Comportamiento de Hormigón Simple Mezclado con Polvo Reactivo.

Angel Ordóñez[1], Hugo Egüez A.[2]
[1]Escuela Superior Politécnica del Litoral, Facultad de Ingeniería en Ciencias de La Tierra,
Campus Gustavo Galindo, km 30.5 vía Perimetral, Apartado 09-01-5863. Guayaquil, Ecuador
[2]Ingeniero Geólogo, ESPOL 1985; MSc, WVa University, EEUU 1987.
[2]heguez@espol.edu.ec

Resumen

El presente artículo describe el estudio del comportamiento de hormigón simple mezclado con polvo reactivo (HPR), fabricado a partir de materiales propios del Ecuador y que satisfagan las características que se requieren para elaborar un hormigón de ultra alto desempeño (HUAD), de cuyo grupo forma parte el HPR. Este tipo de hormigón no se ha probado en nuestro medio y se espera que cumpla los requisitos para ser usado en elementos estructurales y viales sometidos a compresión, flexión, resistencia a los sulfatos y a la reacción álcali – sílice. El artículo presenta el procedimiento a seguir para obtener un HPR y en base a los resultados obtenidos de los ensayos realizados según las normas americanas ASTM comparar con los hormigones convencionales y con los hormigones de alto desempeño (HAD) de manera que tengamos un hormigón de ventajas no vistas en el Ecuador hasta la actualidad.

Palabras Claves*: Hormigón simple mezclado con polvo reactivo (HPR), hormigón de Ultra Alto Desempeño (HUAD), resistencia a los sulfatos, reacción álcali – sílice.*

Abstract

This paper describes the study of the behavior of conventional concrete mixed with powdered reagent (CPR), made from indigenous materials of Ecuador and that meet the characteristics required to develop an ultra high performance concrete (UHPC), of which HPR is a part. This type of concrete has not been tested locally and is expected to meet the requirements of use in road and structural elements working under compression, bending, resistance to sulfate and the alkali – silica reaction. The article presents the procedure for obtaining a CPR and based on the results of tests according to American ASTM standards compare it with both conventional and high performance concrete (HPC) to learn about the advantages of a concrete not seen in Ecuador to the present.

Keywords: *Simple concrete mixed with powdered reagent (CPR), ultra high performance concrete (UHPC), resistance to sulfate, reaction alkali – silica.*

1. Introducción.

Los Hormigones de Ultra Alto Desempeño (HUAD) han sido desarrollados en las últimas décadas, si los comparamos con los Hormigones de Alto Desempeño (HAD), los primeros presentan propiedades superiores con respecto a los últimos, como por ejemplo: mayor resistencia y durabilidad.

El presente trabajo engloba el estudio de un tipo de Hormigones HUAD que es específicamente el Hormigón con Polvo Reactivo (HPR), este hormigón presenta varias diferencias con respecto al hormigón convencional de cemento, arena y grava que por mucho tiempo ha sido considerado como el material a emplear a lo que a construcción se refiere. Una de las principales características del Hormigón de Polvo Reactivo es la no utilización de agregado grueso en la mezcla para su elaboración, este detalle da al concreto mejor empacamiento entre las partículas, esto claro se da con una correcta selección de la granulometría de los materiales. Este mejor empacamiento en los materiales da como resultado menor porosidad en el hormigón y por ende mayores resistencias. La ventaja de tener resistencias mayores es que permite reducir secciones y por ende disminuir el peso de la estructura, aumentar luces en las vigas, lo cual implica reducir el número de columnas o de pilas según sea el caso de la edificación a construir. Esto es una gran ayuda pues en la actualidad por falta de espacio en las grandes urbes, se tiende a construir edificios cada vez más altos.

Este artículo describe los materiales utilizados en el HPR así como también el procedimiento para obtenerlo. Luego se define la dosificación del HPR y a la vez presenta las características intrínsecas del hormigón por medio de los resultados que salieron de los ensayos realizados.

2. Desarrollo de la investigación.

2.1. Antecedentes

Con el paso del tiempo y los requerimientos civiles en el mundo se ha ido desarrollando varios tipos de hormigón, se han ido implementando investigaciones, las mismas que anteceden al HUAD en forma de Hormigón de Alto Desempeño (HAD) y Hormigón de Alta Resistencia (HAR)

(a) Hormigón de Alto Desempeño (HAD). Según el American Concrete Institute (ACI) define al Hormigón de Alto Desempeño como que es el que reúne una combinación especial de requerimientos de desempeño y uniformidad que no siempre pueden ser logrados usando materiales tradicionales, mezclado normal, criterios de colocación normales y prácticas de curado ordinarias (1).

(b) Hormigón de Alta Resistencia (HAR). Son aquellos que tienen una resistencia a la compresión mayor a los 35 MPa son usados en estructuras en las cuales los requerimientos estructurales superan las resistencias de los concretos convencionales. Además de los ahorros en el costo de los materiales, los HAR permiten ahorros adicionales debido a la mayor velocidad en la construcción en comparación con las estructuras metálicas (2).

2.2. Usos

Las ventajas del uso de estos nuevos materiales son evidentes, reducción de secciones, facilidad de trabajo, rapidez y rápido desencofrado, mayor versatilidad y estética en la arquitectura, mejor durabilidad y otras características. El uso de este tipo de hormigón en base a sus características va orientado a emplearse en edificios, puentes entre otros elementos de construcción civil, en la Figura 1 se puede observar 2 ejemplos de aplicaciones del hormigón de ultra alto desempeño que es objeto de estudio.

(a) Taipei 101 - Taiwan **(b)** Puente Millau - Francia

Figura 1. Aplicaciones del HUAD

A continuación se presentan cualidades del Hormigón de ultra alto desempeño.

(a) Reducción de Costos. Este tipo de hormigón presenta la ventaja de reducir los costos del ciclo de vida de la estructura. A diferencia del acero, el concreto de alto desempeño tiene un bajo costo de mantenimiento dada su superior durabilidad, por lo cual un concreto de alto desempeño es un material competitivo respecto a sus costos.

(b) Durabilidad. Los concretos de ultra alto desempeño ofrecen gran tolerancia ante el amplio rango de factores medioambientales, los cuales causarían un proceso de deterioro en un concreto convencional. Los puentes elaborados con concretos de alto desempeño ofrecen una confiable durabilidad, teniendo una mínima deflexión bajo cargas vivas. El uso de las técnicas de construcción por tramos, para así lograr grandes luces rectas o curvas puede hacerse óptimo con el uso de concretos de ultra alto desempeño.

(b) Competitividad. El concreto de alto desempeño es una gran alternativa para áreas geográficas el acero domina las construcciones de puentes de tramos largos. Pudiendo generar los siguientes beneficios: valor, calidad y eficiencia en la construcción.

(b) Estética. Gracias a la versatilidad de usos de los HUAD, estos se han usado en muchos puentes atirantados, los cuales tienen un especial atractivo y belleza como se puede observar en la Figura 1.b, por lo cual los concretos de alto desempeño no solo ofrecen funcionalidad, si no también innovación.

2.3. Materiales

La correcta selección de los materiales dará como resultado una mezcla óptima para desarrollar un HPR. Los materiales empleados en la elaboración del HPR se detallan a continuación:

(a) Cemento. La selección del cemento portland para el HPR es extremadamente importante como material constituyente es por eso que se le debe brindar a sus características y propiedades la mayor atención antes y durante la construcción de la estructura respectiva.

El cemento escogido para el presente proyecto es el cemento portland tipo I, por cuanto es el cemento mejor indicado en nuestro medio para obtener las características requeridas, en la Figura 2 se presenta la composición química del cemento tipo I (3).

Oxido de calcio (CaO)	60-70%
Dióxido de silicio (incluyendo 5% de sílice libre) (Si O2)	19-24%
Trióxido de aluminio (Al3O3)	4 -7 %
Oxido férrico (Fe2O3)	2 -6 %
Oxido de magnesio (MgO)	<5%

Figura 2. Composición química del cemento tipo I

(b) Agregados. Si bien los agregados son los componentes inertes del concreto, su influencia en las características del concreto es notable; sin embargo durante varios años su estudio fue descuidado, debido principalmente, al bajo costo comparativo con el costo del cemento, además de los bajos requerimientos de resistencia, en los cuales los agregados no tienen gran influencia, hoy en día se conoce la influencia del agregado en las propiedades del concreto tanto en estado fresco y endurecido.

Entre los agregados utilizados en la mezcla de hormigón tenemos arena fina de cuarzo, cuarzo molido y humo de sílice. En donde, La arena fina contribuye con las partículas de mayor tamaño en la matriz, el tamaño de la arena es seleccionado dependiendo del grado de homogeneidad que se desea. En el HPR el tamaño de las partículas de arena utilizada está limitado a 600um, pero no menor a 150um como se puede notar en la Figura 3. El polvo de cuarzo molido proviene de la molienda de la arena fina de cuarzo y es el componente reactivo de la mezcla, el beneficio que este brinda al hormigón es realmente su bajo costo y además es una excelente pasta de gran dureza. El diámetro de las partículas de polvo de cuarzo es del orden de 10-15um. El humo de sílice es un subproducto que resulta de la reducción del cuarzo de alta pureza con carbón en calderos de arco eléctrico en la producción de silicio y aleaciones de ferrosilicio. El humo, consistiendo de partículas esféricas muy finas y cuyo contenido de sílice amorfo es muy elevado. Este material, a causa de su extrema finura y su alto contenido de sílice, cumple un papel muy importante en la estructura de la pasta de cemento. Actúa como relleno físico o filler, aumentando la compacidad de la mezcla. Reduce considerablemente la exudación en el hormigón fresco debido a su gran superficie específica y capacidad para retener el agua.

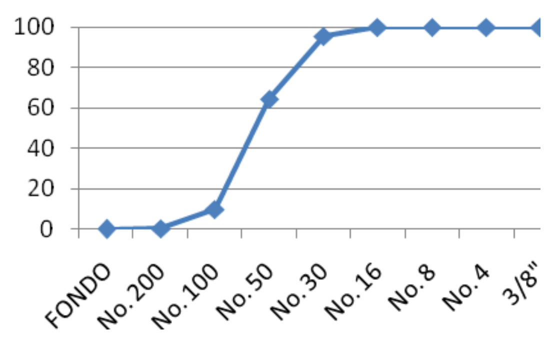

Figura 3. Granulometría de la arena fina de cuarzo

(c) Agua Utilizada. La calidad de agua desempeña un papel importante: las impurezas del agua pueden interferir con el fraguado del cemento, pueden afectar adversamente la resistencia del hormigón o causar manchas en su superficie, y también pueden conducir a la corrosión del refuerzo, inestabilidad del volumen y reducción de la durabilidad. Por estas razones, se debería tomar en cuenta la conveniencia del agua para mezclado y los propósitos del curado. El agua de mezclado no deberá contener cantidades indeseables de sustancias orgánicas ni constituyentes inorgánicos en proporciones excesivas. No obstante, no existen normas que prescriban explícitamente la calidad del agua de mezclado. La disminución de la relación agua-materiales cementicios es muy importante para obtener la mayor resistencia posible en todos los ensayos que se detallarán posteriormente (4).

(d) Fibras Metálicas. La superior ductilidad de los HPR's es obtenida a través de la incorporación de microfibras de acero. Sin la adición de las fibras el concreto presenta un comportamiento completamente frágil. Debido a que las fibras refuerzan la mezcla a nivel micro se elimina la necesidad de colocar refuerzo por temperatura y retracción y a la vez permite la reducción y en algunos casos la eliminación por completo del acero para cortante. El tamaño de las fibras integradas en la mezcla es muy importante, tanto el grado de ductilidad como al resistencia a la tracción obtenidos dependen no solo del tamaño de fibras sino también del porcentaje de fibras usado por m3.

Las fibras de acero utilizadas en este programa de prueba fueron directamente fibras de alambre de acero fabricados por Bekaert Corporation. Las fibras tienen un diámetro nominal de 0,2 mm (0,008 pulgadas) y una longitud nominal de 12,7 mm (0,5 pulgadas). La composición química de las fibras se muestra en la Figura 4 (5).

Element	Composition (percent)
Carbon	0.69-0.76
Silicon	0.15-0.30
Manganese	0.40-0.60
Phosphorus	£ 0.025
Sulfur	£ 0.025
Chromium	£ 0.08
Aluminum	£ 0.003

Figura 4. Composición química de las fibras metálicas

(e) Aditivos. El aditivo que se escogió para el HPR's fue el Glenium 3000 NS que es un reductor de agua de alto rango listo, el mismo que es de una nueva generación de aditivos basados en la tecnología del policarboxilato. GLENIUM 3000 NS es un aditivo muy efectivo produciendo hormigón con diferentes niveles de trabajabilidad, incluyendo aplicaciones que requieran el uso de concreto autocompactante. GLENIUM 3000 NS cumple la norma ASTM C 494 para requerimientos Tipo A, reductores de agua, y Tipo F, aditivos reductores de agua de alto rango (6). En la Figura 5 se presenta el aditivo utilizado en la mezcla.

Figura 5. Aditivo súperplastificante de alto rango.

2.4. Diseño del HPR.

Las proporciones de la mezcla para hormigones de ultra alto desempeño y que dentro de este grupo están los HPR's varían ampliamente dependiendo de muchos factores: el nivel de resistencia requerido, la edad de ensayo, características de los materiales, y el tipo de aplicación son factores que influyen en las proporciones de la mezcla. Además, otros factores importantes son: el económico, requerimientos estructurales, facilidad de fabricación, ambiente de curado previsto y hasta la época del año en otras regiones del mundo en donde este detalle es importante.

(a) Consideraciones de Diseño. Este inciso es uno de los más importantes de este documento pues se debía tener en cuenta que al pretender subir resistencia, no se debía descuidar la trabajabilidad de la mezcla para ello se modificó las proporciones de agua y aditivo empleados, pero sin excederse o que faltaren alguno de los dos elementos nombrados en este subcapítulo. Además Para la dosificación se ha tomado en cuenta el documento ACI 211.4R "Guide for Selecting Proportions for High-Strength Concrete with Portland Cement and Fly Ash" en donde considera, ensayos a partiendo de la edad de diseño, relación agua cemento,

cemento, agregado grueso (en este caso este punto no interviene en la mezcla del presente estudio), agregado fino, aditivos entre otros.

(b) Dosificación. Para la dosificación se realizaron varios ensayos para optimizar la mezcla que desarrolle su resistencia de manera que el hormigón deseado sea catalogado como Hormigón de Ultra Alto Desempeño. Se utilizó cemento tipo I, arena fina de cuarzo, cuarzo molido, humo de sílice, fibras metálicas, aditivo súperplastificante de alto rango y agua. En la Figura 6 que se presenta a continuación se detalla las proporciones que se implementaron para la producción de Hormigón de Polvo Reactivo (HPR).

MATERIAL	PROPORCION (Kg/m3)	%
Cemento Tipo I	712	27,68
Arena Fina	1020	39,66
Humo de Sílice	231	8,98
Cuarzo Molido	211	8,20
Glenium 3000 NS	30,7	1,19
Agua	219	8,51
Fibras metálicas	148,4	5,77

Figura 6. Proporciones utilizados en la mezcla de HPR

(c) Elaboración. En la elaboración del HPR se mezclaron los materiales presentados en la Figura 6 de manera de fabricar 10 dm3 de mezcla por motivo que la mezcladora en la que se la iba a realizar no permitía mezclar un volumen mayor a 10 litros.

Se colocaron los materiales en el siguiente orden: arena fina, cemento, cuarzo molido y humo de sílice, se puso en marcha la mezcladora de manera de homogenizar los materiales, luego se colocaron el agua y el aditivo respectivamente, se esperó varios minutos hasta que se logre la mezcla. Finalmente se incluyó las fibras metálicas a la pasta de hormigón.

Luego de efectuada la mezcla exitosamente, se tomaron las probetas para luego ser ensayadas, más adelante se describirán que tipo de ensayos se realizaron al HPR. Un día luego del moldeo se procedió al desencofrado y puesta en curado de todas las probetas creadas, las mismas que fueron sometidas a curado por simple inmersión en agua. Nótese en la Figura 7 el mezclado del hormigón en la concretera de 10 litros.

Cabe puntualizar que en todas las muestras elaboradas se hizo con la misma dosificación, además se diseñó teniendo 0.19 de relación agua-materiales cementantes.

Figura 7. Proceso de mezclado del HPR

2.5. Ensayos Experimentales del HPR

En los ensayos experimentales que se realizaron al hormigón cabe decir que se hicieron en base al alcance del laboratorio del CTH (Centro Técnico del Hormigón). Las pruebas desarrolladas arrojan las características del hormigón como son resistencia tanto a la compresión como tracción, flexión, módulo de elasticidad, entre otros.

(a) Compresión. En el ensayo de de resistencia a la compresión simple se hizo referencia a la norma ASTM C39 (Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens), de donde se moldeó y ensayó cilindros de 10x20 cm de dimensiones (Figura 8.a), se seleccionó este tamaño por motivo de disponibilidad de materiales y la facilidad de su rotura en las prensas diseñadas para compresión.

(a) Compresión cilindros 10x20 cm

(b) Compresión a partir de vigas a manera de cubos

Figura 8. Ensayo de Compresión

Para facilitar la rotura y aumentar los elementos ensayados se hizo pruebas con fragmentos de vigas de 16x4x4 cm que se los trató a manera de cubos (Figura 8.b) según la norma ASTM C349 (Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure)).

(b) Tracción por compresión diametral. Normalmente el hormigón no se suele diseñar para soportar tracción, sin embargo, es importante conocer la resistencia a la tracción al estimar que carga bajo la cual se presentará el agrietamiento. La no existencia de resquebrajamiento del hormigón es muy importante por cuanto no se haría ningún tipo de mantenimiento a la estructura de hormigón ni tampoco en la preocupación de la corrosión del acero de refuerzo (7).

Para el ensayo de la tracción indirecta o como también se la conoce como el ensayo a la compresión diametral se basó en la norma ASTM C496 (Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens).

Figura 9. Ensayo a Tracción por Compresión Diametral

(c) Flexión. En el diseño de hormigones orientados a ser usados en carreteras y otras losas se requiere la determinación de la resistencia a la flexión o también llamado módulo de rotura. Se puede sacar un índice de correlación teniendo en cuenta una estadística de la compresión de las probetas cilíndricas, ya que los ensayos de compresión son más fáciles de realizar (8).

Para el ensayo de flexión del HPR se hizo unas vigas de 16x4x4 cm de dimensiones, a este test se lo realizó basándose en la norma ASTM C348 (Standard Test Method for Flexural Strength of Hydraulic-Cement Mortars).

Figura 10. Ensayo a Flexión

(d) Módulo de elasticidad. A este parámetro se lo denota con el símbolo E, y se puede definir como la relación entre el esfuerzo y la deformación unitaria en el rango elástico de la curva esfuerzo-deformación del hormigón.

El módulo varía con diversos factores, notablemente con la resistencia del concreto, la edad del mismo, las propiedades de los agregados y el cemento, y la definición del módulo de elasticidad en sí, si es el módulo tangente, inicial o secante (9).

En el ensayo de determinación del módulo de elasticidad se tomó en cuenta la norma ASTM C 469 (Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression).

Figura 11. Ensayo de determinación de Módulo Elásticidad

3. Resultados de los Ensayos Realizados

Los ensayos realizados al HPR descritos anteriormente se realizaron en el laboratorio del Centro Técnico del Hormigón de la ciudad de Guayaquil, se usaron cilindros y barras acorde a lo que se requería determinar y basándose en las normas correspondientes.

En las tablas y gráficas que se presentarán a continuación se separarán los resultados en dos grupos que son:

3.1. Resistencia a la Compresión.

En este ensayo se hizo dos tipos de ensayos a compresión simple uno por medio de cilindros de 10x20 cm y otro con cubos de 4x4 cm que resultaron de la rotura de vigas de 16x4x4 cm. A estos ensayos se los podrá visualizar por separado en las Figuras 12 y 13 respectivamente.

MUESTRA	EDAD (días)	f'c (Mpa)
1	1	35.68
	7	69.82
	28	104.98

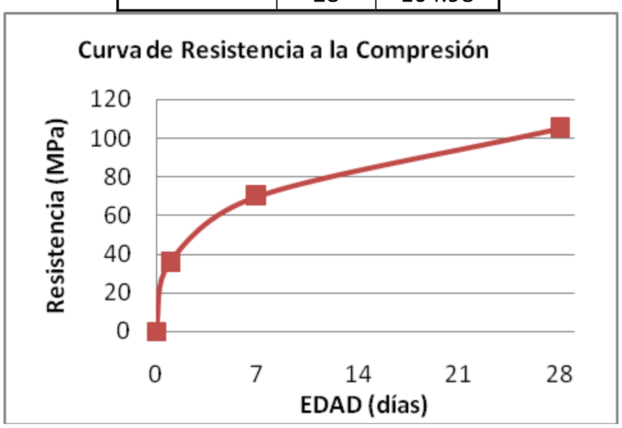

Figura 12. Resistencia Compresión Cilindros

MUESTRA	EDAD (días)	f'c (Mpa)
1	3	73.86
	7	106.13
	28	143.20

Figura 13. Compresión Cubos

3.2. Tracción por Compresión Diametral.

TRACCION POR COMPRESION DIAMETRAL			
MUESTRA	D (mm)	H (mm)	RESISTENCIA (Mpa)
1	101	204	15.14
	101	204	16.56
2	100	203	16.11
	102	203	18.41

Figura 14. Resultados de Tracción por Compresión Diametral

Se evidencia una alta resistencia a la tracción, dado que las fibras proveen al HPR de una mayor capacidad en este parámetro no usual en un hormigón convencional.

3.3. Flexión.

Para llevar a cabo este ensayo y determinar su resistencia se probaron con vigas de 16X4X4 cm de dimensiones, los resultados se detallarán a continuación en la figura 15.

MUESTRA	EDAD (días)	Resist. (Mpa)
1	3	16.32
	7	20.65
	28	25.18

Figura 15. Resultados de Resistencia a la Flexión.

3.3. Módulo de Elasticidad

A continuación se presenta la curva esfuerzo – deformación unitaria en la figura 16.

E = 46,3 GPa

Figura 16. Determinación Módulo Elasticidad

4. Conclusiones

Se puede concluir que el HPR tiene amplias ventajas respecto a los hormigones convencionales y a los de alto desempeño, basta con solo ver los resultados obtenidos para deducir que se pueden disminuir secciones en los elementos estructurales, así como también disminuir el acero depasivo de flexión, cortante y confinamiento

La excelente ductilidad y la buena resistencia a la flexión presentes en el HPR se puede a la vez también disminuir secciones de losas de amplio espesor.

5. Agradecimientos.

Al Ing Hugo Egüez por sus grandes enseñanzas y guía en el desarrollo del proyecto, a los Ing. Eduardo Arellano y Martha Touma por su incondicional ayuda en el apoyo de los ensayos realizados, así como también al personal que forma parte del CTH mis sinceros agradecimientos.

6. Abreviaturas

ACI: American Concrete Institute.
ASTM: American Standard Testing Materials
CTH: Centro Técnico del Hormigón
E: Módulo de Elasticidad
f'c: Resistencia a la Compresión
HAD: Hormigón de Alto Desempeño
HAR: Hormigón de Alta Resistencia
HPR: Hormigón con Polvo Reactivo.
HUAD: Hormigón de Ultra Alto Desempeño.
MPa: Mega Pascales

7. Referencias.

[1] www.concrete.0catch.com/capitulo1.htm

[2] www.imcyc.com/revista/1999/nov99/multiple1.htm

[3] Kosmatka, S., Herkhoff, B., Panarese, W., y Tanesi, J (2004). *"Diseño y Control de Mezclas de Concreto"* Boletín de Ingeniería EB201.

[4] Kosmatka, S., Herkhoff, B., Panarese, W., y Tanesi, J (2004). *"Diseño y Control de Mezclas de Concreto"* Boletín de Ingeniería EB201.

[5] US. DEPARTMENT TRANSPORTATION (2006). *"Structural Behavior of Ultra-High Performance Concrete Prestressed I-Girders"* Publication NO. FHWA-HRT-06-115

[6] www.la.cc.basf.com/paises/Venezuela/productos

[7] Neville, A. (1999), *"Tecnología del Concreto"*

[8] Kosmatka, S., Herkhoff, B., Panarese, W., y Tanesi, J (2004). *"Diseño y Control de Mezclas de Concreto"* Boletín de Ingeniería EB201.

[9] Kosmatka, S., Herkhoff, B., Panarese, W., y Tanesi, J (2004). *"Diseño y Control de Mezclas de Concreto"* Boletín de Ingeniería EB201.

[10] Kosmatka, S., Herkhoff, B., Panarese, W., y Tanesi, J (2004). *"Diseño y Control de Mezclas de Concreto"* Boletín de Ingeniería EB201.