

Design of high performance concrete: high compressive strength, adequate workability and high resistance to erosion - abrasion for hydraulic works

Diseño de hormigones de alto desempeño: alta resistencia a la compresión, trabajabilidad adecuada y alta resistencia a la erosión - abrasión para obras hidráulicas

Fabrizio Yépez^{1*} y Francisco X. Calderón¹

¹Departamento de Ingeniería Civil, Universidad San Francisco de Quito - Calle Diego de Robles y Vía Interoceánica S/N, Cumbayá, Distrito Metropolitano de Quito - Ecuador

*Autor principal/Corresponding author, e-mail: fyopez@usfq.edu.ec

Editado por/Edited by: Cesar Zambrano, Ph.D.

Recibido/Received: 01/03/2014. Aceptado/Accepted: 21/03/2014.

Publicado en línea/Published on Web: 13/06/2014. Impreso/Printed: 13/06/2014.

Abstract

Development and production of High Performance Concrete –HPC– have shown slow progress in Ecuador. This study is focused on the definition of a volumetric design of a concrete mix fulfilling the following performance objectives: to have very high compression strength (over 90 MPa) without losing adequate workability and to get high abrasion erosion resistance of concrete. All those objectives are required for the construction of the spillways in some hydropower projects in Ecuador. At the same time, a guideline to develop the design of a HPC concrete mix using materials available locally is presented. Economic considerations, materials availability in the local market and a cost/resistance ratio of the final product are discussed. For this purpose, several concrete mixtures were produced using ASTM C1240 silica fume and a full range water reducer admixture complying ASTM C494 (polycarboxylate based). The final result was a high workability concrete mixture with 98 MPa compression resistance at 7 days and a maximum compression resistance of 138 MPa at 28 days, being the mixture with the highest strength ever produced in Ecuador, and presenting less than 0.8 % abrasion erosion losses, according to ASTM C1138 test procedure.

Keywords. High performance concrete, Silica fume, Volumetric concrete mix design, Compression strength, Erosion abrasion resistance of concrete, full range water reducer admixture.

Resumen

El desarrollo y producción de hormigones de alto desempeño o HPC (High Performance Concrete) por sus siglas en inglés, han evidenciado un avance lento en el Ecuador. En este artículo se reportan los resultados de una investigación que tuvo como objetivo la obtención de una dosificación volumétrica de hormigón capaz de cumplir tres requerimientos de desempeño: proporcionar una resistencia a la compresión mayor a los 90 MPa en conjunto con una adecuada trabajabilidad de mezcla y, a su vez, presentar una alta resistencia a la erosión abrasión, requerimientos necesarios para el revestimiento de los desagües de fondo de algunos proyectos hidroeléctricos en el Ecuador. Asimismo, este artículo pretende servir como una guía y punto de partida para el desarrollo de hormigones de alto y extra alto desempeño. La investigación toma en cuenta consideraciones económicas, así como disponibilidad de los materiales en el mercado local y relación resistencia/costo del producto final. Para estos fines, se desarrollaron varios diseños de mezclas distintas utilizando microsílíce conforme a las especificaciones ASTM C1240 y un aditivo reductor de agua de alto rango de última generación acorde con ASTM C494. Como resultado final se obtuvo una mezcla de alta trabajabilidad con una resistencia última a la compresión de 98 MPa a una edad temprana de 7 días, con resistencia máxima 138 MPa a los 28 días, siendo hasta hoy, el hormigón de mayor resistencia producido en Ecuador, y con porcentajes de desgaste en relación al peso según ensayo ASTM C1138 que no superan el 0.8 %.

Palabras Clave. Hormigón alto desempeño, Microsílíce, Diseño volumétrico de mezcla, Resistencia a la compresión, Resistencia a la erosión – abrasión, Aditivos reductores de agua de alto rango.

Introducción

Siendo el hormigón uno de los materiales más utilizados a nivel mundial y, observando las limitaciones de esta industria en el Ecuador, surge la motivación de presentar un método coherente y seguro que lleve al desarrollo consistente de mezclas de hormigones de alto desempe-

ño, capaces de superar los 55 MPa [1]. Por otro lado, la ejecución de diversos proyectos hidroeléctricos en el Ecuador requiere la utilización de un material altamente resistente a la erosión-abrasión, a ser utilizado como recubrimiento de los desagües de fondo de las presas. En tal sentido, se requiere diseñar un hormigón de alto

desempeño, que presente alta resistencia a la compresión, buena trabajabilidad de la mezcla y alta resistencia a la erosión – abrasión, a través de una metodología consistente para la obtención de una dosificación volumétrica mediante el uso de materiales y métodos disponibles en el Ecuador.

El desarrollo del diseño de mezcla utilizará humo de sílice ASTM C1240 y un aditivo reductor de agua de alto rango de última generación, acorde a ASTM C494, cuidando de cerca la relación agua/cementante de la mezcla debido a los buenos resultados de estas prácticas reportados alrededor del mundo. Para desarrollar la mezcla se ha utilizado como base la guía ACI 211.4R-08 [1] y las recomendaciones de Willie, K. et al. [2].

Se discuten luego los procedimientos seguidos para el desarrollo de varias mezclas distintas, los resultados obtenidos, y los costos estimados para una producción industrial acorde a precios del mercado ecuatoriano del 2014.

Materiales y Metodología

Materiales

Cada una de las mezclas preparadas utilizó como materiales una combinación específica de un tipo de cemento, agregados finos y gruesos, microsíllice, agua, y un aditivo reductor de agua de alto rango. La razón para las variaciones en el uso de materiales se debe a que cambios en sus composiciones químicas y propiedades físicas impactan las características finales del hormigón, tales como su resistencia última, permeabilidad, trabajabilidad, resistencia a la erosión-abrasión, durabilidad, etc. [1].

Cemento: El cemento utilizado es uno de los factores más influyentes en el desarrollo de hormigones de alto desempeño [1]. En la investigación se ha prestado especial atención al efecto que los distintos tipos de cemento pueden tener en la demanda de agua de la mezcla,

Composición Química	%
SiO ₂	21.9
Al ₂ O ₃	5.1
Fe ₂ O ₃	3.7
CaO	64.4
MgO	0.8
SO ₃	1.8
Na ₂ O	0.23
K ₂ O	0.19
TiO ₂	0.36
Total	100
Cal Libre	0.75
Residuo Insoluble	0.7
Álcalis Equivalente (%)	0.36
Potencial	%
C3A	7.2
C3S + 4.75 C3A	79.3

Tabla 1: Composición química del cemento CP-II, contenido de C3A limitado 7.2 %

SiO ₂ (%) (min.)	94.05
Fe ₂ O ₃ (%)	0.2
Al ₂ O ₃ (%)	0.2
CaO (%)	0.21
K ₂ O+ Na ₂ O (%)	2.00E-01
Humedad (%)	1.03
Perdida al Fuego	1.5
Densidad Aparente (kg/m ³)	500-700

Tabla 2: Composición química y propiedades de la microsíllice utilizada

el comportamiento del aditivo reductor de agua de alto rango y la microsíllice, y la ganancia de resistencia del hormigón en función del tiempo.

Es conocido que una presencia mayor al 8 % de C3A en la composición química del cemento no es recomendable para el desarrollo de hormigones de alta resistencia, pues la rápida reacción de este compuesto durante el proceso de hidratación produce un aumento del área superficial de la partículas, aumentando la demanda de agua necesaria para rodearlas y produciéndose un aumento en la viscosidad de la mezcla. Los resultados de la investigación de Willie, K. et al. [2] muestran que cementos con un contenido bajo de C3A facilitan la obtención de relaciones agua/cementante bajas y llevan a alcanzar resistencias finales mayores.

Otro punto al que se ha prestado atención, es el hecho de que uno de los mecanismos por los cuales la microsíllice aporta al aumento de resistencia en la mezcla es reaccionando con hidróxido de calcio (Ca(OH)₂ denotado también como CH) para producir silicato cálcico hidratado (CSH) y otros cementantes adicionales [3]. De esta información se concluye que la composición química del cemento, que limita los productos de su hidratación, va a afectar la acción de la microsíllice en la mezcla. Con estas ideas en mente, se ha optado por utilizar, a manera de comparación, dos tipos de cementos distintos disponibles en el Ecuador: el primero es un cemento portland tipo II (CP-II), de bajo contenido de C3A (Tabla 1) y el segundo, un cemento hidráulico de alta resistencia temprana que cumple la norma ASTM C1157 de desempeño (CH-HE).

Microsíllice: la microsíllice es definida como un puzolánico producto de desecho de la industria de metales silicoferrosos, utilizada en el desarrollo de hormigones principalmente para mejorar las propiedades mecánicas y durabilidad del producto final. Este material es un cementante adicional que, mediante mecanismos físicos y químicos, es capaz de aumentar la resistencia a la compresión del hormigón, pero reduce la trabajabilidad del hormigón fresco [1, 3]. Pese a que actualmente se cuenta con especificaciones suficientes para garantizar su utilización adecuada, se debe tener en cuenta la variabilidad en sus propiedades. La composición química y propiedades físicas de la microsíllice dependen de un número alto de variables, tales como el tipo de aleación del que se deriva, los métodos utilizados para su producción, densificación y recolección, y el estado general de

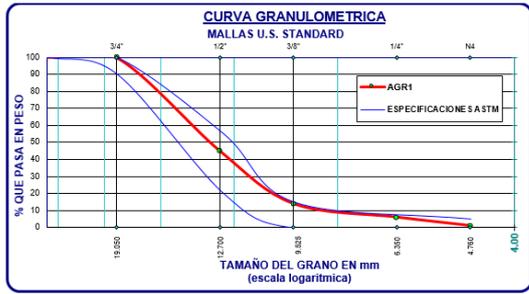


Figura 1: Granulometría del agregado grueso AGR1 (3/4").

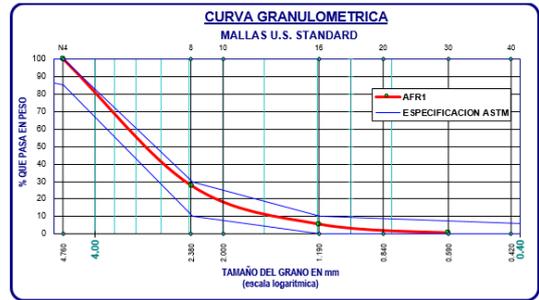


Figura 3: Granulometría del agregado fino (arena gruesa) AFR1 (#4).

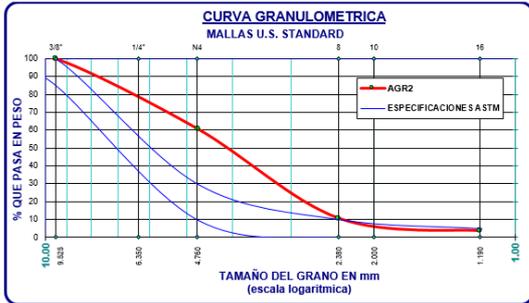


Figura 2: Granulometría del agregado grueso AGR2 (3/8").

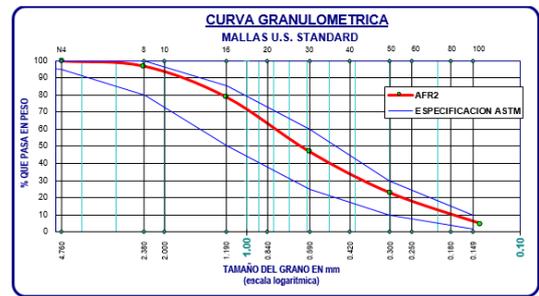


Figura 4: Granulometría del agregado fino (arena fina) AFR2.

la maquinaria utilizada durante todo el proceso [4]. Los estudios consultados [2, 3] no han podido establecer una relación clara entre diferentes tipos de microsílice (todas acorde con ASTM C1240) y la calidad, resistencia y propiedades finales del hormigón producido. Por este motivo, en la presente investigación se ha decidido realizar todas las mezclas con un único tipo de microsílice, con el fin de no introducir una cantidad excesiva de variables que pueden escapar al control del productor y tener un impacto desconocido. Se utilizó microsílice con un contenido del 95 % de SiO₂, que cumple con la norma ASTM C1240 y cuyas propiedades se detallan en la Tabla 2.

Aditivo Reductor de Agua de Alto Rango (HRWR): En el desarrollo de hormigones de alta resistencia uno de los parámetros más críticos de la mezcla es la relación w/c (agua/cementante) [1, 2]. La microsílice produce un aumento en la demanda de agua de la mezcla debido a su alta área superficial, además de proporcionar viscosidad al hormigón, lo cual disminuye su trabajabilidad [1, 3, 4]. Por ello, el desarrollo de hormigones de alto desempeño necesita de la incorporación de un HRWR (high range water reducer). Estos aditivos son capaces de reducir el agua de la mezcla incluso en un porcentaje superior al 30 % [5]; de otra manera, el agua adicional necesaria para proporcionar al hormigón la trabajabilidad adecuada, acarrearía un aumento en la relación w/c y con esto una disminución de la resistencia [1, 3].

Se utilizaron dos aditivos distintos, ambos acorde a la norma ASTM 494 para aditivos reductores de agua de alto rango. El primero (ADTV1), denominado de última generación, que trabaja con policarboxilato como agente activo; estos aditivos son reconocidos hasta la fecha como los más apropiados para el desarrollo de hormigones

de alto desempeño [2]. El segundo (ADTV2) es un aditivo de segunda generación, utilizado para la producción de concreto reoplástico, utilizado por motivos de comparación. Ambos aditivos se encuentran en estado diluido, desconociéndose su concentración exacta, por lo que, siguiendo el método de Willie et. al. [2], se asumió un 40 % de contenido sólido con el fin de tomar en cuenta la incorporación de agua adicional a la mezcla.

Agregados gruesos: El desarrollo de hormigones de alta resistencia requiere una selección cuidadosa de agregados, debido a que éstos son los que ocuparán mayor volumen en la mezcla final y tendrán un impacto significativo en las propiedades del hormigón [1]. En hormigones de alto desempeño, aún cuando la matriz del cementante tenga buenas cualidades, es posible que la máxima resistencia del hormigón esté limitada por la resistencia del agregado. Por ello, se recomienda utilizar agregados resistentes, limpios, sin fisuras y tomar en cuenta que su forma, tamaño, granulometría y composición mineralógica afectarán las características finales del hormigón y la demanda de agua de la mezcla [1].

Para las mezclas desarrolladas se utilizaron varios tipos de agregados distintos, terminándose por seleccionar los agregados provenientes de procesos de trituración y clasificación del material pétreo del Río Pilatón, cercano a uno de los proyectos hidroeléctricos para los cuales se diseñó la mezcla de hormigón de alto desempeño. El proceso permite obtener agregados de superficie angular y con baja presencia de partículas alargadas y planas. La granulometría de estos agregados, de tamaño nominal máximo 3/4 (AGR1) y de tamaño nominal máximo 3/8 (AGR2) se detallan en las Figuras 1 y 2.

Agregados Finos: Las características del agregado fino



Figura 5: Revenimiento típico en muestras de la mezcla 4.



Figura 6: Resultados de pruebas de desgaste según ensayo ASTM C1138.

utilizado pueden tener efectos de similar importancia a las del agregado grueso, por lo que se utilizan los requerimientos ASTM C33 y se recomienda un módulo de finura (MF) entre 2.5 y 3.2, o incluso mayor, con el fin de evitar problemas de trabajabilidad y un aumento excesivo de la demanda de agua [1]. En el presente trabajo se utilizaron agregados finos (AFR1 y AFR2) provenientes de la misma fuente de producción del agregado grueso, cuyas granulometrías se muestran en las Figura 3 y 4.

Agua: Se utilizó agua proveniente del sistema de suministro de la ciudad de Quito, práctica aceptable por la buena calidad de la misma. De sospechar algún problema debido a la calidad del agua utilizada, ACI-211 recomienda referirse a la norma ASTM C1603 para agua utilizada en mezclas de hormigón [1].

Requerimientos

Esta investigación se concentra en tres requerimientos de desempeño: alta resistencia a la compresión, trabajabilidad de mezcla y resistencia a la erosión abrasión. El primer requerimiento es obtener resistencias a la compresión de alrededor de 90MPa, evaluadas mediante ensayos de resistencia a la compresión acorde a ASTM C31 y C39. El segundo requerimiento considerado fue la obtención de una trabajabilidad adecuada en la etapa fresca del hormigón evaluada mediante ensayos de revenimiento acorde a ASTM C143, con un mínimo de 5". No se estableció un asentamiento máximo puesto que,



Figura 7: Equipo utilizado para pruebas de erosión abrasión.

aunque un asentamiento alto puede ser un indicador de posible segregación [5], la adición de microsílíce hace al hormigón resistente a este fenómeno [3, 4] y niveles altos de asentamiento pueden deberse a efectos de los aditivos reductores de agua. Finalmente, se requiere un hormigón que presente bajos índices de desgaste a la erosión – abrasión, de no más de un 2 % de desgaste según norma ASTM C1138.

Dosificación inicial

Se tomaron en cuenta tres parámetros principales para la dosificación de las diferentes mezclas: la cantidad de cemento y las relaciones microsílíce/cemento (SF/C) y agua/cementante (w/c). El ACI recomienda mantener el contenido de microsílíce entre un 5 y 15 % de la masa de cemento y relaciones w/c tan bajas como 0.20 [1]. Para obtener una dosificación inicial se analizaron aquellas propuestas por los comités ACI consultados [1, 3] y por Holland T. [4]. La predosificación 1 fue extraída del “Silica Fume User’s Manual” [4] y la predosificación 2 del comité ACI211.4R-08 [1]. Ambas se muestran en la Tabla 3 junto con los parámetros calculados. Ambas predosificaciones utilizan cementantes adicionales que se escapan del alcance de esta investigación (cemento de escoria y cenizas volantes) por lo que el procedimiento seguido fue reemplazar estos cementantes por un peso similar del cemento utilizado en la mezcla (CP-II o CH-HE).

A partir de las pruebas iniciales con las predosificaciones, se escogieron 5 dosificaciones volumétricas con los 2 cementos estudiados, las cuales se detallan en la Tabla 4. Las mezclas 1 y 2 se diseñaron acorde a la predosificación 1 variando únicamente el tipo de cemento. Las mezclas 3, 4 y 5 siguen los lineamientos de la predosificación dos; entre las mezclas 3 y 4 la diferencia se establece en el procedimiento seguido para la preparación de las muestras, como se describe a continuación.



Figura 8: Probeta de mezcla 4 luego del ensayo erosión abrasión.

Preparación de muestras

Para cada una de las dosificaciones propuestas se fabricaron muestras a escala, siguiendo dos procedimientos distintos, uno para las muestras 1-3 y otro para las muestras 4 y 5. La preparación de muestras incluye las correcciones necesarias en la cantidad de agua de mezcla, con la intención de obtener una trabajabilidad adecuada y una mezcla homogénea de los componentes del hormigón. Para todas las mezclas se utilizó una mezcladora de 1/3 de saco que fue previamente limpiada y llevada a un estado de saturación de su superficie de modo que no extraiga o aporte agua a la mezcla. Para las mezclas 1-3 se inició por verter el agua en la mezcladora, seguida del agregado grueso. Posteriormente se añadieron los cementantes y el aditivo, seguidos por los agregados finos. Se mezcló durante 4 minutos seguidos de 4 minutos de reposo y 4 minutos de mezclado finales. Durante el reposo se evaluó la apariencia física de la mezcla buscando que esta sea fluida y que los cementantes hayan formado una pasta que recubra a los agregados. Durante los últimos 4 minutos de mezclado se añadió agua en pequeñas cantidades de ser necesario con la intención de que el hormigón llegue a tener al aspecto deseado.

Para las mezclas 4 y 5 se inició de igual manera saturando la superficie de la mezcladora y colocando el agregado grueso. Posteriormente los cementantes junto con el agua y el aditivo fueron pre-mezclados aparte utilizando una batidora, la pasta formada fue luego añadida a la mezcladora seguida de los agregados finos. Este procedimiento pareció ser más efectivo en facilitar la reacción del cemento con el aditivo y permitir la obtención de una mezcla fluida. La mezcladora se mantuvo en funcionamiento durante 4 minutos, seguidos de 4 minutos de descanso y 4 minutos finales de mezclado durante los cuales se añadió agua de ser necesario, al igual que en las mezclas 1-3. La variación en estos procedimientos es necesaria, conforme se gana experiencia en la manera cómo interactúan el cemento, la microsílíce y el aditivo reductor de alto rango. Las variaciones en el agua de mezcla han sido tomadas en cuenta en la Tabla 5 que muestra las dosificaciones finales para cada una de las 5 mezclas realizadas.



Figura 9: Superficie de falla de cilindro de prueba a compresión (mezcla 4).

Finalizados los tiempos de mezclado de cada una de las dosificaciones, se procedió a realizar pruebas de revenimiento, acorde con la norma ASTM C143, en la cual todas las muestras mostraron asentamientos mayores a las 5 pulgadas fijadas como requerimiento mínimo (Figura 5). Finalmente, se procedió a la fabricación de muestras cilíndricas y a su posterior curado acorde con la norma ASTM C31. Las pruebas a compresión se realizaron a los 7 y 28 días siguiendo las recomendaciones de la norma ASTM C39.

Resultados

Resistencia a la compresión

Las resistencias obtenidas en las pruebas a compresión a los 28 días se consideran resistencias características F_{cr} , conforme lo especifica el comité ACI-211 [1]. Siguiendo la misma especificación, la resistencia a la compresión a los 28 días $f'c$, definida como requisito de aceptación del hormigón, es menor, basada en las variaciones estadísticas de los resultados de los ensayos. Los resultados de la resistencia $f'c$ se muestran en la Tabla 6. Como puede observarse, la mezcla 4 correspondiente al cemento portland tipo II dio como resultado una resistencia última a la compresión $f'c$ de 109.88 MPa calculada a partir de una resistencia media F_{cr} de 126.51 MPa según ACI318 5.3.2 [6]. Algunas probetas de dicha mezcla alcanzaron incluso valores extremos de 138MPa (1407 kgf/cm²), siendo éste el hormigón de mayor resistencia producido en el Ecuador del que se tenga información, sea en publicaciones o en la práctica profesional, hasta la fecha, con una gran trabajabilidad, medida en 9" de revenimiento en promedio.

Resistencia a la erosión - abrasión

Para la evaluación de la resistencia a la erosión – abrasión de las mezclas preparadas, se realizaron ensayos según norma ASTM C1138, la cual evalúa porcentajes

No.	Fuente	Resistencia 28 días [MPa]	Cemento Portland [Kg/m ³]	Ceniza Volante [Kg/m ³]	Cemento de Escoria [Kg/m ³]	Microsilíce (SF) [Kg/m ³]	Tot. Cementantes (C) [Kg/m ³]	SF/C	W/C
1	Silica Fume User's Manual	83	406	0	169	47	622	7.56 %	0.2
2	ACI211.4R-08	107.00	473.68	103.62	0.00	74.01	651.32	11.36 %	0.2

Tabla 3: Pre - dosificaciones iniciales adoptadas.

No.	CP-II [Kg]	HE-HE [Kg]	Microsilíce [Kg]	ADTV1* [Kg]	ADTV2* [Kg]	AGR1 ^I [Kg]	AGR2 ^I [Kg]	AFR1 ^I [Kg]	AFR2 ^I [Kg]	Agua** [Kg]	SF/C	W/C ^{II}
1	585.19	0.00	47.43	0.00	8.90	427.04	284.66	158.15	711.70	188.45	0.07	0.23
2	0.00	585.19	47.43	0.00	8.90	427.04	284.66	158.15	711.70	188.45	0.07	0.23
3	634.42	0.00	70.49	3.17	0.00	0.00	688.90	229.25	609.54	186.35	0.10	0.22
4	634.42	0.00	70.49	3.17	0.00	0.00	688.90	229.25	609.54	186.35	0.10	0.22
5	0.00	634.42	70.49	3.17	0.00	0.00	688.90	229.25	609.54	186.35	0.10	0.22

* Valores correspondientes al peso total de aditivo sustrayendo el porcentaje de agua.

** Valores incluyen el aporte de agua por parte del aditivo.

^I Pesos secos.^{II} Calculados tomando en cuenta los % de absorción de los agregados.Tabla 4: Dosificaciones iniciales para producir 1m³ de hormigón.

No.	CP-II [Kg]	HE-HE [Kg]	Microsilíce [Kg]	ADTV1* [Kg]	ADTV2* [Kg]	AGR1 ^I [Kg]	AGR2 ^I [Kg]	AFR1 ^I [Kg]	AFR2 ^I [Kg]	Agua añadida [Kg]	Agua** [Kg]	SF/C	W/C ^{II}
1	585.19	0.00	47.43	0.00	8.90	427.04	284.66	158.15	711.70	5.49	193.94	0.07	0.24
2	0.00	585.19	47.43	0.00	8.90	427.04	284.66	158.15	711.70	30.95	219.40	0.07	0.28
3	634.42	0.00	70.49	3.17	0.00	0.00	688.90	229.25	609.54	3.02	189.37	0.10	0.23
4	634.42	0.00	70.49	3.17	0.00	0.00	688.90	229.25	609.54	-10.07	176.28	0.10	0.21
5	0.00	634.42	70.49	3.17	0.00	0.00	688.90	229.25	609.54	25.18	211.52	0.10	0.26

* Valores correspondientes al peso total de aditivo sustrayendo el porcentaje de agua.

** Valores incluyen el aporte de agua por parte del aditivo y agua extra añadida durante la preparación de las muestras.

^I Pesos secos.^{II} Calculados tomando en cuenta los % de absorción de los agregados.Tabla 5: Dosificaciones finales para producir 1m³ de hormigón.

Mezcla No.	Resistencia a la compresión f'c [MPa]
1	70.33
2	76.80
3	98.90
4	109.92
5	77.91

Tabla 6: Resistencia final a la compresión f'c de las mezclas finales.

Material	Precio [US\$]	Unidad	Precio por 1 Kg [US\$]
Cemento	7.80	Saco 50Kg	0.156
Microsilíce	900.00	Ton	0.90
ADTV1	5.30	Kg	5.30
ADTV2	2.45	Kg	2.45
Agregados	36.00	m ³	0.013

Tabla 7: Precios unitarios.

de pérdida de masa de probetas cilíndricas de aproximadamente 30 cm de diámetro y 10 cm de espesor, sometidas a la abrasión por rotación de bolas de acero en la superficie de la probeta, a velocidades de rotación de 1260 rpm, y a diferentes tiempos de ensayo.

Los resultados de los desgastes de las muestras se indican en la Figura 6, mostrando un desgaste máximo 0.79 % a las 72 horas, valor mucho menor que el de diseño, de 2 %. El equipo utilizado junto con la característica del hormigón sometido a erosión abrasión puede observarse en las Figuras 7 y 8.

Mezcla No.	Resistencia a la compresión f'c [MPa]	Precio por m ³ [US\$]	Relación Resistencia/Costo
1	70.33	227.55	0.31
2	76.80	227.89	0.34
3	98.90	238.64	0.41
4	109.92	238.46	0.46
5	77.91	238.93	0.33

Tabla 8: Relación resistencia/costo.

Relación resistencia/costo

Los costos de producción de las mezclas se obtuvieron en base a un análisis de precios unitarios, utilizando datos del mercado ecuatoriano. Los costos indicados incluyen el transporte de los materiales y se muestran en la Tabla 7. Los costos por metro cúbico de producción y las relaciones resistencia/costo de cada una de las mezclas se indican en la Tabla 8, observándose nuevamente a la mezcla No. 4 destacándose con la mayor relación resistencia costo. De manera interesante, el costo de la mejor mezcla resultó ser también la más económica y la más eficiente de todas.

Discusión

En general, el procedimiento adoptado para obtener las predosificaciones ha demostrado ser efectivo. El comparar las resistencias esperadas de la Tabla 3 con las resistencias finales de la Tabla 6, parece indicar que el sustituir cementantes adicionales propuestos por las predosificaciones 1 y 2 (cemento de escoria y ceniza volante)

por los cementos CH-HE y CP-II, acarrea una disminución de la resistencia final esperada, pero no impide el desarrollo de hormigones de alta resistencia. Sin embargo, la mezcla 4 ha logrado superar la resistencia esperada por la predosificación 2, sin la incorporación de ceniza volante (probablemente debido al método de mezclado más efectivo y a una actitud conservadora de las fuentes consultadas y descritas en la Tabla 3, al especificar las resistencias esperadas). Los resultados muestran que el cemento CH-HE alcanzó una resistencia mayor al cemento CP-II al utilizar como base la predosificación 1. Sin embargo, al utilizar los parámetros de la predosificación 2, el cemento CP-II es el más apropiado.

Observando los datos de corrección de agua se puede notar, que el cemento CH-HE produce consistentemente una demanda de agua mayor al cemento CP-II y por tanto dificulta la consecución de relaciones w/c bajas. El procedimiento utilizado para mezclar los materiales también demostró tener un impacto considerable en la demanda de agua. Comparando las mezclas 3 y 4 puede observarse, que el cambio total en el agua requerida fue de 260 kg y llevó a un cambio en la relación w/c de 0.23 a 0.21, factor que explica un aumento en la resistencia final de casi 11 MPa.

Por otro lado, todos los tipos de agregados utilizados demostraron ser aptos para el desarrollo de hormigones de alta resistencia. La efectividad de su granulometría y el buen empaquetamiento obtenido se puede observar en la Figura 9, que muestra la superficie de fallo de uno de los cilindros de prueba. El hormigón de alta resistencia resultó también tener excelente resistencia a la erosión abrasión con una adecuada trabajabilidad para su producción, lográndose los objetivos de desempeño buscados.

Acerca de los aditivos utilizados, los resultados parecen indicar que el reductor de agua de última generación en base a policarboxilatos fue el más eficaz, lográndose relaciones w/c más bajas para cada tipo de cemento, que las alcanzadas con el aditivo de segunda generación.

Para los fines perseguidos en esta investigación, se considera que los datos obtenidos son suficientes. Sin embargo, para una producción industrial, es necesario obtener la resistencia característica y su relación con $f'c$ con base a las desviaciones estándar de producción. Es fundamental mantener un control de calidad muy exigente en la producción de este tipo de hormigones, pues pequeñas variaciones en las propiedades de los materiales utilizados generan variaciones en los resultados del producto final y requiere de ajustes de dosificación rutinarios.

Agradecimientos

Los autores dejan constancia de su agradecimiento a la empresa Proyectos y Construcciones Hidroenergéticas PCH Cía. Ltda. por facilitar el acceso a su laboratorio de materiales y hormigones y a su personal técnico.

Referencias

- [1] ACI 211.4R-08. 2008. "Guide for Selecting Proportions for High-Strength Concrete Using Portland Cement and Other Cementitious Materials". *American Concrete Institute*: 29.
- [2] Willie, K.; Naamany, A.; Parra-Montesinos, G. 2011. "Ultra-High Performance Concrete with Compressive Strength Exceeding 150 MPa (22ksi): A Simpler Way". *ACI Materials Journal*, 108(M06):46-54.
- [3] ACI 234R-06. 2006. "Guide for the Use of Silica Fume in Concrete". *American Concrete Institute*: 63.
- [4] Holland, T. 2005. "Silica Fume User's Manual". *Silica Fume Association, Lovettsville, VA, Rep. FHWA-IF-05-016*: 1-77.
- [5] Philips, W. *et al.* 2005. "Capítulo 2: La mezcla del concreto". *Guía del Contratista Para la Construcción en Concreto de Calidad, 3ra ed. USA, ACI & ASCC*, 2:14-27.
- [6] ACI 318M-11. 2011. "Building Code Requirements for Structural Concrete". *American Concrete Institute*: 503.