)
D7	550	0.4	0.55	0	16.5
DESCRIPCIÓN DE ENSAYO	MINIMO	MÁXIMO	DATOS	UNIDADES	VERIFICACIÓN
Extensibilidad (0 min)	650	800	745	mm	Cumple
Extensibilidad (60 min)	550	700	685	mm	Cumple
T50 (0 min)	2	5	1.2	s	No cumple
T50 (60 min)	-	-	3	s	-
VSI (0 min)	1	0	1	-	Cumple
L-Box (0 min)	80	100	92	%	Cumple
L-Box (60 min)	50	100	78	%	Cumple
F'c a 24 horas	300	-	332	kg/cm ²	Cumple
% DE CUMPLIMIENTO					85.71%

Observaciones:

A pesar de que la mezcla tiene baja viscosidad (a/c = 0.4), la cantidad de pasta permite cumplir con los requerimientos, inclusive a la hora la mezcla aún tiene buena capacidad de paso y es mucho más estable. El porcentaje de cumplimiento es mayor en comparación a los demás.



Ilustración 4.18 Slump flow tiempo 0 min



Ilustración 4.19 Slump flow tiempo 60 min

Tabla 4.13 Propiedades en estado fresco y estado endurecido

Propiedades	Tiempo	D2	D3	D6	D7
Slump flow (mm)	0 min	725	830	750	745
	60 min	628	660	605	685
T50 (s)	0 min	2.5	1.5	1.4	1.2
	60 min	3	2	4.5	3
VSI	0 min	1	2	2	1
	60 min	0	0	0	0
L-box (H1/H2)	0 min	0.75	0.92	0.9	0.92
	60 min	0.29	0.72	0.35	0.78
T° Concreto (°C)	0 min	29.1	29.2	29.6	31.8
	60 min	29.7	29.8	29.9	30.4
T° Ambiente (°C)	0 min	28.6	28.5	28.5	29
	60 min	29	29	28.5	29.8
Resistencia a compresión (kg/cm²)	24 hr	322	326	361	332

Comentario:

Todos los diseños presentan alta fluidez, pero tienen tendencia a segregar, sobre todo al sangrado excesivo. También se puede observar que todos los diseños presentan baja viscosidad; esto debido a que se utilizó agua en lugar de aditivo para disminuir el esfuerzo de corte. A pesar de ello, se garantiza una habilidad de paso. Se descartan las mezclas D3 y D6 por la inestabilidad observada. Los resultados demuestran que la mezcla D7 cumple con todos los requerimientos: capacidad de relleno, habilidad de paso y estabilidad; también presenta una buena mantención de las propiedades en estado fresco hasta los 60 min. Algunas desventajas que pueden presentarse, propio de los concreto de alta fluidez es que requerirá un mayor control de calidad de los componentes y baja robustez (la humedad de los agregados tendrán bastante influencia).

CAPÍTULO 5: DISEÑOS DEFINITIVOS

El capítulo anterior permitió encontrar un diseño patrón “M1” caracterizado por su alta fluidez, habilidad de paso, estabilidad y baja viscosidad; es cierto que se podría mejorar la viscosidad reduciendo la cantidad de agua o con una mayor incidencia de arena pero no se realiza por dos razones: se aumenta la viscosidad en los diseños posteriores mediante la reducción de pasta y se sabe que habrá un incremento significativo de viscosidad por el uso de acelerantes. Por un lado, el aditivo X-SEED 100 se dosifica entre 2 a 4 litros por cada 100 kg de cemento, entonces es necesario la corrección del agua en los diseños posteriores para evitar la segregación. En consecuencia, la relación agua/cemento va a variar; por ello, también se reduce el contenido de cemento (menos pasta) para mantener dicha relación $a/c = 0.4$ y poder comparar las resistencias a compresión a 28 días. Por otro lado, aumentar la incidencia arena/agregado incrementa ligeramente la viscosidad plástica pero afecta negativamente al módulo de elasticidad a edades tempranas (Khayat 2009). La tabla 5.1 detalla los requerimientos técnicos de la presente investigación:

Tabla 5.1 Parámetros de Control

Descripción de ensayo	Min	Max	Unidades	Fuente
Extensibilidad (0 min.)	650	800	mm	EFNARC
Extensibilidad (60 min.)	550	700	mm	PREFABRICADO
VSI	1	0		ACI, EFNARC
T 50	2	5	s	EFNARC
L - Box (0 min.) h2/h1	80	100	%	EFNARC
L - Box (60 min.) h2/h1	50	100	%	NCHRP 628
J ring extensibilidad (0 min)	600	750	mm	NCHRP 628
J ring extensibilidad (60 min)	500	650	mm	NCHRP 628
J ring Dif. alturas h1 – h2	0	10	mm	EFNARC
Viscosidad	10	100	Pa.s	ICAR RHEOMETER
Esfuerzo de Corte	0	100	Pa	ICAR RHEOMETER
Resistencia de desencofrado	100	200	kg/cm ²	PREFABRICADO
Resistencia de preesforzado	245		kg/cm ²	PCI 2004

- El tiempo que se coloca como 0 min es el momento en que ya se realizó la mezcla, esto es aproximadamente 10 min después del contacto agua con cemento. El tiempo de 60 min, es el tiempo de trabajabilidad promedio requerido por los productores de concreto prefabricado.

5.1 PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO

Tabla 5.2 Resultados mezcla patrón M1

DISEÑO DE MEZCLA	Cemento (kg)	A/C	Arena/Piedra	Master Glenium 3810	X-Seed 100
M1	550	0.4	0.5	16	0
DESCRIPCIÓN DE ENSAYO	MINIMO	MÁXIMO	DATOS	UNIDADES	VERIFICACIÓN
Extensibilidad (0 min)	650	800	740	mm	Cumple
Extensibilidad (60 min)	550	700	650	mm	Cumple
T50 (0 min)	2	5	1.8	s	No Cumple
T50 (60 min)	-	-	4.3	s	
VSI (0 min)	1	0	0.5	-	Cumple
L-Box (0 min)	80	100	88	%	Cumple
L-Box (60 min)	50	100	55	%	Cumple
J-Ring diámetro (0min)	600	750	720	mm	Cumple
J-Ring diámetro (60min)	500	650	623	mm	Cumple
J-Ring h1-h2 (0min)	0	10	10	mm	Cumple
J-Ring h1-h2 (60min)	-	-	28	mm	
Viscosidad (0 min)	10	100	13.2	Pa.s	Cumple
Viscosidad (60 min)	-	-	36.8	Pa.s	
Esfuerzo de corte (0 min)	0	100	31.3	Pa	Cumple
Esfuerzo de corte (60 min)	-	-	104.8	Pa	
				% DE CUMPLIMIENTO	90.91%

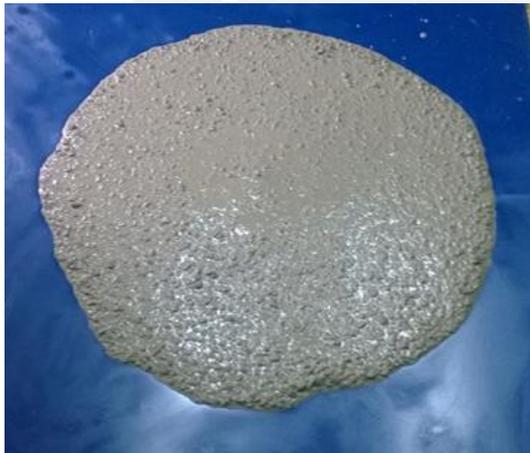


Ilustración 5.1 Slump flow M-1 TIEMPO 0 min

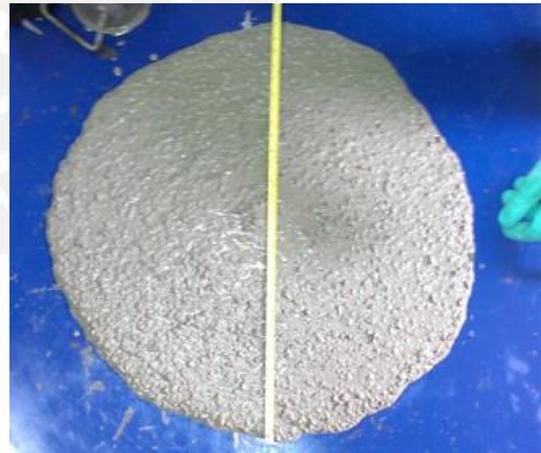


Ilustración 5.2 Slump flow M-1 TIEMPO 60 min

La tabla 5.2 indica las proporciones de los materiales y los resultados obtenidos. El diseño patrón cumple con todos los requerimientos de la tabla 5.1 a excepción de la viscosidad (T50); sin embargo, la estabilidad es aceptable (ver ilustración 5.1).

Tabla 5.3 Resultados mezcla patrón M2

DISEÑO DE MEZCLA	Cemento (kg)	A/C	Arena/Piedra	Master Glenium 3810	X-Seed 100
M2	525	0.4	0.5	16	20
DESCRIPCIÓN DE ENSAYO	MINIMO	MÁXIMO	DATOS	UNIDADES	VERIFICACIÓN
Extensibilidad (0 min)	650	800	775	mm	Cumple
Extensibilidad (60 min)	550	700	590	mm	Cumple
T50 (0 min)	2	5	2	s	Cumple
T50 (60 min)	-	-	5	s	
VSI (0 min)	1	0	1	-	Cumple
L-Box (0 min)	80	100	74	%	No Cumple
L-Box (60 min)	50	100	20	%	No Cumple
J-Ring diámetro (0min)	600	750	643	mm	Cumple
J-Ring diámetro (60min)	500	650	535	mm	Cumple
J-Ring h1-h2 (0min)	0	10	23	mm	No Cumple
J-Ring h1-h2 (60min)	-	-	43	mm	
Viscosidad (0 min)	10	100	21.4	Pa.s	Cumple
Viscosidad (60 min)	-	-	36.4	Pa.s	
Esfuerzo de corte (0 min)	0	100	69.5	Pa	Cumple
Esfuerzo de corte (60 min)	-	-	180.1	Pa	
				% DE CUMPLIMIENTO	72.73%



Ilustración 5.3 Slump flow M-2 TIEMPO 0 min



Ilustración 5.4 Slump flow M-2 TIEMPO 60 min

El diseño M2 corresponde a la primera adición del aditivo acelerante (20 cc/kg cemento). Se corrige la cantidad de agua para evitar la segregación y se reduce la cantidad de cemento para mantener la relación a/c=0.4.

Tabla 5.4 Resultados mezcla patrón M3

DISEÑO DE MEZCLA	Cemento (kg)	A/C	Arena/Piedra	Master Glenium 3810	X-Seed 100
M3	512.5	0.4	0.5	16	30
DESCRIPCIÓN DE ENSAYO	MINIMO	MÁXIMO	DATOS	UNIDADES	VERIFICACIÓN
Extensibilidad (0 min)	650	800	733	mm	Cumple
Extensibilidad (60 min)	550	700	563	mm	Cumple
T50 (0 min)	2	5	2.3	s	Cumple
T50 (60 min)	-	-	7.5	s	
VSI (0 min)	1	0	1	-	Cumple
L-Box (0 min)	80	100	96	%	Cumple
L-Box (60 min)	50	100		%	No Cumple
J-Ring diámetro (0min)	600	750	675	mm	Cumple
J-Ring diámetro (60min)	500	650	495	mm	No Cumple
J-Ring h1-h2 (0min)	0	10	20	mm	No Cumple
J-Ring h1-h2 (60min)	-	-	40	mm	
Viscosidad (0 min)	10	100	7.8	Pa.s	No Cumple
Viscosidad (60 min)	-	-	32.6	Pa.s	
Esfuerzo de corte (0 min)	0	100	109.9	Pa	No Cumple
Esfuerzo de corte (60 min)	-	-	104.4	Pa	
% DE CUMPLIMIENTO					54.55%



Ilustración 5.5 Slump flow M-3 TIEMPO 0 min



Ilustración 5.6 Slump flow M-3 TIEMPO 60 min

El diseño M3 corresponde a la segunda adición del aditivo acelerante (30 cc/kg cemento). Se corrige la cantidad de agua para evitar la segregación y se reduce la cantidad de cemento para mantener la relación a/c=0.4.

Tabla 5.5 Resultados mezcla patrón M4

DISEÑO DE MEZCLA	Cemento (kg)	A/C	Arena/ Piedra	Master Glenium 3810	X-Seed 100
M4	500	0.4	0.5	16	40
DESCRIPCIÓN DE ENSAYO	MINIMO	MÁXIMO	DATOS	UNIDADES	VERIFICACIÓN
Extensibilidad (0 min)	650	800	750	mm	Cumple
Extensibilidad (60 min)	550	700	513	mm	No Cumple
T50 (0 min)	2	5	1.8	s	No Cumple
T50 (60 min)	-	-	8.1	s	
VSI (0 min)	1	0	1.5	-	No Cumple
L-Box (0 min)	80	100	89	%	Cumple
L-Box (60 min)	50	100		%	No Cumple
J-Ring diámetro (0min)	600	750	675	mm	Cumple
J-Ring diámetro (60min)	500	650	415	mm	No Cumple
J-Ring h1-h2 (0min)	0	10	25	mm	No Cumple
J-Ring h1-h2 (60min)	-	-	55	mm	
Viscosidad (0 min)	10	100	16.9	Pa.s	Cumple
Viscosidad (60 min)	-	-	21.5	Pa.s	
Esfuerzo de corte (0 min)	0	100	54.5	Pa	Cumple
Esfuerzo de corte (60 min)	-	-	202.8	Pa	
% DE CUMPLIMIENTO					45.45%



Tabla 5.7 Slump flow M-4 TIEMPO 0 min



Tabla 5.8 Slump flow M-4 TIEMPO 60 min

El diseño M4 corresponde a la tercera adición de aditivo acelerante (40 cc/kg cemento). Se corrige la cantidad de agua para evitar la segregación y se reduce la cantidad de cemento para mantener la relación a/c=0.4.

Tabla 5.6 Resultados mezcla patrón M5

DISEÑO DE MEZCLA	Cemento (kg)	A/C	Arena/Piedra	Master Glenium ACE 407	X-Seed 100
M5	550	0.4	0.5	16	0
DESCRIPCIÓN DE ENSAYO	MINIMO	MÁXIMO	DATOS	UNIDADES	VERIFICACIÓN
Extensibilidad (0 min)	650	800	738	mm	Cumple
Extensibilidad (60 min)	550	700	638	mm	Cumple
T50 (0 min)	2	5	1.9	s	No Cumple
T50 (60 min)	-	-	5.3	s	
VSI (0 min)	1	0	1	-	Cumple
L-Box (0 min)	80	100	78	%	No Cumple
L-Box (60 min)	50	100	54	%	Cumple
J-Ring diámetro (0min)	600	750	713	mm	Cumple
J-Ring diámetro (60min)	500	650	615	mm	Cumple
J-Ring h1-h2 (0min)	0	10	20	mm	No Cumple
J-Ring h1-h2 (60min)	-	-	30	mm	
Viscosidad (0 min)	10	100	16.8	Pa.s	Cumple
Viscosidad (60 min)	-	-	30.5	Pa.s	
Esfuerzo de corte (0 min)	0	100	33.4	Pa	Cumple
Esfuerzo de corte (60 min)	-	-	53.2	Pa	
				% DE CUMPLIMIENTO	72.73%

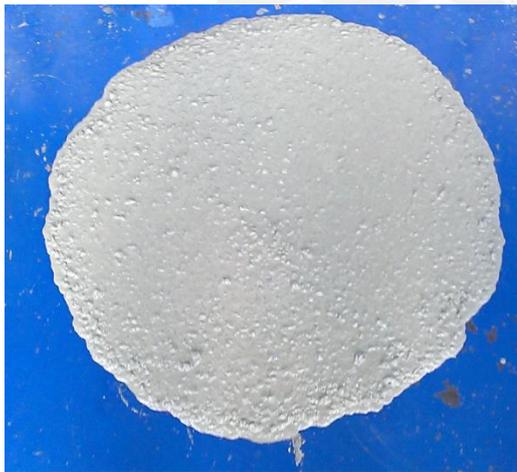


Ilustración 5.9 Slump flow M-5 TIEMPO 0 min



Ilustración 5.10 Slump flow M-5 TIEMPO 60 min

El diseño M5 corresponde al diseño patrón pero se utiliza el aditivo multifuncional Master Glenium ACE 407.

DISEÑO “M6”

Condiciones utilizadas:

- Pre calentamiento: Desde la 4ta a la 7ma hora (ratio 19°C por hora)
- Calentamiento: Desde la 7ma hora a la 9na hora (60°C)
- Enfriamiento (ratio 20.6°C por hora)

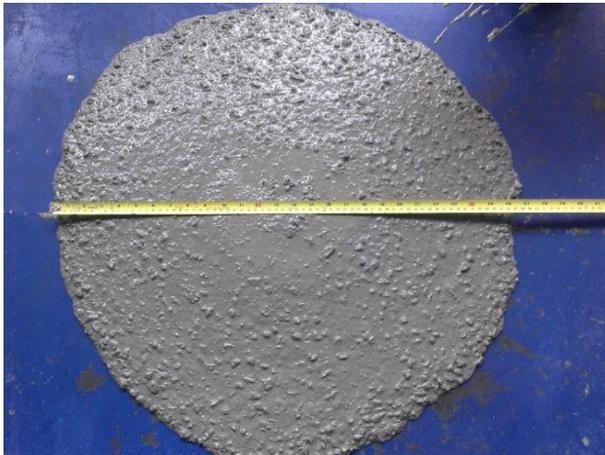


Ilustración 5.11 Slump flow=720 mm M6 TIEMPO 0 min



Ilustración 5.12 Curado a vapor EQUIPO CHAR I M 6

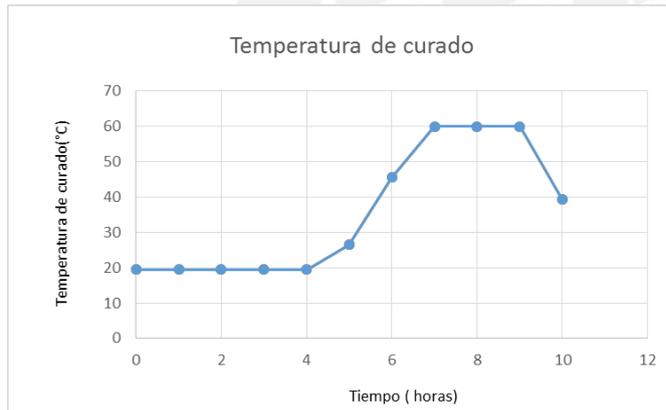


Ilustración 5.13 Gráfica Tiempo vs Temperatura de curado a vapor

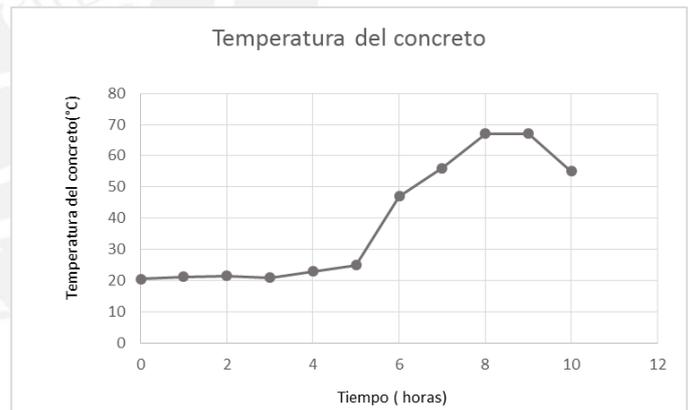


Ilustración 5.14 Gráfica Tiempo vs Temperatura del concreto

5.2 PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO

Resistencia a compresión

Tabla 5.7 Resistencia a compresión (kg/cm²)

EDAD	M1	M2	M3	M4	M5	M6
6 horas	4.6	26.8	36.8	45.5	8.3	21
8 horas	16.1	94.3	133.9	110.9	42.7	170
10 horas	36	139	177	129	94	293
24 horas	310	290	309	271	351	380
3 días	475	436	443	414	493	423
7 días	549	513	526	496	565	510
28 días	630	562	566	537	648	574

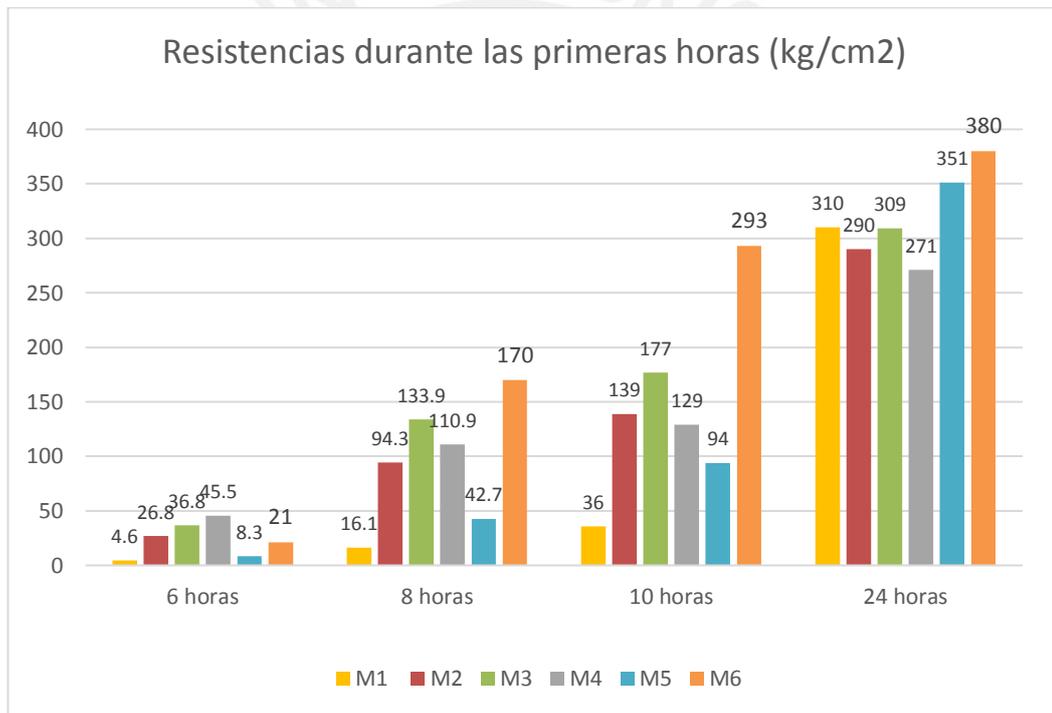


Ilustración 5.14 Grafico tiempo vs resistencia a edades tempranas

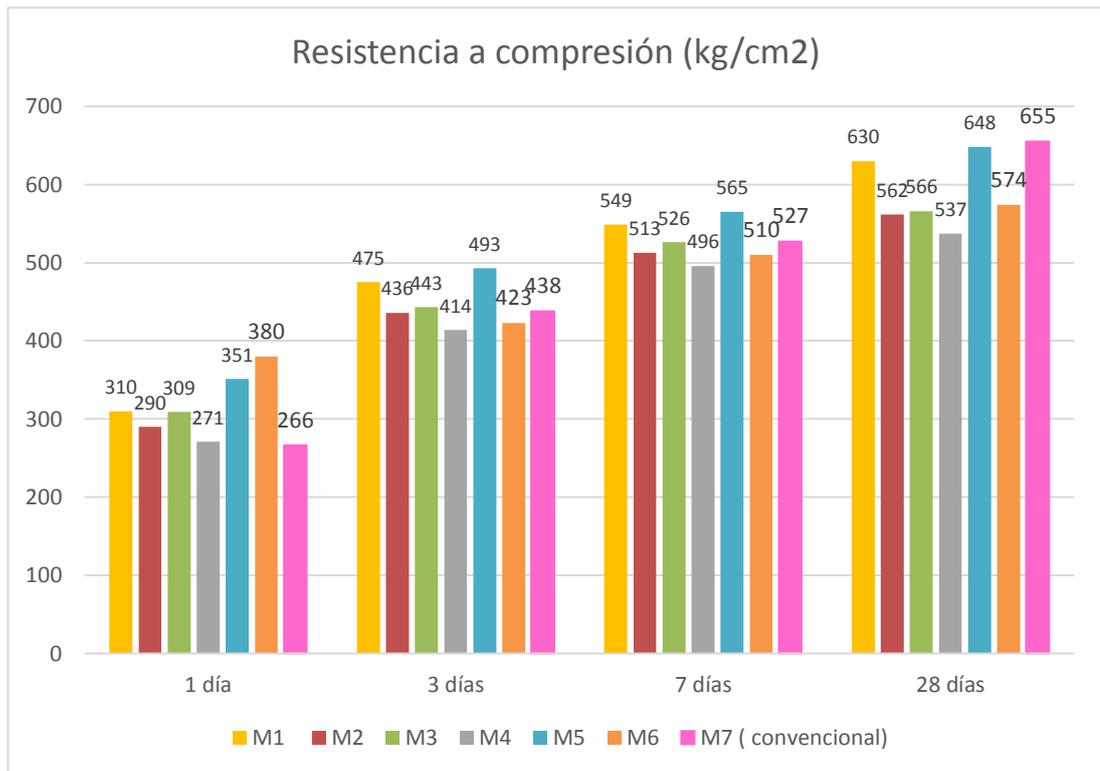


Ilustración 5.15 Grafico tiempo vs resistencia a edades tardías

Calorimetría

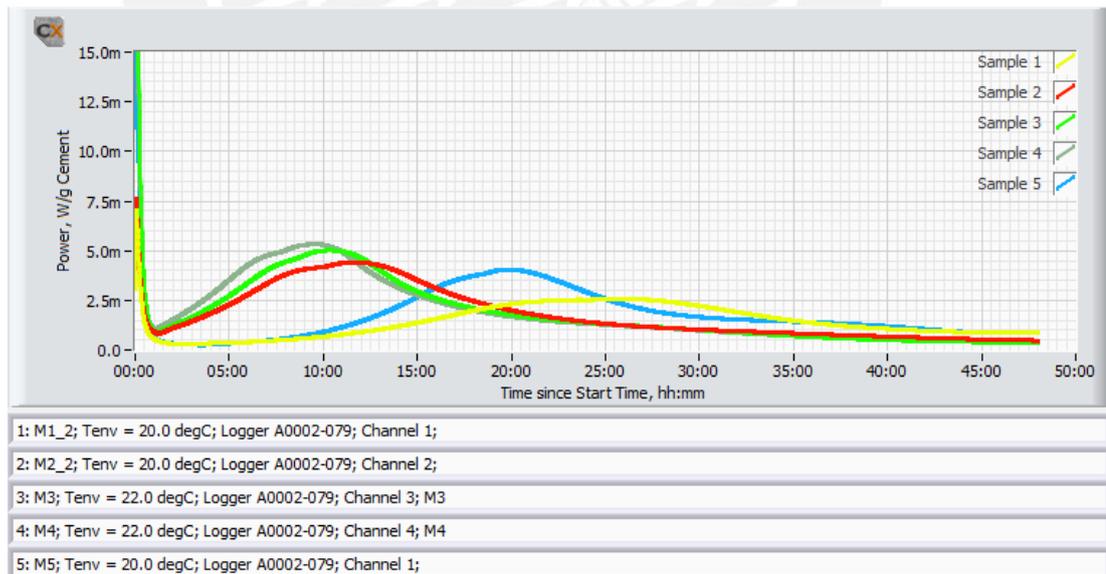


Ilustración 5.16 Calorimetría

CAPÍTULO 6: ANÁLISIS DE RESULTADOS

El presente capítulo complementa lo estudiado en los capítulos anteriores ya que provee sustento teórico a los resultados obtenidos. Son diversas las fuentes sobre la que se apoya este análisis, lo cual demuestra la falta de investigación del concreto autocompactado y cómo se deben establecer los requerimientos, pues cumplir con todos no significa el correcto desempeño para un proyecto en específico.

Tabla 6.1 Resumen de resultados

Diseño	Extensibilidad (mm)				VSI	J - Ring (mm)				L - Box (%)		Reología			
	T=0min	T50(s)	T = 60 min	T50(s)	T=0min	T=0min	H1/H2	T=60min	H1/H2	T = 0 min	T = 60 min	Visc. 1	Visc. 2	Esf. Corte 1	Esf. Corte 2
M 1	740	1.75	650	4.3	0.5	720	10	623	27.5	88	55	13	37	31	105
M 2	775	2	590	5	1	643	22.5	535	42.5	74	20	21	36	70	180
M 3	733	2.25	563	7.5	1	675	20	495	40	43	0	8	33	110	104
M 4	750	1.8	513	8.06	1.5	675	25	415	55	89	0	17	22	55	203
M 5	738	1.9	638	5.28	1	713	20	615	30	78	54	17	31	33	53

Tabla 6.2 Resumen del diseño de mezclas

Diseño	Cemento (kg)	A/C	AF/AG	M.Glenium 3810	M. XSEED-100	M.Glenium ACE407
M 1	550	0.4	0.5	16cc	-	-
M 2	525	0.4	0.5	16cc	20cc	-
M 3	513	0.4	0.5	16cc	30cc	-
M 4	500	0.4	0.5	16cc	40cc	-
M 5	550	0.4	0.5	-	-	16cc

6.1 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO

1. Extensibilidad vs Tiempo

Parámetro	Tiempo (min)		Antes de agregar X SEED 100
	0	60	
M 1	740	650	740
M 2	775	590	730
M 3	733	563	705
M 4	750	513	600
M 5	738	638	738



Ilustración 6.1 Extensibilidad vs tiempo

- Los cuadros de la gráfica representan los rangos permisibles donde las mezclas deberán encontrarse en el tiempo 0 y 60 min.
- Según Koehler, el incremento de pasta reduce el esfuerzo de corte (Koehler 2007). Esto se puede comprobar con la disminución de fluidez en las mezclas M1 y M4, ya que antes de agregar X SEED 100 sus extensibilidades son directamente proporcionales a su contenido de pasta.
- Es importante corregir al agua de diseño, ya que el aditivo X SEED 100 plastifica a la mezcla hasta en 150 mm (M4 - 40cc) dependiendo de la dosis.
- La pérdida de fluidez es directamente proporcional a la dosis de aditivo acelerante. El peor escenario se dio cuando la dosis fue mayor (M4) ya que pierde aproximadamente 250 mm en una hora, cuando lo especificado es 100 mm/hora.

- Las mezclas M1 y M5 presentan un comportamiento similar a la hora en cuanto a fluidez; sin embargo, veremos más adelante que tienen un comportamiento diferente.
- Los márgenes en establecidos se cumplen en la mayoría de diseños. Se puede afirmar que los diseños tienen buena capacidad de relleno durante una hora.

2. T 50 vs tiempo

	Tiempo (min)		Antes de agregar X SEED 100
	0	60	
M 1	1.75	4.30	1.75
M 2	2.00	5.00	2.50
M 3	2.25	7.50	2.80
M 4	1.80	8.06	5.28
M 5	1.90	5.28	1.90

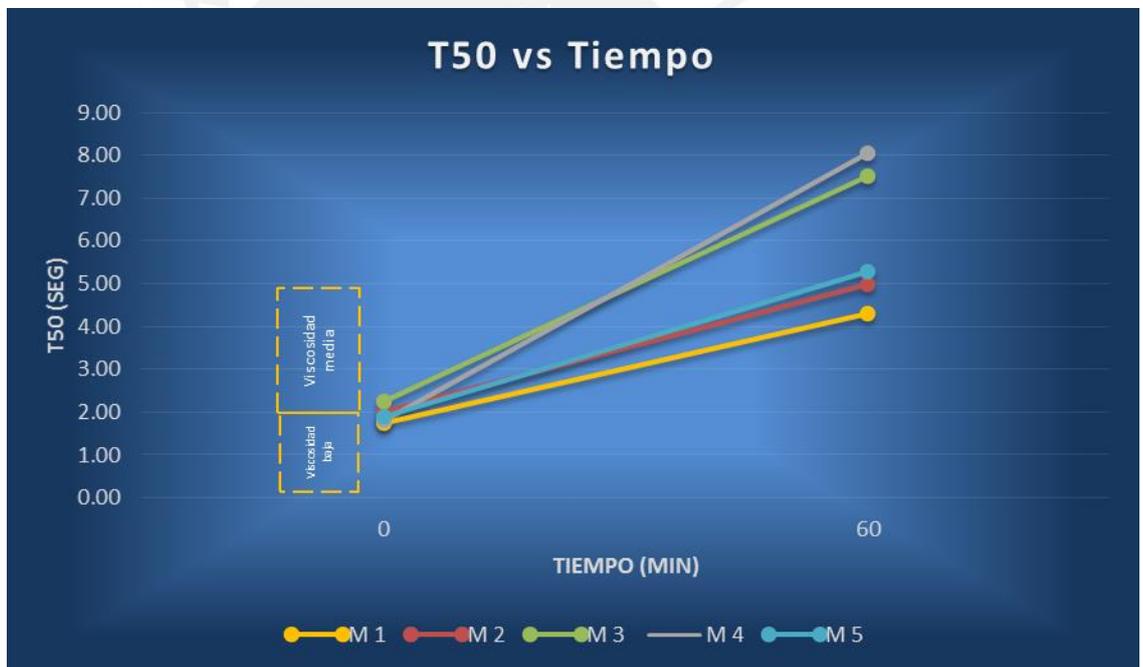


Ilustración 6.2 T50 vs tiempo

- Según Koehler, el incremento de pasta reduce la viscosidad plástica (Koehler 2007). Esto se puede comprobar en las mezclas M1 - M4, antes de agregar X-SEED 100, pues sus viscosidades (T 50) son inversamente proporcionales a su contenido de pasta.
- De la misma manera que en el caso anterior, cuando se añade X SEED también se reduce la viscosidad; por lo que es importante corregir el contenido de agua.

- Según el gráfico, los diseños pueden clasificarse como concretos autocompactados de baja viscosidad ($T_{50} < 2$ segundos). La tixotropía está directamente relacionada con la dosis de acelerante.

3. J-ring (extensibilidad) vs tiempo

	Tiempo (min)		Diferencia (mm)	
	0	60		
M 1	720	623	20	28
M 2	718	535	57	55
M 3	675	495	58	68
M 4	675	415	75	98
M 5	713	615	25	23

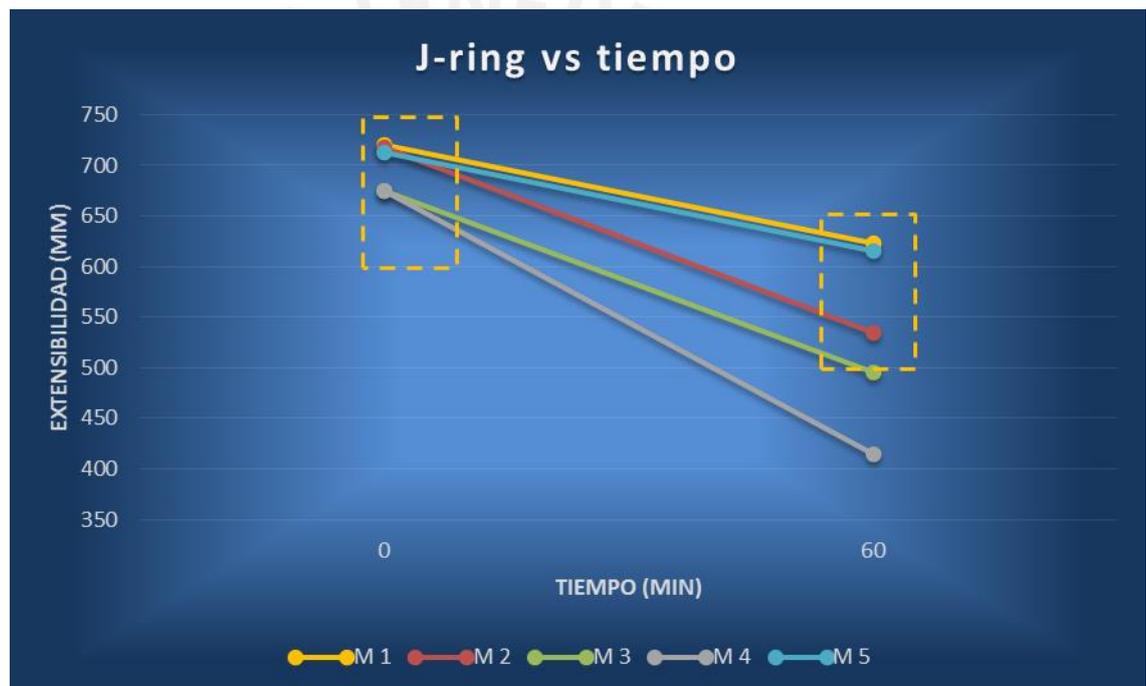


Ilustración 6.3 J-ring (extensibilidad) vs tiempo

- J. Daczko recomienda una diferencia de extensibilidades (J ring – Slump flow) entre 40 a 80 mm; por lo tanto, se puede afirmar que todos los diseños presentan buena habilidad de paso en todo el tiempo requerido a excepción de la mezcla M4 a la hora (96 mm).

4. J-ring (alturas) vs Tiempo

	Tiempo (min)	
	0	60
M 1	10	28
M 2	23	43
M 3	20	40
M 4	25	55
M 5	20	30



Ilustración 6.4 J-ring (alturas) vs tiempo

- Según la EFNARC del 2002, la diferencia de alturas entre la parte media y externa del anillo debe ser menor a 10 mm, valor que garantiza que no hay bloqueo de agregados. Sin embargo, dicho valor solo se cumple en la mezcla patrón M1. Entonces resulta conservador limitar la diferencia de extensibilidades (Slump flow – J ring) en 50mm para cumplir con ambas condiciones.

5. L – box vs Tiempo

	Tiempo (min)	
	0	60
M 1	88	55
M 2	74	20
M 3	96	0
M 4	89	0
M 5	78	54



Ilustración 6.5 L-box vs tiempo

- Los diseños que cumplen con los requerimientos son M1, M3 y M4, pero M2 y M5 están muy cerca al valor recomendado de 0.80. Sin embargo, a la hora solo los diseños M1 y M5 cumplen con el valor especificado por el NCHRP Reporte 628.
- El incremento de la viscosidad de los diseños que contienen X – SEED 100 les permite alcanzar valores de habilidad de paso mayor al diseño patrón, ya que tienen menor tendencia al bloqueo de los agregados. Se puede afirmar que la fluidez y la viscosidad de la mezcla influyen en la capacidad de paso.

6. Extensibilidad vs Estabilidad

	Ensayos	Tiempo (min)
		0
M 1	Extensibilidad	740
	VSI	0.5
M 2	Extensibilidad	775
	VSI	1.0
M 3	Extensibilidad	733
	VSI	1.0
M 4	Extensibilidad	750
	VSI	1.5
M 5	Extensibilidad	738
	VSI	1.0



Ilustración 6.6 Extensibilidad vs VSI

- De la presente gráfica se puede afirmar que mezclas con alta fluidez tienden a ser inestables y sensibles a la segregación. Nuestra experiencia demuestra que la extensibilidad no debe ser superior a 800 mm, tal como se especificó, porque la segregación es inminente. Incluso menor a 750 mm, se puede observar que la mezcla M4 es inestable.

7. T 50 vs Estabilidad

	Ensayos	Tiempo (min)
		0
M 1	T50	1.75
	VSI	0.5
M 2	T50	2.00
	VSI	1.0
M 3	T50	2.25
	VSI	1.0
M 4	T50	1.80
	VSI	1.5
M 5	T50	1.90
	VSI	1.0

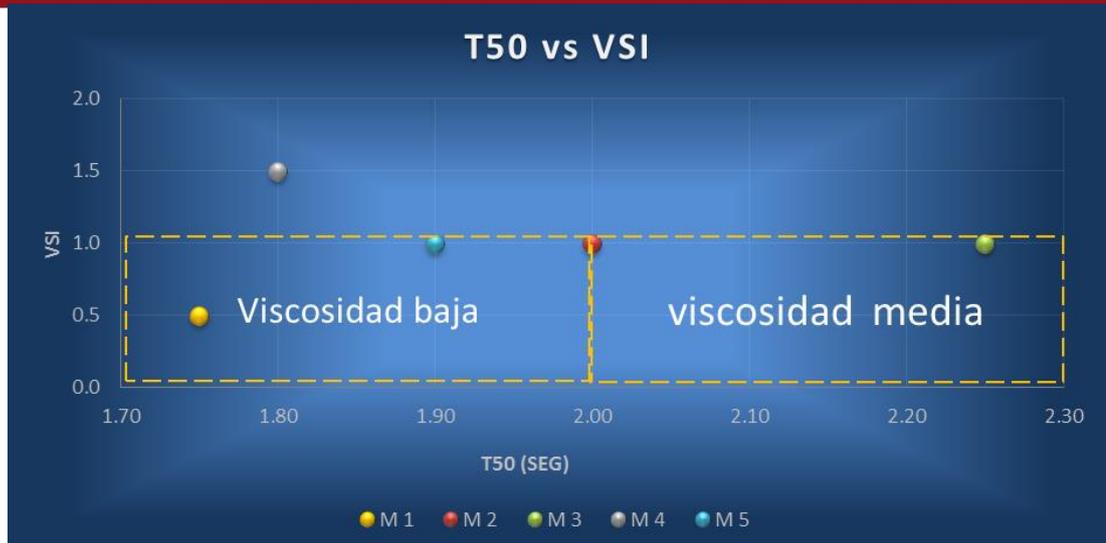


Ilustración 6.7 T50 vs VSI

- Se pueden desarrollar concreto autocompactados de alta fluidez con baja viscosidad, valor mínimo para resistir a la segregación; sin embargo, tienen menor robustez como es el caso del diseño M4 que es ligeramente inestable.

8. Extensibilidad vs L-box

	Ensayos	Tiempo (min)	
		10	70
M 1	Extensibilidad	740	650
	L-box	88	55
M 2	Extensibilidad	775	590
	L-box	74	20
M 3	Extensibilidad	733	563
	L-box	96	0
M 4	Extensibilidad	750	513
	L-box	89	0
M 5	Extensibilidad	738	638
	L-box	78	54

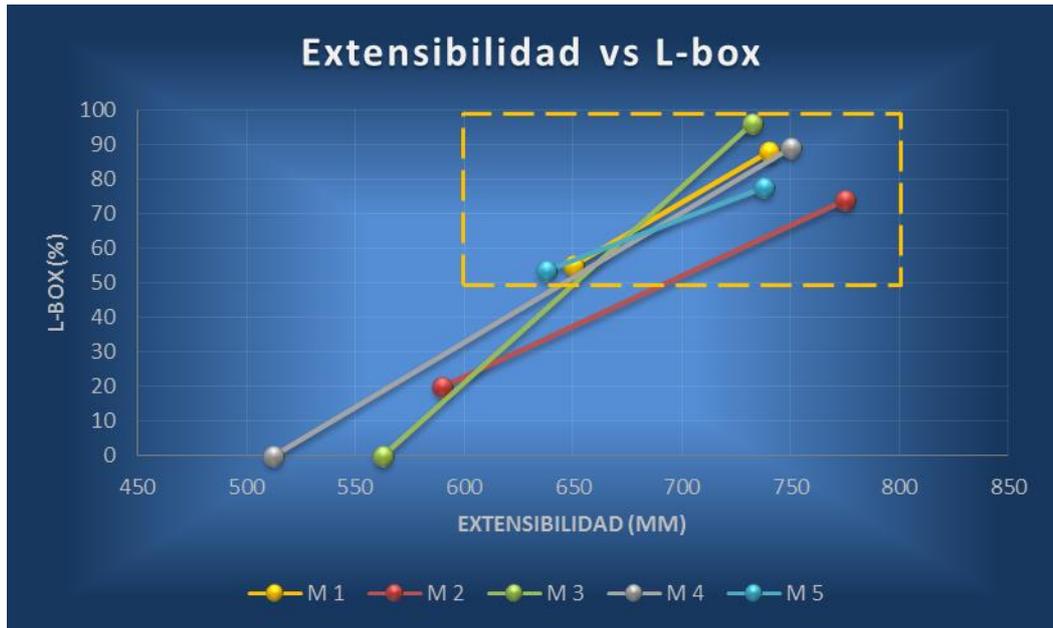


Ilustración 6.8 Extensibilidad vs L-box

- El reporte 628 del NCHRP recomienda un valor mínimo de 0.50 para el ensayo L-box. Se puede afirmar que ambos ensayos están directamente relacionados porque mezclas con alta fluidez exhiben alta capacidad de paso. Entonces, mezclas con extensibilidades menores a 600 mm difícilmente tendrán una buena capacidad de paso sin vibrado alguno.

9. T50 vs L-box

	Ensayos	Tiempo (min)	
		10	70
M1	T50	1.75	4.30
	L-box	88	55
M2	T50	2.00	5.00
	L-box	74	20
M3	T50	2.25	7.50
	L-box	96	0
M4	T50	1.80	8.06
	L-box	89	0
M5	T50	2	5
	L-box	78	54



Ilustración 6.9 T50 vs L-box

- El diseño M3 es el que tiene mayor viscosidad en el tiempo inicial, característica que influye en la capacidad de paso ($h_2/h_1 = 0.96$) pues evita el bloqueo de los agregados. Esto es deducible debido a que todas las mezclas presentan extensibilidades parecidas.
- M2, M3 y M4 presentan una capacidad de paso muy baja a la hora; pues en dicho instante son concretos de baja fluidez (extensibilidad menores a 600 mm) con viscosidades altas ($T_{50} > 5$ segundos). Cuando lo ideal es que los concretos de baja fluidez tengan baja viscosidad para proveer una capacidad de paso adecuada.

10. Viscosidad vs Esfuerzo de corte

	Ensayos	Tiempo (min)	
		0	60
M 1	Viscosidad	13.20	36.80
	Esfuerzo de corte	31	105
M 2	Viscosidad	21.40	36.40
	Esfuerzo de corte	70	180
M 3	Viscosidad	7.80	32.60
	Esfuerzo de corte	110	104
M 4	Viscosidad	16.90	21.50
	Esfuerzo de corte	55	203
M 5	Viscosidad	17	31
	Esfuerzo de corte	33	53

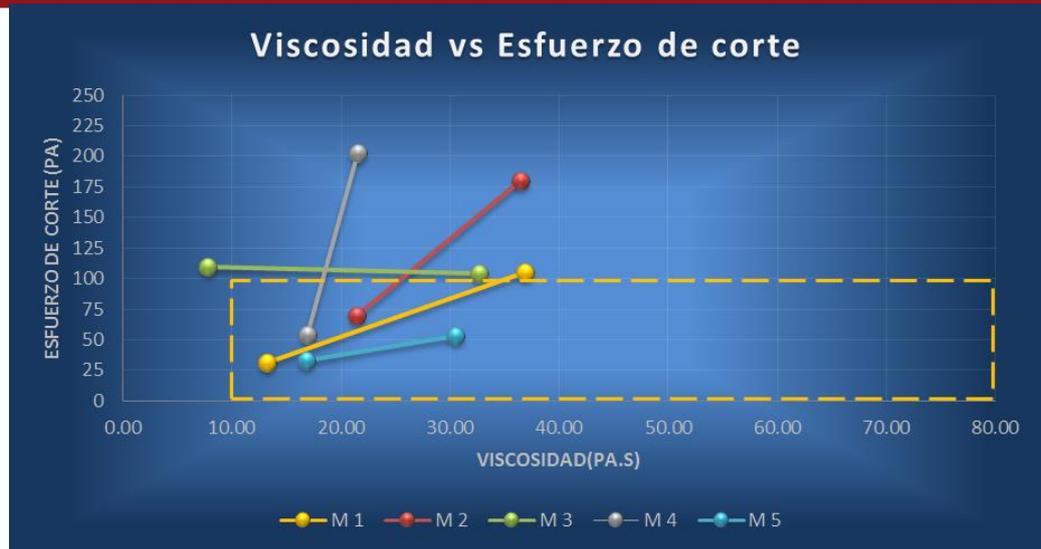


Ilustración 6.10 Viscosidad vs Esfuerzo de corte

- Se sabe que el CAC debe tener un esfuerzo de corte bajo para que tenga alta fluidez y una viscosidad moderada para resistir a la segregación. En todas las mezclas, el esfuerzo de corte es bajo (0 – 100 Pa) a excepción de la mezcla M3 donde posiblemente hubo un error en la lectura del reómetro pues su fluidez es alta. La viscosidad es baja, encontrándose en el rango inferior (20 – 80 Pa.s), pero estar por encima de 10 Pa.s conservador pero inminente a segregar.
- La tendencia es que mezclas con bajo esfuerzo de corte tengan baja viscosidad; esto es principalmente por el contenido de pasta como se explicó anteriormente. Por ello, es importante prever los efectos en la reología por cambios en las proporciones y propiedades de los materiales.

11. Extensibilidad vs Esfuerzo de corte

	Ensayos	Tiempo (min)	
		10	70
M 1	Extensibilidad	740	650
	Esfuerzo de corte	31	105
M 2	Extensibilidad	775	590
	Esfuerzo de corte	70	180
M 3	Extensibilidad	733	563
	Esfuerzo de corte	110	104
M 4	Extensibilidad	750	513
	Esfuerzo de corte	55	203
M 5	Extensibilidad	738	638
	Esfuerzo de corte	33	53

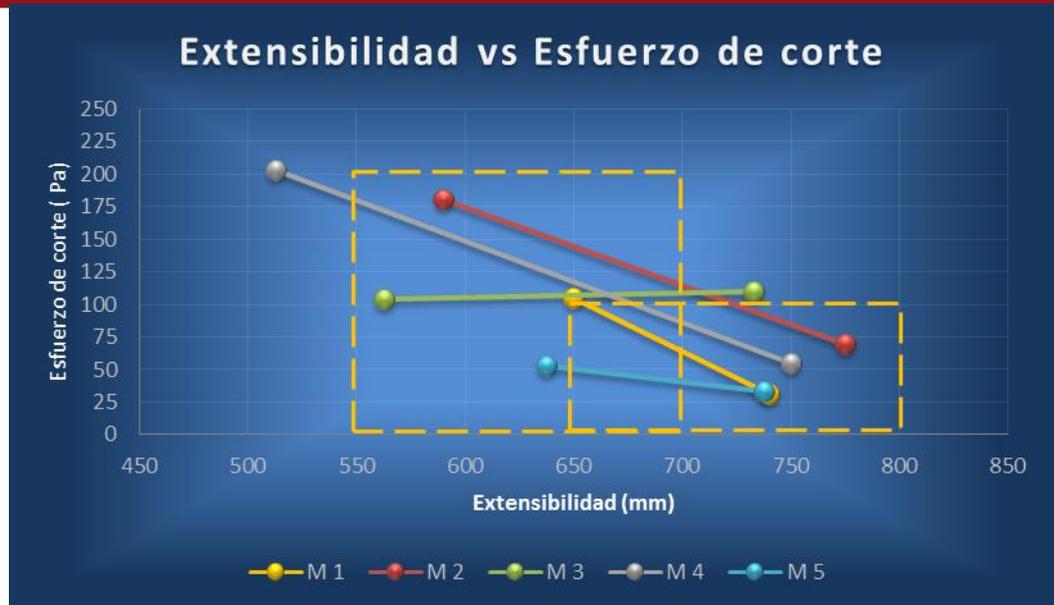


Ilustración 6.11 Extensibilidad vs Esfuerzo de corte

- La extensibilidad requerida se encuentra en el rango de 650 – 800 mm; y el esfuerzo de corte, en el rango de 0 – 100 Pa. Se puede observar que concretos con alta fluidez (> 700 mm) requieren de un esfuerzo de corte muy bajo (< 100 Pa); ambos valores son inversamente proporcionales.
- Conforme pasa el tiempo, se pierde fluidez e incrementa el esfuerzo de corte. Se tiene como requerimiento una extensibilidad a la hora entre 550 – 700 mm, rango que puede cumplirse con esfuerzos de corte menores a 200 Pa.

12. T50 vs Viscosidad

	Ensayos	Tiempo (min)	
		10	70
M 1	T50	1.75	4.30
	Viscosidad	13	37
M 2	T50	2.00	5.00
	Viscosidad	21	36
M 3	T50	2.25	7.50
	Viscosidad	8	33
M 4	T50	1.80	8.06
	Viscosidad	17	22
M 5	T50	2	5
	Viscosidad	17	31

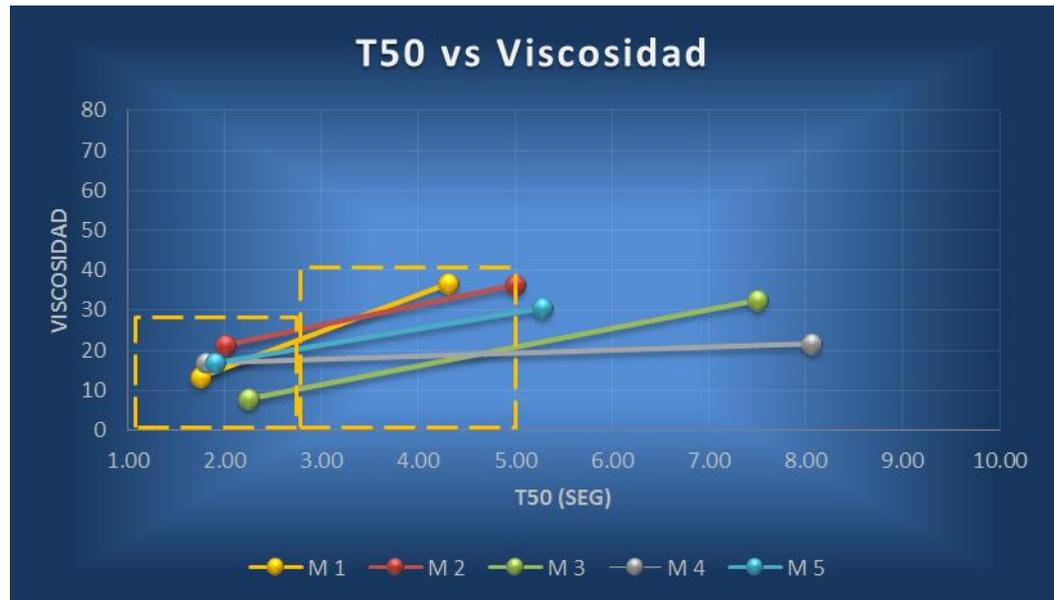


Ilustración 6.12 T50 vs Viscosidad

- Todos los diseños tienen viscosidades entre media a baja pues sus valores de T50 oscilan en 2 segundos. Asimismo, los parámetros de viscosidad plástica deben encontrarse entre 10 a 80 Pa.s baja ser caracterizados también en rango medio. En ambos casos, los diseños se encuentran en el límite cercano a una viscosidad baja; por lo que, se puede afirmar que mezclas con T50 menor a 2 segundos, describen viscosidades menores a 25 Pa.s.
- Dentro de 1 hora, M1, M2 y M5 describen viscosidades entre media a alta pues sus valores de T50 oscilan en 5 segundos; dichos valores medidos por el reómetro son superiores a 25 Pa.s. Teóricamente, valores por encima de 100 Pa.s caracterizan a una mezcla de alta viscosidad. Esto puede deberse al fenómeno de tixotropía.

6.2 ANÁLISIS DE LAS PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO

- Resistencia a edades tempranas

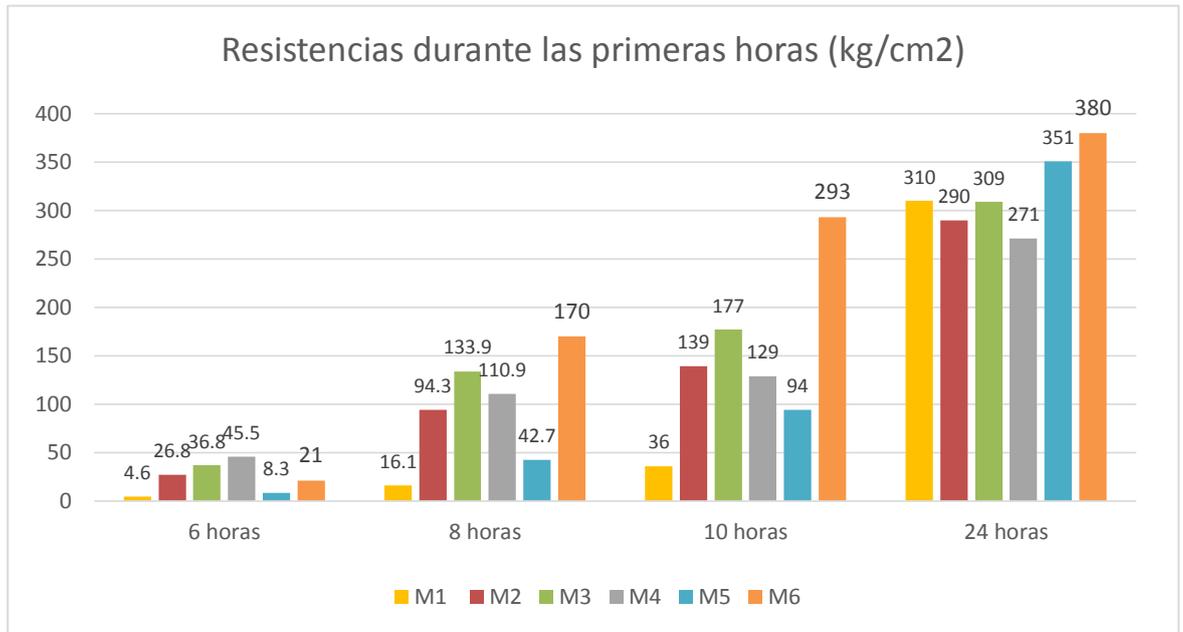


Ilustración 6.13 Resistencias a edades tempranas



Ilustración 6.14 Resistencia a edades tempranas

La presente gráfica describe la resistencia a compresión de los diseños definitivos, a continuación se realiza el análisis de cada uno:

- M1 alcanza una resistencia de 36 kg/cm^2 a las 10 horas (5.7% de la resistencia a 28 días)
 - M2 alcanza una resistencia de 139 kg/cm^2 a las 10 horas (24.7% de la resistencia a 28 días). Supera al diseño patrón en 3.86 veces su resistencia, a pesar de tener 25 kg menos de cemento.
 - M3 alcanza una resistencia de 177 kg/cm^2 a las 10 horas (31.27 % de la resistencia a 28 días). Supera al diseño patrón en 4.92 veces su resistencia, a pesar de tener 37.5 kg menos de cemento.
 - M4 alcanza una resistencia de 129 kg/cm^2 a las 10 horas (24.02% de la resistencia a 28 días). Supera al diseño patrón en 3.58 veces su resistencia, a pesar de tener 50 kg menos de cemento. Este diseño corresponde al mayor reemplazo de cemento por aditivo acelerante. Comparando los diseños que contienen X-SEED, se observa que a las 6 horas el diseño M4 supera a las demás en la generación de CSH, pero en las demás edades el aporte de CSH de las demás mezclas por la hidratación del cemento es superior.
 - M5 alcanza una resistencia de 94 kg/cm^2 a las 10 horas (14.51% de la resistencia a 28 días). Supera al diseño patrón en 2.61 veces su resistencia, entonces se comprueba que la tecnología Master Glenium ACE 407 influye más en el desarrollo de resistencias iniciales que los superplastificantes convencionales.
 - M6 alcanza una resistencia de 293 kg/cm^2 a las 10 horas (51% de la resistencia a 28 días). Supera a la mezcla M1 en 8.14 veces su resistencia, ganando alrededor a 75 kg/cm^2 por hora de curado a una temperatura de 60°C .
- El aditivo X-SEED demuestra que desarrolla altas resistencias tempranas en 6 y 12 horas
- El Silicato de Calcio Hidratado se encarga de generar resistencias tempranas; el X-SEED añade directamente gel de CSH acelerando su desarrollo en el concreto.
- La mezcla M4 nos indica que más allá de que tenga mayor dosis, después de las 8 horas el cemento es quien predomina el desarrollo de resistencias.

- El aditivo Master ACE tiene baja importancia en el desarrollo de resistencias en 6 y 12 horas; sin embargo, superado este tiempo su efecto se incrementa haciendo que en 24 horas supere a las demás.

A la edad de 24 horas el diseño patrón M1 ha superado a los diseños que contienen X – SEED, esto debido a la cantidad de cemento utilizada. Realizando una comparación en la producción de CSH a edades tempranas, se podría decir que 1 litro de X-SEED 100 equivale a 4.57 kilogramos de cemento. Lo anterior debido a que M1 y M3 desarrollan resistencias similares a 24 horas. En cuando a su aplicación, los diseños cuya resistencia se encuentre entre 100 y 200 kg/cm² pueden desencofrarse, siendo el menor tiempo en 8 horas; sin embargo, en elementos preesforzados el concreto requiere soportar los esfuerzos para después ser desencofrados. Según el PCI, esta resistencia como mínimo debería ser 3500 psi o 245 kg/cm² (PCI 2004). En la actualidad, el ciclo de producción de los productores de prefabricado es de 18 horas; por lo que el diseño óptimo es M3, y posiblemente M5, quienes alcanza dicha resistencia en dicho tiempo. El mejor escenario en la reducción del ciclo de producción se observa en el diseño M6 (curado a vapor) pues logra alcanzar dicha resistencia entre 9 y 10 horas; y el peor escenario lo demuestra M4 con 22 horas.

▪ **Resistencias a compresión a edades tardías**

El diseño M7 corresponde a un diseño convencional para concretos prefabricados (slump entre 8 – 9 ”) :

Tabla 6.3 Proporciones diseño convencional

Cemento	460 kg
Agua	160 lt
Arena	820.16
Piedra	944.45
Master Glenium ACE 407	8.51 litros

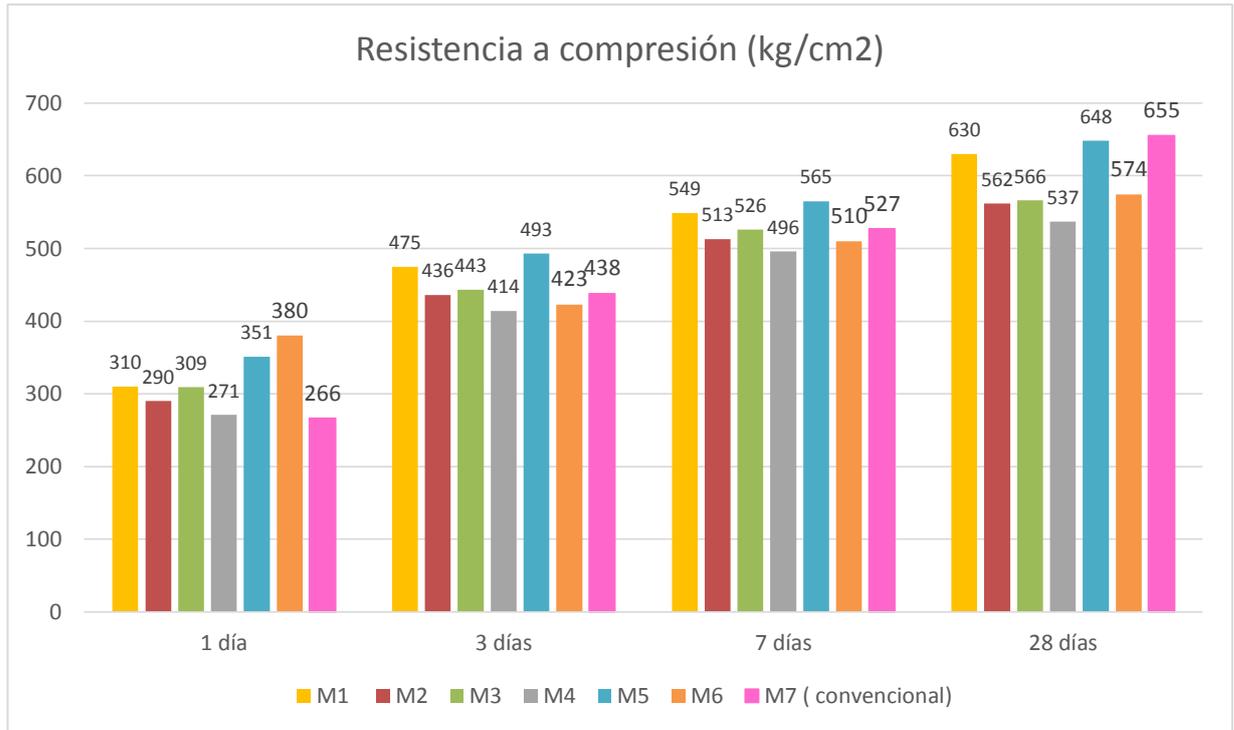


Ilustración 6.15 Resistencia a edades tardías

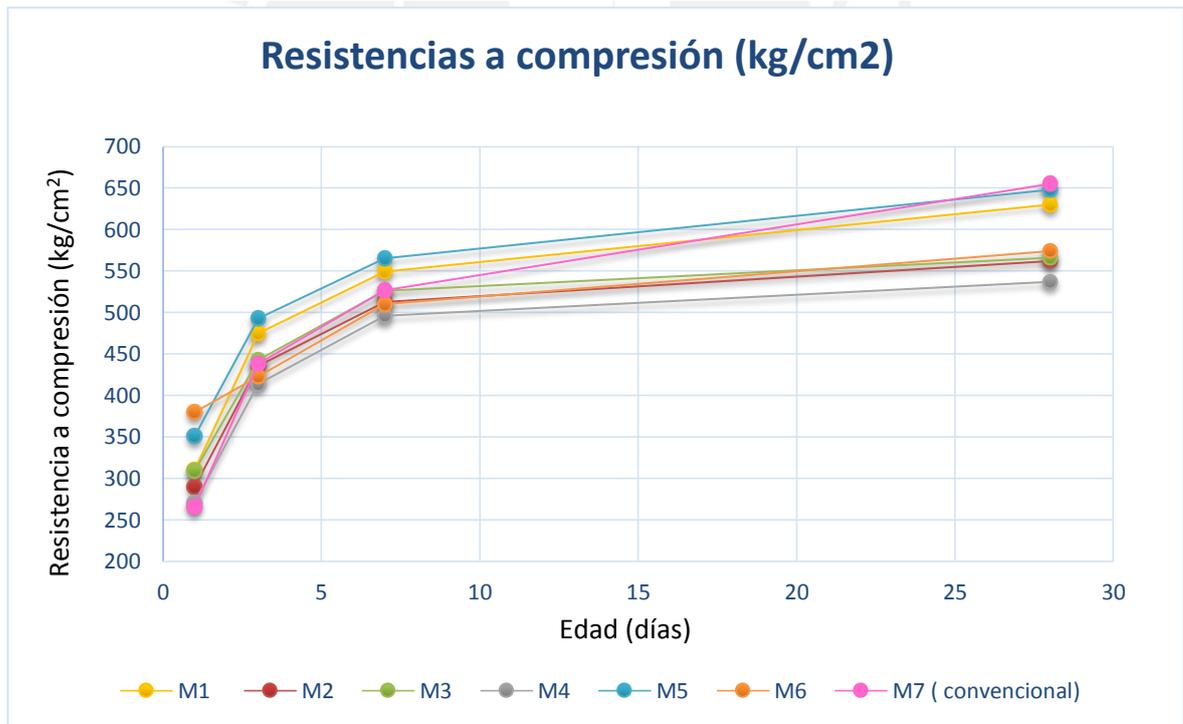


Ilustración 6.16 Resistencia a edades tardías

La siguiente tabla presenta porcentajes de desarrollo de resistencia con respecto a la edad 28 días:

Tabla 6.4 Porcentajes resistencia a compresión

EDAD	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7 (convencional)
1	49.21%	51.60%	54.59%	50.47%	54.17%	66.20%	40.61%
3	75.40%	77.58%	78.27%	77.09%	76.08%	73.69%	66.87%
7	87.14%	91.28%	92.93%	92.36%	87.19%	88.85%	80.46%

- A la edad de 1 día, la mezcla M6 continúa presentando el mayor desarrollo de resistencia (66.22% de su resistencia final 28d). Siendo los diseños patrón y convencional los de peor performance (49.21 y 40.61% respectivamente). Mientras que los diseños con M-2.3.4 y 5 superan al patrón con porcentajes muy parecidos. En cuanto al valor de la resistencia, la mezcla M1, M5 y M6 alcanzan resistencias de 310, 351 y 380 kg/cm² respectivamente, lo que nos dice que el volumen de pasta influye en la resistencia a edades tempranas ya que todos los diseños tienen relación agua/cemento menor que la mezcla M7 (a/c = 0.40).
- A la edad de 3 días, todos los diseños con excepción de la mezcla M7 presentan porcentajes parecidos de desarrollo de resistencia. En cuanto a los valores de resistencia, M1 y M5 han superado a M6 con lo que se puede observar el descenso significativo de ganancia de resistencia de esta. Los demás diseños presentan resistencias similares. Todos los diseños han superado el valor de 5000 psi o 350 kg/cm² especificado por el PCI para el diseño. Incluso la mezcla M5 ha superado dicho valor al día; entonces el elemento ya podría trabajar estructuralmente sin necesidad de apuntalamiento u otros sistemas de apoyo.
- A la edad de 7 días, los diseños que aplican X-SEED 100 han desarrollado gran parte de su resistencia final estando sobre el 90%. De la misma manera, los diseños que contienen la misma cantidad de pasta han desarrollado aproximadamente el 88% de su resistencia final. La mezcla M7 es la que menos porcentaje presenta, cerca del 80%. En cuanto, a sus valores resistencia todos los diseños han superado el valor de 500 kg/cm² especificado por el cliente.
- A la edad de 28 días, M7 presenta el valor más alto de resistencia debido a su relación agua/cemento igual a 0.35. Los demás diseños a pesar de tener la misma relación agua/cemento presentan resistencias muy variadas.

Primero, los diseños que contienen la misma cantidad de pasta son M1, M5 y M7; este último diseño ha perdido cerca del 9% de resistencia ya que la temperatura del concreto alcanzó cerca de los 70°C durante el curado térmico. Mientras que los diseños M1 y M5 presentan resistencias similares al ser curadas a una temperatura similar 23 +/- 2°C. Segundo, los diseños que contienen M2, M3 y M4 en comparación con el diseño patrón presentan menores resistencias a pesar de tener la misma relación agua/ cemento incluso el CSH aportado por el X-SEED. La explicación se debe a la cantidad de pasta extra que aporta resistencia tanto en edades tempranas como en edades posteriores; debido a los sólidos de hidratación generados por todos los compuestos, sobretodo de los silicatos (C_3S , C_2S). Por último, se recomienda utilizar mayores dosis cuando la reducción de cemento sea mayor y descontar el volumen del producto del agua de amasado.

▪ Calorimetría

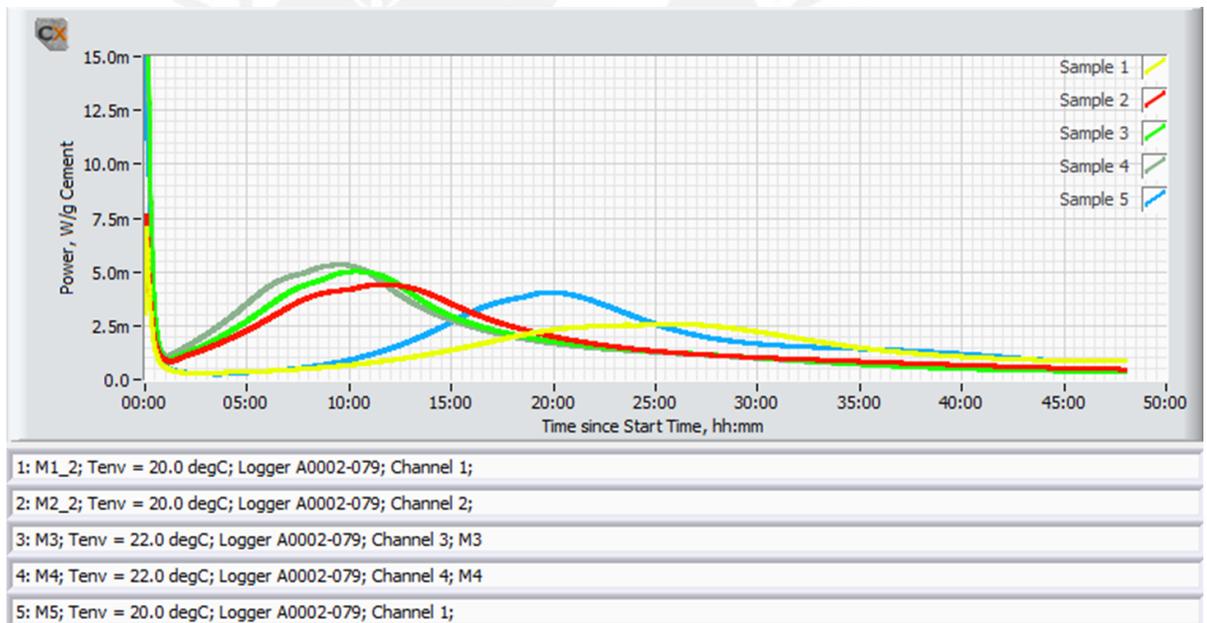


Ilustración 6.17 Calorimetría

En las ilustraciones 6.17 y 6.18 se puede observar el efecto directo que tienen los aditivos acelerantes en la generación de CSH y en el fraguado del cemento; asimismo, la ilustración 5.18 ayuda a diferenciar cada etapa. El aditivo Master X-SEED 100 aporta resistencias iniciales entre 6-10 horas; mientras que el aditivo Master Glenium ACE 407 aporta resistencias altas antes de las 20 horas. Estos tiempos fueron comprobados en la evaluación de las resistencias a compresión.

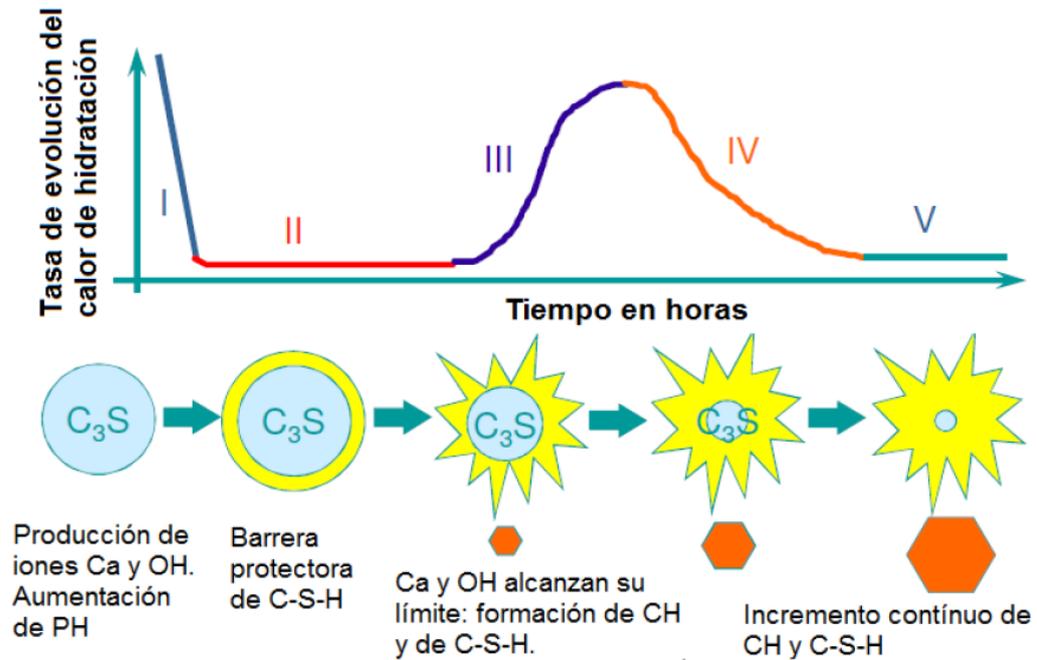


Ilustración 6.18 Hidratación del cemento (BASF)

6.3 ANÁLISIS DE COSTOS

En lo que respecta a la comparación de costos se puede diferenciar en tres categorías:

1. Proporciones del diseño y la materia prima.
2. Costo de producción
3. Mejoras en el producto terminado

La primera categoría que es la diferencia de las cantidades de materiales es referida en particular a la cantidad de cemento. El elevado contenido de cemento en un CAC en comparación de un concreto convencional es el principal aspecto que alerta a los clientes debido al costo elevado que esto implicaría. Según Martin, un productor de concreto prefabricado pagara entre 8-12% más en materia prima para un diseño de CAC, que el costo de un concreto convencional. Los aditivos utilizados también influyen de manera importante los costos, estos pueden aumentar en promedio un 2% del costo de la mezcla (Martin 2002).

Sin embargo, este mayor costo del diseño de un CAC es compensado con la eficiencia en su producción. Es evidente una reducción del tiempo de colocación del concreto que resulta en mayores ganancias, no es necesario el uso de un vibrador, se mantiene el encofrado en mejor estado y se mejora la seguridad del trabajo. El

tiempo de colocación es el tiempo necesario para llevar el concreto de la unidad de transporte hacia el encofrado y consolidarlo. En un estudio donde se hizo el seguimiento de la colocación de CAC en una viga “doble T”, se obtuvo una reducción de tiempo en 20% en comparación con un concreto convencional y una reducción de 32% en trabajo realizado. (Martin 2002). Independientemente del elemento estructural se puede estimar una reducción de trabajo en 30% utilizando un CAC (Schlagbaum 2002). El vibrador que es utilizado debe tener un mantenimiento al igual que todos los equipos mecánicos, esto implica un costo, que en este caso no será realizado. Además, al no utilizar el equipo vibrador el encofrado no es maltratado y este tendrá mayor vida útil y menos gastos por mantenimiento.

Con el uso de CAC evitamos tener muchas imperfecciones por cangrejeras o burbujas en la superficie, por ende se generan menos gastos en material, tiempo y mano de obra. En EE.UU en las estructuras realizadas con CAC se registró un decrecimiento del 25-75% del costo por arreglar las imperfecciones en comparación del uso de un concreto convencional (Martin 2002).

El análisis de costos se realizó para 1 m³ de los 6 diseños de CAC realizados y el diseño convencional utilizado en una planta de prefabricados:

Tabla 6.5 Precios unitarios de los insumos

MATERIALES	P.U VENTA (S./.)
Cemento (kg)	0.3436
Agua (L)	0.0070
Arena (kg)	0.0160
Piedra 89 (kg)	0.0185
Master Glenium 3810 (L)	8.5000
Master X-seed 100 (L)	11.0000
Master Glenium ACE 407 (L)	8.5000
Curado térmico * (m3)	100.0000

*Costo estimado del curado = S/ 100 por m3 (BASF)

Tabla 6.6 Análisis de costos

Materiales	M1		M2		M3		M4		M5		M6		Convencional	
	Peso Seco	Costo (S/.)	Peso Seco	Costo (S/.)										
Cemento (kg/m ³)	550	188.98	525	180.39	513	176.27	500	171.80	550	188.98	550	188.98	460	158.06
Agua (L/m ³)	220	1.54	210	1.47	205	1.44	200	1.40	220	1.54	220	1.54	155	1.09
Arena (kg/m ³)	763	12.21	774	12.39	779	12.47	785	12.56	763	12.21	763	12.21	826	13.22
Piedra 89 (kg/m ³)	761	14.09	772	14.29	777	14.38	782	14.48	760	14.08	761	14.09	952	17.62
Master Glenium 3810 (L/m ³)	8.80	74.80	8.40	71.40	8.20	69.70	8.00	68.00	-	-	8.80	74.80	-	-
Master X-SEED 100 (L/m ³)	-	-	10.50	115.50	15.38	169.13	20.00	220.00	-	-	-	-	-	-
Master Glenium ACE 407 (L/m ³)	-	-	-	-	-	-	-	-	8.80	74.80	-	-	8.50	72.25
Curado térmico	1.00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1.00	100.00	-	-
TOTAL / m³ S/. (sin igv)		291.62		395.44		443.38		488.24		291.61		391.62		262.24

Tabla 6.7 Evaluación de las propiedades en estado fresco

Diseño	Costo (S/.) sin igv.	% Cumplimiento
M1	292	90.91
M2	395	72.73
M3	443	54.55
M4	488	45.45
M5	292	72.73
M6	392	90.91

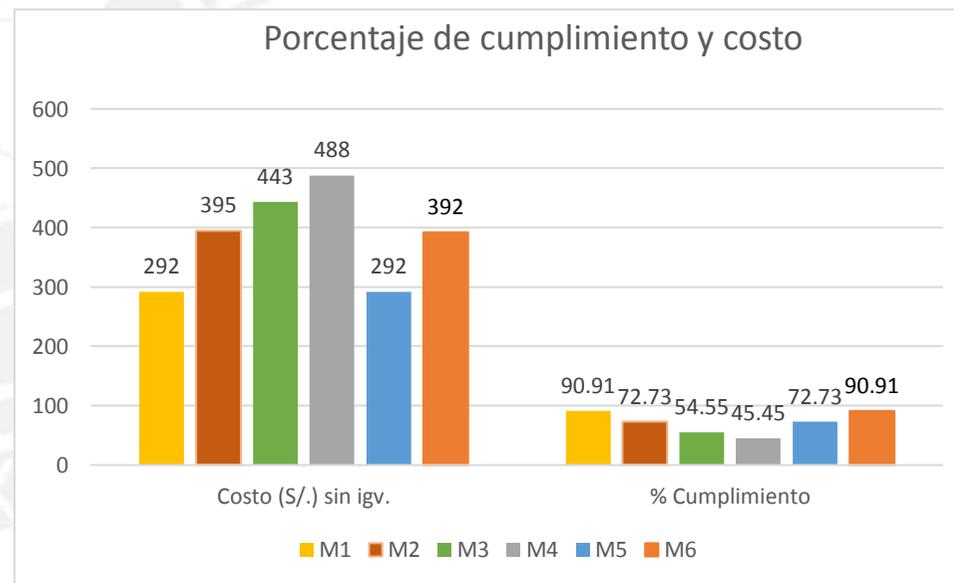


Ilustración 6.19 Porcentaje de cumplimiento y costo

Por un lado, el costo directo de un concreto autocompactado (M1) respecto de un concreto convencional (M7) supera en S/. 30.0, valor que es aproximadamente el 11% del costo inicial. El costo indirecto es la suma de los gastos de los trabajadores, tiempo de colocación, vibrado, acabado y reparaciones, mantenimiento de los equipos y otros. Sumando ambos costos, es probable que el costo total en la fabricación de un elemento sea menor. Por ello, los beneficios que se generan en las propiedades en estado fresco convierte a esta tecnología (CAC) viable en la industria de los concreto prefabricados. Comparando los diseños en cuanto a costos y su cumplimiento de los requerimientos establecidos, el diseño M1 es el más económico y el que tiene mayor porcentaje de cumplimiento. Mientras que el diseño M4 es el más caro y el que tiene menor porcentaje de cumplimiento. Esto debido a la dosis de acelerante que no solo incrementa los costos sino que afecta negativamente a la trabajabilidad.

Tabla 6.8 Resistencia vs costo

Diseño	Resistencia (kg/cm ²)			
	Costo (S/.) sin igv.	8 hr	10 hr	24 hr
M1	292	16	36	310
M2	395	94	139	290
M3	443	134	177	309
M4	488	111	129	271
M5	292	43	94	351
M6	392	170	293	380
Convencional	262	-	-	266

Por otro lado, la tabla 6.8 indica que el costo no necesariamente está relacionado a un mayor desarrollo de la resistencia. Por ejemplo, si se comparan los diseños M3 Y M4 se puede determinar la máxima reducción de cemento ya que se generan menores costos (S/. 443 contra S/.488) con mayores beneficios (177kg/cm² contra 129 kg/cm² a 10 horas). El diseño M2 es también más económico que el diseño M4; a pesar de tener una ligera ventaja durante las 8 horas, esto se revierte después de las 10 horas. Con respecto al diseño M6 (curado a vapor), se puede concluir de la tabla 6.8 que es la opción más rentable si se quieren obtener resistencias muy elevadas durante las primeras 12 horas. Sin embargo, esta tecnología implica tener un mayor control durante el proceso: mayor número de trabajadores, materiales, mantenimiento e implementación de los equipos, y control de calidad. El diseño patrón M1 no presenta altas resistencias a pocas horas, solo a partir de las 24 horas. Por último, el diseño convencional es el de menor costo y menor resistencia a 24 horas; se asume que su desarrollo de resistencias a edades tempranas es menor comparado al diseño M5 ya que en ambos caso se utilizó el mismo aditivo.

CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

7.1 CONCLUSIONES RESPECTO A LAS PROPIEDADES EN ESTADO FRESCO

- Durante el desarrollo de las mezclas de prueba, se comprueba que el concreto autocompactado es un material muy susceptible a los cambios de las proporciones y características de los materiales, inclusive el protocolo de prueba influye en los resultados. Esta etapa es muy importante, ya que puede causar variaciones en las propiedades del CAC de no ser el apropiado. Se repitieron diseños similares con dos humedades de arena (8 y 12%) que desarrollaron extensibilidades muy distintas (150 mm de diferencia), entonces surge un concepto de humedad óptima de los agregados donde los diseños presentan consistencias parecidas. Asimismo, los aditivos superplastificantes desarrollan un mejor comportamiento cuando existe mayor agua libre de amasado; esta afirmación se confirma en la ilustración 4.7 y los resultados mencionados (ilustraciones 4.5 y 4.6). De esta manera, se propone un protocolo basado en porcentajes respecto del agua diseño que tiene como finalidad establecer una condición inicial de mezcla de arena, piedra y agua inicial (A1), independientemente del valor de la humedad. Por último, los tiempos establecidos son recomendaciones propias basadas en nuestra experiencia para lograr un mezclado homogéneo, pero es importante indicar que el tiempo total es relativo a la apreciación visual del operador.
- El capítulo 3 es una herramienta muy útil para diseñar mezclas que considera el efecto de las características y proporciones de los materiales en las propiedades en estado fresco y reología del CAC. Se rescatan tres factores importantes: volumen de mortero, volumen de pasta y relación agua/finos. Primero, se producen concretos más estables cuando el volumen de mortero es mayor puesto que se encargan de movilizar al agregado grueso y los finos de la arena reducen la exudación: material que pasa la malla N^o 50 y 200. Esto se comprueba en la mezcla MP12 (a/A= 55%) que es más estable que la mezcla MP8 (a/A = 53%). Segundo, el volumen de pasta es importante puesto que de ser insuficiente como en la mezcla MP 1 (vol.pasta = 33.8%) genera una torre de agregados en el medio. Por último, la relación agua/finos demostró ser útil para prever la viscosidad de la mezcla. En general todas las mezclas presentaron una relación mayor a 1 lo que los caracteriza como concretos de baja viscosidad, ensayos como el T50 lo demostraron.
- Se demuestra que la fluidez de la pasta no garantiza una buena habilidad de paso. La adición de 1cc/kg de cemento de aditivo superplastificante en el

diseño D 1 no influye en la habilidad de paso; pero la estabilidad del diseño D2, logrado con la utilización del aditivo MasterSet 770R, mejora la habilidad de paso. Sin embargo, es el diseño con menor tamaño de piedra (D7) quien sobrepasa a las demás en cuanto a habilidad de paso (92 %). La sinergia de ambas alternativas (fluidez y tamaño de piedra) lograron que la habilidad de paso sea mayor a 80%.

- El diseño con mayor porcentaje de cumplimiento es la mezcla D7 (85.71%) que posteriormente es denominado como el diseño patrón. Cumple con todos los requerimientos de las propiedades en estado fresco: capacidad de relleno, habilidad de paso y estabilidad. Sin embargo, es sensible a cambios en las características de los materiales por lo que requerirá un mayor control de calidad propio de concretos autocompactados de alta fluidez. Se puede concluir lo siguiente: Es el volumen de pasta quien se encarga de mejorar la capacidad de relleno y habilidad de paso, siempre que el contenido de agua no cause exudación excesiva ni inestabilidad.
- Desarrollar un concreto autocompactado de alta fluidez con una relación agua/cemento = 0.40 (viscosidad límite entre media y baja) es útil pues mitiga el efecto de los aditivos acelerantes sobre la reología del concreto, esto se comprueba en los porcentajes de cumplimiento de las propiedades en estado fresco. Durante una hora descienden conforme se aumenta la dosis de aditivo acelerante y se reduce el volumen de pasta. Los diseños M1, M2, M3 y M4 presentan porcentajes de cumplimiento iguales a 90.91, 72.73, 54.55 y 45.45% respectivamente. El diseño M5 presenta similar comportamiento que M1 pero su influencia en el fraguado reduce su porcentaje de cumplimiento en 72.73%.
- Por un lado, la extensibilidad de un CAC es proporcional al contenido de pasta ya que la extensibilidad del diseño M1 (vol.pasta = 42.40%) es 740mm comparado al diseño M4 (vol.pasta = 40.77%) cuya extensibilidad es 600mm antes de agregar el acelerante. Por otro lado, la viscosidad es inversamente proporcional al contenido de pasta ya que el T50 del diseño M1 es de 1.75 segundos comparado al diseño M4 cuyo T50 es 5.28 segundos antes de agregar el acelerante. Cuando se agrega el Master X-SEED 100 la extensibilidad aumenta y la viscosidad disminuye a valores similares a las características del diseño patrón. Dentro de una hora, todos los diseños a excepción de M4 cumplen con los requerimientos de extensibilidad; en cuanto a viscosidad, solo los diseños M1, M2 y M5 cumplen con tener una viscosidad

media que no afecta negativamente a la capacidad de relleno y habilidad de paso.

- En cuanto a habilidad de paso por el ensayo J-ring (extensibilidad) todos los diseños cumplen con los parámetros establecidos pero a la hora es notoria la pérdida de habilidad de paso en los diseños M3 y M4 tal como se concluyó anteriormente. El ensayo J-ring (diferencia de alturas) es más estricto pues solo la mezcla M1 cumple con dicho requerimiento. En el ensayo L-box, el diseño M3 presenta mejor habilidad de paso debido a que su viscosidad es mayor. En general todas las mezclas en el tiempo inicial cumplen con superar el valor de 50% que es el recomendado para concretos prefabricados según el reporte 628 de la NCHRP, pero dentro de la hora solo las mezclas M1 y M5 cumplen con dicho requerimiento. Un instante es mejor que otro respecto a esta propiedad: en el tiempo inicial (10min) se tienen mezclas muy fluidas con la viscosidad necesaria para evitar la segregación, pero en el tiempo final (70min) se tienen mezclas de baja extensibilidad y alta viscosidad cuando lo ideal es que un CAC de baja fluidez tengan baja viscosidad para proveer una habilidad de paso adecuada.
- En cuanto a los parámetros que caracterizan la reología del CAC, esfuerzos de corte menores a 100 Pa proporcionan mezclas muy fluidas (slump flow > 700 mm) y viscosidades entre 10 y 25 Pa.s proporcionan mezclas de viscosidad baja a media (T50 = 2 segundos), dicho rango se encuentra muy cerca al límite inferior del parámetro 20– 80 Pa.s que proporciona una mezcla con viscosidad moderada. Dentro de una hora, el esfuerzo de corte tiende a ser mayor a 100 Pa, para este valor la mezcla M1 describe una extensibilidad de 650 mm que es el valor límite establecido para un CAC de alta fluidez.

7.2 CONCLUSIONES RESPECTO A LAS PROPIEDADES EN ESTADO ENDURECIDO

- A edades tempranas, la tecnología Master Glenium 3810 no tiene influencia significativa en la resistencia inicial del diseño patrón M1 debido a que es un aditivo superplastificante con retardo.
- A edades tempranas, se puede ver el efecto directo en las resistencias iniciales de la tecnología Master X-SEED 100 en los diseños M2, M3 y M4 respecto del diseño patrón M1. Pese a tener menor cantidad pasta (menor cemento), el diseño M3, que contiene 37.5 kilogramos menos de cemento, alcanza un resistencia de 177 kg/cm^3 superando al diseño patrón en 4.92 veces su resistencia a la edad de 10 horas. Este aditivo promueve la hidratación de la pasta cemento, por lo que reemplazar cemento por aditivo conlleva a utilizar dosis más altas para alcanzar resistencias similares. Lo anterior se demuestra comparando los diseños M3 (30 cc/kg cemento) y M4 (40cc/kg de cemento) donde a pesar de que el segundo tiene más dosis de acelerante que el primero, este supera la resistencia de aquel a las 10 horas en 48 kg/cm^2 ; incluso el diseño M2 (20 cc/kg cemento) termina superándolo en 10 kg/cm^2 . Se concluye que la resistencia inicial en estos diseños (curado estándar) depende de la cantidad de cemento óptimo y la dosis de aditivo.
- A edades tempranas, la tecnología Master Glenium ACE 407 (M5) alcanza un resistencia de 94 kg/cm^2 a las 10 horas, 2.61 veces la resistencia del diseño patrón. Entonces se comprueba que esta tecnología influye más en el desarrollo de resistencias iniciales que los superplastificantes convencionales.
- A edades tempranas, el curado a vapor (M6), a una temperatura máxima de 60°C , alcanza 293 kg/cm^2 en 10 horas; este valor es aproximadamente el 51% de su resistencia final a 28 días. El diseño patrón alcanza un porcentaje de 49% a las 24 horas de edad. Se concluye que la resistencia del concreto depende principalmente de dos variables: tiempo y temperatura.
- En cuanto a su aplicación, los diseños cuya resistencia se encuentren entre $100 - 200 \text{ kg/cm}^2$ pueden desencofrarse. Este rango es alcanzado por los diseños M3, M4 y M6 en 8 horas, 10 horas menos que los diseños convencionales. Sin embargo, en elementos preesforzados el PCI especifica una resistencia del concreto mayor a 245 kg/cm^2 para tensionar los cables, valor alcanzado por en diseño M 6 entre 9 y 10 horas. En este caso, los ciclos de prefabricación pueden reducirse significativamente ya que actualmente

este tiempo es de 18 horas. Pero si dicho tiempo es óptimo por factores de plazo, materiales y mano de obra; entonces los diseños óptimos sería M3 y M5.

- A edades tardías, las tecnologías presentan efectos secundarios en el desarrollo de resistencias. Es la resistencia de la pasta y la adherencia de esta con los agregados quienes determinan la resistencia. Primero, los diseños que contienen similar contenido de pasta son M1, M5 y M6. El diseño M5 no cambia la resistencia final del diseño patrón, incluso la mejora levemente. Sin embargo, el curado a vapor en el diseño M6 reduce cerca del 9% la resistencia final, lo que comprueba que el curado térmico es perjudicial por lo que debe limitarse y controlar que la temperatura del concreto no exceda los valores permisibles. Segundo, los diseños M2, M3 y M4 en comparación al concreto patrón presentan menores resistencia a pesar de tener la misma relación agua/cemento y nanopartículas de CSH aportado por el acelerante. La explicación se debe a la cantidad de pasta extra que tiene el diseño patrón donde todos los compuestos aportan CSH tanto a edades tempranas como a edades posteriores. Por último, el diseño convencional M7 presenta el valor más alto de resistencia debido a su relación agua/cemento igual a 0.35, lo que indica que la porosidad de la pasta gobierna la resistencia final del concreto. En todos los casos, la resistencia a 28 días supera a lo especificado de 500 kg/cm^2 ya que la tendencia de los prefabricados es sobre diseñar la resistencia para desarrollar altas resistencia iniciales por lo que resulta conveniente reducir el contenido de cemento mediante el uso de las presentes tecnologías.
- La calorimetría demuestra el efecto de las tecnologías en la hidratación del cemento mediante la evolución de calor. Se comprueba que el aditivo Master Glenium X- SEED 100 aporta resistencias iniciales entre 6 y 10 horas; mientras que el aditivo Master Glenium ACE 407 influye en la resistencia y la mejora antes de las 20 horas. Asimismo, se comprueba en el diseño M1 que los aditivos superplastificantes influyen en el tiempo de fraguado (mayor mantención), sobre todo cuando se trata de un CAC ya que las dosis son elevadas.

7.3 CONCLUSIONES RESPECTO A LOS COSTOS

- El costo directo de un concreto autocompactado (M1) respecto de un concreto convencional (M7) supera en S/. 24.7, valor que es aproximadamente 10% mayor al costo de un concreto prefabricado convencional. El costo indirecto es la suma de los gastos en trabajadores, tiempo de colocación, vibrado, acabado y reparaciones, mantenimiento de los equipos y otros. Sumando ambos costos, es probable que el costo total en la fabricación de un elemento sea menor. Por ello, los beneficios que se generan de sus propiedades en estado fresco convierte esta tecnología (CAC) viable en la industria de los prefabricados.
- La tecnología Master X-SEED 100 puede reducir costos mediante la disminución de cemento y ahorro de energía, pero un concreto autocompactado requiere altos contenidos de pasta por lo que su uso es limitado. Esta tecnología no es rentable para contenidos de pasta bajos como es el caso del diseño M4 ya que requieren mayores dosis que perjudican a la mantención de propiedades autocompactantes en el tiempo. Por lo tanto, se concluye que desarrollar un concreto autocompactado con alta resistencia inicial (entre 6 y 12 horas) no es rentable en términos de costo directo. La tecnología Master Glenium ACE si es rentable (S/. 27 más) cuando se trata de mantener el ciclo de 18 horas ya que se puede desarrollar un concreto autocompactado con la mantención necesaria (1 hora), incluso se podría optimizar cambiando la incidencia de agregados lo que reduce la cantidad de cemento.
- El curado térmico es el de mejor performance en estado fresco (91% de cumplimiento) y estado endurecido (presforzado en 10 horas), no afecta al fraguado como en el caso de los acelerantes; pero el costo estimado (no se conoce el costo de curado) es S/. 100 adicionales. Su desventaja, respecto de un concreto convencional, es el uso excesivo de cemento (90 kg más) y mayor consumo de energía: no es sustentable.

7.4 CONCLUSIONES GENERALES

- La relación agua/finos recomendada por la EFNARC y el profesor Okamura son de gran utilidad para controlar el diseño de un CAC; en nuestro caso, el valor de 1.06 indicaba un concreto de baja viscosidad y así fue en el transcurso de toda la investigación.
- Un CAC es un concreto de alta fluidez que debe ser capaz de pasar a través de las armaduras sin bloqueo de los agregados, y además debe resistir a la segregación. Dichos requerimientos se logran estableciendo tres parámetros básicos: capacidad de relleno entre 650 y 800 mm (slump flow), T50 entre 2 y 5 segundos y habilidad de paso mayor al 80% (L-box); los demás ensayos complementan a los mencionados. Sin embargo, es la aplicación la que debe limitar los parámetros pues por razones económicas se debe producir lo deseado. En este sentido, en elementos prefabricados es necesario un concreto con alta capacidad de relleno que provea un acabado superficial de alta calidad sin imperfecciones y prescindir del vibrado. No es necesario proveer una elevada capacidad de paso ya que la colocación se realiza en un área accesible, pero resulta conveniente aprovechar la fluidez de la pasta para alcanzar el máximo valor posible con la viscosidad establecida tal que dentro de una hora cumpla con la recomendación de la NCHRP.
- Un CAC es el concreto ideal para aplicar los conceptos de reología. Un esfuerzo de corte bajo garantiza una elevada fluidez, siempre que se provea una viscosidad moderada que evite la segregación. El uso del reómetro puede simplificar los ensayos del CAC pero todavía es necesario una base de datos. La investigación presente comprueba el valor del esfuerzo de corte menor a 100 Pa está relacionado a una fluidez mayor a 700 mm, y el valor de la viscosidad de 10 a 25 Pa.s está relacionado a T50 cercanos a 2 segundos; por lo que, el valor recomendado por ICAR de 20 a 80 Pa.s es acertado.
- La combinación superplastificante y acelerante para producir un CAC requiere un mayor control de calidad porque el primero afecta positivamente a la trabajabilidad, mientras que el segundo afecta negativamente. Lo anterior se comprueba en los porcentajes de cumplimientos ya explicados.
- La tecnología del concreto hasta el día de hoy continúa en desarrollo, no existen recetas únicas. Nuevas soluciones aparecen ante la demanda de una construcción industrializada que deben optimizar los materiales (reducir el cemento), reducir el consumo de energía (curado térmico, vibrado mecánico) y garantizar calidad (resistencia y durabilidad). Todo esto es posible con la

tecnología presentada en este trabajo; el siguiente paso es optimizar los diseños y promover su aplicación.

7.5 RECOMENDACIONES

- En elementos prefabricados resulta ideal diseñar un concreto patrón fluido con viscosidad baja a media; ya que al añadir acelerante, la viscosidad a la hora se encuentra en el límite entre viscosidad media y alta. En consecuencia, durante la hora se puede garantizar capacidad de relleno, capacidad de paso y estabilidad.
- Nuestra experiencia concluye que la extensibilidad no debería superar los 750 mm cuando la viscosidad esta entre media y baja ($T_{50} = 2$ segundos), ya que el índice de estabilidad visual se encuentra en el máximo valor de 1.
- Un CAC mientras sea más fluido será más inestable. Nuestra experiencia recomienda que la extensibilidad no debería superar los 750 mm cuando la viscosidad esta entre media y baja ($T_{50} = 2$ segundos), ya que el índice de estabilidad visual se encuentra en el máximo valor de 1. Asimismo, cuando se realiza la producción de un concreto con estas características no siempre se obtendrá el mismo comportamiento aun cuando se utilice el mismo diseño. Para evitar estos cambios es necesario tener un control durante la producción, y en base a su aspecto y su comportamiento durante el mezclado se deberá hacer los ajustes correspondientes (cantidad de agua y/o cantidad de aditivo).
- Se recomienda utilizar la presente tecnología en elementos donde la complejidad del encofrado sea alta, la profundidad del elemento sea baja a media, la longitud de elemento depende la accesibilidad (en prefabricados longitud alta), importancia del acabado superficial sea alta, y nivel de refuerzo preferiblemente debe ser medio debido a que la viscosidad es media a baja. Asimismo, la energía de colocación debe ser media a baja, la colocación continúa y la altura de caída debe ser baja a fin de evitar la segregación.
- Se recomienda utilizar el aditivo Master X-SEED 100 cuando se requieren altas resistencias entre 6 y 10 horas, utilizar el aditivo Master ACE 407 cuando se requieren altas resistencia antes de las 20 horas y aplicar curado térmico cuando el concreto autocompactado requiere mayor mantención de trabajabilidad.

7.6 LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

- ✓ Estudiar la influencia de los aditivos modificadores de viscosidad en la resistencia a la segregación y robustez del concreto autocompactado.
- ✓ Estudiar la reología de los concreto estándar con distintas consistencias ($f'c = 175, 210, 280 \text{ kg/cm}^2$; slump=3,5, 7 y 9") a fin de optimizar los diseños.



CAPÍTULO 8: BIBLIOGRAFÍA

1. ADAMS, M.
2008 “PCI Producer Members Weigh SCC Options” Concrete Producers
2. American Concrete Institute
2007 “Self-Consolidating Concrete”. ACI Comité 237. Código 237R-07
3. Aldred, J.M.
2007 “Pumping concrete on the Burj Dubai” Terence C. Holland Symposium on Advances in Concrete Technology – 9th CANMET/ACI International Conference
4. American Concrete Institute
2000 “Guide for Measuring, Mixing, Transporting, and Placing Concrete. ACI Comité 304. Código: 304R-00
5. American Concrete Institute
1987 “Accelerated Curing of Concrete at Atmospheric Pressure”. ACI Comité 517. Código: 517.2R-87
6. American Concrete Institute
2010 “High Strength Concrete”. ACI Comité 363. Código: 363R-10
7. ASOCIACION ESPAÑOLA PARA LA CALIDAD
2013 Manual Anual Comité de construcción de la AEC. España. Consulta: 15 de marzo de 2015
http://www.aec.es/c/document_library/get_file?uuid=8738692a-e124-4fc5-8629-abd3c96fb440&groupId=10128
8. American Society for Testing Materials International
2006 Significance of Test and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials STP 169D. Consulta: 09 de enero de 2015
<https://books.google.com.br/books?id=isTMHD6yly8C&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>
9. American Society for Testing Materials International
2014 “Concrete aggregates” Comité ASTM C33

10. American Society for Testing Materials International
2008 “Compressive Strength of Cylindrical Specimens” Comité ASTM C39
11. American Society for Testing Materials International
2015 “Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates”
Comité ASTM C125
12. American Society for Testing Materials International
2012 “Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Coarse
Aggregate” Comité ASTM C127
13. American Society for Testing Materials International
2012 “Density, Relative Density (Specific Gravity), and Absorption of Fine
Aggregate” Comité ASTM C128
14. American Society for Testing Materials International
2010 “Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates” Comité
ASTM C136
15. American Society for Testing Materials International
2003 “Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete” Comité ASTM
C143
16. American Society for Testing Materials International
2014 “Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete” Comité ASTM C172
17. American Society for Testing Materials International
2015 “Specification of Chemical Admixtures for Concrete” Comité ASTM C494
18. American Society for Testing Materials International
2014 “Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete” Comité
ASTM C1611
19. American Society for Testing Materials International
2014 “Test Method for Passing Ability of Self-Consolidating Concrete by J-
Ring” Comité ASTM C1621

20. American Society for Testing Materials International
2014 “Practice for Measuring Hydraulic Cementitious Mixtures Using Isothermal Calorimetry” Comité ASTM C1679
21. BASF CONSTRUCTION CHEMICALS
2009 “Hormigón de altas resistencias iniciales”. España. Consulta: 01 de junio del 2014.
<http://www.basf.es/ecp1/Spain/es/>
22. BASF CONSTRUCTION CHEMICALS
20149 “Master X-Seed 100”. España. Consulta: 05 de junio del 2014.
<http://www.master-builders-solutions-basf.es>
23. BASF CONSTRUCTION CHEMICALS
2014 “The unique hardening accelerator of BASF”. España. Consulta: 15 de abril del 2014.
<http://www.youtube.com/watch?v=56BCscCINRU>
24. BASF CONSTRUCTION CHEMICALS
2014 “RheoMatrix Smart 2011 Dynamic Concrete”. España. Consulta: 15 de abril del 2014.
<http://www.youtube.com/watch?v=5IEiSR4Hba8>
25. BEITZEL, H
2010 “Optimization of the Mixing Process for Producing Self-Compacting High-Performance Concrete” Proceeding of SCC2010, Design, Production and Placement of Self-Consolidating Concrete. Montreal, Canada.
26. Bensted, J.
1987 “Some applications of conduction calorimetry 10 cement hydration”
27. BILLBERG, Peter
2008 “Fresh Property Responses of Powered-, VMA-, and Combination-Type SCC to Varying Aggregate Moisture”. Consulta: 15 de mayo de 2015
<https://www.youtube.com/watch?v=AuD1nXk3Gs8>

28. BILLBERG, Peter
1999 "Fine Mortar Rheology in Mix Design of SCC" Proceedings of the First RILEM International Symposium on Self-Compacting Concrete. Sweden
29. BLANCO, Francisco
2015 "Lección 7: Hidratación del cemento Portland". Universidad de Oviedo. España. Consulta: 28 de mayo del 2015
<http://www6.uniovi.es/usr/fblanco/Leccion7.HidratacionCEMENTO.pdf>
30. CASTRO Claudia, GAMARRA Claudia
2012 "Empleo de aditivos superplastificantes basados en la tecnología policarboxilato". Tesis para optar el grado de ingeniero civil. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ingeniería Civil.
31. CHUTÁN, Rudy
2004 "Concreto Autocompactante Experimentación". Universidad San Carlos de Guatemala, Facultad de Ingeniería Civil. Guatemala.
32. DACZKO J., Vachon, M.
2006 "FIRST NORTH AMERICAN CONFERENCE ON THE DESIGN AND USE OF SELF-CONSOLIDATING CONCRETE-U.S. REGULATORY WORK ON SCC"
33. DACZKO J., VACHON, M.
2006 SELF CONSOLIDANT CONCRETE (SCC) "Significance of Test and Properties of Concrete and Concrete-Making Materials. Consulta: 10 de noviembre de 2015
<https://books.google.com.br/books?id=isTMHD6yly8C&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>
34. DACZKO J.
2012 "Self-Consolidating Concrete: Applying What We know". USA and Canada: Spon Press
35. DE LARRARD
2003 "Production of SCC". Proceedings of the Third International Symposium on Self- Compacting Concrete. Iceland

36. De Schuteer, G.
2008 "Self-Compacting Concrete". Whittles Publishing
37. DOMONE, P.
1999 "Properties of mortar for self-compacting concrete". Proceedings of RILEM International Symposium on Self-Compacting Concrete. Paris
38. EFNARC
2002 "Especificaciones y directrices para el Hormigón autocompactable – HAC"
39. European Project Group
2005 "EUROPEAN GUIDELINES FOR SELF-CONSOLIDATING CONCRETE: Specification, Production and Use"
40. EUROPEAN STANDARD
2012 "Common Rules for Precast Concrete Products" UNE-EN 13369
41. FERNANDEZ, José
1974 "Prefabricación teoría y práctica". España .Editores técnicos asociados S.A.
42. GAMARRA, Claudia
2012 "Empleo de aditivos superplastificantes basados en la tecnología policarboxilato". Tesis para optar el grado de ingeniero civil. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ingeniería Civil.
43. GEIKER, M.R., BRAND, M., THARNE, L.N., and NIELSEN
2002 "On Effect of Coarse Aggregate Fraction and Shape on the Rheological Properties of Self-Consolidating Concrete"
44. HACKLEY V.A.
2001 "Guide to Rheological Nomenclature: Measurements in Ceramic Particulate Systems". National Institute of Standards and Technology

45. IMCYC

2009 “La aceptación de las innovaciones” Construcción y Tecnología de concreto. Consulta: 2 de mayo del 2014

<http://www.imcyc.com/revistacyt/feb10/tecnologia.htm>

46. IMCYC

2009 “El ABC del concreto autocompactable” Construcción y Tecnología” Construcción y Tecnología de concreto. Consulta: 31 de marzo del 2014

<http://www.imcyc.com/ct2006/marzo06/TECNOLOGIA.pdf>

47. KHAYAT, Kamal Henrl

2008 “Self-Consolidating Concrete for Precast, Prestressed Concrete Bridge Elements” National Cooperative Highway Research Program NRCRHP Report 628.

48. KOEHLER. Eric P.

2006 “A New, Portable Rheometer for Fresh Self-Consolidating Concrete”

49. KOEHLER, Eric P

2007 “ICAR Mixtures Proportioning Procedure for Self-Consolidating Concrete”, Research Report ICAR 108-1, ICAR Project 108: Aggregates in Self Consolidating Concrete, International Center for Aggregates Research.

50. KOEHLER, Eric P.

2004 “Development of a Portable Rheometer for Fresh Portland Cement Concrete”. The University of Texas at Austin, TX.

51. MARTIN, D.

2002 “Economic Impact of SCC in Precast Applications”/ First North American Conference on The Design and Use of Self-Consolidating Concrete (páginas157-152).

52. MINISTERIO DE FOMENTO

2008 “EHE -08 INSTRUCCIÓN ESPAÑOLA DE HORMIGÓN ESTRUCTURA”. Consulta: 12 de setiembre del 2015

<http://www.ponderosa.es/docs/Norma-EHE-08.pdf>

53. MORK

1996 "Effect of Gypsum-Hemihydrate Ratio in Cement on Rheological Properties of Fresh Concrete" ACI Material Journal.

54. NAVARRO, Gabriela

2013 "Life Cycle Analyzer de BASF". Construcción y tecnología del concreto. España. Consulta: 01 de junio del 2014

< <http://www.imcyc.com> >

55. NEVILLE, Adam M.

2010 "Concrete Technology Second Edition". British Library Cataloguing-in-publication Data

56. OKAMURA, H.

1999 "Self-compacting concrete, Development, Present Use and Future". Sweden

57. OKAMURA, H.

1999 "Mix Design for Self-Compacting Concrete". Concrete library of JSCE

58. OTTAZI, Gianfranco

2012 "Diseño en Concreto Armado". Pontificia Universidad Católica del Perú. Lima, Perú.

59. PASQUEL, Enrique

1998 "Tópicos de Tecnología del Concreto Segunda Edición". Colegio de Ingenieros del Perú. Lima, Perú.

60. PRECAST CONCRETE INSTITUTE

2004 "PCI DESIGN HANDBOOK Precast and Prestressed Concrete Institute 6th Edition". MNL 120 – 04. USA

61. PRICE AND MYERS Consulting Engineers

2006 "The European Guidelines for Self-Compacting Concrete". Grupo de Proyecto Europeo. España. Consulta: 12 de mayo del 2014.

<http://www.ermco.eu/documents>

62. REVEL, Maurice
1978 "La prefabricación en la construcción". URMO, S.A de Ediciones.
España.
63. RIGUEIRA, Johnson
2007 "Estudio de la sensibilidad e influencia de la composición en las propiedades reológicas y mecánicas de los hormigones autocompactantes".
Tesis para optar el grado de doctor. España: Universidad Politécnica de Valencia, Facultad de Ingeniería Civil.
64. RIXOM, M.R.
1978 "Aditivos para los hormigones". Primera edición publicada por E. &F.N.
España. Editores técnicos asociados, S.A.
65. SEDRAN. T.
1999 "Optimization of self-compacting concrete thanks to packing model".
First International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete
66. SMEPLASS
1994 "Applicability of the Bingham Model to High Strenght Concrete"
Proceedings, Special Concretes: Workability and Mixing, Paisley, Scotland
RILEM, 145-151.
67. SOMPURA, K.
2011 "SCC VALUE IN PRECAST APPLICATIONS". Presentation at Spring
American Concrete Institute Convention. Florida
68. SZECSY
1997 "Concrete Rheology" University of Illinois at Urbana-Champaign.
Urbana, IL.
69. TATTERSALL G.H
1983 "The rheology of Fresh Concrete"
70. TATTERSALL G.H
1991 "Workability and Quality Control of Concrete". London

71. TURCRY, P.

2002 “A study of plastic shrinkage of self-compacting concrete”. International RILEM Symposium on Self-Compacting Concrete.

72. UNICON

2013 “Concreto de alta resistencia”. Lima. Consulta: 10 de mayo del 2014.
<http://www.youtube.com/watch?v=jHDUyIYaUSI>

73. VARGAS, Renato

2006 “Diseño y evaluación de hormigones autocompactantes (CAC)”. Universidad de Chile. Chile, 2006. Consulta: 30 de marzo del 2014.
<http://www.ricuc.cl/index.php/ric/article/viewFile/VARGAS/pdf>

74. VILANOVA, Ángel

2009 “Influencia de dosificación y empleo de diferentes tipos de cemento y adiciones en las propiedades mecánicas del hormigón autocompactante”. Tesis para optar el grado de doctor. España: Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos.

75. YOUNG J.F

1985 “HYDRATION OF PORTLAND CEMENT”. Consulta: 22 de febrero de 2015

<https://books.google.com.br/books?hl=es&lr=&id=6wPpkyrWE5oC&oi=fnd&pg=PA57&dq=+HYDRATION+OF+PORTLAND+CEMENT+calorimetry+young+1985&ots=5alhgifhHd&sig=Yz3ImQ8ZiodMFPjdRZOqOIBybeo#v=onepage&q&f=false>

76. ZARABOSO, Ángel

2014 “Problemática el hormigón en elementos prefabricados” Revista de obras públicas. España, 1981. Consulta: 28 de abril del 2014.

http://ropdigital.ciccp.es/pdf/publico/1981/1981_septiembre_3196_04.pdf