

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra

“Comportamiento de hormigón simple mezclado con polvo
reactivo”

TESIS DE GRADO

Previo a la obtención del Título de:

INGENIERO CIVIL

Presentada por:

Angel Marcelo Ordóñez Crespo

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2009

AGRADECIMIENTO

Al personal que forma parte del Centro Técnico del Hormigón por su incondicional ayuda y en especial al Ing. Hugo Egüez Alava por su invaluable guía y apoyo en el desarrollo del presente trabajo.

DEDICATORIA

A mis padres quienes me apoyaron en todo momento en todos los estudios que he realizado y a la vez han sido un ejemplo de superación para alcanzar este propósito.

A mis hermanos y amigos quienes fueron un apoyo adicional para mí.

TRIBUNAL DE GRADUACIÓN

Ing. Gastón Proaño C.
SUBDECANO DE LA FICT
PRESIDENTE

Ing. Hugo Egüez Alava.
DIRECTOR DE TESIS

Ing. José Camposano L.
VOCAL

Ing. Xavier Arce P.
VOCAL

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de esta Tesis de Grado, me corresponden exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

Angel Marcelo Ordóñez Crespo

RESUMEN

El presente trabajo 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, tracción, flexión, resistencia a los sulfatos y a la reacción álcali – sílice.

Esta tesis 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.

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN.....	II
ÍNDICE GENERAL.....	III
ABREVIATURAS.....	VII
SIMBOLOGÍA.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
CAPÍTULO 1	
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Antecedentes.....	3
1.1.1 Historia del Cemento Portland.....	3
1.1.2 Hormigón de alto desempeño.....	6
1.1.3 Hormigón de alta resistencia.....	8
1.2 Hormigón con Polvo Reactivo. Definición.....	9
1.3 Ventajas en su Utilización.....	10

CAPÍTULO 2	15
2. USOS.....	15
2.1 Hormigón Estructural.....	16
2.2 Elementos Prefabricados.....	18
2.3 Vías de Comunicación.....	20
2.3.1 Reducción de Costos.....	20
2.3.2 Durabilidad.....	22
2.3.3 Competitividad.....	22
2.3.4 Estética.....	23
CAPÍTULO 3	25
3. MATERIALES.....	25
3.1 Cemento.....	25
3.1.1 Cemento Tipo I.....	25
3.1.2 Cemento Tipo III.....	27
3.1.2.1 Usos y Aplicaciones.....	28
3.1.2.2 Ventajas.....	29
3.2 Agregados.....	30
3.2.1 Arena Fina de Cuarzo.....	31
3.2.2 Polvo Reactivo.....	33
3.2.3 Humo de Sílice.....	34

3.3 Agua Utilizada.....	37
3.4 Fibras Metálicas.....	39
3.5 Aditivo.....	42
CAPÍTULO 4	46
4. DISEÑO Y ENSAYOS EXPERIMENTALES EN EL HORMIGON...	46
4.1 Diseño del Hormigón.....	47
4.1.1 Consideraciones de Diseño.....	47
4.1.2 Dosificación.....	48
4.1.3 Elaboración.....	49
4.2 Ensayos Experimentales.....	51
4.2.1 Resistencia.....	51
4.2.1.1 Resistencia a la Compresión.....	51
4.2.1.2 Resistencia a la Tracción Indirecta.....	54
4.2.1.3 Resistencia a la Flexión.....	55
4.2.2 Módulo de Elasticidad.....	57
4.2.3 Resistencia a los Sulfatos.....	58
4.2.4 Reacción Alkali – Sílice.....	59
CAPÍTULO 5	62
5. RESULTADO Y ANALISIS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS.....	62
5.1 Compresión Simple.....	63

5.2 Tracción Indirecta.....	66
5.3 Flexión.....	68
5.4 Módulo de Elasticidad.....	71
5.5 Resistencia a los Sulfatos.....	74
5.6 Reacción Alkali – Sílice.....	75
CAPÍTULO 6	
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	77
BIBLIOGRAFÍA.....	

ABREVIATURAS

ACI	American Concrete Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
CTH	Centro Técnico del Hormigón
cm	centímetro
dm ³	decímetro cúbico
etc.	etcétera
GPa	Giga Pascal
HAD	Hormigón de Alto Desempeño
HAR	Hormigón de Alta Resistencia
HPR	Hormigón con Polvo Reactivo
HUAD	Hormigón de Ultra Alto Desempeño
Kg / cm ²	Kilogramo – centímetro cuadrado
Kg / m ³	Kilogramo – metro cúbico
KN	Kilo Newton
lt	litro
m/ s ²	metro – segundo cuadrado
m ² /Kg	metro cuadrado - kilogramo
m ³	metro cúbico
mm	milímetro
MPa	Mega Pascal
MF	Módulo de finura
MR	Módulo de rotura
S-C-H	Silicato de calcio hidratado
TCD	Tracción por compresión diametral

SIMBOLOGÍA

a	ancho
a/c	Relación agua-materiales cementantes
$\text{Al}_2 \text{O}_3$	Trióxido de aluminio
CaO	Óxido de calcio
$\text{C}_3 \text{A}$	Aluminato tricálcico
$\text{C}_3 \text{S}$	Silicato tricálcico
$\text{Fe}_2 \text{O}_3$	Óxido férrico
f'c	Resistencia a la compresión
g	gravedad
E	Módulo de elasticidad
L	Luz
MgO	Óxido de magnesio
No.	Número
Q	Carga
R	Resistencia
SO_3	Anhídrido sulfúrico
Si O_2	Dióxido de silicio
μm	micrómetro
"	pulgada
%	porcentaje

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1.1	Hormigón del período romano 6
FIGURA 1.2	Módulos de “E” de materiales dúctiles y frágiles 12
FIGURA 2.1	Edificio Taipei 101 – Taiwan 17
FIGURA 2.2	Comparación de secciones de la misma capacidad de momento..... 19
FIGURA 2.3	Puente de la Paz – Corea del Sur..... 20
FIGURA 3.1	Cemento tipo I..... 26
FIGURA 3.2	Arena fina de cuarzo..... 32
FIGURA 3.3	Curva granulométrica de la arena fina de cuarzo..... 32
FIGURA 3.4	Polvo reactivo proveniente de la trituración de arena de cuarzo..... 34
FIGURA 3.5	Humo de sílice..... 35
FIGURA 3.6	Agua utilizada..... 38
FIGURA 3.7	Fibras metálicas 40
FIGURA 3.8	Ensayos experimentales de la fibra de acero 42
FIGURA 3.9	Aditivo súperplastificantes GLENIUM 3000NS 44
FIGURA 4.1	Mezcla de los componentes del HPR 50
FIGURA 4.2	Ensayo de compresión simple..... 52
FIGURA 4.3	Ensayo de compresión de fragmentos de vigas a manera de cubos..... 53
FIGURA 4.4	Ensayo del HPR de tracción por compresión diametral. 55
FIGURA 4.5	Ensayo a flexión de vigas pequeñas de HPR..... 56
FIGURA 4.6	Ensayo para determinación de módulo elástico..... 57
FIGURA 4.7	Barras de HPR que serán ensayadas a resistencia a sulfatos y reacción álcali – sílice..... 59
FIGURA 5.1	Rotura de cilindros por compresión simple 63
FIGURA 5.2	Resistencia a la compresión simple de cilindros de 10x20 cm..... 64
FIGURA 5.3	Resistencia a la compresión cubos de fibra pequeña.... 65
FIGURA 5.4	Resistencia a la compresión cubos de fibra grande..... 66
FIGURA 5.5	Rotura de cilindros por tracción por compresión

	diametral.....	67
FIGURA 5.6	Resistencia a la flexión de vigas de fibra pequeña.....	69
FIGURA 5.7	Resistencia a la flexión de vigas de fibra grande.....	70
FIGURA 5.8	Rotura a flexión de viga de 16x4x4 cm	71
FIGURA 5.9	Vista inferior de la fisura de la viga ensayada a flexión..	71
FIGURA 5.10	Curva Esfuerzo-Deformación cilindro fibra pequeña.....	72
FIGURA 5.11	Curva Esfuerzo-Deformación cilindro fibra grande.....	73
FIGURA 5.12	Deformación de barras de HPR versus el tiempo debido a la acción de los sulfatos.....	74
FIGURA 5.13	Deformación de barras de HPR versus el tiempo debido a la reacción álcali – sílice.....	75

ÍNDICE DE TABLAS

		Pág.
TABLA 2.1	Número de edificios altos de cada país con su respectiva población	18
TABLA 3.1	Composición química del cemento tipo I	27
TABLA 3.2	Composición química del cemento tipo III	30
TABLA 3.3	Composición de las fibras metálicas	41
TABLA 4.1	Proporcionamiento del HPR	49
TABLA 5.1	Tabla de datos de resistencia a la compresión simple de cilindros de 10x20 cm.....	64
TABLA 5.2	Datos de resistencia a la compresión de cubos de 4x4 cm de HPR de fibra pequeña.....	65
TABLA 5.3	Datos de resistencia a la compresión de cubos de 4x4 cm de HPR de fibra grande.....	66
TABLA 5.4	Datos de resistencia a la tracción por compresión diametral	67
TABLA 5.5	Datos de resistencia a la flexión de vigas con fibra pequeña.....	69
TABLA 5.6	Datos de resistencia a la flexión de vigas con fibra grande.....	70
TABLA 5.7	Datos de esfuerzo – deformación unitaria de cilindro fibra pequeña.....	72
TABLA 5.8	Datos de esfuerzo – deformación unitaria de cilindro fibra grande.....	73

CAPITULO 1

1. INTRODUCCION

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.

Muchos investigadores han estudiado hormigones que se podrían clasificar como los HUAD, dando por sentado las siguientes características:

- Resistencia a la Compresión es mayor a 150 MPa,
- Tienden a tener menor Relación a/c (Agua/Cemento), esto es posible con la inclusión de un súper plastificante de alto rango.

El presente trabajo engloba el estudio de un tipo de Hormigones HUAD que es específicamente el Hormigón de 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 por ende disminuye el peso de la estructura, aumentar luces en las vigas, lo cual implica disminuir 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.

Otra propiedad importante es la durabilidad, ya que de esta propiedad depende la vida útil de la obra civil que se edifique.

1.1 ANTECEDENTES

1.1.1 HISTORIA DEL CEMENTO PORTLAND

Hasta el siglo XVIII puede decirse que los únicos conglomerantes empleados en la construcción fueron los yesos y las cales hidráulicas, sin embargo, es durante este siglo cuando se despierta un interés notable por el conocimiento de los cementos.

John Smeaton, ingeniero de Yorkshire (Inglaterra), al reconstruir en 1758 el faro de Eddystone en la costa de Cornish, se encuentra con que los morteros formados por la adición de una puzolana a una caliza con alta proporción de arcilla eran los que mejores resultados daban frente a la acción de las aguas marinas y que la presencia de arcilla en las cales, no sólo las perjudicaba sino que por el contrario, las mejoraba, haciendo que estas cales fraguasen bajo el agua y que una vez endurecidas fuesen insolubles en ella.

Puede decirse con acierto que el primer padre del cemento fue Vicat a él se debe el sistema de fabricación que se sigue empleando en la actualidad y que propuso en 1817. Vicat fue un gran investigador y divulgador de sus trabajos; en 1818 publicó su "Recherches experimentales" y en 1828 "Mortiers et ciments

calcaires". En estos trabajos marca la pauta a seguir en la fabricación del cemento por medio de mezclas calizas y arcillas dosificadas en las proporciones convenientes y molidas conjuntamente. El sistema de fabricación que empleó Vicat fue el de vía húmeda y con él marcó el inicio del actual proceso de fabricación. Este gran científico en 1853 empieza a estudiar la acción destructiva del agua de mar sobre el mortero y hormigón.

En 1824, Joseph Aspdin, un constructor de Leeds en Inglaterra, daba el nombre de cemento portland y patentaba un material pulverulento que amasado con agua y con arena se endurecía formando un conglomerado de aspecto parecido a las calizas de la isla de Portland. Probablemente, el material patentado por Aspdin era una caliza hidráulica debido, entre otras cosas, a las bajas temperaturas empleadas en la cocción.

En 1838 Brunel emplea por primera vez un cemento procedente de la fábrica de Aspdin en el que se había logrado una parcial sinterización por elección de una temperatura adecuada de cocción. Este cemento se aplicó en la construcción de un túnel bajo el río Támesis en Londres.

Puede decirse que el prototipo del cemento moderno fue producido a escala industrial por Isaac Johnson quien en 1845 logra conseguir temperaturas suficientemente altas para clinkerizar a la mezcla de arcilla y caliza empleada como materia prima.

El intenso desarrollo de la construcción de ferrocarriles, puentes, puertos, cemento y las fábricas de éste, especialmente las de cemento natural, empiezan a extenderse por doquier.

Es a partir de 1900 cuando los cementos portland se imponen en las obras de ingeniería y cuando empieza un descenso veloz del consumo de cementos naturales.

Actualmente, el cemento portland ha llegado a una gran perfección y es el material industrializado de construcción de mayor consumo. Se puede decir que el cemento es el alma del hormigón, yendo destinada, prácticamente, toda su producción a enlazar piedras sueltas para crear el material pétreo que conocemos como hormigón.

Las investigaciones llevadas a cabo por los padres del cemento Michaelis y Le Chatelier, en 1870 y 1880, fueron fundamentales y

muy meritorias para el desarrollo de este material. En ellas se apoya toda la investigación actual que emplea técnicas de análisis muy sofisticadas y rápidas (1).



FIGURA 1.1. Hormigón del período romano

1.1.2 HORMIGON DE ALTO DESEMPEÑO

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.

Un concreto de alto desempeño es un concreto en el cual ciertas características son desarrolladas para una aplicación y medioambiente particular.

Ejemplos de estas características que pueden ser consideradas críticas para una aplicación son:

- Facilidad de colocación
- Compactación sin segregación.
- Propiedades mecánicas a largo plazo
- Resistencias iniciales
- Permeabilidad
- Densidad
- Calor de hidratación
- Dureza
- Estabilidad volumétrica.
- Gran periodo de vida de servicio en un medioambiente severo.

Dado que muchas de las características de un concreto de alto desempeño son interrelacionadas, un cambio en una sola usualmente resulta en cambios en una o más de otras características. Consecuentemente, si muchas características tienen que ser tomadas en cuenta en la producción de concreto para una aplicación, cada una de estas características debe ser claramente especificada en los documentos contractuales (2).

1.1.3 HORMIGON DE ALTA RESISTENCIA (HAR)

Son aquellos que tienen una resistencia a la compresión mayor a los 70 MPa son usados en estructuras en las cuales los requerimientos estructurales superan las resistencias de los concretos convencionales (3). 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. Los HAR tienen por lo general relaciones agua/cemento menores a 0.40 ayudados por el uso de superplastificantes y adiciones, tales como humos de sílice, escoria de alto horno granulada molida y ceniza volante. Debido a la baja relación agua/cemento el producto presenta no solo alta resistencia sino que también una muy alta impermeabilidad, esta

es la clave para la durabilidad a largo plazo en medio ambientes agresivos.

1.2 HORMIGON DE POLVO REACTIVO. DEFINICION

Son concretos de ultra alto desempeño que se caracterizan por su alta resistencia y baja porosidad, las cuales se logran con la mejoría del empaquetamiento de las partículas y el bajo contenido de agua. Su resistencia a la compresión excede los 150 MPa y la resistencia a la flexión excede los 30 MPa.

Estas propiedades del Hormigón con Polvo Reactivo se alcanzan a través de:

- Eliminación de los agregados gruesos; solo se emplean partículas muy finas, tales como arena, cuarzo triturado y humo de sílice, todos con tamaño de partícula entre 0.02 y 300 μ m.
- Mejoría de la distribución de los tamaños de los granos a fin de densificar la mezcla.
- Adición de fibras de acero de alta resistencia alrededor del 6% del peso del hormigón.

- Uso de un superplastificante para disminuir la relación agua/cemento, normalmente alrededor de 0.2, mientras que mejora la reología de la pasta.

La durabilidad es una propiedad que provee a las estructuras de una mejor serviciabilidad del elemento a edificarse y en este tipo de hormigón esta característica se presenta con un mejor desempeño.

Debido a su ductilidad, dependiendo el elemento permitiría en ciertos casos reducir o eliminar el cierto reforzamiento en las estructuras bajo determinadas circunstancias.

En general, el hormigón con polvo reactivo presenta mejores características como resistencias, ductilidad, así como también un mejor comportamiento contra ambientes agresivos (4).

1.3 VENTAJAS EN SU UTILIZACION

A continuación se describirán las ventajas más relevantes en la utilización de este tipo de hormigón (5):

Manejabilidad: Esta característica en el hormigón determina el hecho de una mejor facilidad en la colocación y debido a que tiene propiedades autocompactantes disminuye el tiempo de vibración y de fundición de

algún elemento, esto es posible por la utilización de un súper plastificante de alto rango.

Impermeabilidad: Los Hormigón con polvo reactivo por poseer ingredientes finos, pero obviamente unos más que otros, esto ayuda a que posea un mejor empacamiento en las partículas que lo constituyen y por ende una baja porosidad y a la vez la impermeabilidad que evitaría daños en la armadura o en la estética de la obra civil.

Altas Resistencias Iniciales: El costo adicional del concreto de alta resistencia se compensa con la posibilidad de reutilización de encofrados y puntales más rápidamente, fraguado más rápido que permite que se empiece el acabado más temprano y pronto uso de la estructura.

Durabilidad: Se refiere a la capacidad del hormigón de resistir el deterioro causado por el ambiente o por las condiciones de servicio en los cuales se coloca. El hormigón adecuadamente diseñado debería durar sin daños significativos durante su vida útil (de servicio), lo cual la durabilidad cumple un papel tan fundamental como lo es la resistencia del hormigón.

Módulos elásticos elevados: El comportamiento de una estructura bajo carga depende en gran medida de la relación esfuerzo-deformación del material del que se compone y del tipo de esfuerzos al que el material está sometido en la estructura. Los hormigones de ultra alto desempeño tienen la característica de desarrollar la deformación elástica obteniendo así módulos de elasticidad elevados.

Ductilidad: Se dice que un sistema estructural es dúctil cuando es capaz de soportar deformaciones importantes bajo carga prácticamente constante, sin alcanzar niveles excesivos de daños (6).

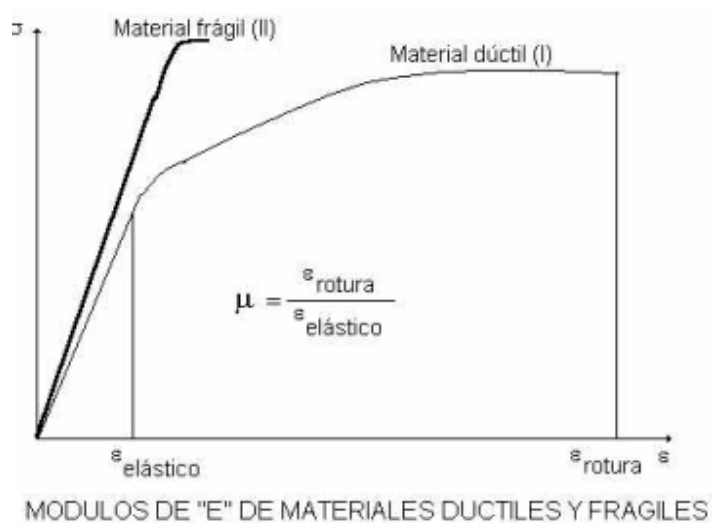


FIGURA 1.2. Módulos de "E" de materiales dúctiles y frágiles (6).

La curva (I) de la figura representa un comportamiento inicial dúctil, opuesto al del material representado en la curva (II), que tiene un comportamiento frágil.

De las curvas carga-deformación para el primer ciclo de carga, no puede conocerse un comportamiento dúctil en ciclos posteriores, puesto que en los ciclos siguientes de carga pueden producirse deterioros de rigidez y resistencia.

La fibra metálica utilizada en el Hormigón con Polvo Reactivo provee las siguientes propiedades en este tipo de hormigón y se detallan a continuación:

- Mayor resistencia del hormigón fisurado a tracción, compresión y tracción.
- Uniformidad del refuerzo en todas las direcciones.
- Mayor protección ante cargas accidentales.
- Excelente resistencia a impactos
- Reducción de la fisuración por retracción.
- Ahorro de materiales debido a menores espesores.
- Posibilidad de hacer menos juntas de corte

Estabilidad Volumétrica: El hormigón común utilizado en las construcciones civiles, experimenta cambios volumétricos leves, pero que pueden afectar la estructura de manera considerable. Estos cambios responden a variación de clima, humedad y factores químicos y físicos externos, en el caso de los HPR se evita o se disminuye estos cambios en lo posible.

CAPITULO 2

2. USOS

Hay que reconocer que el hormigón elaborado con polvo reactivo (HPR) aun está en proceso de experimentación y que las aplicaciones que se le ha dado al momento a este novedoso hormigón de ultra alto desempeño son limitadas a unas cuantas estructuras construidas en el mundo, pero no por ello se dejará de analizar las posibles obras que se podrían realizar en un futuro no muy lejano. La tecnología del hormigón está avanzando bastante con el pasar de los años y tal como se aprecia en las Figuras 2.2 y 2.3 se pueden evidenciar dos claros ejemplos de los usos que se han realizado hasta ahora del HPR.

El presente capítulo está dedicado a mostrar las obras que se pueden o se podrían realizar con la utilización de Hormigones con Polvo Reactivo.

Primeramente se enlistan las posibles ventajas de un concreto de ultra alto desempeño, posteriormente se describe cada una de estas.

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; por lo cual el motivo del presente capítulo es mostrar efectivamente estas ventajas y dar una opinión de las posibles perspectivas de desarrollo de estas tecnologías en el Ecuador.

2.1 HORMIGON ESTRUCTURAL

En esta sección describimos las ventajas obtenidas con el uso de concretos de alto desempeño en estructuras de edificaciones altas, la construcción de edificaciones de gran altura se ha difundido a nivel mundial, por lo cual los requerimientos de resistencia han aumentado, actualmente existen más de 15000 edificios altos en todo el mundo, sin embargo como se ve en la siguiente tabla es en Norteamérica donde se encuentra la mayor cantidad de estos; es importante destacar que solo 25% de estos edificios son construidos con concreto, sin embargo en los últimos años la tendencia hacia el uso del concreto ha aumentado siendo

en el año 2002, la construcción de edificios de concreto un 50% del total de edificaciones de gran altura.



FIGURA 2.1. Edificio Taipei 101 – Taiwan (7)

A continuación se presenta una tabla que denota la cantidad de edificios altos y a la vez la población que tiene su respectivo país.

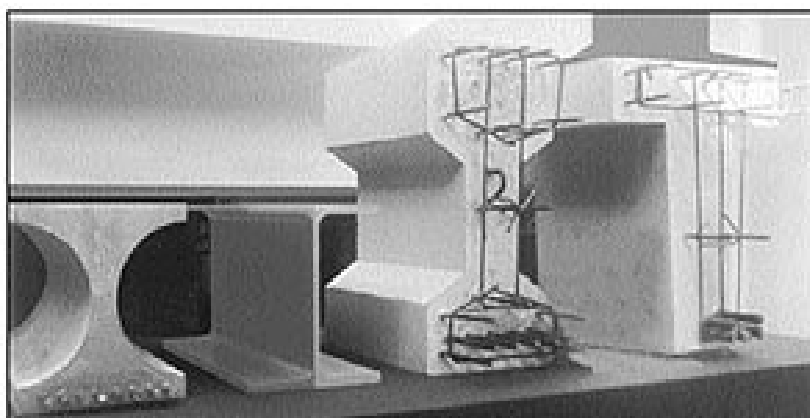
País	Población	Edificios.	País	Población	Edificios.
1 United States	292,197,695	6,783	11 <u>Japan</u>	127,291,000	269
2 Canada	31,714,637	2,070	12 <u>Malaysia</u>	20,932,901	250
3 China	1,295,330,000	1,861	13 <u>Mexico</u>	97,483,412	236
4 UK	58,789,194	1,134	14 South Africa	40,583,611	225
5 Germany	82,558,000	711	15 Spain	40,847,371	217
6 Netherlands	16,234,219	430	16 South Korea	46,416,796	197
7 Australia	19,485,300	425	17 Austria	8,032,926	192
8 Brazil	169,799,170	390	18 New Zealand	4,038,671	185
9 Russia	145,181,900	381	19 EAU	2,411,000	181
10 Turkey	65,293,000	288	20 Italy	56,995,744	163

TABLA 2.1. Número de edificios altos de cada país con su respectiva población (9).

2.2 ELEMENTOS PREFABRICADOS

Los actuales elementos estructurales prefabricados que son utilizados a manera de vigas pretensadas de puentes y edificios han sido diseñados para el hormigón con propiedades de resistencia mucho menor como es el caso de los hormigones convencionales.

Existe en la actualidad con los HUAD la oportunidad para introducir nuevas formas en el diseño del elemento pretensado. Una viga de HPR pretensado, con una sección transversal en forma de X y sin ningún tipo de barra de acero de refuerzo secundaria, fue configurado y probado para llevar la igualdad de capacidad del momento en comparación con su viga homóloga de acero con la misma profundidad y muy cerca de su peso. Mediante el uso de HPR, las dimensiones de las alas y el alma se pueden reducir en un 50 por ciento y su peso en un 75 por ciento en comparación con el hormigón convencional (8).



Section Parameters	RPC X-shaped	Steel wide-flange	Prestressed concrete	Reinforced concrete
Section Depth	360 mm	360 mm	700 mm	700 mm
Weight	130 kg/m	110 kg/m	470 kg/m	530 kg/m

Comparison of beam cross sections of equal moment capacity

FIGURA 2.2. Comparación de secciones de la misma capacidad de momento (8)

2.3 VIAS DE COMUNICACION

En esta sección describimos las ventajas obtenidas con el uso de hormigones de ultra alto desempeño (HUAD) en estructuras de puentes o vías de comunicación.



FIGURA 2.3. Puente de la Paz - Corea del Sur (7)

Los hormigones con Polvo Reactivo (HPR) (ultra alto desempeño) ofrecen al propietario, ingeniero diseñador y constructor muchas ventajas sobre otros materiales o sobre el hormigón convencional, a continuación destacamos algunas de estas:

2.3.1 REDUCCION DE COSTOS

Más allá del costo inicial dadas las consideraciones de construcción, los hormigones de alto desempeño ofrecen adicionalmente la ventaja de reducir los costos del ciclo de vida de la estructura. A diferencia del acero, el hormigón de ultra alto desempeño tiene un bajo costo de mantenimiento dada su superior durabilidad, por lo cual un (HUAD) es un material competitivo respecto a sus costos.

A continuación se detalla las ventajas de usar este tipo de hormigón con polvo reactivo en lo que a costo se refiere:

- **Minimiza el mantenimiento:** En los puentes de acero y de concreto convencional se hace necesario un mantenimiento en un periodo de vida no muy largo, así como un pintado rutinario en las estructuras de acero, para evitar la corrosión, en el Ecuador la política de mantenimiento de los puentes es muy escasa y casi nula por lo cual varias estructuras no han cumplido su periodo de vida o han requerido un mantenimiento muy temprano, un ejemplo claro de esto es el deterioro que han sufrido algunos de los puentes que cruzan hacia Guayaquil, en los cuales se encuentran daños por carbonatación.

- **Construcción de vigas de mayores longitudes:** Dada su mayor resistencia los HUAD permiten alcanzar mayor longitudes de vigas sin apoyos, reduciendo así el costo.
- **Vida de servicio extendida:-** Dada su mayor durabilidad y mayor resistencia, las construcciones con HUAD tendrán una mayor resistencia al ataque de agentes externos así como también una mayor resistencia a las fallas por fatiga, por lo cual se puede diseñar puentes que no tendrán grave deterioro por periodos tan largos como 100 años con un bajo mantenimiento.

2.3.2 DURABILIDAD

Los HUAD ofrecen gran tolerancia ante el amplio rango de factores medioambientales, los cuales causarían un proceso de deterioro en un hormigón convencional. Los puentes elaborados con HUAD 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 HUAD.

2.3.3 COMPETITIVIDAD

El hormigón de ultra alto desempeño es una gran alternativa para áreas geográficas donde el acero domina las construcciones de puentes de tramos largos. Pudiendo generar los siguientes beneficios:

- **Valor.-** Desde un costo inicial menor hasta una vida de servicio extendida, el concreto de alto desempeño es más económico que el acero, y comparado con el concreto convencional el uso de un concreto de alto desempeño puede generar menor secciones y más largos tramos por lo cual el conjunto de la obra puede ser más económico.
- **Calidad.-** Un material durable en una variedad de aplicaciones, el concreto de alto desempeño es una opción práctica.
- **Eficiencia en la construcción.-** El uso de elementos prefabricados pretensados de concreto pueden ayudar a reducir los tiempos de construcción y los costos por la prefabricación de segmentos iguales.

2.3.4 ESTETICA

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, por lo cual los concretos de alto desempeño no solo ofrecen funcionalidad, si no también innovación (FIGURA 2.2).

A continuación se describen los puntos a favor del Hormigón de Polvo Reactivo correspondiente a la estética que le da a los elementos que se construyeren:

- **Distinción de la arquitectura.-** La adaptabilidad del hormigón a diferentes formas hace que cada puente presente una apariencia singular.
- **Distingue a la comunidad.-** La construcción de una obra como un Puente con un gran criterio arquitectónico, como el de un puente atirantado distingue a la localidad donde se ubica.
- **Promueve el desarrollo económico y turístico.-** Las regiones con una infraestructura eficiente atrae al desarrollo (9).

CAPITULO 3

3. MATERIALES

3.1 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.

Es muy importante que el cemento empleado tenga una elevada resistencia y uniformidad, de los cuales se van a citar los siguientes mejor opcionados para su utilización en el HPR.

3.1.1 CEMENTO TIPO I

El cemento Portland Tipo I es admirablemente adecuado para la construcción general de concreto cuando no hay exposición a

sulfatos o aguas freáticas. La especificación de este cemento está en la norma ASTM C150. Es un cemento Portland Tipo I, resultante de la molienda conjunta de clínker, yeso y adiciones (10).



FIGURA 3.1. Cemento tipo I

Entre los usos que se pueden citar están los siguientes:

- Producción de concretos y morteros tanto para estructuras como para acabados.
- Ideal en la producción de pequeños elementos prefabricados.

- Durante la hidratación del cemento, da un incremento en las resistencias finales, aun después de los 28 días.
- Da mejores tiempos de fraguado que permiten un manejo adecuado (transporte, colocación, compactación y afinado), sin que se presente pérdida de movilidad prematura.
- Por tener un diseño estable de mezclas, a través del tiempo resulta un producto uniforme.
- Da mayor durabilidad derivada de mezclas más densas y de su manejabilidad, cuando se le adiciona materiales puzolánicos.

A continuación se presenta la composición química del cemento tipo I (11):

COMPUESTO	PORCENTAJE
Oxido de Calcio (CaO)	60-70
Dióxido de silicio (Si O ₂)	19-24
Trióxido de aluminio (Al ₂ O ₃)	4-7
Oxido férrico (Fe ₂ O ₃)	2-6
Oxido de magnesio (MgO)	<5

TABLA 3.1. Composición química del cemento tipo I (11).

3.1.2 CEMENTO TIPO III

El cemento Portland tipo III es un cemento obtenido por la pulverización de clinker Portland especial, el cual consiste esencialmente en silicatos de calcio hidráulico, con la adición de sulfato de calcio. Posee mayor resistencia a la compresión inicial y final debido a la combinación de su composición química, de las características de sus minerales y su alta finura, las cuales son conferidas por utilizar materias primas óptimas, por la tecnología de los equipos de procesamiento y por un proceso de fabricación altamente controlado (12).

3.1.2.1 USOS Y APLICACIONES

Este cemento puede ser utilizado en construcciones generales de concreto convencionales, tales como: Estructuras, placas, muros, fundaciones, etc.; pero dadas sus características y bondades de alta resistencia es muy conveniente para los siguientes casos:

- Estructuras con requerimientos de alta resistencia mecánica inicial y/o final; y de alta capacidad estructural, tales como: estructuras prefabricadas, elementos postensados, puentes, viaductos y losas.

- En estructuras en donde se necesite retirar el encofrado o cimbras en pocas horas de haber vaciado el concreto.
- En obras con requerimientos de puesta en servicio a temprana edad del concreto, tales como: carreteras, puentes y pontones.
- En plantas de elementos prefabricados de hormigón, tales como: bloques, tubos, etc.; cuya exigencia de producción en serie y pronta entrega de los elementos exigen el uso de un cemento que haga más eficiente los procesos.

3.1.2.2 VENTAJAS

El cemento Portland tipo III es un cemento que supera en requisitos físico-químicos al resto de los cementos producidos, con la mayor resistencia a la compresión y mayor estabilidad. Se mencionan los siguientes beneficios para el usuario:

- Incrementa la durabilidad (vida útil) de las obras mediante el diseño y utilización de concretos de alta resistencia y ultra alta resistencia.

- El retiro de encofrados en pocas horas, disminuye los tiempos de ejecución mejorando los rendimientos y economía de la obra.
- Pronta puesta en servicio de obras públicas, caso de carreteras, puentes, túneles, etc.
- Mejora la productividad y eficiencia en plantas hormigoneras y de prefabricados.

A continuación se presenta la composición del cemento tipo III:

COMPOSICIÓN	PORCENTAJE
Oxido de calcio (CaO)	64-67
Oxido de silicio (Si O ₂)	20-22
Oxido de aluminio (Al ₂ O ₃)	4-6
Oxido férrico (Fe ₂ O ₃)	3-4
Oxido de magnesio (MgO)	1-3
Anhídrido sulfúrico (S O ₃)	2.5-3.5
Residuo Insoluble	1-1.3
Aluminato Tricálcico (C ₃ A)	9-13
Silicato Tricálcico (C ₃ S)	55-65

TABLA 3.2. Composición química del cemento tipo III (12).

3.2 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. En los HPR, los agregados deben cumplir las normas como la ASTM C 33, caso contrario se deberá comprobar su eficiencia en el concreto. Es recomendable que en una obra, todas las mezclas empleen los mismos agregados.

3.2.1 ARENA FINA DE CUARZO

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 es limitado a 600 μ m, pero no menor a 150 μ m. Son preferibles las partículas con formas esféricas, lo anterior debido a que se requiere menos cantidad de agua.



FIGURA 3.2. Arena fina de cuarzo

A continuación se presenta la curva granulométrica de la arena fina de cuarzo empleada para el HPR:

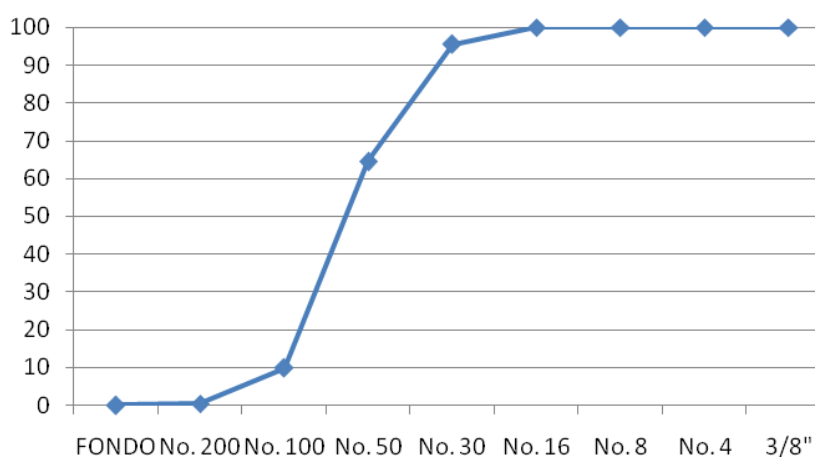


FIGURA 3.3. Curva granulométrica de la arena fina de cuarzo

Teniéndose un módulo de finura de 1.3 para el ensayo de granulometría efectuado. Según ACI 211.4R (13), para el agregado fino el módulo de finura preferentemente debe estar en el rango de 2,5 a 3,2 si se va a elaborar un hormigón de alta resistencia. Hormigones con una granulometría inferior a 2,5 de módulo de finura, la pasta puede ser pegajosa y se traduce en la escasa trabajabilidad y de mayor requerimiento de agua usada, a esta desventaja se la ataca utilizando un súperplastificante de alto rango para revertir esa falta de trabajabilidad. La arena empleada en la dosificación es proveniente de la provincia de Zamora.

3.2.2 POLVO REACTIVO

El polvo de cuarzo triturado es el componente complementario de la mezcla. El beneficio que este brinda al hormigón es realmente su bajo costo, mejora el empaquetamiento, y además es una excelente pasta de gran dureza. El diámetro de las partículas de polvo de cuarzo es del orden de 10-15 μ m.

Este elemento proviene de la molienda de arena de cuarzo, se obtuvo que el 99% del material pasó la malla No. 325.



FIGURA 3.4. Polvo reactivo proveniente de la trituración de arena de cuarzo

3.2.3 HUMO DE SILICE

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, es extraído de los gases de escape de los calderos.

El humo de sílice consiste de partículas vidriosas muy finas con una superficie específica del orden de los $20.000 \text{ m}^2/\text{Kg}$, la cual es medida mediante técnicas de adsorción de nitrógeno.

La distribución del tamaño de las partículas de un humo de sílice típico indica que la mayoría de las mismas son menores a un micrón ($1 \mu\text{m}$), con un diámetro promedio de casi $0,1 \mu\text{m}$ que es menor, casi, en 100 veces a la partícula promedio de cemento. El peso específico típico es 2,2 pero puede llegar hasta 2,5. La densidad volumétrica tal como se extrae es de 160 a $320\text{Kg}/\text{m}^3$; sin embargo, también se lo consigue en formas densificadas para aplicaciones comerciales.



FIGURA 3.5. Humo de sílice

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. Se convierte en agente para la nucleación de los hidratos de cemento, reaccionando puzolánicamente con la cal durante su hidratación para formar los compuestos cementicios estables de silicato de calcio hidratado (S-C-H). Asimismo, al reducir el espacio disponible para la formación del S-C-H, se favorece la formación de compuestos internos, de mayor resistencia.

La disponibilidad de reductores de agua de alto rango ha facilitado el uso del humo de sílice como parte del material cementante para producir hormigones de alto desempeño. Los contenidos normales de humo de sílice varían entre 5 y 15 % del peso del cemento.

La utilización del humo de sílice en la producción de hormigones de alto desempeño se incrementó notoriamente en los últimos años. Experiencias de laboratorio y obra indican que el hormigón

con humo de sílice tiene una tendencia marcada a desarrollar fisuras por contracción plástica. Entonces, se hace necesario cubrir rápidamente las superficies expuestas de éste hormigón para prevenir pérdidas rápidas de agua por evaporación.

El humo de sílice, llamado también microsílice y los aditivos que lo contienen han sido utilizados en hormigones para propósitos estructurales, aplicaciones superficiales y como material de reparación en situaciones en donde se requiere resistencia a la abrasión y baja permeabilidad (14).

3.3 AGUA UTILIZADA

Una de las principales características de los HPRs es la mínima cantidad de agua requerida en la mezcla sin que exista un sacrificio en la trabajabilidad de esta. Es requerido un porcentaje importante de súper-plastificante para vencer la floculación causada por las cargas eléctricas en la superficie de los granos de cemento. La razón de súper-plastificante requerida debe ser alta debido a la poca cantidad de agua utilizada en la mezcla.

El agua empleada en la mezcla debe cumplir que ocupe de manera efectiva el espacio fuera de las partículas de agregado cuando se llega a

estabilizar el volumen bruto del hormigón, es decir, aproximadamente en el tiempo de fraguado.

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.



FIGURA 3.6. Agua utilizada

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 (15).

Acorde al ACI 211.4R (13), muchos investigadores han llegado a la conclusión de que la variable más importante para alcanzar un hormigón de alta resistencia es la relación agua-cemento. Por lo tanto, la mayoría de hormigones de alta resistencia deben contener materiales que no sean cemento. En consecuencia, la relación agua-materiales cementicios debe ser considerado en lugar de la relación agua-cemento, donde los materiales cementicios incluyen cemento, cenizas volantes, humo de sílice entre otros según corresponda. Entonces, como disminuye la proporción de agua-materiales cementicios, la resistencia del hormigón se incrementa.

3.4 FIBRAS METALICAS

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 a la resistencia a la tracción obtenidos dependen no solo del tamaño de fibras sino también del porcentaje de fibras usado por m^3 .



FIGURA 3.7 Fibras metálicas

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 Tabla 3.3. Tenga en cuenta que una delgada capa de latón se aplica a las fibras durante el proceso de fabricación, por lo que las fibras vírgenes puede ser de color oro. Esta capa desaparece durante el proceso de mezcla y ya no es claramente visible durante la fundición de los HPRs (16).

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

TABLA 3.3. Composición de las fibras metálicas (15)

La función a la que van a estar sometidas estas fibras en HPR's exige que éstas tengan una muy alta resistencia a la tracción. El fabricante especifica una resistencia a la tracción mínima de 2600 MPa, y la tensión se llevan a cabo ensayos como medio de control de calidad en la producción de la fibra. Los resultados de tres de estas pruebas se presentan en la Figura 3.8.

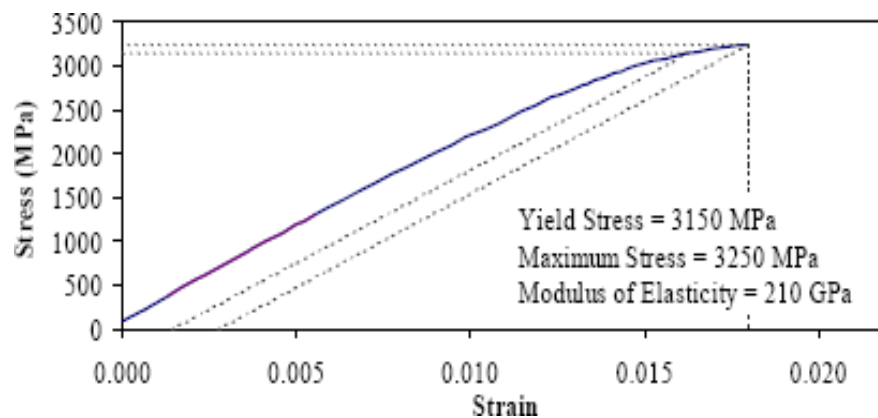


FIGURA 3.8 Ensayos experimentales de la fibra de acero (15)

3.5 ADITIVOS

Los aditivos superplastificantes son aditivos reductores de agua de alto rango. Estos aditivos se adicionan al hormigón que posea una relación agua-cemento baja para producir un hormigón fluido, con alto revenimiento (asentamiento). El hormigón fluido o plástico es un hormigón de consistencia bien fluida, pero trabajable, y que se puede

colocar con poca o ninguna vibración o compactación mientras que se lo mantiene prácticamente libre de sangrado (exudación) o segregación excesivas.

Se recomienda el uso de súper plastificantes cuando se tiene:

- Hormigón con características de fraguado rápido, mejor apariencia superficial y desarrollo de resistencias acelerado
- Hormigón donde el control de trabajabilidad y el tiempo de fraguado son críticos
- Hormigón donde sea necesaria una reducción de agua de alto rango (12 a 40%)
- Hormigón donde se requieran altas resistencias tempranas y últimas y un incremento en la durabilidad
- Producción de mezclas de Hormigón autocompactante.

El aditivo que se escogió para el HPR's fue el Glenium 3000 NS que es un reductor de agua de alto rango listo para usarse es 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 hormigón 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 (17).

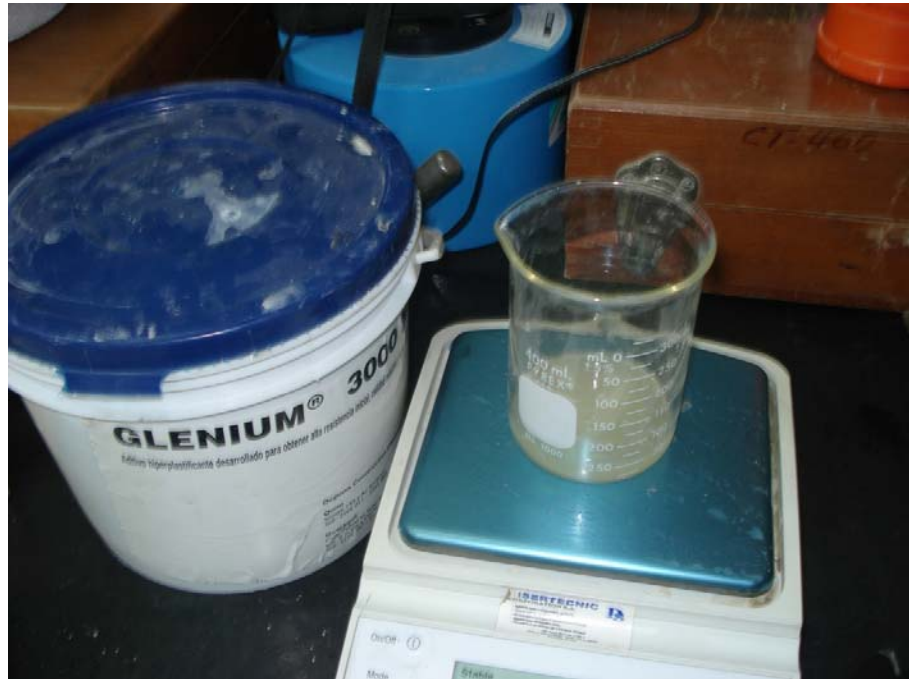


FIGURA 3.9. Aditivo súperplastificantes GLENIUM 3000NS

A continuación se detallan los beneficios de este súperplastificante (18):

- Reducción de agua
- Proporciona una reducción de agua lineal dentro del rango de dosificación recomendado
- Produce una mezcla de concreto cohesiva que no segrega

- Tiempos de fraguado y desarrollo de resistencias más rápidos
- Incremento en el desarrollo de resistencias a compresión y a flexión a todas las edades
- Resulta en menores costos de producción debido al rápido vaciado, mejor acabado, y reducción de costos de curado

CAPITULO 4

4. DISEÑO Y ENSAYOS EXPERIMENTALES EN EL HORMIGON

Las proporciones de la mezcla para hormigones de 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.

El diseño de mezclas de hormigón de ultra alta resistencia es un proceso mucho más crítico que el de hormigones convencionales. Usualmente, se

emplean adiciones químicas y puzolanas especialmente seleccionadas, además se considera esencial obtener una baja relación agua – materiales cementicios. Muchos ensayos de prueba son requeridos para obtener los datos suficientes que permitan al investigador reconocer las proporciones para una mezcla óptima.

Los ensayos experimentales en el hormigón fueron hechos en base al alcance y capacidad del laboratorio y acorde a las necesidades del hormigón a diseñar.

4.1 DISEÑO DEL HORMIGON

Para conocer las bondades y características del hormigón se han realizado una serie de ensayos así como su respectivo diseño. En el capítulo anterior se describieron los materiales utilizados para el diseño del HPR, ahora se definirá las proporciones empleadas para optimizar la mezcla.

4.1.1 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" (12) en donde considera, ensayos a partiendo de la edad de diseño, relación agua cemento, cemento, agregado grueso (en este caso el agregado grueso no interviene en la mezcla del presente estudio), agregado fino, aditivos entre otros.

4.1.2 DOSIFICACION

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 tabla que se presenta a continuación se detalla las proporciones que se implementaron para la producción de Hormigón con Polvo Reactivo.

En la dosificación abajo descrita se hizo los ajustes primero sin contar con la inclusión de la fibra metálica. Una vez que se

encontró el proporcionamiento óptimo se integró la fibra a la mezcla, cabe añadir que en la dosificación se contempló una relación agua/materiales cementantes de 0.19.

MATERIAL	PROPORCION (Kg/ m^3)	%
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

TABLA 4.1. Proporcionamiento del HPR

4.1.3 ELABORACION

En la elaboración del HPR se bacheó los materiales presentados en la Tabla 4.1 de manera de fabricar 10 dm^3 de mezcla por motivo que la mezcladora en la que se la iba a realizar no permitía mezclar un volumen mayor a 10 litros (lts).

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



FIGURA 4.1 Mezcla de los componentes del HPR

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 elaboradas, las mismas que fueron sometidas a curado por simple inmersión en agua.

4.2 ENSAYOS EXPERIMENTALES

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, resistencia a los sulfatos y la reacción álcali – sílice que son los ensayos que se seleccionó para determinar las características propias del Hormigón elaborado con polvo reactivo.

4.2.1 RESISTENCIA

4.2.1.1 RESISTENCIA A LA COMPRESION

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, se seleccionó este tamaño por motivo de disponibilidad de materiales y la facilidad de su rotura en las prensas diseñadas para compresión, pues estamos tratando con hormigón de muy alta resistencia,

obviamente se requeriría una mayor carga para romper por ejemplo un cilindro de 15x30 cm que también está soportado por la norma mencionada.



FIGURA 4.2. Ensayo de compresión simple

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 según la norma ASTM C349

(Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic-Cement Mortars (Using Portions of Prisms Broken in Flexure)).



FIGURA 4.3. Ensayo de compresión de fragmentos de vigas a manera de cubos

La resistencia a la compresión se la podría definir como la medición máxima de la resistencia a carga axial de probetas de hormigón. Se la puede expresar en kilos por centímetro cuadrado (Kg/cm^2) o también como megapascales MPa en nuestro medio. Esto es a una edad de 28 días a partir del

moldeo, así como también se puede ensayar a otras edades.

La resistencia a compresión que el hormigón alcanza, es función de la relación agua-materiales cementicios en nuestro caso, de en cuanto la hidratación ha progresado, del curado, de las cuestiones ambientales y de la edad del concreto (19).

4.2.1.2 RESISTENCIA A LA TRACCION INDIRECTA

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 (20).

Para el ensayo de la tracción indirecta o como también se la conoce como el ensayo a la tracción por compresión diametral (TCD) se basó en la norma ASTM C496 (Standard

Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens).



FIGURA 4.4. Ensayo del HPR de tracción por compresión diametral.

4.2.1.3 RESISTENCIA A LA FLEXION

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 (MR). 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 hacer (21).

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 4.5. Ensayo a flexión de vigas pequeñas de HPR.

4.2.2 MODULO 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.



FIGURA 4.6. Ensayo para determinación de módulo elástico.

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 (22).

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).

4.2.3 RESISTENCIA A LOS SULFATOS

Algunas variedades de sulfatos que se encuentran ya sea en el suelo o agua pueden atacar un determinado hormigón que no se encuentra adecuadamente diseñado para soportar ese ataque químico. Los sulfatos pueden atacar al hormigón pues reaccionan con los compuestos hidratados en la pasta de cemento hidratada. El resultante de estas reacciones se traduce en presiones que podrían bastar para resquebrajar la pasta de cemento y como consecuencia la desintegración del hormigón (23).

Ante lo expuesto, se vio en la necesidad de conocer si el hormigón diseñado soportaría el ataque químico de los sulfatos, para ello se

efectuó el ensayo pertinente teniendo en cuenta la norma ASTM C1012 (Standard Test Method for Length Change of Hydraulic-Cement Mortars Exposed to a Sulfate Solution).



FIGURA 4.7. Barras de HPR que serán ensayadas a resistencia a sulfatos y reacción álcali – sílice

4.2.3 REACCION ALCALI – SILICE

La reacción álcali – sílice genera un gel que se expande cuando absorbe agua de la pasta de cemento de su alrededor. Los

productos de esta reacción tienen afinidad con la humedad. El gel al absorber agua induce presión, expansión y fisuración del agregado y de la pasta.

La cantidad de gel que se crea en el hormigón depende la cantidad y del tipo de sílice y concentración del hidróxido alcalino. La presencia de gel no siempre coincide con el deterioro, y por tanto, el gel no indica necesariamente la ocurrencia de la reacción álcali – sílice (24).

Para que la reacción ocurra debe haber:

- Una forma reactiva de sílice en el agregado.
- Una solución en el poro altamente alcalina (pH).
- Humedad suficiente.

Dada la importancia de las consecuencias que puede dejar la reacción álcali – sílice en la composición y serviciabilidad de determinado hormigón, se desarrolló el ensayo correspondiente para determinar si el HPR resiste, para ello se siguió el procedimiento detallado en la norma ASTM C1260 (Standard Test

Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar-Bar Method)).

CAPITULO 5

5. RESULTADO Y ANALISIS DE LOS ENSAYOS REALIZADOS.

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

Los resultados arrojados se los analizará en los subcapítulos subsiguientes teniendo en consideración que estamos tratando un hormigón de ultra alto desempeño, el cual requiere de mayores estándares en los valores que se tomará como patrones en su aceptación o rechazo de determinada característica.

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

- Muestra 1: Probetas con inclusión de fibra de $\frac{1}{2}$ " de longitud.
- Muestra 2: Probetas con inclusión de fibra de 1" de longitud.

5.1 COMPRESION SIMPLE

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 tablas subsiguientes.



FIGURA 5.1. Rotura de cilindros por compresión simple

MUESTRA	EDAD (días)	f'c (Mpa)
1	1	35,68
	7	69,82
	28	104,98

TABLA 5.1. Tabla de datos de resistencia a la compresión simple de cilindros de 10x20 cm

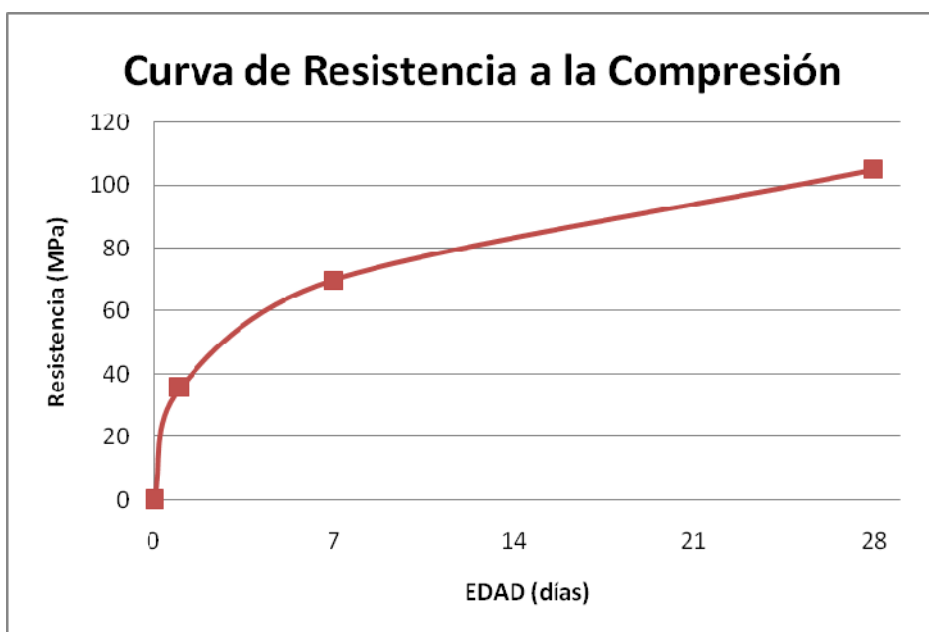


FIGURA 5.2. Resistencia a la compresión simple de cilindros de 10x20 cm

Se puede apreciar que a edades tempranas el HPR gana bastante resistencia, tal es el caso del día 1 que tenemos un hormigón de 35 MPa de resistencia, suficiente resistencia para tomar en cuenta en

construcción de edificios o en cimentaciones por citar dos ejemplos de las tantas aplicaciones que tiene el HPR.

MUESTRA	EDAD (días)	f'c (Mpa)
1	3	73,86
	7	106,13
	28	143,20

TABLA 5.2. Datos de resistencia a la compresión de cubos de 4x4 cm de HPR de fibra pequeña

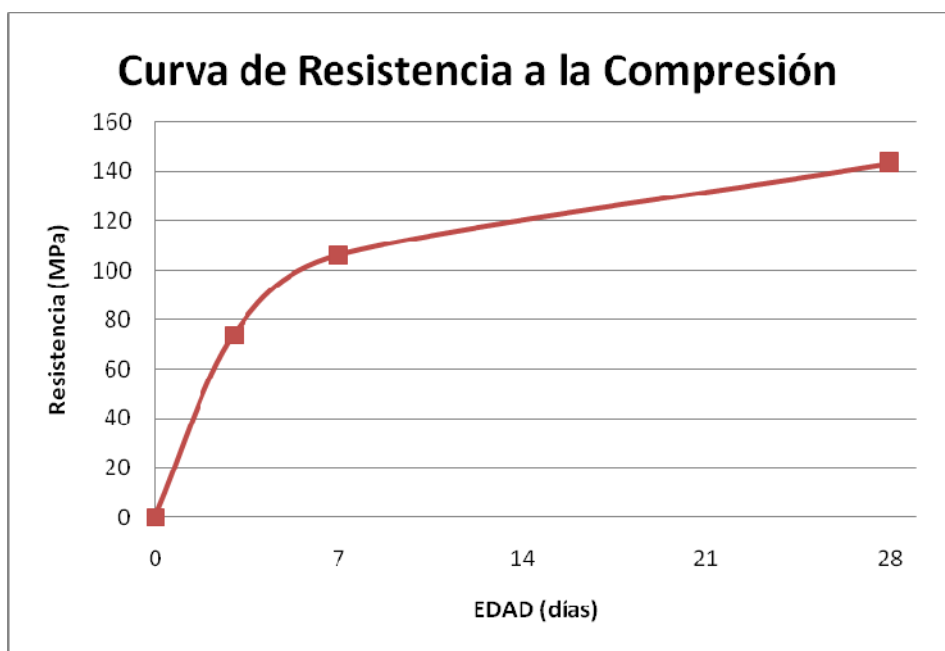


FIGURA 5.3. Resistencia a la compresión cubos de fibra pequeña

MUESTRA	EDAD (días)	f'c (Mpa)
2	3	81,13
	7	104,2
	28	149,33

TABLA 5.3. Datos de resistencia a la compresión de cubos de 4x4 cm de HPR de fibra grande

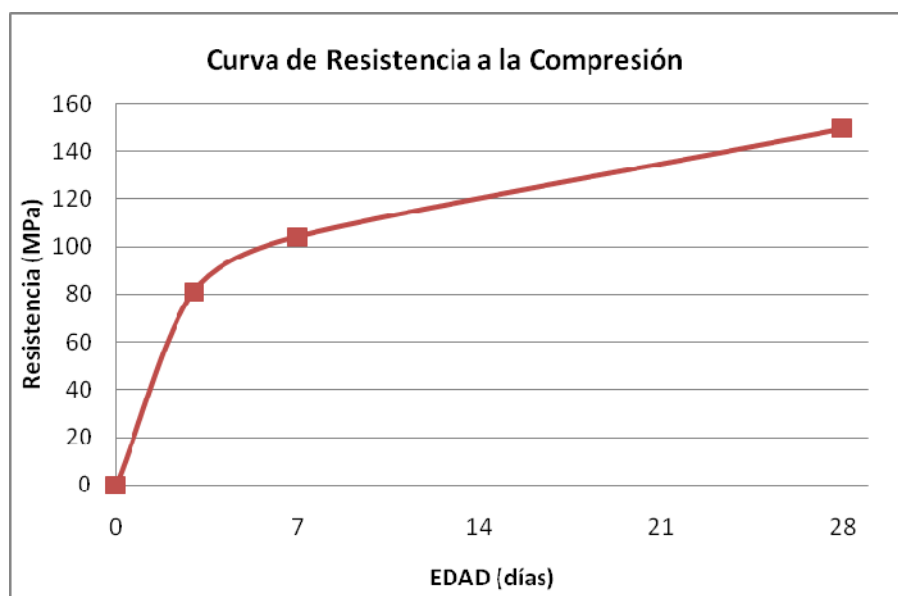


FIGURA 5.4. Resistencia a la compresión cubos de fibra grande

5.2 TRACCION INDIRECTA

En este ensayo realizado se hizo referencia a la norma ASTM C496 y se tomaron cilindros de 10x20 cm.



FIGURA 5.5. Rotura de cilindros por tracción por compresión diametral.

TRACCION POR COMPRESION DIAMETRAL (28 DIAS)			
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

TABLA 5.4. Datos de resistencia a la 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.

5.3 FLEXION

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 las dos siguientes tablas y sus correspondientes figuras de resistencia respecto al tiempo.

En la determinación de la resistencia de las vigas se adoptó la siguiente fórmula:

$$R = \left[\frac{Qxg}{a^3} \right] xL$$

En donde:

R: Resistencia en MPa

Q: Carga KN

g: Gravedad m/s^2

a: Ancho de la viga

L: Luz de la viga apoyada

MUESTRA	EDAD (días)	f'c (Mpa)
1	3	16,32
	7	20,65
	28	25,18

TABLA 5.5. Datos de resistencia a la flexión de vigas con fibra pequeña.

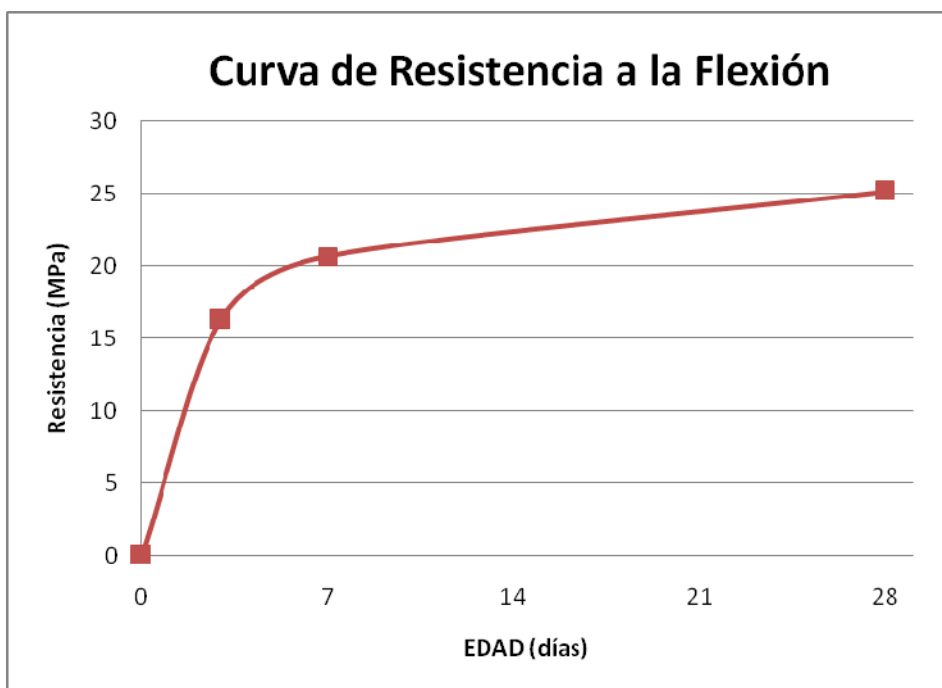


FIGURA 5.6. Resistencia a la flexión de vigas de fibra pequeña.

MUESTRA	EDAD (días)	f'c (Mpa)
2	3	18,45
	7	23,10
	28	32,89

TABLA 5.6. Datos de resistencia a la flexión de vigas con fibra grande.

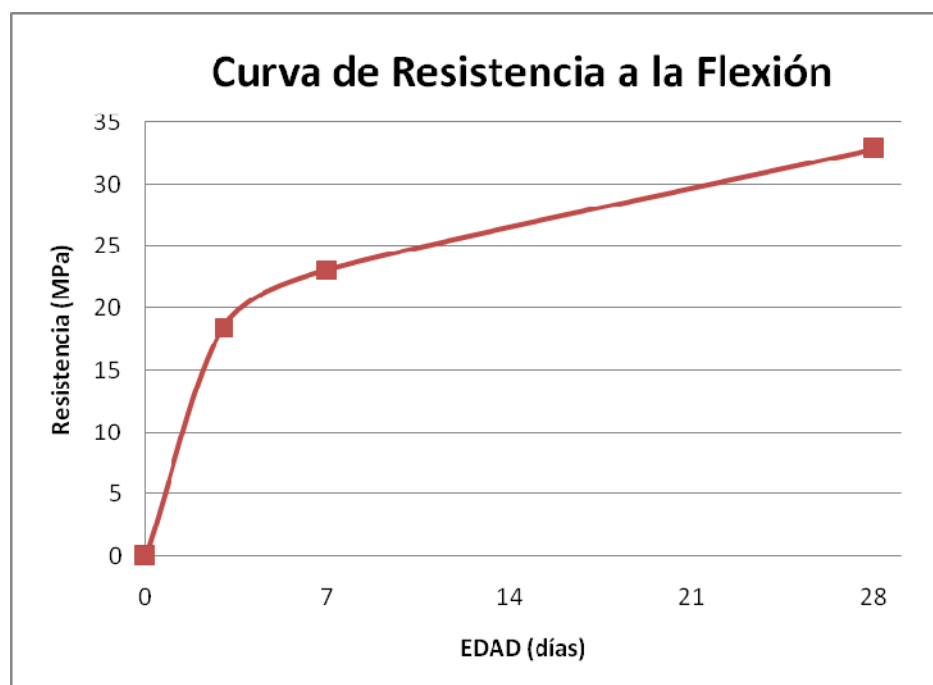


FIGURA 5.7. Resistencia a la flexión de vigas de fibra grande.

En la Figura 5.8 se muestra una rotura típica de de la viga que utilizó en el ensayo a flexión. Mientras en que en la Figura 5.9 se aprecian con mayor detalle las fibras utilizadas.



FIGURA 5.8. Rotura a flexión de viga de 16x4x4 cm

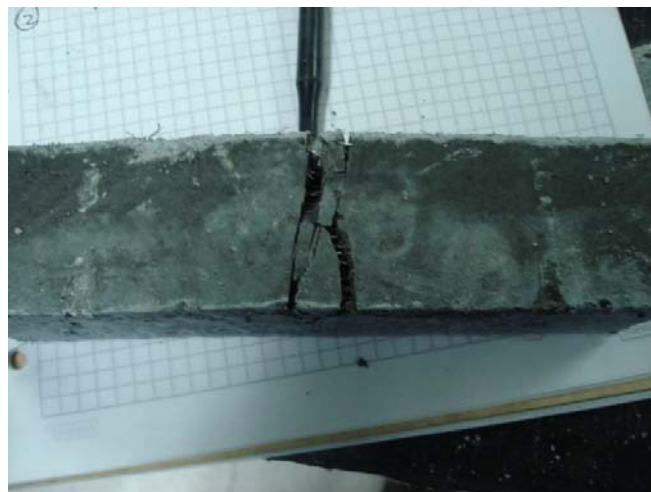


FIGURA 5.9. Vista inferior de la fisura de la viga ensayada a flexión.

5.3 MODULO DE ELASTICIDAD

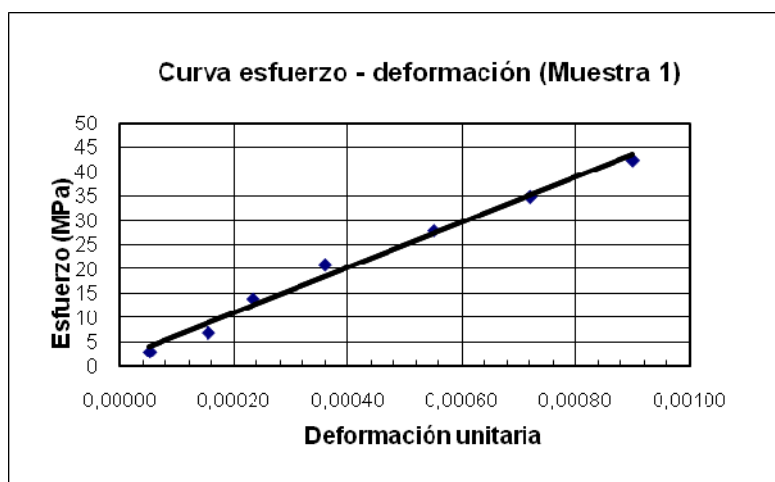
En las Tablas 5.7 y 5.8 y Figuras 5.10 y 5.11 respectivamente se presentan los datos de la curva esfuerzo versus deformación unitaria del

hormigón tanto con la fibra pequeña que como la grande (Muestra 1 y Muestra 2). Además se presenta el módulo de elasticidad E determinado en el ensayo para cada una de las muestras.

MUESTRA 1

Esfuerzo MPa	Deformación Unitaria
3,1	0,00005
7,0	0,00015
14,0	0,00023
20,9	0,00036
27,9	0,00055
34,9	0,00072
42,4	0,00090

TABLA 5.7. Datos de esfuerzo – deformación unitaria de cilindro fibra pequeña.



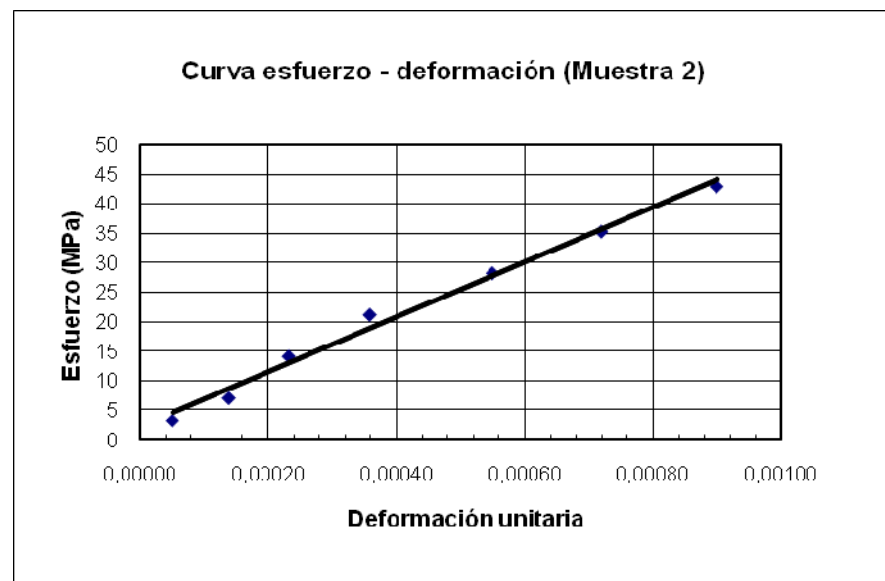
$$E = 46.3 \text{ GPa}$$

FIGURA 5.10. Curva Esfuerzo-Deformación cilindro fibra pequeña.

MUESTRA 2

Esfuerzo MPa	Deformación Unitaria
3,3	0,00005
7,1	0,00014
14,1	0,00023
21,2	0,00036
28,3	0,00055
35,4	0,00072
43,0	0,00090

TABLA 5.8. Datos de esfuerzo – deformación unitaria de cilindro fibra grande.



$$E = 46,7 \text{ GPa}$$

FIGURA 5.11. Curva Esfuerzo-Deformación cilindro fibra grande.

Se puede notar que no existe mayor diferencia entre las dos muestras tomadas, pero ambas coinciden con un módulo de elasticidad superior a los hormigones convencionales.

5.4 RESISTENCIA A LOS SULFATOS

Los valores presentados en el dial del deformímetro acerca de la medición de las barras de HPR correspondientes a la acción de los sulfatos se encuentran en la Figura 5.12.

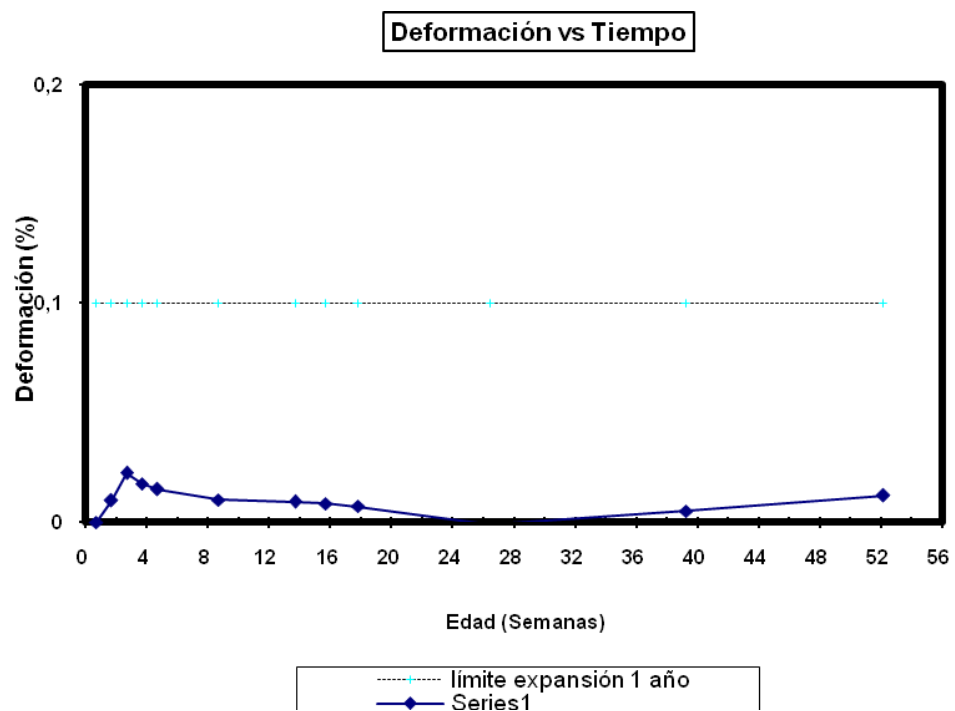


FIGURA 5.12. Deformación de barras de HPR versus el tiempo debido a la acción de los sulfatos

Los resultados arrojados presentan una leve o por no decir una casi nula acción de los sulfatos al hormigón con polvo reactivo, por lo cual el mismo puede elaborarse en ambientes agresivos.

5.5 REACCION ALCALI – SILICE

En el ensayo de la reacción álcali – sílice se puede apreciar una situación similar a lo que ocurrió con el ensayo precedente que es el de los sulfatos, lo cual tenemos un escenario similar como se puede ver en la Figura 5.13.

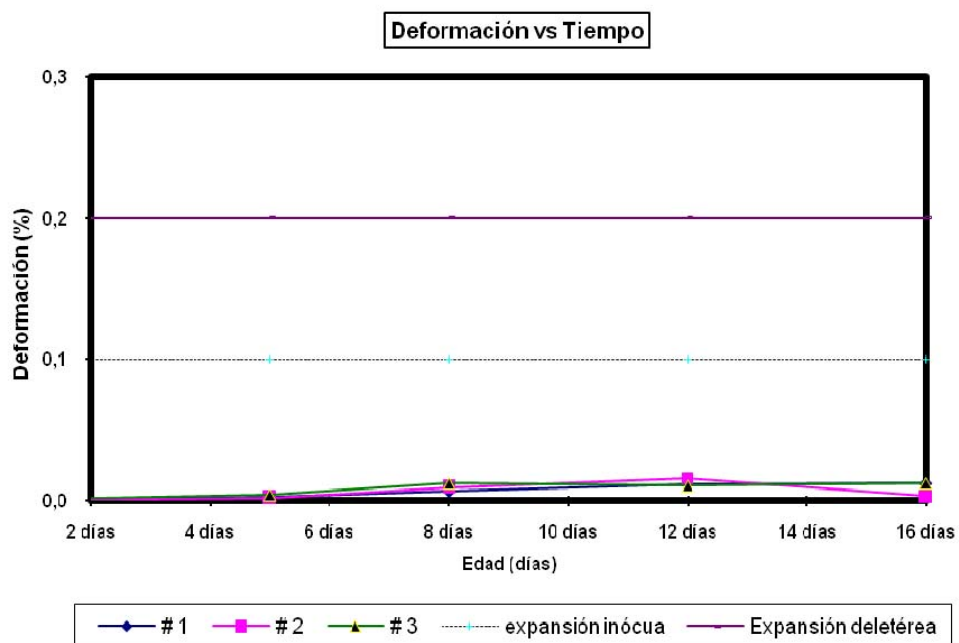


TABLA 5.10. Deformación de barras de HPR versus el tiempo debido a la reacción álcali – sílice.

Al igual que en el ensayo de los sulfatos el HPR no es afectado por la reacción álcali - sílice por presentarse deformaciones demasiado pequeñas que son insignificantes en la serviciabilidad y durabilidad del hormigón diseñado.

CAPITULO 6

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Las conclusiones que se detallan a continuación se encuentran demostradas en el desarrollo de la presente tesis, las mismas darán una pauta para futuras investigaciones en el campo de los hormigones de ultra alto desempeño.

1. Al omitir el uso del agregado grueso y añadir otros materiales cementantes en los componentes del HPR como el cuarzo molido (polvo reactivo) y el humo de sílice, se adquirió una mejor distribución de los espacios del hormigón diseñado, como se puede corroborar en los altos valores obtenidos tanto en la compresión (149.3 MPa), tracción indirecta (18.41 MPa), flexión (32.89 MPa) y módulo elástico (46.7 GPa).

2. La inclusión de fibras metálicas de alta resistencia a la mezcla dio origen a un hormigón más dúctil y resistente a la compresión, flexión y tracción, tal es el caso que en investigaciones futuras se podría obviar o minimizar el uso de acero de refuerzo al cortante, adicionalmente se pudo comprobar que las muestras que contenían las fibras de 1" se comportaban de mejor manera que las de ½", por motivo del mayor agarre que ejercían las mayores para soportar la ruptura.
3. La baja relación agua/materiales cementantes de 0.19 dio como resultado la optimización de las resistencias obtenidas descritas anteriormente, esto no se pudo haber dado de no ser por el uso de un súperplastificante de alto rango como es el GLENIUM 3000NS basada en tecnología de los polycarboxilatos.
4. No está de más enfatizar la importancia de las muchas influencias en la resistencia del concreto a sulfatos y a la reacción álcali - sílice. Mientras que la repercusión del tipo de cemento seleccionado es importante, obviamente no es la única influencia. Por supuesto, en la mayoría de las situaciones otros factores tendrán una influencia igual o tal vez mayor. Es el diseño de la mezcla del hormigón, el reducido contenido de agua, el

contenido incrementado de cemento, la colocación apropiada, la compactación adecuada y el curado efectivo, todo esto producirá un hormigón resistente tanto a sulfatos y a la reacción álcali – sílice.

BIBLIOGRAFIA

1. www.ieca.es/verinformes.php?IdInforme=0&Tipo=4
2. www.concrete.0catch.com/capitulo1.htm
3. Galligo, J. M. y Ma. P. Alaejos, "Hormigón de Alta Resistencia. Estado actual de conocimientos", CEDEX. Página 57. Madrid, España. 1990.
4. Kosmatka, S., Herkhoff, B., Panarese, W. y Tanesi, J "Diseño y Control de Mezclas de Concreto", Portland Cement Association. Página 369. Ciudad de México, México. 2004.
5. Kosmatka, S., Herkhoff, B., Panarese, W. y Tanesi, J "Diseño y Control de Mezclas de Concreto", Portland Cement Association. Páginas 3-13. Ciudad de México, México. 2004.

6. <http://estructuras.eia.edu.co/hormigonII/Trabajos/Ductilidad/Imagenes/Fig1.gif>
7. [www.capac.org/Secciones_Categorias//20061205Concretos de alto desempe%C3%B1o.pdf](http://www.capac.org/Secciones_Categorias//20061205Concretos_de_alto_desempe%C3%B1o.pdf)
8. www.djc.com/special/concrete97/10024304.htm
9. www.concrete.0catch.com/Capitulo9.htm
10. www.holcim.com/CO/COL/id/40477/mod/gnm10/page/product.html
11. www.jmcprl.net/GLOSARIO/CEMENTO.htm
12. www.cemexvenezuela.com/content/publica/cemento/index.asp?subm=3&ns=dgeneral6b.html&nsDer=gdralderecha6.html&submenu=submenu6.html
13. ACI 211.4R “Guide for Selecting Proportions for High-Strength Concrete Using Portland Cement and Other Cementitious Materials”
2008

14. Kosmatka, S., Herkhoff, B., Panarese, W. y Tanesi, J “Diseño y Control de Mezclas de Concreto”, Portland Cement Association. Página 80. Ciudad de México, México. 2004.
15. Kosmatka, S., Herkhoff, B., Panarese, W. y Tanesi, J “Diseño y Control de Mezclas de Concreto”, Portland Cement Association. Páginas 95-96. Ciudad de México, México. 2004.
16. Graybeal A. Benjamin. “Structural Behavior of Ultra-High Performance Concrete Prestressed I-Girders”, Us. Department transportation. Publication No. FHWA-HRT-06-115. Páginas 4-5. 2006.
17. www.la.cc.basf.com/paises/Venezuela/productos/glenium3000ns-ve.pdf
18. Kosmatka, S., Herkhoff, B., Panarese, W. y Tanesi, J “Diseño y Control de Mezclas de Concreto”, Portland Cement Association. Páginas 141-142. Ciudad de México, México. 2004.
19. Kosmatka, S., Herkhoff, B., Panarese, W. y Tanesi, J “Diseño y Control de Mezclas de Concreto”, Portland Cement Association. Página 8. Ciudad de México, México. 2004.

20. Neville Adam M. "Tecnología del Concreto" Instituto Mexicano del Cemento y del Concreto. Página 415. Ciudad de México, México. 1999.
21. Kosmatka, S., Herkhoff, B., Panarese, W. y Tanesi, J "Diseño y Control de Mezclas de Concreto", Portland Cement Association. Página 9. Ciudad de México, México. 2004.
22. Kosmatka, S., Herkhoff, B., Panarese, W. y Tanesi, J "Diseño y Control de Mezclas de Concreto", Portland Cement Association. Página 9. Ciudad de México, México. 2004.
23. Kosmatka, S., Herkhoff, B., Panarese, W. y Tanesi, J "Diseño y Control de Mezclas de Concreto", Portland Cement Association. Página 17. Ciudad de México, México. 2004.
24. Kosmatka, S., Herkhoff, B., Panarese, W. y Tanesi, J "Diseño y Control de Mezclas de Concreto", Portland Cement Association. Página 122. Ciudad de México, México. 2004.