

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



**DESARROLLO DE CONCRETOS DE ULTRA ALTO DESEMPEÑO CON
AGREGADOS CALIZOS DEL ÁREA METROPOLITANA DE
MONTERREY, MÉXICO**

POR
GUILLERMO HERNÁNDEZ CARRILLO

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN
CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN**

FEBRERO 2016

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL



DESARROLLO DE CONCRETOS DE ULTRA ALTO DESEMPEÑO CON AGREGADOS

CALIZOS DEL ÁREA METROPOLITANA DE MONTERREY, MÉXICO

POR

ING. GUILLERMO HERNÁNDEZ CARRILLO

**COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN
CIENCIAS CON ORIENTACIÓN EN MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN.**

DIRECTORES DE TESIS

DR. PEDRO VALDEZ TÁMEZ

DR. ALEJANDRO DURÁN HERRERA

FEBRERO 2016

Agradecimientos

A mi madre, Ana Isabel, y a mi abuelo, Mario Carrillo, por haberme provisto de sustento y haberme apoyado a lo largo de todo este proceso. A mi padre, Amado Hernández, por haberme dado la vida.

A mi pareja y colega, Jennifer Canul, quien prácticamente se lleva media tesis, por haberme ayudado en este desarrollo experimental y haber permanecido a mi lado a pesar de lo demandante que fue esta empresa.

A todos los maestros que he tenido en el aula, y a los que sin conocerme me orientaron en mis inquietudes.

A mi asesor, el Dr. Pedro Valdez, por su apoyo guía y consejo durante esta etapa.

A mi co-asesor, el Dr. Alejandro Durán, por haber creído del proyecto y haberme orientado en su desarrollo.

A mis compañeros de tecnología del concreto, Daniel Gálvez, Rogelio Dávila, Franciso Anguiano, Juan de León y Sergio Gutiérrez.

A mi compañero de generación, Victor Galván.

A todo el personal del departamento de Tecnología del Concreto por las innumerables ocasiones que me han apoyado con su ayuda y cooperación.

A Filiberto Marín y a Eucomex por el donativo del aditivo fluidificante.

A la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León y a los doctores Pedro Valdez Tamez y Cesar Juárez Alvarado, por el apoyo económico brindado en numerosas ocasiones para asistir a congresos, seminarios y cursos locales, nacionales e internacionales.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, por la beca otorgada para la realización de mis estudios de maestría.

Dedicatoria

A mi amigo, mentor y guía, el Dr. Eric Iván Moreno, a quien siempre recordaré por su visión pragmática de la vida, su ética y su dedicación, que en paz descansa.

Contenido

Capítulo 1	Introducción.....	1
1.1	Generalidades	1
Capítulo 2	Antecedentes.....	3
2.1	El Concreto de Ultra Alto Desempeño	3
2.2	Materiales del Concreto de Ultra Alto Desempeño	8
2.2.1	Agregados	9
2.2.2	Optimización de la mezcla granular.	14
2.2.3	Cementantes	19
2.2.4	Fibras.....	31
2.3	Mezclado.....	32
2.4	Curado	34
2.5	Aditivos	37
2.6	Sostenibilidad y durabilidad del concreto.....	38
Capítulo 3	Justificación e hipótesis	41
3.1	Justificación	41
3.2	Hipótesis	41
Capítulo 4	Objetivos.....	42
4.1	Objetivo general	42
4.2	Objetivos específicos	42
Capítulo 5	Materiales y caracterización.....	43
5.1	Descripción de los materiales	43
5.1.1	Cementantes y filler	43
5.1.2	Agregados	43
5.1.3	Aditivo superplastificante	44
5.1.4	Fibras metálicas	45
5.2	Caracterización de los materiales	45
Capítulo 6	Diseño de mezclas	48
Capítulo 7	Metodología experimental.....	51
7.1	Procedimiento de mezclado.	51
7.2	Definición de la extensibilidad objetivo.....	53
7.3	Influencia de la relación agua/cemento en la resistencia	57
7.4	Efecto de la adición de micro sílice en el desarrollo de la resistencia..	58

7.5	Evaluación de la permanencia de la trabajabilidad.....	61
7.6	Evaluación de la durabilidad de la mezclas con proporciones optimizadas.....	61
7.7	Efecto del curado acelerado en la Resistencia a Compresión	66
7.8	Influencia del aumento del tamaño máximo del agregado	67
7.9	Influencia de la adición de fibras en la trabajabilidad y el desempeño mecánico.....	69
7.10	Caracterización microestructural por medio de análisis termogravimétrico.....	71
Capítulo 8	Resultados y discusión.....	79
8.1	Caracterización de los materiales utilizados.....	79
8.1.1	Caracterización necesaria para el diseño de mezclas	79
8.1.2	Granulometría de los agregados y distribución de tamaño de partícula de los polvos.....	79
8.1.3	Área superficial BET	81
8.1.4	Composición química de los cementantes y compuestos potenciales de Bogue de los cementos	82
8.1.5	Identificación de fases cristalinas.....	83
8.1.6	Microscopía electrónica de barrido.....	86
8.2	Determinación de la extensibilidad de proyecto.....	87
8.2.1	Influencia del contenido de aire en la resistencia a compresión....	88
8.3	Influencia en la extensibilidad en la resistencia a compresión	89
8.4	Definición de la relación agua cemento del proyecto.....	91
8.5	Optimización del uso de micro sílice	93
8.5.1	Influencia de la relación micro sílice cemento (sc) y el cemento en la resistencia a compresión.....	93
8.5.2	Tiempos de fraguado de las mezclas.....	100
8.5.3	Permanencia de la trabajabilidad	101
8.5.4	Contracción autógena de la mezcla óptima.....	103
8.6	Durabilidad de las mezclas	104
8.6.1	Influencia de la adición de micro sílice en la resistividad superficial. 104	
8.6.2	Coeficiente de migración del ion cloruros a través de experimentos no estacionarios	106
8.6.3	Estimación de la vida útil de las mezclas optimizadas.....	109

8.7	Curado acelerado.....	110
8.8	Aumento del tamaño del agregado.....	112
8.9	Adición de fibras	115
8.10	Análisis termogravimétrico	120
Capítulo 9 Conclusiones		124
9.1	Materiales a utilizarse.....	124
9.2	Extensibilidad objetivo	124
9.3	Relación agua/cemento	124
9.4	Relación sílice/cemento (adición de micro sílice)	125
9.5	Contracción autógena.....	125
9.6	Durabilidad de las mezclas	125
9.7	Curado acelerado.....	125
9.8	Tamaño del agregado	125
9.9	Adición de fibras	125
9.10	Caracterización de la hidratación de las pastas cementantes	126
9.11	Conclusión general del proyecto	126
Capítulo 10 Recomendaciones para trabajo futuro		127
Capítulo 11 Referencias.....		128

Resumen

Teniendo como plataforma un enfoque integral que contribuya con la sostenibilidad, en la actualidad, la industria de la construcción con concreto está migrando hacia el uso de concretos más resistentes y más durables. Los Concretos de Ultra Alto Desempeño (UHPC) son una opción que satisface este objetivo, debido a su desempeño estructural y su durabilidad conducen a reducir el impacto ecológico del material y a prolongar de manera significativa la vida útil de las estructuras que se construyen con este material.

Típicamente, los UHPC que reporta la literatura científica, en su mayoría han sido formulados con agregados de origen volcánico. Siendo la caliza la principal opción para su utilización como agregado en la producción de concreto en el área metropolitana de Monterrey, técnicamente sería deseable poder producir UHPC con este material como agregado. Este proyecto estuvo orientado a establecer la factibilidad técnica de producir UHPC con agregado calizo del área metropolitana de Monterrey, así como un procedimiento que pudiese estandarizarse para su transferencia a escala industrial mediante el cual se puedan establecer dosificaciones apropiadas de otros ingredientes como son: el cemento, la micro sílice y el aditivo superfluidificante. Adicionalmente, esta investigación también evaluó aspectos como: la Influencia del curado acelerado, el efecto del aluminato tricálcico, el efecto de la fineza del cemento y la adición de micro fibras entre otros.

Para los materiales y el programa experimental utilizado en esta investigación fue factible producir un UHPC con resistencia promedio a la ruptura de 150 MPa a la edad de 28 días. Para este fin la relación agua/cemento que se utilizó fue de 0.25 la adición de micro sílice de 8% en masa del cemento, el consumo de cemento promedio fue de 800 kg/m³ la dosificación de aditivo superfluidificante fue la necesaria para obtener una extensibilidad óptima de 320 ± 20 mm. Para una estructura con la formulación óptima, los indicadores de durabilidad sugieren una vida útil mínima de 200 años.

Capítulo 1 Introducción

1.1 Generalidades

Desde que el ser humano hizo sus primeras construcciones permanentes, probablemente con paja y adobe o con grandes piedras, siempre se ha tenido el interés de desarrollar un mejor material, un material más resistente, un material más duradero. Es esa inquietud humana de siempre querer superar los logros de la generación anterior la que ha llevado al hombre a la luna y a las profundidades del océano y todo eso ha sido posible a través del desarrollo de la ciencia y tecnología de materiales.

El uso de morteros y concretos se remonta al año 2000 a.C, cuando la cultura Minoica utilizó morteros de agua con cal [1]. Muchas civilizaciones hicieron intentos de desarrollar cementantes hidráulicos, unas utilizaron yeso, sin embargo, el problema de la cal y del yeso es que sus estructuras no son duraderas y no fue sino hasta que los romanos descubrieron la reacción puzolánica que se pudieron tener construcciones hechas a base de concreto que resistían el embate del agua.

El cemento Portland se produce por primera vez a inicios del siglo XIX [2] y con su producción y mezcla con agregados pétreos se obtiene un material que cementa y mantiene su forma aún bajo el agua, y lo más interesante de este material es que su materia prima se encuentra disponible en cualquier parte del mundo a un relativo bajo precio. Entre las principales ventajas del concreto hidráulico como material de construcción se encuentran la resistencia a compresión, durabilidad y baja necesidad de mantenimiento; sin embargo, la industria moderna de la construcción demanda concretos que tengan una mayor facilidad de colocación, que sea dúctiles, durables y que alcancen resistencias a la compresión cada vez más altas.

El concreto de Ultra Alto Desempeño surge como una respuesta a esas exigencias y es definido según la agencia de Administración de Carreteras de Estados Unidos (FHWA) [3] como un material compuesto cementante con

refuerzo de fibras discontinuo, con resistencias a la compresión por encima de los 150 MPa, resistencias a la tensión pre y post agrietamiento mayores de 5 MPa, y durabilidad mejorada a través de una estructura de poro discontinua.

El UHPC es como un carro de Formula 1, se hace con las mejores materiales y tiene el mejor desempeño, sin embargo, no vemos carros de Formula 1 en las calles ¿Por qué?. Utilizar un carro de formula 1 en la calle sería complicado por muchas razones, una de las principales es que no existe reglamentación para el uso de ese tipo de carros en las calles, problema del que adolece el UHPC en la mayoría de los países con algunas excepciones en países desarrollados como Alemania y Francia.

Aún cuando no vemos un carro de Fórmula 1 rodando por las calles, sí vemos parte de la tecnología de ellos en carros normales, como la forma aerodinámica y el diseño de los frenos. De manera análoga a este ejemplo este trabajo busca desarrollar UHPC basado en las formulaciones de la literatura, pero adaptando la selección de una parte de los materiales a los disponibles en el Área Metropolitana de Monterrey.

Capítulo 2 Antecedentes

2.1 El Concreto de Ultra Alto Desempeño

En la Tabla 2.1 Antoine E. Naaman y Kay Wille [4] muestran de manera cronológica los avances en el mejoramiento de la matriz cementante y en el concreto, así como en las fibras utilizadas en su elaboración desde la década de los 1970 hasta la época actual. En la Tabla 2.2 se muestran los desarrollos que a su parecer llevaron a la formulación del Concreto de Ultra Alto Desempeño (UHPC, UHPC).

Tabla 2.1 Avances cronológicos en la matriz cementante y fibras desde los años 1960 [4]

Década	Matriz Cementante y Concreto	Fibra
1970's	<p>Mejor entendimiento de las reacciones de las reacciones de hidratación, estructura de gel</p> <p>Mejor entendimiento de las contracciones, el flujo plástico y la porosidad</p> <p>Se utiliza concreto de alta resistencia de 50 MPa en la práctica</p> <p>Desarrollo de los reductores del agua</p> <p>Avances en tratamientos para el concreto y condiciones de curado</p>	<p>Fibras lisas; resistencia normal</p> <p>Fibras de vidrio</p> <p>Algunas fibras sintéticas</p>
1980's	<p>Se incrementa el desarrollo de aditivos químicos: Reductores de agua de alto rango, etc...</p> <p>Aumento de la fluidez (concreto autocompactable)</p> <p>Reducción en la relación A/C</p> <p>Terminología Concreto de Alta Resistencia: hasta 60 MPa; Alta Resistencia Especial: hasta 80 MPa; Alta Resistencia Exótica (agregado y curado especial): hasta 120 MPa</p> <p>Terminología Concreto de Alto Desempeño: Concreto de Alta Resistencia con propiedades de durabilidad mejoradas.</p>	<p>Fibras deformadas: resistencia normal y alta</p> <p>Fibras sintéticas de bajo módulo (polipropileno, nylon, etc..)</p> <p>Aumento del uso de fibras de vidrio</p> <p>Micro fibras</p> <p>Fibras poliméricas de alto desempeño (carbón, Spectra, Kevlar, etc..)</p>
1990's	<p>Aumento en el desarrollo de aditivos químicos: superplastificantes, agentes de viscosidad, etc...</p> <p>Aumento del uso de materiales cementantes suplementarios como reemplazo del cemento</p> <p>Concreto de Ultra Alto Desempeño: Aplicación del concepto de alta densidad de empaquetamiento, adición de partículas finas, baja porosidad, baja relación agua/cementante.</p> <p>Concreto autocompactable.</p>	<p>Nuevas fibras enroscadas</p> <p>Fibras de alcohol poli-vinílico con adhesión química con el concreto</p> <p>Mayor disponibilidad de fibras sintéticas</p>

2000's	Aumento de desarrollos de Concretos de Ultra Alto Desempeño comerciales y no comerciales Concreto de Ultra Alto Desempeño: Mejoramiento del entendimiento de alta densidad de empaquetamiento, aplicación de conceptos de nanotecnología	Fibras de ultra alto desempeño: lisas y deformadas con diámetros tan pequeños como 0.12 mm y resistencias de hasta 3400 MPa Nano tubos de carbono, nano fibras de carbono
2010's	Aumento de entendimiento de la matriz cementante a nano-escala	Nano fibras de carbono, grafeno,..

Tabla 2.2 Desarrollos en compuestos cementantes de alta resistencia y alto desempeño desde 1970 hasta la fecha

Año	f'c [MPa]	Fuente/ Referencia	Nombre	Condiciones Especiales
1972	230	Yudenfreund, Skalny, et al.		Pasta, mezclado al vacío, baja porosidad, especímenes pequeños
1972	510	Roy et al. (EUA)		Pasta, alta presión y alta temperatura, especímenes pequeños.
1981	200	Birchall et al. (Reino Unido)	MDF (libre de micro defectos)	Pasta, adición de polímeros, resistencia a la flexión de hasta 150 MPa
1981-1982	120-150	Bache, Hjorth (Dinamarca)	DENSIT, COMPRESSIT	Empaquetamiento de partículas mejorado, uso de micro sílice, uso de superplastificantes.
1980's	Hasta 120	Muchos investigadores alrededor del mundo (Shah, Zia, Russell, Swamy, Malier, Konig, Aitcin, Malhotra)	Concreto de Alta Resistencia, Concreto de Alto Desempeño.	Concreto con aditivos y agregados especiales para aplicaciones estructurales, uso de superplastificantes, curado normal, mejor durabilidad.
1980's	Hasta 210	Lankard, Naaman (EUA)	SIFCON (concreto infiltrado en forma de slurry)	Mortero de arena fina con altas adiciones de fibras (8 al 15% en volumen)
1987	Hasta 140	Bache (Dinamarca)	CRC (Concreto Compacto reforzado)	Concreto con alto volumen de fibras con barras de refuerzo
1987	Rango amplio	Naaman (EUA)	HPFRCC (Compuestos Cementantes de Alto Desempeño Reforzados)	Mortero y Concreto con fibras que provocan un desempeño de endurecimiento por deformación a la tensión
1991	Rango amplio	Reinhart and Naaman (Alemania, EUA)	HPFRCC (Primer Taller Internacional)	Con el objetivo de reducir el contenido de fibras
1992	Rango amplio	Li y Wu (EUA)	ECC (Compuestos Cementantes Ingenieriles)	Principalmente mortero con fibras sintéticas, desempeño de endurecimiento por deformación a la tensión
1994	Más de 150	De Larrad (Francia)	UHPC (Concreto de Ultra Alto Desempeño)	Material optimizado con empaquetamiento de partículas denso y partículas ultra finas
1995	Hasta 800	Richard y Cheyrezy	RPC (Concreto de Polvos Reactivos)	Pasta y concreto, curado con temperatura y presión, empaquetamiento de partículas.

1998 y posterior	Hasta 200	Lafarge (Chanvilliard, Rigaud, Behloul) Francia	DUCTAL	Curado a 90°C por 3 días, fibras hasta el 6% (comercialmente disponible)
2000 principios	Hasta 200	Muchos investigadores alrededor del mundo (Ulm, Graybeal, Rossi)	UHPC y UHP-FRC (Concreto de Ultra Alto Desempeño Reforzado Con Fibras)	Muchas formulaciones basadas en DUCTAL
2000 y posterior	Hasta 200	Rossi et al. LCPC (Francia)	CEMTEC, CEMTEC Multi escala	Hasta 9% de fibras, combinaciones híbridas
2004	Rango abierto > 150	Fehling y Schmidt (Alemania)	Primer Simposio Internacional de UHPC	Muchas formulaciones similares al DUCTAL con y sin temperatura de curado, con y sin fibras
2005	Hasta 140	Karihaloo (Reino Unido)	CARDIFRC	Empaquetamiento y mezclado optimizados.
2005	Hasta 200	Jungwirth (Suiza)	CERACEM	Formulación similar al DUCTAL, fibras largas, agregados más grandes
2005	Abierto	Schmidt et al. (Alemania)	Construcción Sustentable con UHPC	La fundación de investigación alemania, financió una iniciativa más amplia (2005-2012)
2008	Rango abierto > 150	Fehling y Schmidt (Alemania)	Segundo Simposio Internacional de UHPC	Muchas formulaciones similares al DUCTAL con y sin curado por temperatura, con y sin fibras.
2011	>150	Accorsi y Meyer (EUA)	Taller de UHPC	Primer taller estadounidense
2011	Hasta 290	Wille y Naaman (EUA-Alemania)	UHP-FRC	Sin curado por temperatura, empaquetamiento optimizado, resistencia a la tensión registrada directamente

Como se puede ver en las tablas antes presentadas, la dosificación de mezclas de Concreto de Ultra Alto Desempeño no es un secreto, la comunidad científica ya tiene un conocimiento general de los requerimientos de este material. Las contribuciones de distintos autores se pueden resumir en los siguientes puntos [5]:

- Relaciones agua cemento (a/c) entre 0.16 y 0.27.
- Utilización de aditivo fluidificante de alto rango basado en policarboxilatos.
- Extensibilidad de mini cono de revenimiento de entre 30 y 35 cm.
- Cemento con una fineza moderada y una cantidad de C_3A significativamente menor que 8%.

- Microsílice con bajo contenido de carbón y dosificada en adición en masa con de 25% en relación al peso del cemento.
- Adición de micro fibras de acero hasta 2.5% en adición con respecto al volumen del concreto

Al ver el diseño básico de una mezcla de Ultra Alto Desempeño se puede pensar que las aplicaciones de este tipo de material sería incosteable, sin embargo, la visión inicial no debería nublarse por el aparente alto precio, hay otros factores que se tienen que tomar en cuenta para evaluar un material más allá de su costo inicial, tales como la cantidad efectiva de material utilizado en la construcción, la vida útil, el impacto arquitectónico, etc.

Un concreto normal de alta resistencia en general se diseña para 30 MPa y un UHPC, debe alcanzar una resistencia a la compresión de 150 MPa, pasando esto al diseño estructural podemos reducir el tamaño del elemento 5 veces, multiplicando esto por la longitud del elemento estaríamos reduciendo el peso del elemento y a esto se suman otras ventajas como el espacio que ocupa y la estética del elemento que al ser el UHPC autocompactable, su acabado siempre es aparente.

Ya países del primer mundo (Canadá, Alemania, Francia, Japón) han iniciado programas dirigidos al desarrollo y aplicación del UHPC. Al menos 26 puentes han sido construidos en Canadá usando UHPC en uno o varios componentes [3].

Aún cuando las principales aplicaciones del UHPC sea para la construcción de puentes. su uso potencial puede extenderse a distintos tipos de aplicaciones como:

- Construcción de estructuras presforzadas sin refuerzo de acero pasivo.
- Tubos para el transporte de agua, aguas residuales u otros líquidos bajo presión.

- Bóvedas de seguridad, contenedores de desechos nucleares y estructuras de defensa y aplicaciones que requieren alta resistencia al impacto.
- Moldes de partes metálicas.

Con respecto a las ventajas técnicas que supone la utilización de este tipo de compuestos pueden enumerarse las siguientes:

- Mejor retorno de inversión
- Alternativas de diseño
- Espacios arquitectónicos
- Eficiencia del volumen de concreto
- Disminución de secciones en columnas
- Disminución de cargas muertas
- Funcionalidad
- Estética
- Durabilidad de las obras de infraestructura (ingreso de cloruros, ataque por sulfatos, etc)

Algunas imágenes de estructuras de concreto fabricadas con concreto de ultra alto desempeño se pueden observar en la Figura 2.1.

Con el avance de la tecnología de los Concretos de de Ultra Alto Desempeño varias empresas alrededor del mundo han desarrollado combinaciones de agregados y cementantes que satisfacen la definición de un concreto de esa índole. Estas combinaciones se venden en bolsas con los ingredientes combinados y listos para su utilización, algunos ejemplos de las marcas registradas de concretos de este tipo son los siguientes:

- BSI[®] desarrollado por el grupo Eiffage en Francia,
- Ductal[®] desarrollado por Lafarge, Bouygues y Rhodia en Francia.

- Fortis® desarrollado por CEMEX en México.
- CRC® Aalborg Portland en Dinamarca.



Figura 2.1 a) Puente Mars Hill en el condado Wapello, Iowa, EUA [3] b) puente peatonal Sherbrooke, Quebec, Canadá [3] c) Puente peatonal Glenmore/Legsby, Calgary, Alberta, Canadá [3] d) Puente peatonal de la paz, Seoul, Corea del Norte [3]

En comparación con un concreto normal que cuesta alrededor de 130 USD/m³, el UHPC puede llegar a costar 20 veces más [6], es por ello que la optimización de las mezclas juega un rol vital en la posible democratización del material.

2.2 Materiales del Concreto de Ultra Alto Desempeño

En los apartados siguientes se presentarán el efecto de los materiales constituyentes en el desempeño de las mezclas en función de la investigación previa que se ha hecho alrededor del mundo de manera que se pueda tener un panorama más específico del papel que juega cada elemento en el diseño. Adicionalmente, estos antecedentes servirán de cimiento para las decisiones que se tomaron durante el diseño experimental.

2.2.1 Agregados

La dureza de los agregados en general es mayor que la de la pasta de cementantes. Un ejemplo es que el módulo de elasticidad de la sílice es de 70 GPa, comparado con los 18 a 22 MPa de la pasta [7].

A pesar de que los agregados utilizados usualmente en la generación de estos concretos son en general de altas prestaciones como lo pueden ser: el granito, la diabasa, el cuarzo molido, la arena de origen silíceo, el basalto, la bauxita sinterizada o en algunos casos partículas finas de acero, existen algunos estudios que reportan la posibilidad de usar a la caliza o el vidrio reciclado como reemplazo de este tipo de agregados [8]-[11].

Según Richard y Cheyrezi uno de los problemas principales en el concreto es la falta de homogeneidad por lo que propone lo siguiente [7]:

- Eliminación de los agregados gruesos, reemplazados con arena fina, de 600 micrómetros de tamaño máximo.
- Mejoramiento de las propiedades mecánicas de la pasta.
- Reducción en la relación agregado/matriz.

De acuerdo con Richard [7], los agregados en el concreto conforman un conjunto de inclusiones rígidas en la matriz. Cuando se aplica una fuerza de compresión aparecen esfuerzos de tensión y cortantes en la interface pasta/agregado que genera rajaduras en la pasta. El tamaño de esas rajaduras está relacionado con el tamaño de la zona bajo esfuerzo cortante o de tensión. En el caso de una inclusión esférica, el tamaño de la agrietamiento es directamente proporcional al diámetro de la inclusión. Para los UHPC, con una reducción en el tamaño del agregado más grueso por un factor de 50 (por ejemplo 400 micrómetros en vez de 20 mm.), se obtiene una importante reducción en el tamaño de las microfisuras de los siguientes orígenes:

- Mecánico (cargas externas)
- Químico (contracción autógena)

- Termo-mecánico (expansión diferencial entre la pasta y el agregado bajo los efectos del tratamiento de calor)

A pesar de que la hipótesis de Richard y Cheyrezy establece un rango prohibitivo de tamaño máximo de los agregados, investigadores han hecho concreto de ultra alto desempeño sin remover la sección gruesa llegando hasta los 20 mm de tamaño máximo de agregado [12].

Colleparidi [10] demostró que el uso de un agregado bien graduado de 8 mm. de tamaño máximo puede reemplazar a la arena fina de cuarzo de tamaño micrométrico propuesto por Richard y Cheyrezy para el concreto de polvos reactivos. En su estudio fabricó concreto con agregado calizo bien graduado y lo comparó con un concreto de polvos reactivos convencional, el cual contuvo arena de cuarzo molida finamente. Concluyó que la adición de agregado graduado no reduce la resistencia a compresión provista por la calidad de la matriz cementante, este estudio contrasta con la visión original del concreto de polvos reactivos.

Chong [12] se fue al extremo al incluir agregado grueso de tamaño máximo de 19 mm en su intento de producir un concreto de ultra alto desempeño que pudiera fabricarse con tecnologías comunes. Señala en su estudio que al incluir polvo de caliza. La hidratación de la alita se ve acelerada y que a su vez ésta mejora la compactación y dispersión del hidróxido de calcio en el gel de C-S-H al igual que juega un papel importante en la cristalización.

Sin embargo, en general, para todos los UHPC se obtienen mejores resultados con agregados más finos sin importar su origen [6] como se puede ver en la Figura 2.2.

Es fácil pensar que sus características juegan un papel importante en el desempeño del mismo cuando éstos ocupan tres cuartas partes del volumen total del concreto. Las fisuras se generan usualmente en las interfaces, posteriormente crecen a través de la matriz, cuando la propagación de una grieta alcanza al agregado grueso, éste sirve de barrera provocando un serpenteo en

la propagación y ramificación de la misma. Estos mecanismos dependen en gran medida de las características de los agregados, especialmente de la textura superficial y forma, y la diferencia que exista entre la resistencia de la matriz cementante y los mismos [9].

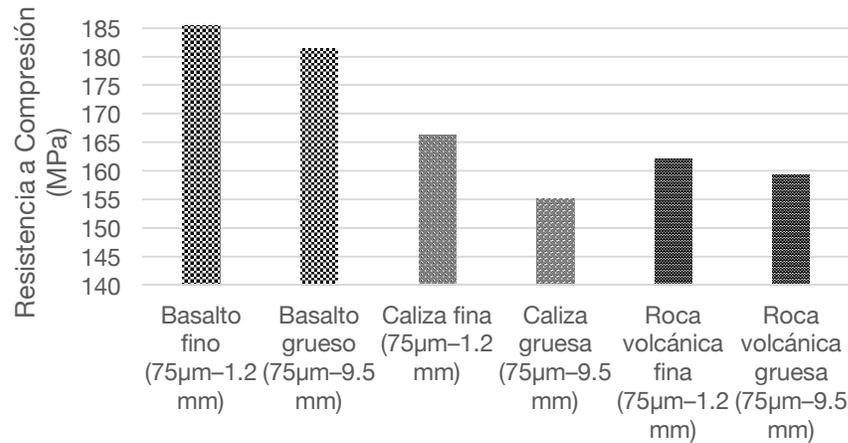


Figura 2.2 Influencia del tamaño de partícula en la Resistencia a Compresión del UHPC [6]

La evaluación de la resistencia a compresión de un agregado a través de la prueba de núcleos de roca sólida puede ser engañosa. En las formaciones rocosas existen de manera cotidiana planos preferenciales de falla provocados por el proceso de consolidación de la misma. Al triturar el agregado y reducirlo a partículas pequeñas, es posible que éstos ya no signifiquen un problema. La experiencia ha mostrado, sin embargo, que la bauxita sinterizada, el korund, el basalto y el cuarzo tienen relativamente mucha mayor resistencia que la caliza y el granito[9]. En la Tabla 2.3 se puede observar la resistencia a compresión de los núcleos para cuatro diferentes tipos de roca y en la Figura 2.3 se presenta una comparación que ilustra la influencia de seis diferentes agregados en la resistencia a compresión de UHPC sometidos a cuatro diferentes regímenes de curado.

Tabla 2.3 Resistencia a compresión de núcleos de roca [9]

	Basalto	Caliza	Cuarzo	Granito
Resistencia compresión (MPa) ^a	252	83	70	102

Cruzando la información de la Tabla 2.3 con la de la Figura 2.3, se puede descartar la posibilidad de poder afirmar de manera categórica que la resistencia del concreto es la misma que la resistencia máxima del concreto en el caso de los UHPC, en parte porque la mitad del volumen del concreto está formado por la pasta cementante.

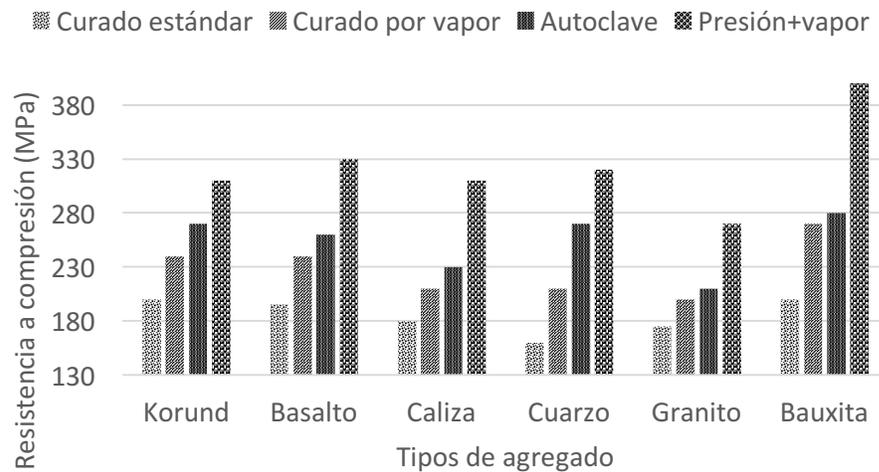


Figura 2.3 Influencia del agregado en la resistencia a compresión del UHPC [9].

El Dr. Alejandro Durán [13] realizó un estudio cuyo objetivo fue fabricar una mezcla que consiguiera una ultra alta resistencia utilizando los materiales disponibles en la Región Noreste de México, parte de sus resultados se plasman en la Tabla 2.4. Si bien es un hecho que los agregados influyen en el desempeño de los compuestos, y los resultados lo confirman, también es cierto que el diseño de la pasta es muy importante, puesto que los resultados del autor contrastan con los antes reportados para agregados de alto desempeño de origen silíceo (andesita, arena sílica, piedrita de reynosa).

Tabla 2.4 Resistencias a compresión de morteros (MPa) y porcentaje de resistencia con respecto al mortero de caliza [13]].

Tipo de agregado	Caliza	Piedrita de Reynosa	Andesita	Arena silica
Resistencia a compresión (MPa)	92.6	103.1 (111%)	107.9 (117%)	110.4 (119%)

El impacto del tipo de agregado es más sensible en el concreto de alta resistencia. La energía de fractura, rigidez y resistencia del concreto depende significativamente del tipo de agregado con el que se fabrica[14].

Reda [11] comparó las propiedades de un concreto de ultra alto desempeño fabricado con caliza contra las propiedades de uno fabricado con bauxita sinterizada. Entre sus conclusiones está que con un 35% de volumen de pasta se pueden alcanzar resistencias de 200 MPa si el agregado es bauxita, por el contrario, para alcanzar el mismo desempeño con agregado calizo sería necesario que la pasta ocupara del 60 al 70% del volumen del concreto.

El uso de agregado calizos para la fabricación de Concretos de Ultra Alto Desempeño no es generalizado, sin embargo, es posible encontrar algunos reportes en la literatura como se puede observar en la Tabla 2.5.

Tabla 2.5 Diseños de Mezclas de Ultra Alto Desempeño con Agregado Calizo.

	M.M Reda et al. (1999) [11]	Aydin et al. (2001) [9]	Durán (2003) [13]	Collepari (2004) [10]	Camacho (2012) [15]	Wang (2012) [12]	Wille (2015) [6]
Cemento (kg/m³)	1040	940	760	937	850-635	810	778
Humo de sílice (kg/m³)	310	282	190	235	85-63.5	90	188
Agregado relativamente grueso (kg/m³)	800	960	991	1031	0-600	1539	1129
Agua (kg/m³)	240	125	218.5	200	200	162	179
Superplastificante (kg/m³)	27 (polvo)	61	23.94 (polvo)	43	ND	18	27
Tipo de cemento	Tipo 1	Tipo 1	Tipo 3	Tipo 5	Tipo 5	Tipo 1	Blanco
Polvo	Arena de Ottawa+ harina de sílice	-	-	-	Arena sílica	Arena caliza	Ceniza volante (183)
Fibras	-	-	-	-	2%	-	-
Tamaño del agregado (mm)	4 a 6	4	9.5	8	2	20	1.2
Curado	Sin curar	Estándar, Vapor, Autoclave, Presión+Vapor	Estándar	Estándar, 90 °C, 160°C	Estándar	Estándar	Estándar
Relación a/c	0.23	0.13	0.29	0.21	0.20125	1.9	.24
Relación Microsílice/Cemento (s/c)	0.30	0.30	0.25	0.25	0.15	0.11	.24
Resistencia (Mpa)	140	180, 210, 230, 310	92.6	160,175, 200	160	137	166
Compactación	Vibrado	Vibrado	Vibrado	Vibrado	Autocompactable	Vibrado	Autocompactable

2.2.2 Optimización de la mezcla granular.

La optimización de los agregados es ventajosa por razones técnicas y económicas. Mezclas granulares con una buena densidad de empaquetamiento

requieren de menores de cantidades de pasta por lo que son más baratas y al ser más densas producen un concreto más durable [16]. Para obtener una buena mezcla granular se debe ver a todas las fracciones de agregados como una misma.

Distintos intentos se han hecho por obtener una mezcla granular óptima, entre ellos el más comúnmente usado es el recomendado por el ACI 211.1 [16], que sugiere un volumen de agregado grueso en función del módulo de finura de la arena y el tamaño máximo del agregado apoyándose en que las granulometrías de los agregados deben estar de acuerdo a los límites del estándar ASTM C33[17]. A pesar de su popularidad ha sido propuesto que su utilización no necesariamente da los mejores resultados posibles [18]

En lo siguiente se mostrarán dos métodos para optimizar mezclas basados en la combinación de agregados.

Modelo de Andreasen y Andersen modificado

El modelo de Andreasen y Andersen modificado es ampliamente utilizado en la fabricación de UHPC concreto autocompactable y refractarios [4],[19],[20], [21], consiste en la ecuación (2.1):

$$P(D) = \frac{D^q - D^{qmin}}{D^{qmax} - D^{qmin}} \quad (2.1)$$

Donde:

P (D): es una fracción del total de sólidos que son menores que el tamaño D,

D: es el tamaño de partícula en micrómetros

Dmáx: es el tamaño máximo de partícula en micrómetros

Dmín: es el tamaño mínimo de partículas en micrómetros

q: es el módulo de distribución.

Valores mayores de módulo de distribución q a 0.5 llevan a mezclas gruesas, valores menores de 0.25 resulta en mezclas que son ricas en partículas finas.

Aunque de acuerdo a la literatura el coeficiente q que tiene el óptimo empaquetamiento es 0.37 [21], aparentemente un máximo empaquetamiento no es el más recomendado, sino un ligeramente menor que aún tenga una alta densidad de empaquetamiento de manera que se permita tener mezclas trabajables y no rocosas [18]. Se ha demostrado [19], [22] que un q entre 0.22 y 0.25 es el más recomendable para que mezclas con altas cantidades de finos y microsilice puedan fluir y tener alta resistencia.

La optimización de los materiales de las mezclas mediante el modelo de Andreasen y Andersen se hace mediante la minimización de la Ecuación (2.2):

$$\text{Min} \left(\sum_{i=1}^n ((P_{mezcla}(D_i) - P_{objetivo}(D_i))^2 \right) \quad (2.2)$$

Donde:

P_{mezcla} = Porcentaje del material que pasa con tamaño D_i en la mezcla diseñada

$P_{objetivo}$ = Porcentaje del material que pasa con tamaño D_i según el modelo

Este tipo de cálculo se puede realizar con paquetes computacionales o por iteraciones manuales. Finalmente la curva optimizada debe parecerse a la que aparece en la Figura 2.4.

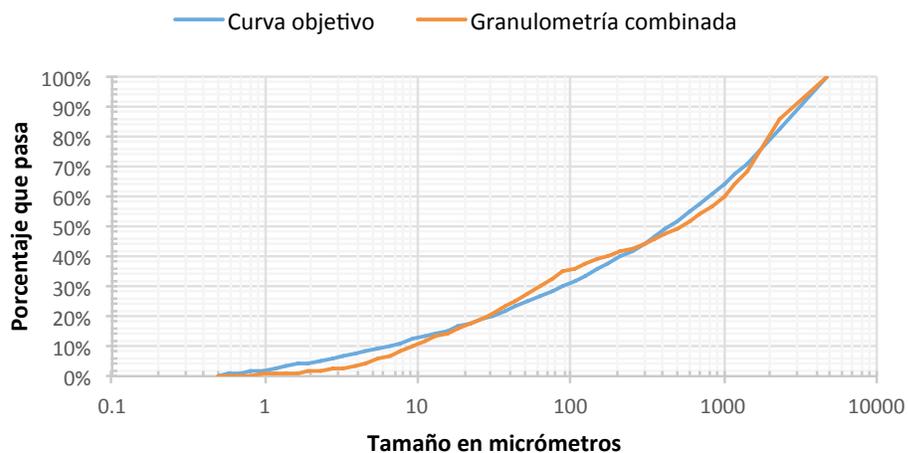


Figura 2.4 Resultado de la curva granulométrica optimizada

Por su facilidad de cálculo y aparentes buenos resultados el modelo de Andreasen y Andersen es muy popular.

Modelo de Empaquetamiento Compresible (MEC)

Existen modelos más complejos como el desarrollado por François de Larrard [23], que permiten predecir varias características del concreto en estado fresco y endurecido, el cual por la gran cantidad de pruebas de caracterización, resulta en algunas ocasiones, complicada su aplicación.

El primer concepto introducido por este modelo es el de la Densidad de Empaquetamiento Virtual (DEV), el cual se refiere a la máxima compactación que puede alcanzar una mezcla granular si las partículas fueran ordenadas una por una, escenario que solo ocurre teóricamente.

Otro concepto es el de clase dominante. Una clase de granos grandes es dominante, cuando llena el espacio de manera que adicionar unos pocos granos pequeños solo llenaría los intersticios sin forzar a las partículas a alejarse. Una clase dominante de granos pequeños es aquella que consume más espacio que los intersticios disponibles entre partículas grandes (Figura 2.5)

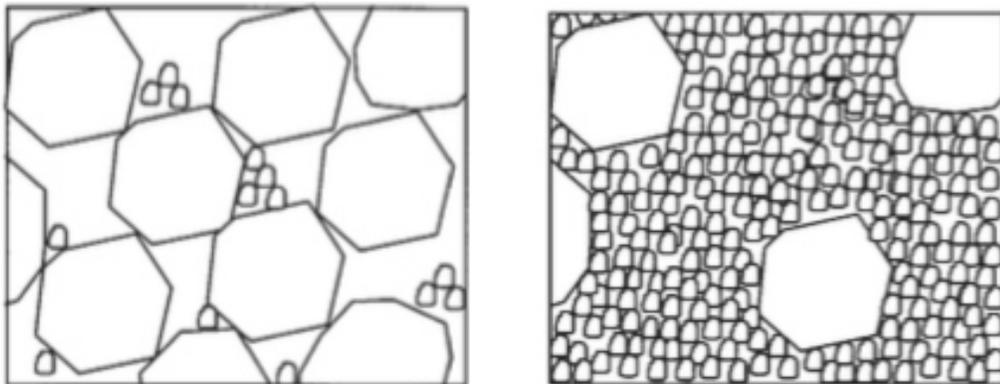


Figura 2.5 a) Mezcla granular con granos grandes dominantes b) Mezcla granular con granos pequeños dominantes [23]

La densidad de empaquetamiento virtual de una mezcla de cualquier cantidad de tamaños de partículas con una clase dominante i (una clase es dominante si asegura la continuidad del esqueleto granular), viene dada por la ecuación (2.3):

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} \left[1 - \beta_i + b_{i,j} \beta_i \left(1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right] y_j - \sum_{j=i+1}^n \left[1 - a_{i,j} \left(1 - \frac{\beta_i}{\beta_j} \right) y_j \right]} \quad (2.3)$$

Donde:

γ_i = Es la compactabilidad virtual de una mezcla de clase dominante i

β_i = Es la compactabilidad virtual de la clase i

y_i = Es la fracción volumétrica de la clase i

a_{ij} = Es el efecto de aflojamiento de la clase j ejerce en la clase i

b_{ij} = Es el efecto de pared que la clase j ejerce en la clase i

Los coeficientes a_{ij} y b_{ij} vienen dados por las siguientes ecuaciones (2.4) y (2.5):

$$a_{i,j} = \sqrt{1 - \left(1 - \frac{d_j}{d_i} \right)^{1.02}} \quad (2.4)$$

$$b_{i,j} = 1 - \left(1 - \frac{d_i}{d_j} \right)^{1.50} \quad (2.5)$$

Debido a que el empaquetamiento virtual es solamente teórico el modelo toma en cuenta los métodos de compactación de las partículas para convertir el empaquetamiento virtual en real.

El índice de compactación K relaciona el empaquetamiento real (φ) con el virtual a través de la siguiente ecuación (2.6):

$$K = \sum_{i=1}^n K_i = \sum_{i=1}^n \frac{\frac{y_i}{\beta_i}}{\frac{1}{\varphi} - \frac{1}{\gamma_i}} \quad (2.6)$$

Los índices K vienen dados por la Tabla 2.6 y se designan en relación a la energía de compactación:

Tabla 2.6 Índices K de compactación

Método de compactación	K
Vaciado simple	4.1
Varillado	4.5
Vibrado	4.75
Prueba de Vicat	6.7
Vibrado+ Compactación	9

Conociendo los valores de y_i , β_i , y γ_i , y el valor de K, la única incógnita es φ la cual se debe maximizar variando los porcentajes y_i en la ecuación (2.6) por iteraciones.

El MEC ha sido utilizado exitosamente para mezclas de UHPC según las siguientes fuentes [23],[24],[25]

2.2.3 Cementantes

Los cementantes juegan un papel vital en las mezclas de concreto, son el pegamento que une a los agregados. Se hace diferencia entre dos tipos de cementantes:

- Los hidráulicos e hidráulicos latentes: Son el cemento portland y algunos tipos de escorias, los cuales por sus características químicas pueden reaccionar directamente con el agua y formar productos hidratados.
- Los cementantes suplementarios: Son aquellos que dependen de una fuente de hidróxido de calcio para formar hidratos, la cual puede provenir del cemento como un subproducto de su reacción con el agua, a este tipo de reacción se le conoce como puzolánica.

A continuación se hablará del cemento portland, del humo de sílice, y del polvo de caliza, que aunque no tiene propiedades cementantes puede acelerar la hidratación del cemento Portland.

Cemento Pórtland

La ASTM (American Society for Testing and Materials) define el cemento portland como el cemento obtenido de la mezcla minuciosa de materiales calcáreos y arcillosos u otros materiales que contienen sílice, alúmina u óxidos de fierro, quemándolos a una temperatura de formación de clinkers, y mezclando estos con yeso [56].

Los componentes principales del cemento son Silicato Tricálcico, Silicato Dicálcico, Aluminato Tricálcico, y Ferroaluminato Tetracálcico. Los compuestos menores son óxidos de magnesio, de titanio, de manganeso, de potasio y de sodio. Estos dos últimos conocidos como “álcalis”. Una composición típica de óxidos y de fases del cemento se puede observar en la Tabla 2.7 y en la Tabla 2.8

Tabla 2.7 Composición Típica de Óxidos [1]

Óxido	Contenido máximo (%)	Contenido promedio (%)
CaO	60-69	65
SiO ₂	18-24	21
Al ₂ O ₃	4-8	6
Fe ₂ O ₃	1-8	3
MgO	< 5	2
K ₂ O, Na ₂ O	< 2	1
SO ₃	< 3	1

Tabla 2.8 Composición Típica del Cemento Portland Ordinario [27]

Nombre Químico	Formula Química	Notación Corta	% en peso	Función mineral
Silicato Tricálcico	$3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_3S	50	Se hidrata rápidamente y confiere resistencias altas y fraguado
Silicato Dicálcico	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$	C_2S	25	Se hidrata lentamente e imparte resistencia a largo plazo.
Aluminato Tricálcico	$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A	12	Se hidrata casi instantáneamente y muy exotérmicamente. Contribuye al fraguado y a la resistencia temprana
Ferroaluminato Tetracálcico	$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF	8	Se hidrata rápido. Actúa como fundente en la manufactura de Clinker. Da la apariencia grisácea al cemento
Sulfato cálcico hidratado (yeso)	$\text{CaSO}_4\cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{C}\bar{\text{S}}\text{H}_2$	3.5	Se muele con el Clinker para controlar la reacción del C_3A

Las principales reacciones de hidratación de las fases del cemento se presentan en la Tabla 2.9:

Tabla 2.9 Principales reacciones de hidratación de las fases del Cemento [28]

$2(3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2)$ Silicato tricálcico	+ 11 H_2O agua	= $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 8\text{H}_2\text{O}$ Silicato de calcio hidratado (C-S-H)	+ 3 ($\text{CaO}\cdot\text{H}_2\text{O}$) Hidróxido de calcio
$2(3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2)$ Silicato tricálcico	+ 9 H_2O agua	= $3\text{CaO}\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 8\text{H}_2\text{O}$ Silicato de calcio hidratado (C-S-H)	+ $\text{CaO}\cdot\text{H}_2\text{O}$ Hidróxido de calcio
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ Aluminato tricálcico	+ 3 ($\text{CaO}\cdot\text{SO}_3\cdot 2\text{H}_2\text{O}$) Yeso	+ 26 H_2O Agua	= $6\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SO}_3\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ Etringita
$2(3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3)$ Aluminato tricálcico	+ $6\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 3\text{SO}_3\cdot 32\cdot\text{H}_2\text{O}$ Etringita	+ 4 H_2O Agua	= $3(4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SO}_3\cdot 12\text{H}_2\text{O})$ Monosulfoaluminato de calcio
$3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ Aluminato tricálcico	+ $\text{CaO}\cdot\text{H}_2\text{O}$ Hidróxido de calcio	+ $12\text{H}_2\text{O}$ Agua	= $4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 13\text{H}_2\text{O}$ Aluminato tetracálcico hidratado
$4\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ Ferroaluminato tetracálcico	+ 10 H_2O agua	+ 2 ($\text{CaO}\cdot\text{H}_2\text{O}$) Hidróxido de calcio	= $6\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot 12\text{H}_2\text{O}$ Ferroaluminato de calcio hidratado

Basado en experimentos de isotermas de sorción de vapor y agua químicamente enlazada T.C Powers en 1948 desarrolló un modelo de cómo se compone

volumétricamente una pasta de cemento hidratada [29], el cual se basa en lo siguiente:

- El agua puede estar en tres formas en una pasta de cemento: ligada químicamente (parte del gel sólido), físicamente adsorbida (agua de gel) o libre en los capilares.
- El agua químicamente enlazada es proporcional a la físicamente adsorbida
- El agua físicamente adsorbida no está disponible de manera general para reaccionar con el cemento anhidro, la hidratación se da preferencialmente con el agua capilar.
- Existe un cambio de volumen en la pasta debido a que los productos hidratados ocupan menos volumen que los anhidros, llamado contracción química

A través de estos principios se puede establecer el grado de hidratación de una pasta, su contracción potencial y porosidad teórica, las ecuaciones del modelo de hidratación de Powers son las siguientes:

$$V_c = 1 - \frac{ac}{ac + \frac{da'}{dc}} \quad (2.7)$$

$$V_a = \frac{ac}{ac + \frac{da'}{dc}} \quad (2.8)$$

$$V_{cq} = dc * Cq * V_c * \alpha \quad (2.9)$$

$$V_{ac} = V_a - \frac{dc}{da} (alq + afa)(V_c)\alpha \quad (2.10)$$

$$V_{ag} = \frac{dc}{da} * afa * V_c * \alpha \quad (2.11)$$

$$V_{gs} = \left(1 - dc * Cq + \frac{dc}{da} * alq\right) * \alpha \quad (2.12)$$

$$V_{uc} = (V_c) * (1 - \alpha) \quad (2.13)$$

$$\alpha = \frac{ac}{alq + afa} \quad (2.14)$$

Donde:

V_c (m^3): Volumen de cemento inicial

V_a (m^3): Volumen de agua inicial

ac (kg/kg): Relación agua/cemento

d_a (kg/ m^3): densidad del agua

d_c (kg/ m^3): Densidad del cemento

alq (kg/kg): Agua ligada químicamente potencial (normalmente 0.23 kg de agua/kg de cemento completamente hidratado)

afa (kg/kg): Agua físicamente adsorbida potencial (normalmente 0.19 kg de agua/kg de cemento completamente hidratado)

C_q : Contracción química del cemento ($6.4 \times 10^{-5} m^3/kg$ de cemento).

V_{cq} (m^3): Volumen de contracción química

V_{ac} (m^3): Volumen de agua capilar

V_{ag} (m^3): Volumen de agua de gel o físicamente adsorbida

α : Potencial de hidratación.

La norma NMX-C 414-ONNCCE [30] hace las siguientes definiciones con respecto a los tipos de cementos:

- **Cemento hidráulico:** Es un material finamente pulverizado, comúnmente conocido como cemento, que al agregarle agua, ya sea solo o mezclado con arena, grava, asbesto u otros materiales similares, tiene la propiedad de fraguar y endurecer, incluso bajo el agua, en virtud de reacciones químicas durante la hidratación y que, una vez endurecido, conserva su resistencia y estabilidad.
- **Cemento portland ordinario:** Es el cemento producido a partir de la molienda del Clinker portland y usualmente sulfato de calcio.

- **Cemento portland compuesto:** Es el conglomerante hidráulico que resulta de la molienda conjunta de clinker portland que, usualmente contiene sulfato de calcio y una mezcla de materiales puzolánicos, escoria de alto horno y caliza. En el caso de la caliza, éste puede ser el componente único.

Para la clasificación de los cementos con respecto a su composición química la misma norma proporciona la Tabla 2.10

Además de la clasificación general de los cementos la norma propone una clasificación especial, la cual incluye características del cemento orientadas a resolver problemas específicos como podría ser el ataque por sulfatos; la misma puede verse en la Tabla 2.11. Igualmente propone una clasificación más acerca de la clase resistente de los cementos la cual puede verse en la Tabla 2.12.

Tabla 2.10 Tipos de Cemento (clasificación; Norma NMX-C 414-ONNCCE).

Tipo	Denominación
CPO	Cem. Portland Ordinario
CPP	Cem. Portland Puzolanico
CPEG	Cem. Portland c/Escoria Granulada
CPC	Cem. Portland Compuesto
CPS	Cem. Portland c/humo de Sílice
CEG	Cem. c/Escoria Granulada

Tabla 2.11 Cementos c/características especiales (Norma NMX-C 414-ONNCCE).

Nomenclatura	Características especiales de los cementos
RS	Resistente a los Sulfatos
BRA	Baja Reactividad Alkali-agregado
BCH	Bajo Calor de Hidratación
B	Blanco

Tabla 2.12 Especificaciones mecánicas (Norma NMX-C 414-ONNCCE).

Clase Resistente	Resistencia a la compresión (N/mm ²)		
	3 días	28 días	
	Mínimo	Mínimo	Máximo
20	-	20	40
30	-	30	50
30R	20	30	50
40	-	40	-
40R	30	40	-

Cuando un cemento necesita tener una resistencia inicial especificada se indica con una R en su denominación. Como ejemplo de una clasificación usando todos los parámetros encontrados en la norma está lo siguiente:

Un cemento Portland compuesto de clase resistente 30 de alta resistencia inicial y bajo calor de hidratación sería CPC 30R BCH.

El cemento recomendado Pórtland para los UHPC desde el punto de vista de la composición química es uno que contenga un bajo contenido de aluminato tricálcico (C_3A) significativamente menor que el 8% [3], una baja fineza de Blaine debido a que requieren de menos agua y la relación agua/cemento puede reducirse más [6]. Otro efecto que se ha reportado en el concreto hecho con cemento con un alto contenido de C_3A , es que éste reacciona con los aditivos superfluidificantes base policarboxilato, los cuales son los más usados en el concreto de ultra alto desempeño, debido a que el radical COO^- que existe en los aditivos reacciona formando compuestos organominerales [1].

Se ha visto que el calor máximo de hidratación de concreto de cementos binarios/terciarios (ceniza volante y/o escoria granulada) se reduce con materiales cementantes suplementarios, como resultado, el concreto de materiales cementantes suplementario genera un menor riesgo de fractura térmica que el concreto de cemento portland [31].

Con respecto a la cantidad de cementante que se debe usar en mezclas de concreto de ultra alto desempeño Wang [12], investigó el efecto de la relación volumétrica cementante/agregado variando el contenido de 500 kg/m³ hasta 900 kg/m³ de cementante. Llegó a la conclusión de que es necesario mantener alto el volumen de pasta para ganar fluidez y desempeño de ultra alta resistencia.

Humo de sílice

El humo de sílice es un subproducto de la fabricación de silicio metálico, aleaciones u ocasionalmente de la fabricación de zirconio. Esos metales o aleaciones son producidos en hornos de arco eléctrico. Durante el proceso vapores de óxido de silicio (SiO) se forman en el arco eléctrico, y cuando éstos escapan por la parte superior del horno entran en contacto con el aire y se oxidan formando pequeñas partículas vítreas de dióxido de silicio (SiO₂), cien veces más pequeñas que el cemento [1]. Un ejemplo ilustrativo de la producción de la micro sílice se presenta en la Figura 2.6.

Por su alta área superficial y su estructura química amorfa, la micro sílice reacciona fácilmente con el hidróxido de calcio para formar silicatos de calcio hidratados, esta reacción es llamada puzolánica y se puede describir de la siguiente manera:



De acuerdo a Lothenbach et al. [32] la relación y/x entre el Hidróxido de Calcio y el Dióxido de Silicio depende de la cantidad de microsíllice adicionada al sistema, mientras mayor sea la adición de micro sílice éste valor se verá más reducido pasando de valores entre 1.5 y 1.9 (CSH tipo Jennita) a valores menores de alrededor de 0.83 (CSH tipo Tobermorita). La Figura 2.7 presenta un modelo termodinámico de las fases presentes en un sistema cemento portland+humo de sílice en función de la cantidad de SiO₂ adicionado.

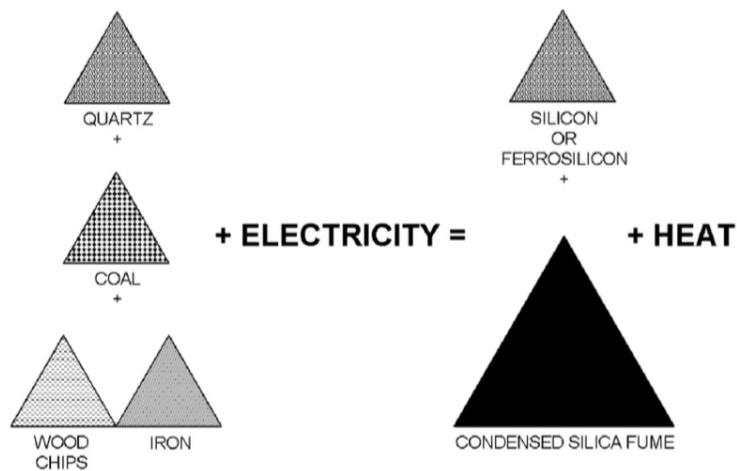


Figura 2.6 Principio de producción de la micro sílice

La Figura 2.7 muestra que con adiciones moderadas de microsílice la portlandita se consume. Si una mayor cantidad de humo de sílice es añadido, el excedente de silicio reacciona con los CSH tipo Jennita para progresivamente convertirse a un compuesto con menor contenido de calcio tipo Tobermorita.

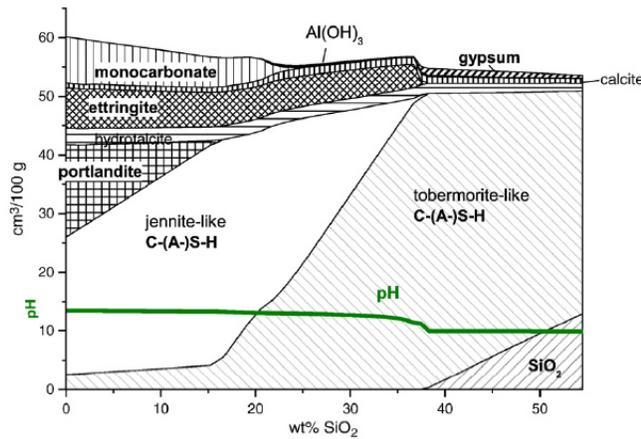


Figura 2.7 Cambios modelados en Cemento Portland hidratado mezclado con SiO₂, asumiendo una completa hidratación del Cemento Portland y SiO₂

Para las adiciones de micro sílice de bajas a moderadas, la relación calcio silicio se mantiene ligeramente por debajo del rango de la Jennita, una recopilación de lo reportado en la literatura se presenta en la Tabla 2.13

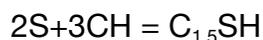
Tabla 2.13 Relación Ca/Si del CSH formado por la micro sílice

Relación Ca/Si de la reacción puzolánica de la Micro Sílice	
Papadakis [33]	1.5
Sellevoid [34]	1.14
Ramachandran [35]	0.8-1.5

Un valor entre 0.8 y 1.5 de relación Ca/Si puede ser considerado como un valor adecuado.

Con respecto al agua ligada químicamente por la reacción puzolánica de la micro sílice (y+z), se ha reportado que la adición de micro sílice no la aumenta y que la relación C/H de los compuestos de micro sílice es igual que la del Hidróxido de Calcio [34] lo que convierte al término Z en cero.

La reacción puzolánica de la micro sílice para adiciones bajas ha sido descrita en [33], como prosigue:



A partir de una modificación del modelo de Powers de hidratación del cemento, Jensen [36] propone una ecuación para estimar el grado de hidratación de un sistema de micro sílice y cemento tomando las siguientes consideraciones:

- La micro sílice y el cemento se hidratan de manera paralela y su grado de hidratación es el mismo
- La micro sílice no liga agua químicamente, pero sus hidratos adsorben 0.5 gramos de agua por gramo de micro sílice que ha reaccionado.
- La contracción química de la micro sílice es 20 ml/100 g de micro sílice que ha reaccionado.

Tomando en cuenta estas consideraciones propone la ecuación

$$\alpha = \frac{ac}{0.42 + 0.5 * sc} \quad (2.15)$$

Donde:

α = Es el grado de hidratación del sistema

ac= Es la relación agua cemento en peso

sc = Es la relación micro sílice cemento en peso

Una preocupación relacionada con el avance de la reacción puzolánica es la reducción del pH de la solución de poro. La reacción puzolánica reduce la cantidad de iones de Calcio disueltos en la solución de poro al ligarse estos con el SiO_2 , mientras que adiciones altas de micro sílice promueven la formación de CSH con bajas relaciones Ca/Si, este tipo de CSH incorpora dentro de sus cadenas una mayor cantidad de álcalis lo que reduce todavía más la alcalinidad de la solución de poro.

Sin embargo esta reducción de pH no es tan alta, puesto que concretos con hasta 20% de micro sílice siguen teniendo un pH por arriba de 12.5 el cual es mayor que el necesario para iniciar la despasivación del acero [32],[35].

Otro resultado de la reducción del pH es la reducción de la velocidad de reacción de la micro sílice, a mayor pH mayor velocidad de reacción. A altos niveles de adición de micro sílice, el pH disminuye, reduciendo la solubilidad de los silicatos amorfos y con ello la velocidad de reacción [32].

Mientras que la reducción del pH reduce la solubilidad de la micro sílice, el aumento de la temperatura la acelera, a mayores temperaturas mayor es la cantidad de micro sílice reaccionada.

La reacción de la micro sílice puede continuar, incluso cuando la portlandita ha desaparecido el humo de sílice continúa reaccionando, pero más lentamente. La microsíllice proseguirá su reacción combinándose con las especies de CSH más ricas en calcio, reduciendo de esta manera la relación Ca/Si a largo plazo[32].

Típicamente la relación humo de sílice/cemento usado en Concretos de Ultra Alto Desempeño es de 0.25. Esta relación corresponde al contenido óptimo de relleno y está cerca del contenido requerido para un consumo completo del

hidróxido de calcio que resulta de la hidratación completa del cemento. Sin embargo, la hidratación del cemento de los RPC no es completa porque según Powers, esta sólo puede ser alcanzada por relaciones agua/cemento iguales o mayores a 0.42. A relaciones agua/cemento menores parte del cemento se mantiene anhidro y permanece como un relleno inerte, de manera que la cantidad disponible de humo de sílice es mayor que la requerida para la reacción puzolánica [7].

El alto porcentaje de adición de humo de sílice (mayor al 25% por peso de cemento) cambia la cinética de reacción y las propiedades mecánicas. Se ha visto que los cementos de polvos reactivos tienen un largo período durmiente de cerca de 20 horas después de la adición del agua, el cual puede ser atribuido a la alta cantidad de superplastificante. Después de esto, se inicia una reacción de hidratación caracterizada por un desprendimiento alto de calor que dura 12 horas. La cantidad de hidratación observada a 70 horas es del 18%[37].

Según Richard [7], el humo de sílice usado en los Concretos de Ultra Alto Desempeño sirve para las siguientes tres cosas:

- Llenar los vacíos entre la siguiente partícula más grande (cemento)
- Mejorar las características reológicas con el efecto de lubricación que da su esfericidad
- Producir hidratos secundarios de reacción puzolánica con el hidróxido de calcio producido por la reacción primaria

Los siguientes parámetros son utilizados para la caracterización del humo de sílice:

- Grado de agregación de las partículas
- Naturaleza y cantidad de impurezas
- Tamaño básico de partícula

Polvo de caliza

Se ha probado que el polvo de caliza acelera el proceso de hidratación del cemento, lo cual es beneficioso para la estructura del concreto y su desempeño, al igual que puede fomentar un mayor grado de hidratación de los materiales cementantes. Se ha visto que en presencia de polvo de caliza se forman preferiblemente monocarbonato de aluminato de calcio y que la hidratación del C_3S es acelerada y que algunos carbosilicatos son producidos. Fuentes muestran que el polvo de caliza tiene un efecto compactador y de dispersión en la precipitación del hidróxido de calcio y en el gel de C-S-H al igual de jugar un papel principal en la cristalización[12].

2.2.4 Fibras

Un alto porcentaje de volumen (2.5 a 10%) de fibras de acero especiales (24 o 12 mm de longitud y 0.16 mm de diámetro) [8],[19],[37],[38],[39],[40] se han reportado en la literatura. Han sido usadas igualmente combinaciones de fibras cortas y largas en cocteles con la incorporación de fibras de polipropileno.

Graybeal [41] ensayó cubos de 10 cm a compresión para estudiar el efecto del alineamiento preferencial de las fibras, y concluyó que éste no tiene un efecto significativo en la resistencia a compresión o módulo elástico. Sin embargo, los ensayos de flexión a tres puntos mostraron que el pico de resistencia a flexión equivalente se redujo por un factor de más de tres cuando las fibras estuvieron alineadas preferentemente perpendicularmente a las fuerzas de tensión. Aquellos prismas no mostraron tenacidad después de la fractura, la cual es normalmente asociada a los UHPC, y frecuentemente exhibieron un abrupto decrecimiento de la carga después de la primera fractura.

La adición de fibras en los concretos de ultra alto desempeño provee muchas ventajas al desempeño a tensión. Los UHPC que son sometidos a ensayos de compresión cuando no están reforzados con fibras exhiben un desempeño frágil y explosivo, al estar reforzados con fibras los especímenes sometidos al mismo tipo de ensayos se mantienen enteros después de la falla.

2.3 Mezclado

En el proceso de elaboración del concreto es usual que los elementos secos se mezclen previamente durante un minuto [7],[23],[37],[39]. Posteriormente se incorpora el agua y el plastificante y se sigue mezclando durante un tiempo total que puede ir entre los 4 y 10 minutos. Algunos autores que señalan la pertinencia de incorporar en dos etapas el plastificante con la justificación de que la reacción de estos aditivos toma un tiempo [23], sin embargo, hay autores que afirman que el retraso de la incorporación de aditivos superplastificantes basados en polycarboxilatos de éter no mejora su efectividad [38].

A pesar de lo contradictoria que pueda parecer la literatura acerca de las ventajas de la adición retardada o en partes de los aditivos base polycarboxilatos en [42] se presenta un estudio que propone una explicación acerca de las ventajas de la adición retardada o en partes del aditivo fluidificante.

Las conclusiones de los autores acerca de la mejora de la fluidez por la adición tardía o por partes del aditivo fluidificante base polycarboxilatos son las siguientes:

Los aditivos base polycarboxilates funcionan bajo el efecto de la fuerza de repulsión estérica. La cadena principal se adsorbe en la partícula de cemento y las cadenas secundarias se extienden para evitar que las partículas se acerquen (Figura 2.8 a). Mientras la hidratación continúa puede existir precipitación de productos en la vecindad de la partícula de cemento que ya se encuentra ligada al polímero fluidificante, debido a esto la longitud efectiva que le queda al aditivo para separar a la partículas de cemento se ve reducida y con ello su poder fluidificante (Figura 2.8 b y c).

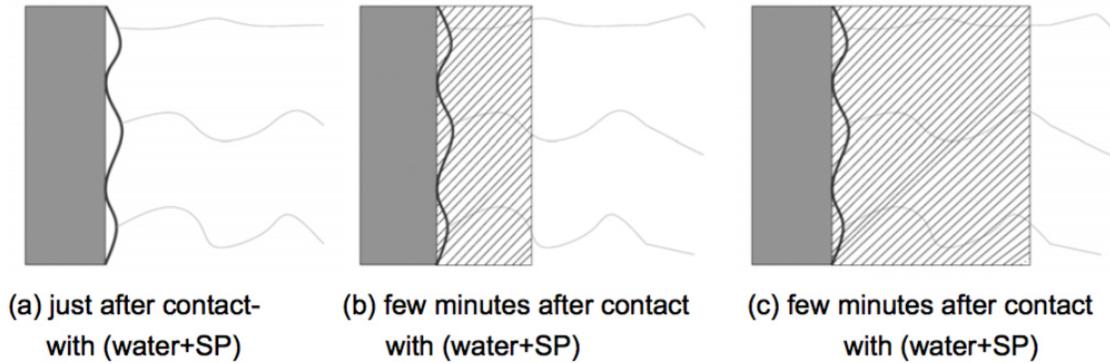


Figura 2.8 Ilustración del efecto de la adición directa del aditivo base policarboxilatos en el cemento, a) cemento con baja velocidad de reacción y b) cemento con alta velocidad de reacción.

La razón de que la adición tardía o por partes del aditivo fluidificante base policarboxilatos tenga éxito en mejorar las propiedades en estado fresco de la pasta radica en lo que se ilustra en la Figura 2.9. Si el plastificante es adicionado con el agua o inmediatamente después, es posible que las cadenas secundarias del polímero se vean sumergidas en los productos de hidratación que se forman a edades tempranas. Pero si se añade por partes o de manera tardía, los polímeros se verán adsorbidos en la capa inicial de los productos de hidratación, permitiendo así que el fluidificante tenga una longitud de cadena efectiva mayor y por lo tanto mayor efecto de fluidificación.

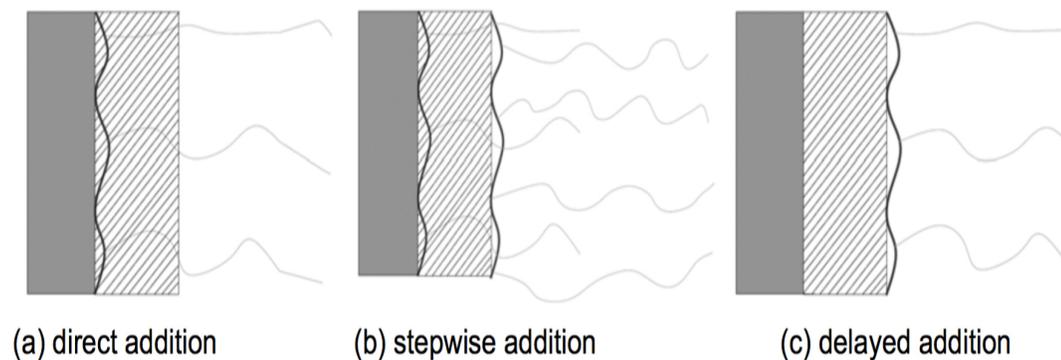


Figura 2.9 Ilustración de la adición directa (a), adición en partes (b), y la adición tardía (c)

Con respecto a la adición de las fibras es de común práctica adicionarlas después de que la mezcla ya ha llevado un período de incorporación previo prolongado y que cuando ya se tiene un aspecto homogéneo [1], [38], [7], [18], [37] y [23]. Posterior a la adición de las fibras el concreto es puesto en moldes y

compactado manual y mecánicamente, los moldes son cubiertos con mantas para evitar la evaporación del agua y almacenados durante un día en espera del fraguado.

2.4 Curado

En relación al curado existen tres posibles alternativas [1], [6], [7], [37]:

- Curado estándar: Consiste en el almacenaje de especímenes en cuartos de curado con humedad (90-100% HR) y temperatura controlada (20-23°C).
- Curado de alta temperatura: Consiste en someter a los especímenes a temperaturas usuales de 90 o 100°C por lapsos que pueden ir desde horas hasta días.
- Curado por autoclave: Consiste en someter los especímenes a temperaturas que van desde los 200 hasta los 500°C y a presiones que van desde los 2 hasta los 50 MPa.

Los tratamientos de calor son una parte del proceso de producción de la mayoría de los concretos de ultra alto desempeño. En la mayoría de los casos se les aplica tratamientos de temperatura de 90 o más centígrados. A tales temperaturas de curado existen dos tipos de complicaciones:

1) Para concretos hechos con cementos convencionales, está muy bien estudiado que temperaturas arriba de 70°C puede provocar la aparición de etringita retardada [43].

2) Al someter los concretos a temperaturas de alrededor de 100 °C, es posible observar un proceso llamado “Retrogresión de la resistencia”. Este fenómeno produce menores resistencias y un aumento de la permeabilidad. La baja de desempeño de las mezclas se debe a la formación de fases cristalinas ricas en calcio como el α -silicato cálcico hidratado (α -C₂SH) [44].

Etringita retardada

Heinz [43] hizo un estudio acelerado en Concretos de Ultra Alto Desempeño para evaluar si este ataque puede existir en un sistema como este:

Se hicieron prismas de 1x4x16 cm. para determinar a través de la prueba Duggan si el ataque por etringita se producía. Los especímenes tratados con calor fueron sujetos a ciclos alternados de temperatura y humedad (en agua a 21°C y secos a 82°C). Seguidamente, los especímenes fueron guardados en agua y la longitud se midió. El test de Duggan señala un máximo de expansión de .5 mm/m después de 21 días como un criterio de aceptación. En el estudio se extendió a 400 días (Figura 2.10).

Entre las conclusiones de este estudio se encuentran que el tratamiento a 90°C con cemento resistente a sulfatos (UHSC CEM I-HS) y uno con 69% de escoria granulada (UHSC CEM III/B) en mezclas de Concreto de Ultra Alto Desempeño no produjo el ataque de etringita.

Debido a que los UHPC se hacen por lo general con cementos resistentes a sulfatos por motivos de reología, la aparición del ataque de etringita retardada es poco probable.

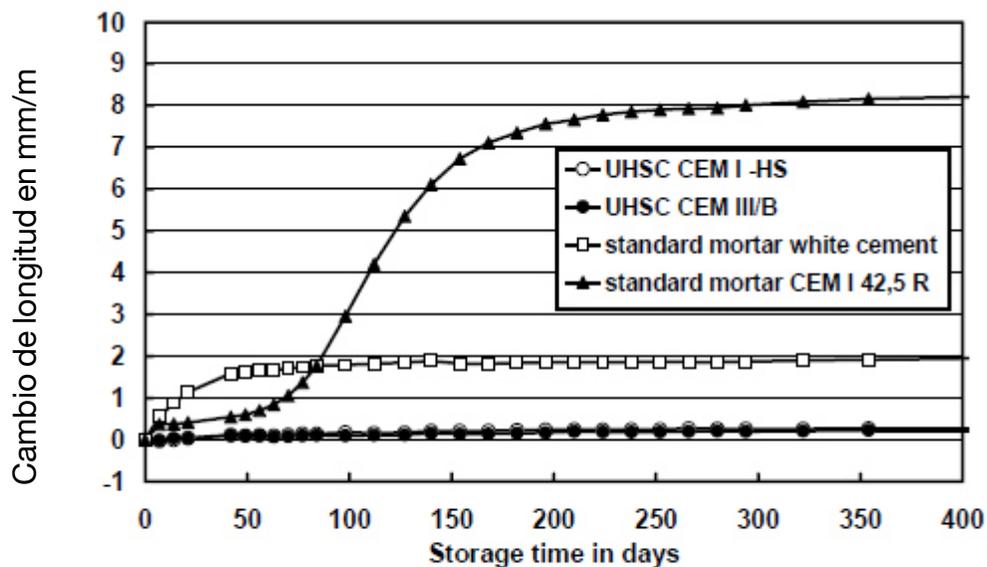


Figura 2.10 Expansión de especímenes de diferentes concretos y morteros durante el test de Duggan. Los especímenes fueron tratados con calor a 90°C

Retrogresión de la resistencia

Los tratamientos de calor en este tipo de concretos le permiten alcanzar propiedades que difícilmente se alcanzarán en períodos de tiempo razonables. Las resistencia compresión puede aumentar entre un 21 y un 59% comparando especímenes curados al vapor con los que han sido sometidos a un curado estándar y esto puede deberse a que a condiciones de alta temperatura el C-S-H se convierte a un producto cristalino llamado α -silicato cálcico hidratad (α -C₂SH), el cual produce un aumento en la porosidad. Sin embargo, en presencia de fuentes de sílice, el α -C₂SH se convierte en torbemorita (C₅S₆H₅) [8]

Se puede ver en la figura 3 extraída de [7], que los concretos tratado al vapor alcanzan su resistencia máxima inmediatamente después de que el tratamiento ha sido aplicado y que los cilindros comunes no igualan esa resistencia ni en 3 meses.

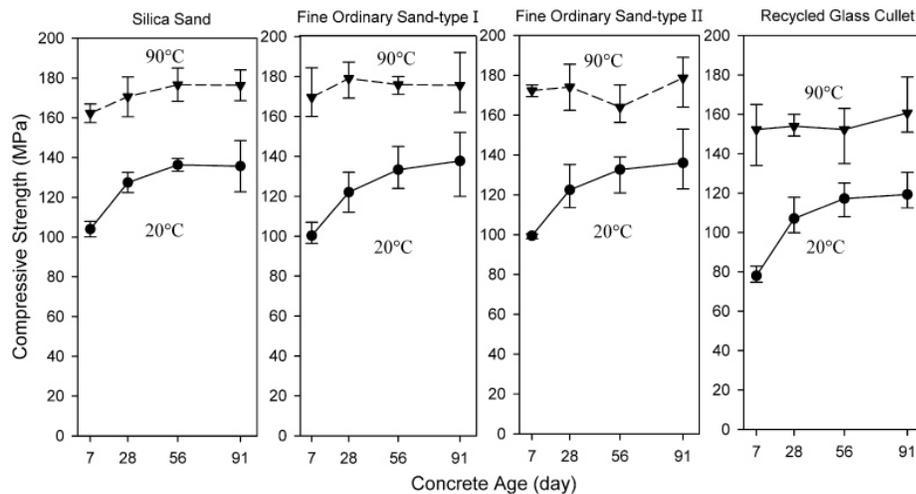


Figura 2.11 Desarrollo de resistencia de cilindros curados a alta temperatura vs cilindros curados de manera estándar [7].

En general los concretos de ultra alto desempeño contienen fuertes adiciones de cuarzo molido y humo de sílice [7], esto aunado a la ahora cada vez más común práctica de añadir puzolanas a las formulaciones permite aumentar las resistencias con tratamientos térmicos y evitar la retrogresión de la resistencia.

2.5 Aditivos

Collepari et al. en [10] investigó la influencia de aditivos reductores de agua de alto rango en la resistencia a compresión de concretos de ultra alto desempeño. Reportaron que los aditivos de polímeros acrílicos permitieron el uso de relaciones agua cemento más bajas resultando esto en resistencias más altas comparadas con los basados en naftaleno y melamina.

Por otro lado Soutsos en [38] reporta que los plastificantes basados en polímeros de policarboxilato probaron ser más eficientes que los basados en naftaleno y que las presentaciones líquidas permiten desmoldar en menor tiempo que las que se ofrecen en polvo.

Es conocido que las cantidades de C_3A , SO_3 , hemidrato de yeso y la cantidad de álcalis solubles, así como la fineza influyen directamente en el desempeño de los plastificantes en las mezclas de concreto. Y con el advenimiento de los cementos binarios o terciarios la cantidad de alúmina en el cemento se ha incrementado, debido a la preocupación de cómo el contenido de C_3A en un cemento pudiera influir en la fluidez de mezclas de Concreto de Alto desempeño en [45] se presenta un estudio de la influencia del C_3A en la viscosidad de pastas de cemento fluidificadas con dos aditivos: uno base policarboxilatos (PC34) y otro base naftaleno (BNS).

En la Figura 2.12 se puede apreciar como para cantidades menores del 8% de C_3A en el cemento la viscosidad de las pastas permanece constante, sin embargo, cuando se cruza el aparente umbral de 8% de contenido de la fase, la viscosidad aumenta grandemente.

Debido a estas evidencias el autor recomienda utilizar cementos con no más de 8% de contenido de C_3A , pues estos pueden ser fluidificados fácilmente con los aditivos de última generación.

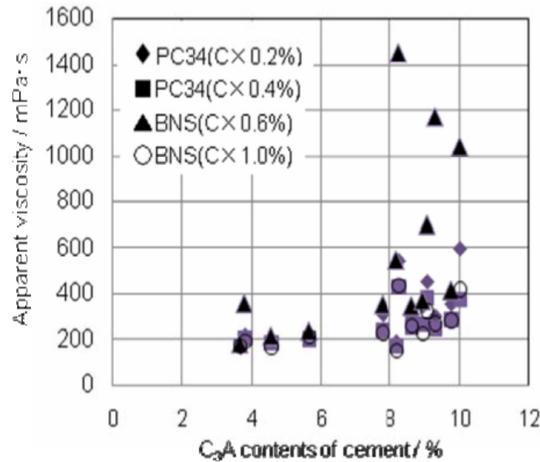


Figura 2.12 Influencia del contenido de C_3A en la fluidez de pastas de cemento[45]

2.6 Sostenibilidad y durabilidad del concreto

Acerca de la economía y la sostenibilidad del UHPC nos habla un estudio reportado (Racky [46]), donde los autores examinan las propiedades del concreto normal y de alto desempeño en relación a una de ultra alto desempeño. En su análisis comparan el consumo energético y de materia prima de la fabricación de una columna a compresión los cuales son presentados en la Tabla 2.14. Al ser presentada de esta forma la información es posible dilucidar de mejor manera qué es lo que implica hacer un elemento de ultra alta resistencia, aunado a sus ventajas adicionales, como lo son la reducción de la cantidad de acero, entre otras.

Tomando en consideración los datos de la tabla puede observarse ventajas del UHPC con respecto a los concretos ordinarios y de alto desempeño, tanto en el consumo energético como en el uso de materias primas. Debe notarse igualmente que al reducir el volumen del concreto se reducen también las cargas que llegarán a las cimentaciones, por ende las cimentaciones podrán ser menos robustas y con la reducción del volumen de concreto se tendrá un mayor espacio disponible para su uso con lo que aumentará la plusvalía de la edificación, esto sin tomar en cuenta la vida útil de la estructura.

Tabla 2.14 Consumo de energía y materia prima para una columna de concreto reforzada de acuerdo a la clase del concreto (Carga muerta 40 MN, longitud 3.5 metros) [46]

Clase de Resistencia del Concreto		C 40/50 MPa	C 80/95 MPa	C 180 MPa
Sección de la columna de concreto	m ²	1.0	0.67	0.44
Volumen de concreto	m ³	3,360	2,258	1,464
Sección del acero de refuerzo	cm ²	400	270	174
Volumen de acero	m ³	0.140	0.095	0.061
Peso de acero	T	1.08	0.74	0.47
Consumo energético				
Concreto	MJ	6,693	5,701	8,616
Acero de refuerzo	MJ	11,745	8,048	5,111
Total	MJ	18,438	13,749	13,727
Consumo de materia Prima				
Concreto	to	8.13	5.37	5.71
Acero de refuerzo	to	6.91	4.74	3.01
Total	to	15.04	10.11	8.72

Hablando de la durabilidad de este tipo de materiales, podemos encontrar un ejemplo en el estudio realizado Michael Thomas et al. [47] donde se evaluó el desempeño de tres series de Concretos de Ultra Alto Desempeño que constaron de vigas de 152x152x533 mm. y se dejaron al nivel medio de la marea en un sitio de exposición marina en la Isla Treat en Maine durante 15 años. Según los autores la isla Treat supone condiciones de exposición muy severas al presentarse en ella mareas muy severas de alrededor de 6 metros al igual que ciclos de congelamiento-deshielo (más de 100 al año).

En laboratorio se determinaron el coeficiente de difusión a los cloruros por la norma ASTM C1556 y la “permeabilidad a los iones cloro” a través de la norma ASTM 1012. Se obtuvieron valores entre 0 y 19 coulombs para la prueba de permeabilidad a iones cloro, lo cual indica una permeabilidad despreciable, y un

coeficiente de difusión de $D=1.3 \times 10^{-13} \text{m}^2/\text{s}$, el cual es alrededor de dos ordenes de magnitud menor que el del concreto normal.

Con respecto a las pruebas de desempeño en ambiente real, se midieron la profundidad a la cual los cloruros habían alcanzado el umbral de cloruros (0.05 y 0.1% en masa de concreto según los autores) para las probetas expuestas para los Concretos de Ultra Alto Desempeño (RPC-USACE, UNB-FM, VHSC-USACE) y un Concreto de Alto Desempeño (HPC) como referencia. Tomando en cuenta que la difusión sea el mecanismo dominante del transporte de los cloruros en el concreto y que el coeficiente de difusión no cambiara con el tiempo, los autores asumieron que la penetración de la concentración del umbral de cloruros es proporcional a la raíz cuadrada del tiempo, se graficó la profundidad del umbral con respecto al tiempo para los concretos probados (Figura 2.13)

El comité ACI 318[48] recomienda que la profundidad a la que tiene que estar el refuerzo embebido en el concreto debe ser de 7.5 cm cuando el concreto está expuesto a ciclos de humedecimiento y secado; podemos hacer un estimado de la vida útil de estos concretos a partir de los datos plasmados en la Figura 2.13.

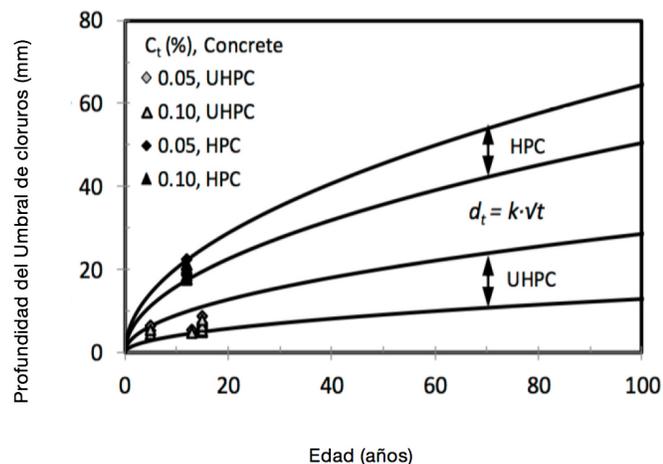


Figura 2.13 Velocidad de penetración del Umbral de cloruros para UHPC y HPC

Para los concretos de alto desempeño se tendría una vida útil estimada de alrededor de 150 años, mientras que para un concreto de ultra alto desempeño

la vida útil con respecto a la penetración de cloruros sería muy difícil de estimar puesto que aparentemente sería ilimitada.

Debido a la relativa novedad de la disponibilidad del UHPC de manera comercial (el Ductal, estuvo disponible a partir de 1998), todavía no se tienen resultados a 50 años que pudieran confirmar la aparente impermeabilidad del concreto; pero asumiendo conservadoramente una vida útil de 200 años se estaría hablando de un concreto que requiere significativamente un menor volumen para la construcción de secciones estructurales y el cual además tiene una vida útil al menos cuatro veces mayor que un concreto normal, siendo así éste más sostenible.

Capítulo 3 Justificación e hipótesis

3.1 Justificación

El concreto de ultra alto desempeño, al ser mucho más resistente que el concreto estructural convencional permite fabricar secciones hasta tres veces más delgadas y tiene una mayor vida útil debido a su alta densidad.

Al utilizarse agregados calizos de origen local, su costo se verá reducido con respecto a productos comerciales que involucran la utilización de agregados volcánicos.

Al ser autocompactables, los Concretos de Ultra Alto Desempeño conducen a reducir tiempos de colocación y reducir la mano de obra

La permeabilidad en este tipo de material es un orden de magnitud menor que el concreto convencional, por lo que resulta una opción muy apropiada en ambientes de servicio donde la durabilidad del concreto está comprometida.

3.2 Hipótesis

Mediante la optimización de las proporciones de la mezcla, utilizando agregados calizos de la Zona Metropolitana de Monterrey, un cemento bajo en aluminato tricálcico, humo de sílice y una consistencia fluida, es posible producir concretos

de Ultra Alto Desempeño con resistencias a la compresión mayores o iguales a 150 MPa y con una vida útil estimada mayor a 100 años.

Capítulo 4 Objetivos

4.1 Objetivo general

Desarrollar concretos de ultra alto desempeño con proporciones optimizadas y resistencia mínima a la compresión 150 MPa utilizando agregados típicos de la Zona Metropolitana de Monterrey, México.

4.2 Objetivos específicos

- Determinación de las cantidades óptimas de micro sílice, aditivo fluidificante y cemento para la producción de concretos de ultra alto desempeño en base a la resistencia a compresión de cubos de 50 mm.
- Evaluar el efecto de diferentes opciones de cemento y la adición de micro sílice en los tiempos de fraguado y trabajabilidad de las mezclas.
- Evaluar el efecto de la adición de fibras metálicas en la trabajabilidad.
- Determinar el módulo de elasticidad estático, la resistencia a la compresión, a la flexión y a la tensión por corte diametral para los concretos con proporciones optimizadas y con adición de fibras.
- Determinar el coeficiente de migración de cloruros en estado no estacionario para los concretos con proporciones optimizadas, así como la resistividad eléctrica superficial.
- Evaluar el efecto de un curado con temperatura controlada (de temperatura ambiente hasta 90 grados celsius).
- Evaluar la hidratación de pastas de cemento con adiciones de micro sílice mediante análisis termogravimétricos.

Capítulo 5 Materiales y caracterización

5.1 Descripción de los materiales

5.1.1 Cementantes y filler

Se utilizaron 4 tipos de cementos Portland que clasificados como se muestra a continuación de acuerdo a la norma NMX-C-414 [30]. En la Figura 5.1 puede observarse su aspecto físico:

- Cemento I: CPO 30 R RS BRA
- Cemento II: CPO 40
- Cemento III: CPC 40 RS
- Cemento IV: CPC 40 R RS

Se utilizó un tipo de microsílíce de aspecto grisáceo y bajo contenido de carbón, en la Figura 5.2 se puede apreciar su aspecto físico .

Se utilizó micro-polvo de mineral de carbonato de calcio (mármol, calcita) comercializado por la compañía OMYA, con nombre comercial Omyacarb® UF – FL. El cual es un polvo ultra fino de alta pureza cuya composición química consiste en más de 99% de CaCO_3 en masa, en la Figura 5.3.



Figura 5.1 Cementos utilizados en la investigación.



Figura 5.2 Microsílíce utilizada en la investigación

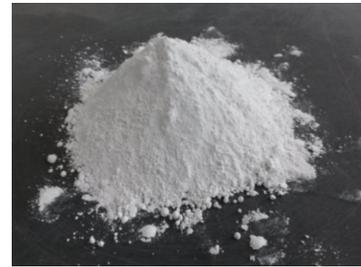


Figura 5.3 Micro polvo de caliza utilizado durante la investigación

5.1.2 Agregados

Los agregados ocupan la mayor parte del volumen total del concreto, son responsables de características como el módulo de elasticidad y la resistencia a

la compresión; por otro lado mejoran la estabilidad volumétrica del concreto y reducen los costos del mismo.

De acuerdo a su tamaño se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Agregado grueso: se refiere a las porciones de agregado retenidas en la malla con abertura de 4.75 mm (No. 4) [49].
- Agregado fino: se refiere a las porciones de agregado que pasan a través de la malla con abertura de 4.75 mm (No. 4) y se retienen en la malla con abertura de 75 μm (No. 200) [49].



Figura 5.4 Agregado grueso (izquierda), agregado fino (derecha).

Se utilizaron en la investigación agregados base caliza triturada de la región, el agregado grueso tuvo un tamaño máximo de 12.7 mm (malla de 1/2") y arena con un tamaño máximo de 4.75 mm (Figura 5.4).

5.1.3 Aditivo superplastificante

Para el presente proyecto se utilizó el aditivo Plastol Precast Plus® (Figura 5.5) de la compañía EUCOMEX, que es un aditivo reductor de agua de alto rango, diseñado específicamente para la fabricación de mezclas autocompactables. Este aditivo cumple con la norma ASTM C-494 como reductor de agua de alto grado tipos A y F [50].



Figura 5.5 Aditivo fluidificante Plastol Precast Plus®

5.1.4 Fibras metálicas

Se seleccionó una fibra metálica marca Dramix® OL (Figura 5.6) de densidad de 7.80 g/cm^3 , con una longitud 13mm y diámetro de 0.21 mm, y relación de aspecto de 60, elaborada con acero de alta resistencia (2750 MPa).



Figura 5.6 Fibras metálicas

5.2 Caracterización de los materiales

Los materiales utilizados en la investigación se caracterizaron de acuerdo a los procedimientos descritos en la Tabla 5.1.

A continuación se describen las técnicas de caracterización que no se encuentran estandarizadas, pero que fueron consideradas en esta investigación por proveer información valiosa en cuanto a las características de los materiales:

Composición química por Fluorescencia de Rayos X

Se obtuvo la composición química de los polvos mediante la técnica de Fluorescencia de Rayos “X” (FRX) para obtener los porcentajes de óxidos presentes en cada uno y en el caso de los cementos para obtener los compuestos potenciales de Bogue de acuerdo al estándar ASTM C 150.

Morfología de partículas por Microscopía Electrónica de Barrido:

Se observaron los cuatro cementos estudiados con el microscopio electrónico de barrido, así como la micro sílice, para estimar el tamaño de partículas de los cementantes así como su morfología.

Distribución de tamaño de partícula por láser:

Se obtuvo la distribución del tamaño de partículas (DTP) utilizando el equipo analizador de difracción láser de la marca MICROTRAC . La prueba se realizó utilizando una suspensión de material en polvo y alcohol isopropílico, con una pureza de 99.5%; dispersando la suspensión con ultrasonido, para eliminar posibles aglomeraciones en el material y determinar efectivamente su tamaño de partícula.

En el caso de la micro sílice primero se aplicó ultrasonido externo. Se depositó aproximadamente 5 mg de material en 3ml de alcohol isopropílico en un tubo de ensayo y se aplicó ultrasonido por 10 minutos, después al vaciarse toda la solución al Microtrac se aplicaron 60 segundos de ultrasonido.

Identificación de Fases Cristalinas por Difracción de Rayos X:

Se determinó la presencia de fases minerales tanto en el cemento como en la micro sílice mediante la técnica de Difracción de Rayos "X" (DRX) utilizando un difractómetro de rayos "X" Bruker D8 Advance con radiación de CuK_α de 1.5418 Å, equipado con un detector Vantec de alta velocidad y filtros de Níquel. Para los cuatro cementos se ejecutó la prueba de 10 a 80° 2θ y en el caso de la micro sílice de 10 a 90° 2θ, con una velocidad de rotación de 15 rpm y un tamaño de paso (step size) de 0.01° de 2θ.

Área superficial BET (Brunauer–Emmett–Teller)

Esta técnica cuantifica el área superficial a partir de la absorción de multicapas de nitrógeno en la superficie de un material. Es muy precisa y permite conocer el área superficial de materiales muy finos como la micro sílice.

El equipo utilizado para este análisis fue uno NOVA 2000e de Quantachrome Instruments.

Las condiciones de análisis fueron las siguientes: Las muestras fueron sometidas a tratamiento de desgasificación a 300°C por 1 hora previo al análisis, para posteriormente realizar su medición utilizando nitrógeno como gas adsorbente y nitrógeno líquido como medio a -196 °C, graficando 11 puntos de adsorción en el intervalo de 0.05 –0.3.

Tabla 5.1 Caracterización de los materiales utilizados en la investigación

	Cemento Portland	Micro Sílice	Agregado fino	Agregado grueso	Filler (Micro polvo de caliza)	Aditivo reductor de agua
Pruebas a realizarse	Densidad (ASTM C188)[51]	Densidad (ASTM C188) [51]	Densidad específica y absorción, según AASHTO T 84 [52]	Densidad específica y absorción, según AASHTO T 85[54]	Distribución de Tamaño de Partícula por Láser	Densidad (ASTM C 494) [50]
	Distribución de tamaño de partícula por Láser	Distribución de tamaño de partícula por Láser	Distribución Granulométrica, según AASTHO T 27 [53]	Distribución Granulométrica, según AASTHO T 27 [53]	Densidad, según ASTM C 188 [51]	Contenido de sólidos en %. (ASTM C 494) [50]
	Composición química por Fluorescencia de Rayos X	Composición química por Fluorescencia de Rayos X				
	Morfología y tamaño de partícula por Microscopía electrónica de barrido	Morfología y tamaño de partícula por Microscopía electrónica de barrido				
	Identificación de Fases Cristalinas por Difracción de Rayos X	Identificación de Fases Cristalinas por Difracción de Rayos X				
	Pérdida Por Ignición (ASTM C 114) [55]	Pérdida Por Ignición (ASTM C 114) [55]				
	Área superficial BET (Brunauer–Emmett–Teller)	Área superficial BET (Brunauer–Emmett–Teller)				

Capítulo 6 Diseño de mezclas

Para ilustrar el proceso de diseño de mezclas se hará un ejemplo, los parámetros de diseño se muestran en la Tabla 6.1

Tabla 6.1 Parámetros de diseño del ejemplo de dosificación de mezclas.

Parámetro	Valor a probar
Relación agua/cemento	0.25
Relación sílice/cemento	0.14
Dosificación de aditivo (gr/kg de polvo)	12.35

Paso 1: Determinación de la cantidad de cemento:

Tomando en cuenta los 200 litros de agua definidos por literatura [6],[10]-[13],[15], la cantidad de cemento se obtiene de una simple división del agua entre la relación $ac = 200/0.25 = 800 \text{ kg/m}^3$

Paso 2: Determinación de la cantidad de micro sílice

Una vez obtenida la cantidad de cemento, la cantidad de micro sílice viene de una simple multiplicación de la cantidad de cemento por la relación sílice cemento = $800 * 0.14 = 112 \text{ kg/m}^3$

Paso 3: Determinación de la cantidad de agregado fino

Para el cálculo de la cantidad de agregado fino se utilizó una tabla similar a la anterior (Tabla 6.2).

Tabla 6.2 Determinación de la cantidad de arena por el método de volúmenes absolutos

Material	Masa (kg/m ³)	Densidad (kg/l)	Volumen (l/m ³)
Agua	200	1	200
Cemento	800	3.13	255.59
Micro sílice	112	2.2	50.91
Arena	$= 473.5 * 2.6 = 1231.1$	2.6	$= 1000 - 20 - (200 + 255.29 + 50.91) = 473.5$
Aire			20

Paso 4: Adición del aditivo fluidificante al diseño de mezclas

El aditivo fluidificante se añade en función de la cantidad de polvos, en este caso micro sílice y cemento, multiplicado la dosificación por la cantidad en gramos total de polvo por metro cúbico $(800+112)*(12.35/1000)=11.26 \text{ kg/m}^3$.

Debido a que el aditivo fluidificante tiene una densidad distinta a la del agua y a que es una suspensión del agente activo en agua se hace necesario hacer una modificación al agua de mezcla para mantener la relación agua/cemento constante.

Las propiedades del aditivo fluidificante a utilizar en el ejemplo se plasman en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3 Propiedades del aditivo fluidificante

Tipo	Policarboxilatos
Densidad g/cm ³	1.12
Contenido de sólidos (%)	54.37

El ajuste del agua se hace en función de la cantidad de aditivo fluidificante añadido y su contenido de sólidos, en este caso se desean añadir 11.26 kg/m^3 de aditivo fluidificante, en esa cantidad de aditivo el 54.37% es sólido y el 45.67% es líquido. Esta cantidad de líquido es asumido como agua y se debe restar al agua de diseño de la siguiente manera $(200-11.26*(45.67/100))=194.86$.

Una vez obtenida la nueva cantidad de agua se debe hacer un ajuste de cantidades debido a la adición del aditivo fluidificante a la mezcla, la cual aumenta el volumen de mezcla por lo que se debe recalcularse para 1 m^3 , proceso que se ilustra en la Tabla 6.4

La conversión a un metro cúbico se hace con una simple regla de tres, las cantidades finales se pueden observar en la Tabla 6.5

Paso 5: Corrección por humedad de los agregados

Adicional a estos procedimientos, el peso de los agregados y la cantidad de agua deben ser corregidos en función de sus condiciones de humedad y de acuerdo al procedimiento descrito en el ACI 211.1 [16].

Tabla 6.4 Corrección de volúmenes por adición del aditivo fluidificante

Material	Masa (kg)	Densidad kg/l	Volumen
Agua	194.86	1	194.86
Cemento	800	3.13	255.59
Micro sílice	112	2.2	50.91
Arena	1231.1	2.6	473.5
Aditivo	11.26	1.12	10.05
Total			984.91
Aire 2%			20.1
Total con aire			1005.01

Tabla 6.5 Cantidades finales del ejemplo

Material	Masa (kg)	Densidad kg/l	Volumen
Agua	193.89	1	193.89
Cemento	796	3.13	254.31
Micro sílice	111.44	2.2	50.65
Arena	1224.95	2.6	471.14
Aditivo	11.20	1.12	10
Aire 2%			20
Total con aire			1000

Capítulo 7 Metodología experimental

Se plantean siete etapas en esta investigación.

1. Evaluar la influencia de la extensibilidad en la resistencia a compresión y la cantidad de aire.
2. Evaluar la influencia de la relación agua/cemento y la relación sílice/cemento (s/c) en el desempeño de las mezclas.
3. Evaluar índices de durabilidad de las mezclas optimizadas.
4. Evaluar la influencia del curado acelerado en una mezcla optimizada
5. Evaluar el efecto del aumento del tamaño máximo del agregado en la resistencia y durabilidad
6. Evaluar el efecto de la inclusión de fibras en las propiedades mecánicas e índices de trabajabilidad.
7. Caracterización de la hidratación de pastas por medio análisis termogravimétrico.

7.1 Procedimiento de mezclado.

Para el mezclado de las formulaciones se hicieron batchadas de 2.5 litros, se utilizó una mezcladora planetaria marca UNIVEX de 14.21 litros de capacidad y se siguió el siguiente procedimiento:

- Todos los polvos se adicionaron con prácticamente la totalidad del agua de mezcla exceptuando una pequeña cantidad que se dejó para diluir el aditivo fluidificante, esto con el objetivo de utilizarlo en su totalidad pues es muy viscoso.
- Se da un mezclado de 4 minutos inicial a velocidad 1.5 para poder homogenizar los materiales, al término del minuto 4 se adiciona el aditivo fluidificante y se mezcla un minuto adicional (en el caso que la mezcla no fuera fluida al término del minuto adicional el tiempo de mezclado se alargó

a 3 minutos). El aditivo se adiciona de manera retardada pues de esta manera se obtienen mejores resultados de acuerdo a Tue [42].

- Al minuto 5 se detiene la mezcla y se procede a un raspado general
- Posteriormente se pasa a velocidad 4 para un mezclado adicional de 3 minutos.



Figura 7.1 Mezcladora UNIVEX



Figura 7.2 Moldes de metal



Figura 7.3 Mini cono de revenimiento

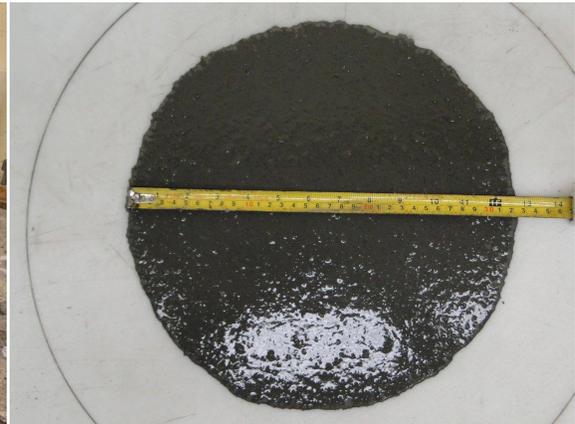


Figura 7.4 Medición de extensibilidad



Figura 7.5 Cilindro de volumen conocido para medición de peso volumétrico.

Terminada las mezclas se vertieron, sin vibrar ni compactar en moldes de metal (Figura 7.2), en el cono que marca la norma ASTM C 230/C 230 M [57] (Figura 7.3), una vez enrasado el cono se removió y la extensibilidad fue medida una vez que la mezcla detuvo su movimiento (Figura 7.4), se tomaron dos medidas y se promediaron los resultados. Simultáneamente se midió el peso volumétrico y el contenido de aire a través del procedimiento descrito en la norma ASTM C185 [58].

7.2 Definición de la extensibilidad objetivo

De acuerdo a Wille [5] existe un intervalo de extensibilidad en el cual se obtienen mejores resultados de compresión, y en el caso de los Concretos de Ultra Alto Desempeño, ésta puede ser medida a través de la prueba de extensibilidad de morteros que se describe en el estándar ASTM C230 [57].

Para estimar esta extensibilidad óptima se hicieron mezclas de mortero con dos de los cuatro cementos a las cuales se les midió la extensibilidad sin vibración por el método de la norma ASTM C230 [57], el contenido de aire a través del estándar ASTM C185 [58] y pruebas de compresión a los 28 días según la norma ASTM C109 [59].

La Tabla 7.1 muestra las mezclas diseñadas con objeto de determinar la extensibilidad de las mezclas del proyecto.

Tabla 7.1 Matriz experimental para obtener la extensibilidad óptima

Clave	Cemento I			Cemento II					
	CI2514-A11	CI2514-A13	CI2514-A15	CII250-A7	CII250-A7.6	CII250-A8.1	CII2514-A12.35	CII2514-A15	CII2514-A16
Dosificación de aditivo (gr/kg de material cementante)	11.00	13.00	15.00	7.00	7.60	8.10	12.35	15	16
Relación a/c	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Relación s/c	0.14	0.14	0.14	0.00	0.00	0.00	0.14	0.14	0.14
Agua (kg/m ³)	194.60	193.62	192.64	196.95	196.69	196.48	193.89	192.58	192.09
Aditivo (kg/m ³)	9.99	11.80	13.60	5.59	6.06	6.46	11.21	13.60	14.50
Cemento (kg/m ³)	796.55	795.93	795.31	798.01	797.84	797.70	796.01	795.15	794.83
Micro sílice (kg/m ³)	111.52	111.43	111.34	0.00	0.00	0.00	111.44	111.32	111.28
Arena (kg/m ³)	1241.55	1240.58	1239.61	1370.53	1370.24	1370.00	1234.38	1233.06	1232.56
Aire (%)	2.28	0.49	0.15	3.49	3.88	0.81	2.65	2.09	1.41
Extensibilidad (cm)	35.56	31.75	30.69	26.77	29.50	33.17	28.66	33.65	33.77
Densidad (kg/m ³)	2400	2390	2350	2330	2330	2400	2340	2340	2360

El sistema de nomenclatura de las mezclas de morteros es el siguiente:

- El cemento utilizado se muestra inicialmente con la abreviación C seguido de su número con numeración romana, siendo el cemento 1, el CI
- Seguido del nombre del cemento va la relación agua cemento en número, la relación agua/cemento de 0.25 se abrevia con el número 25
- Posteriormente se añade la relación microsíllice cemento, la relación sílice cemento de 0.14 se abrevia con el número 14

- Finalmente separada por un guión va la dosificación de aditivo fluidificante en miligramos por kg de polvo, precedido por una A, la dosificación de 11 gr/kg de polvo se abrevia con la clave –A11.

Para una mezcla hecha con el cemento 1, de relación agua/cemento 0.25, una relación micro sílice/cemento (s/c) de 0.14 y una dosificación de aditivo de 11 gr/kg de polvo la identificación quedaría como CI2514-A11.

Para la definición de la relación de sílice/cemento de esta prueba (0.14) se realizó el siguiente procedimiento el cual se basa en la hidratación del Cemento I:

Para el cálculo de la cantidad de moles de silicatos cálcicos presentes en el cemento se necesita conocer el peso molar de cada uno, se supusieron composiciones puras para simplificar el cálculo.

Las masas molares de los elemento presentes en los silicatos cálcicos se presentan en la Tabla 7.2:

Tabla 7.2 Masas molares de elementos presentes en los silicatos cálcicos

Elemento	Calcio	Oxígeno	Silicio
Masa molar (gr/mol)	40.078	15.999	28.086

El cálculo de la masa molar de los silicatos cálcicos y del Dióxido de silicio se muestran en la Tabla 7.3:

Tabla 7.3 Masa molar del Dióxido de Silicio y de los silicatos cálcicos.

	Cantidad de Ca (gr/mol)	Cantidad Si (gr/mol)	Cantidad de O (gr/mol)	Masa molar (gr/mol)
C₃S	3*(40.078)	1*(28.086)	3*(15,999)+2*(15,999)	228.315
C₂S	2*(40.078)	1*(28.086)	2*(15,999)+2*(15,999)	172.238
S (SiO₂)		1*(28.086)	2*(15,999)	60.006

Conociendo las masas molares de los silicatos cálcicos presentes en el cemento se procede a calcular la cantidad de moles de cada uno presentes en un gramo de cemento a través de las Ecuaciones (7.1) y (7.2).

$$C_3S = \frac{\frac{\%Peso\ de\ C_3S\ en\ el\ cemento}{100} * 1gr}{Peso\ molar\ del\ C_3S} = \frac{\frac{\%Peso\ de\ C_3S\ en\ el\ cemento}{100} * 1}{228.315\ gr/mol} \quad (7.1)$$

$$C_3S = \frac{\frac{\%Peso\ de\ C_3S\ en\ el\ cemento}{100} * 1gr}{Peso\ molar\ del\ C_3S} = \frac{\frac{\%Peso\ de\ C_3S\ en\ el\ cemento}{100} * 1}{228.315\ gr/mol} \quad (7.2)$$

De acuerdo a [1] un modelo de hidratación de los silicatos cálcicos que se aproxima a la reacción del cemento es el siguiente:



A partir del modelo se calculan los moles de Hidróxido de Calcio (CH) producidos por la hidratación de los silicatos de calcio con las ecuaciones (7.3) y (7.4):

$$CH_{C_3S} = \frac{\frac{\%Peso\ de\ C_3S\ en\ el\ cemento}{100} * 1}{228.315\ gr/mol} * 1.3 \quad (7.3)$$

$$CH_{C_2S} = \frac{\frac{\%Peso\ de\ C_2S\ en\ el\ cemento}{100} * 1}{172.238\ gr/mol} * 0.3 \quad (7.4)$$

Al sumar ambos contenidos podemos conocer la cantidad de moles de hidróxido de calcio que se producirán de llegarse a hidratar la totalidad de los silicatos cálcicos.

Durante la reacción puzolánica se consume el hidróxido de calcio, suponiendo que se formará un CSH del tipo $C_{1.7}SH$ se necesitarán 1.7 moles de CH por cada uno de S se propuso la Ecuación (7.5):

$$\frac{Puzolana}{gr\ de\ cemento} = \frac{CH_{total}}{1.7 * \%Si\ en\ la\ puzolana} * 60.006 \quad (7.5)$$

A partir de lo establecido se procederá con el cálculo de la cantidad de microsílíce necesaria para consumir todo el CH producido por el cemento I, haciendo las siguientes suposiciones:

- El CSH producido por la reacción puzolánica es parecido a lo dicho en Aitcin [1],
- La hidratación del cemento no interfiere con la de la microsílíce y viceversa,

- Es muy fortuito que la distribución de la microsílíce coincide en todos los casos con concentraciones de hidróxido de calcio producto de la hidratación del cemento.
- El pH de la solución de poro no disminuye lo suficiente para que la reacción de la microsílíce se vea comprometida.

(Es importante resaltar que estas suposiciones se vieron en general contrastadas con los resultados obtenidos posteriormente en esta investigación).

Los Compuestos potenciales de Bogue del cemento I se presentan en la Tabla 7.4:

Tabla 7.4 Fases del Cemento I

Fase	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
Porcentaje en Peso	66.5	8.6	2	13.6

Se calcula la cantidad de hidróxido de calcio producido por el cemento hidratado por completo, hidratación a partir de las ecuaciones (7.1),(7.2),(7.3) y (7.4):

$$CH_{total}(\text{moles}) = \frac{\% \text{Peso de } C_3S}{228.315 \text{ gr/mol}} * 1.3 + \frac{\% \text{Peso de } C_2S}{172.238 \text{ gr/mol}} * 0.3$$

$$CH_{total} = \frac{.665}{228.315 \text{ gr/mol}} * 1.3 + \frac{.086}{172.238 \frac{\text{gr}}{\text{mol}}} * 0.3 = 0.003938 \text{ moles}$$

Y por último se calcula la cantidad de microsílíce por gramo de cemento necesaria para consumir todo el CH con la ecuación (7.5):

$$\frac{\text{gr Puzolana}}{\text{gr de cemento}} = \frac{CH_{total}}{1.7 * \%Si} * 60.006 = \frac{0.003938}{1.7 * .95} * 60.006 = .14$$

7.3 Influencia de la relación agua/cemento en la resistencia

Debido a que la hidratación del cemento no es completa para relaciones agua cemento menores de 0.42 según el modelo de Powers [29], se evaluó el efecto de reemplazar el cemento por un micro filler de caliza.

Las mezclas fueron realizadas con el Cemento I y se hicieron tres reemplazos en volumen partiendo de una relación a/c de .25 hasta la relación a/c que se hidrata

completamente de acuerdo a la ecuación (2.15) recomendada por [36] para una adición de 14% de micro sílice:

$$ac = 0.42 + 0.5 * sc = 0.42 + 0.5 * 0.14 = 0.49$$

En la medida de lo posible, las mezclas contaron con la extensibilidad óptima obtenida de los resultados de las pruebas aparecen en el Capítulo 7.1. La relación de las mezclas sometidas a prueba se presentan en la Tabla 7.5. Se les midió la extensibilidad sin vibración por el método de la norma ASTM C230 [57], el contenido de aire a través del estándar ASTM C185 [58], y se hicieron pruebas de compresión a los 3,7 y 28 días según la norma ASTM C109 [59].

Tabla 7.5. Matriz de mezclas a realizar para la investigación del efecto de la relación a/c en la resistencia

Clave	CI2514-A12.35	CI3314-A16	CI4114-A25	CI4914-A33
Dosificación de aditivo (gr/kg de polvo)	12.35	16.00	25.00	33.00
Relación a/c	0.25	0.33	0.41	0.49
Relación s/c	0.14	0.14	0.14	0.14
Agua (kg/m ³)*	193.46	192.63	188.96	185.87
Aditivo (kg/m ³)	11.18	13.63	20.41	26.13
Cemento (kg/m ³)	794.18	602.50	483.51	403.56
Micro sílice (kg/m ³)	111.18	84.35	67.69	56.50
Micro polvo de caliza (kg/m ³)	0.00	165.14	265.06	331.84
Arena (kg/m ³)	1237.85	1270.21	1285.09	1294.39
Aire (%)	2.21	1.92	1.81	2.50
Extensibilidad (cm)	30.67	30.75	28.00	23.25
Densidad (gr/cm ³)	2.36	2.35	2.34	2.31

*La cantidad de agua se ve reducida por la cantidad de la misma en el aditivo, no se presenta en esta dosificación los ajustes por humedad del agregado.

7.4 Efecto de la adición de micro sílice en el desarrollo de la resistencia

El efecto de la adición de micro sílice se hizo con dos series de mezclas de 5 mezclas cada una, ambas series se hicieron con una relación a/c de 0.25 (dato

resultante de la investigación realizada en el capítulo 7.3), las cantidades de aditivo variaron en función de la obtención de la extensibilidad objetivo determinada en el Capítulo 7.1.

Las mezclas realizadas con el objetivo de estudiar el tema de este capítulo se presentan en la Tabla 7.6. Se les midió la extensibilidad sin vibración por el método de la norma ASTM C230 [57], el contenido de aire a través del estándar ASTM C185 [58], y pruebas de compresión a los 3,7 y 28 días según la norma ASTM C109 [59].

Tabla 7.6. Relación de mezclas diseñadas para investigar el efecto de la adición de micro sílice en la resistencia

	Cemento I					Cemento II				
Clave	CI250-A6	CI2505-A7.6	CI2508-A9.2	CI2514-A12.35	CI2525-A33	CI250-A8.1	CI2505-A9	CI2508-A11.6	CI2510-A12	CI2514-A15
Dosificación de aditivo (gr/kg de cementante)	6.00	7.6	9.20	12.35	33.00	8.10	9.00	11.60	12.00	15.00
Relación a/c	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Relación s/c	0	0.05	0.08	0.14	0.25	0	0.05	0.08	0.10	0.14
Agua (kg/m ³)*	197.39	196.38	195.68	193.46	182.26	196.48	195.89	194.56	194.27	192.58
Aditivo (kg/m ³)	4.79	6.36	7.92	11.18	32.52	6.46	7.53	9.98	10.51	13.60
Cemento (kg/m ³)	798.29	797.10	797.18	794.18	788.41	797.70	797.31	796.44	796.25	795.15
Micro sílice (kg/m ³)	0.00	39.86	63.77	111.18	197.10	0.00	39.87	63.72	79.63	111.32
Arena (kg/m ³)	1371.02	1323.77	1293.15	1237.85	1119.32	1370.00	1321.86	1291.97	1272.69	1233.06
Aire (%)	2.15	1.38	2.49	2.21	2.94	0.81	2.75	0.20	1.28	2.09
Extensibilidad (cm)	31.08	31.17	31.67	30.67	28.93	33.17	30.17	31.50	33.58	33.65
Densidad (kg/m ³)	2390	2390	2370	2360	2260	2400	2340	2410	2370	2340

*La cantidad de agua se ve reducida por la cantidad de la misma en el aditivo, no se presenta en esta dosificación los ajustes por humedad del agregado.

Adicionalmente se replicaron las mezclas de mejor desempeño en otros dos cementos (Tabla 7.7), utilizando la misma relación a/c y extensibilidad objetivo. A estas mezclas se les realizó la misma batería de pruebas.

Tabla 7.7 Mezclas realizadas para la evaluación del cambio de cemento en la resistencia.

	Cemento III	Cemento IV
Clave	CIII2508-A23	CIV2508-A23
Dosificación de aditivo (gr/kg de cementante)	23	23
Relación a/c	0.25	0.25
Relación s/c	0.08	0.08
Agua (kg/m ³)*	189.26	189.26
Aditivo (kg/m ³)	19.70	19.70
Cemento (kg/m ³)	792.98	792.98
Micro sílice (kg/m ³)	63.44	63.44
Arena (kg/m ³)	1277.75	1284.22
Aire (%)	0.27	1.04
Extensibilidad (cm)	32	30.33
Densidad (gr/cm ³)	2400	2390

*La cantidad de agua se ve reducida por la cantidad de la misma en el aditivo, no se presenta en esta dosificación los ajustes por humedad del agregado.

El fraguado de las mezclas realizadas durante esta etapa de la investigación fue evaluado a través del estándar ASTM C403 [60], adicionalmente la mejor muestra resultante fue sometida a un ensayo de contracción autógena bajo el estándar ASTM C 1698 [61].

La distribución de tamaño de partículas de la mezcla granular de todas las mezclas fue comparada con una distribución modelo basada en lo planteado por [19] y [22] a través del modelo de Andreasen y Andersen con un valor de q de

.25, un tamaño máximo de 4750 micrómetros y uno mínimo de .486 micrómetros. La evaluación fue hecha a través del coeficiente de determinación R^2 el cual permite conocer qué tanto se parece un modelo a los datos experimentales.

7.5 Evaluación de la permanencia de la trabajabilidad

Las mezclas resultantes de la optimización descrita en el capítulo 7.4, vieron la duración de su trabajabilidad puesta a prueba a través de una modificación del estándar Tex-403-A[62]. Las mezclas puestas a prueba se encuentran en la Tabla 7.8.

El procedimiento a seguir para esta etapa de la investigación fue el siguiente:

- Inmediatamente después de terminado el mezclado se realizó la primera medición de la extensibilidad bajo el estándar ASTM C230 [57], sin vibración.
- Posterior a la medición inicial se hizo un remezclado cada cinco minutos por 30 segundos y a cada 30 minutos un remezclado de un minuto.
- Se tomaron mediciones de la extensibilidad cada 15 minutos, hasta un total de 2 horas.

Tabla 7.8 Mezclas cuya pérdida de trabajabilidad fue evaluada

Cemento	Cemento I	Cemento II	Cemento III	Cemento IV
Mezcla	CI2508-A9.2	CI2508-A11.6	CIII2508-A23	CIV2508-A23

7.6 Evaluación de la durabilidad de la mezclas con proporciones optimizadas

Para la evaluación de la resistividad se utilizó el estándar AASHTO TP 95 [63] y para la evaluación del coeficiente de migración de cloruros se utilizó el estándar NT Build 492[64] (Figura 7.6 y Figura 7.7).



Figura 7.6 Medición de la resistividad

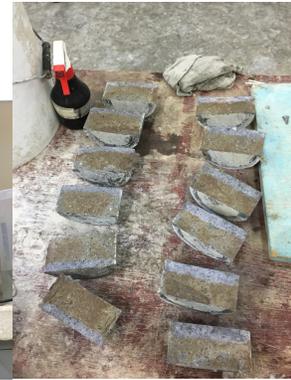


Figura 7.7 Medición del coeficiente de difusión

El diseño de las mezclas fue el mismo que el definido en el capítulo 7.4. El resumen de las mezclas utilizadas se presenta en la Tabla 7.9, todas las mezclas se hicieron con una relación a/c de 0.25

Tabla 7.9 Mezclas para evaluación de resistividad y coeficiente de migración de cloruros.

	Clave de Mezcla
Cemento 1	CI250-A6, CI2508-A9.2, CI2510-A10.5
Cemento 2	CII250-A6, CII2508-A8.1, CII2510-A12
Cemento 3	CIII2508-A23
Cemento 4	CIV2508-A23

Se presenta una estimación de la vida útil de las mezclas a través del modelo de difusión de la siguiente solución de la segunda ley de Fick [65] (Ecuación (7.6):

$$\frac{C_s - C_x}{C_s - C_o} = \text{erf} \left(\frac{x}{2 * \sqrt{Dt}} \right) \quad (7.6)$$

Donde:

Cs= Concentración superficial

Cx= Concentración a una distancia x

Co= Concentración inicial

D= Coeficiente de difusión obtenido mediante [64]

t= Tiempo

Para la concentración superficial de cloruros del Concreto de Ultra Alto Desempeño se hizo una investigación bibliográfica en pro de encontrar mezclas con consumos de puzolanas similares a las mezclas utilizadas expuestas durante largos períodos a pruebas de penetración de cloruros, los resultados se presentan en la Tabla 7.10:

Tabla 7.10 Concentración superficial de cloruros en concretos expuestos.

Trabajo	Tipo de mezcla	Concentración superficial más crítica de la investigación
Mangat (1994) [66]	Mezclas con adiciones micro sílice, escoria, ceniza volante.	1.5% del peso del cementante
Bleszynski (2002) [67]	Mezcla de relación agua/cementante .42 con adición de 8% de micro sílice	1.76% del cementante
Thomas (2012) [69]	Concreto de ultra alto desempeño	Entre .38% y .64% del peso del cementante
	Máxima concentración reportada	1.76%

Para el valor de Cs se utilizó el **1.76%** de acuerdo a lo investigado.

El valor de Cx, puede ser llamado igualmente umbral de cloruros. El umbral de cloruros es definido como la concentración de cloruros en la proximidad del acero de refuerzo que provoca un cambio de desempeño en el mismo, pasando éste de un estado de pasividad en el cual los óxidos del acero están en equilibrio, a uno de corrosión activa donde existe pérdida de sección [65].

Para determinar qué valor de umbral de cloruros se utilizaría para la estimación de la vida útil se hizo una investigación bibliográfica cuyos resultados se presentan en la Tabla 7.11

Tabla 7.11 Umbral de cloruros

	Tipo de mezcla	Umbral de cloruros
Sandberg (1995) [69]	Reemplazo del 5% por micro sílice, relación agua cementante .3	1.7% del cementante
Thomas (1996) [70]	Variedad de mezclas	0.40%(solubles en ácido) o 0.15%(solubles en agua) del cementante
Manera (2008) [71]	Reemplazo del 10% por micro sílice, relación agua cementante .6	0.6–1.2% del cementante
	Mínimo	.4% del cementante

Debido a que mientras más bajo es el umbral de cloruros más fácilmente se iniciará el proceso de corrosión se decidió elegir el valor más crítico encontrado en la literatura que fue **0.4%** del cementante.

Para el valor de x se eligió el designado por el comité ACI 318 [72], que recomienda utilizar 65 mm de recubrimiento para el acero de refuerzo cuando éste se encuentre expuesto a ambientes corrosivos (como puede ser el ambiente marino).

Limitaciones de la segunda ley de Fick:

- Los mecanismos de ingreso de los cloruros a las estructuras dependen de su zona de exposición como se ilustra Figura 7.8, la única zona que está únicamente afectada por la difusión es la zona de completa inmersión. De modo que la segunda ley de Fick solo se aplicaría para ese caso.
- El coeficiente de difusión depende de la madurez del concreto y de la reacción puzolánica, por lo que no es un valor fijo y es susceptible de aumentar con el tiempo [66].
- No se toman en cuenta variaciones de la concentración de cloruros con el tiempo, ni de el efecto que pudieran tener grietas en el avance de los mismos.

- No se toma en cuenta la capacidad de ciertas fases del cemento como el C_3A que pudiera ligar cloruros y con ello aumentar el umbral de cloruros.

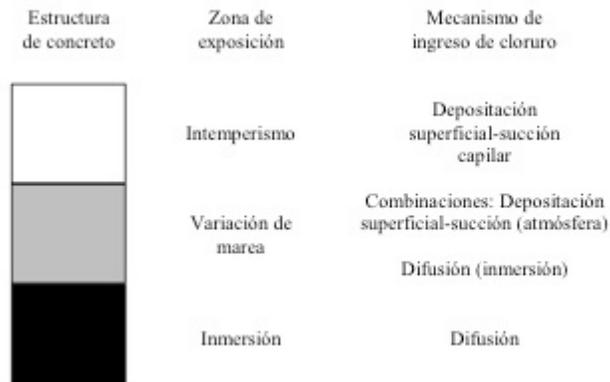


Figura 7.8 Mecanismo de ingreso de cloruros de acuerdo a la zona de exposición [65].

Habiendo ya expuesto cómo se determinaron el valor de algunas variables que no se obtuvieron experimentalmente, se explicará el procedimiento de cálculo:

Paso 1:

Se obtiene el valor del argumento de la error función:

Para hacer esto se tienen que buscar en tablas de la error función qué argumento de la función produce el valor de la sección izquierda de la Ecuación (7.6):

$$\frac{1.7\% - .4\%}{1.7\% - 0\%} = .77 = \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2 * \sqrt{Dt}}\right)$$

En este caso el valor del argumento es .8537

$$\frac{x}{2 * \sqrt{Dt}} = .8537$$

Debido a que conocemos los valores de las variables x (por parte del ACI 318 [72]) y el coeficiente de Difusión D de la estándar NT Build 492 [64], la única incógnita es el tiempo que se obtendrá en segundos (ecuación (7.8)):

$$t = \frac{\left(\frac{.065}{2 * .8537}\right)^2}{D} \quad (7.7)$$

$$t = \frac{\quad}{365 * 24 * 60 * 60}$$

Donde:

t: Tiempo de vida útil del concreto en años

D: Coeficiente de migración de cloruros en m^2/s

El tiempo obtenido de esta manera sería la vida útil del concreto, llamando vida útil al tiempo en que la concentración crítica de cloruros alcanzara las barras de acero de refuerzo.

7.7 Efecto del curado acelerado en la Resistencia a Compresión

A partir de los resultados del capítulo 7.4, se decidió evaluar el efecto que tendría un tratamiento de curado acelerado en la Resistencia a compresión de la mezcla optimizada.

Se pusieron a prueba dos tipos de tratamientos de calor, que consistieron en la inmersión en agua con hidróxido de calcio de cubos de mortero en un baño maría temperatura controlada, los tratamientos difirieron en la rampa de calentamiento, en el primer caso se aplicó una rampa de $51^{\circ}C/h$ y en el segundo caso de $11^{\circ}C/h$ después de la cual los especímenes permanecieron a $90^{\circ}C$ por espacio de 6 horas.

El tiempo de permanencia de 6 horas se decidió a partir de los resultados del doctor Durán [13]. Los tratamientos de calor se muestran en forma gráfica en la Figura 7.9 y Figura 7.10.

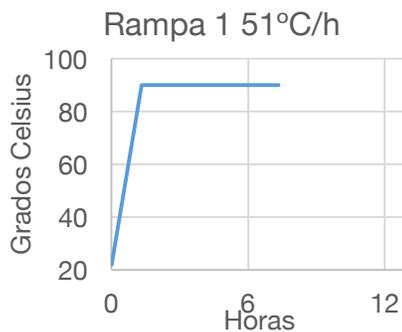


Figura 7.9 Curado acelerado a $51^{\circ}C/h$

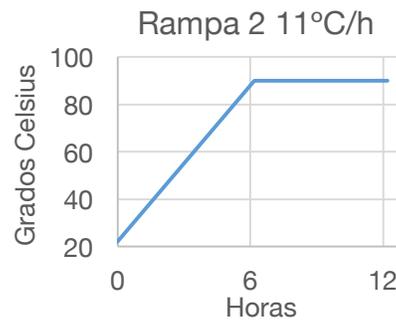


Figura 7.10 Curado acelerado a $11^{\circ}C/h$

Después de aplicados los tratamientos de calor, los especímenes permanecieron en el baño maría hasta alcanzar la temperatura de laboratorio para después ensayarse a compresión.

7.8 Influencia del aumento del tamaño máximo del agregado

Una vez obtenida la mezcla optimizada se probó el efecto de aumentar el tamaño máximo del agregado en la resistencia a compresión del concreto y durabilidad. Para este efecto se añadió agregado grueso de tamaño máximo 12.7 mm (1/2"). El diseño de mezclas utilizado en esta sección de la investigación se encuentra en la Tabla 7.12

Tabla 7.12 Diseño de mezclas de concreto de ultra alto desempeño con agregado grueso

Clave	COCI2508-A7.36
Dosificación de aditivo (gr/kg de cementante)	7.36
Relación a/c	0.25
Relación s/c	0.08
Agua (kg/m ³)*	196.54
Aditivo (kg/m ³)	6.34
Cemento (kg/m ³)	797.74
Micro sílice (kg/m ³)	63.82
Arena (kg/m ³)	1036.35
Grava	262.64
Aire (%)	1.70
Extensibilidad (cm)	71.5
Densidad (gr/cm ³)	2.40

*La cantidad de agua se ve reducida por la cantidad de la misma en el aditivo, no se presenta en esta dosificación los ajustes por humedad del agregado

El proceso de mezclado fue el siguiente:

Se añaden todos los ingredientes secos dentro de la revolvedora Marca Eirich de contra flujo (Figura 7.11) y se adiciona la mayoría del agua ya que una parte de esta se utiliza para diluir el aditivo. Ya añadida el agua se inicia el mezclado,

al minuto cuatro se agregan el aditivo y el agua restante se utiliza para limpiar el recipiente del aditivo y continúa el mezclado por cinco minutos más.



Figura 7.11 Revolvedora de contraflujo marca Eirich

Esta mezcla fue evaluada por las siguientes pruebas:

- La resistencia a compresión se hizo bajo el estándar ASTM C39[73] con modificaciones con respecto al cabeceo del material (el método se explica más adelante).
- Índice de estabilidad visual, extensibilidad y T50 de acuerdo al estándar ASTM C1611 [74].
- Habilidad de paso de acuerdo al estándar ASTM C1621 [75]
- Flujo en túnel V de acuerdo al estándar BS EN 12350-9 [76]
- Contenido de aire de acuerdo al estándar ASTM C231[77], utilizando el medidor tipo B
- Densidad (Peso Unitario) de acuerdo al estándar ASTM C138 [78]
- Resistividad eléctrica superficial bajo el estándar AASHTO TP95 [61].

Debido a las características del material desarrollado no fue posible utilizar el procedimiento estándar de cabeceo por azufre, utilizando el procedimiento descrito siguiente:

- Se toma el molde para almohadillas de neopreno y se añaden 155 g de arena sílica graduada 30/40, vibrando para distribuir la arena dentro del molde para después colocar el cilindro y vibrar por segunda vez. Una vez

centrado el cilindro se vierte azufre alrededor del molde para sellarlo evitando el desplazamiento de la arena al momento del ensaye (Figura 7.12) .



Figura 7.12 Configuración de la preparación del espécimen

7.9 Influencia de la adición de fibras en la trabajabilidad y el desempeño mecánico
 Para evaluar la influencia de una fibra de acero de 0.6 mm. de diámetro por 10 mm de longitud se hicieron dos mezclas con adiciones de 0.5 y 1% del volumen de fibras. El diseño de mezclas de las mismas se presenta en la Tabla 7.13.

Tabla 7.13 Proporcionamiento de las mezclas para la evaluación de la adición de fibras.

Mezcla	Volumen fibra (%)	de Proporcionamiento de la mezcla (kg/m ³)					
		Cemento	Agua	Agregado	Micro Sílice	Fibra	Aditivo SP
CI2510-A10.5	-	797	195	1278	80	-	9
CI2510-A10.5-F.5	0.5	797	195	1265	80	39	9
CI2510-A10.5-F1	1.0	797	195	1252	80	78	9

El mezclado de estos especímenes fue el mismo que el descrito en el capítulo anterior. Para los concretos con fibras el mezclado es el mismo, procediendo a agregar las fibras al minuto nueve, continuando el mezclado por un total de catorce minutos.

Estas mezclas fueron evaluadas por las siguientes pruebas:

- La resistencia a compresión se hizo bajo el estándar ASTM C39[73] con modificaciones con respecto al cabeceo del material, como se ha explicado en el capítulo 7.8.
- Índice de estabilidad visual, extensibilidad y T50 de acuerdo al estándar ASTM C1611 [74].
- Habilidad de paso de acuerdo al estándar ASTM C1621 [75]
- Flujo en túnel V de acuerdo al estándar BS EN 12350-9 [76]
- Contenido de aire de acuerdo al estándar ASTM C231[77], utilizando el medidor tipo B
- Densidad (Peso Unitario) de acuerdo al estándar ASTM C138 [78]
- Resistencia a la tensión por corte diametral de acuerdo al estándar ASTM C496 [80]
- Módulo elástico de acuerdo al estándar ASTM C469 [81]
- Se midió la resistencia a la flexión, el límite de proporcionalidad y la resistencia residual para las mezclas con fibras a través del estándar EN 14651 [82].

Para el ensayo de resistencia a la flexión se utilizaron especímenes prismáticos de las dimensiones de 600 mm de longitud y de sección de 150mm x 150mm, sobre las cuales se realizó un corte central a fin de tener un muesca (hsp) de 25 mm \pm 1mm, quedando la sección de falla de 125 mm (Figura 7.13). Dicha probeta se apoyo sobre dos rodillos en configuración isostática, conformando un claro libre de 500 mm. En el programa experimental se utilizó el método de lectura directa en la apertura de la fisura (CMOD) por sus siglas en inglés “crack mouth opening displacement”, midiendo la apertura mediante un extensómetro tipo clip de marca Épsilon. Durante la realización del ensayo de prueba de control de la velocidad de la carga se obtuvo mediciones del incremento del CMOD, definiendo una velocidad constante de 0.05 mm/min para todos los ensayos.

Cuándo $CMOD = 0.1 \text{ mm}$, se puso en funcionamiento la máquina de modo que $CMOD$ aumenta a una velocidad constante de 0.2 mm/min . La instrumentación de la prueba permitió la adquisición de señales análogas por medio un sistema CompactDAQ de National Instruments. El sistema de registro de datos fue directamente a las salidas electrónicas de carga y $CMOD$, con una velocidad de grabación no inferior a 5 Hz , conforme a la norma.



Figura 7.13 Espécimen y configuración de prueba de flexión

7.10 Caracterización microestructural por medio de análisis termogravimétrico.

Para la evaluación de la hidratación de las mezclas de UHPC se hicieron 4 pastas base cemento I y una de micro sílice e hidróxido de calcio 99% puro (Tabla 7.14).

La pasta de microsilíce se hizo de acuerdo a las proporciones de la Tabla 7.15, con una relación molar hidróxido de Calcio/Dióxido de Silicio mayor a 1.5 de manera que la reacción puzolánica tuviera lugar [83].

El sistema de nomenclatura de las pastas fue el siguiente:

- El nombre de la pasta inicia con una P
- El cemento utilizado se muestra inicialmente con la abreviación C seguido de su número con numeración romana, siendo el cemento 1 CI
- Seguido del nombre del cemento va la relación agua cemento en número, siendo una relación agua/cemento de 0.25 abreviada con el número 25
- Posteriormente se añade la relación microsilíce cemento, siendo una relación sílice cemento de 0.14 abreviada con el número 14

- Finalmente separada por un guión va la dosificación de aditivo fluidificante en miligramos por kg de polvo precedido por una A, siendo una dosificación de 11 gr/kg de polvo abreviada con la clave –A11.

Tabla 7.14. Mezclas evaluadas en el TGA

Clave	PCI250-A13	PCI2505-A13	PCI2508-A9.2	PCI2514-A13	PCI2525-A13
Dosificación de aditivo (gr/kg de cementante)	13	13	9.2	13	13
Relación a/c	0.25	0.25	0.25	0.25	0.25
Relación s/c	0	0.05	0.08	0.14	0.25
Agua (kg/m ³)*	424.52	408	402.40	382	354.40
Microsílice (kg/m ³)	0.00	84	131.14	220	365.19
Cemento (kg/m ³)	1739.18	1675	1639.21	1571	1460.75
Aditivo (kg/m ³)	22.61	23	16.29	23	23.74

*La cantidad de agua se ve reducida por la cantidad de la misma en el aditivo

Tabla 7.15 Proporciones de la pasta Micro sílice/Hidróxido de calcio

Microsílice (gr/gr de pasta)	0.16
Hidroxido (gr/gr de pasta)	0.30
Agua (gr/gr de pasta)	0.54
Relación Ca/Si en peso molar	1.60

Para una pasta hecha con el cemento 1, de relación agua/cemento 0.25, una relación micro sílice/cemento (s/c) de 0.14 y una dosificación de aditivo de 11 gr/kg de polvo la clave sería PCI2514-A11.

Las pastas de cemento se vertieron en envases de cristal y se taparon para al siguiente día añadirles agua con cal para su curado (Figura 7.14). La pasta de micro sílice e hidróxido calcio igualmente fue vertida en un envase de cristal, pero el agua de curado fue agua destilada.



Figura 7.14 Pastas de cemento

Una vez que alcanzaron la edad deseada las pastas fueron molidas con un mortero hasta que pasaron completamente por la malla No. 100 (Figura 7.15).



Figura 7.15 Molido de las pastas

Posterior a su molienda se detuvo su hidratación mediante el método de intercambio de solventes, dicho método consiste en lo siguiente:

El espécimen se sumerge en un líquido orgánico. Durante la inmersión, el solvente se difunde dentro de la pasta y reemplaza la solución de poro[84]

En este caso el solvente utilizado fue alcohol isopropílico, las muestras se mantuvieron en inmersión en dicho alcohol por espacio de 24 horas para después secarse al vacío en un desecador durante aproximadamente 18 horas.

Las pruebas de análisis termogravimétrico fueron hechas con un dispositivo Perkin Elmer, termogramas modelo de los dos tipos de pastas se pueden ver en la Figura 7.16 y en la Figura 7.17 las condiciones de prueba fueron las siguientes:

- Para las pastas de cemento se usaron 65 miligramos, la pasta de micro sílice fue de 51 miligramos
- Se calentaron las mezclas desde 28° hasta 1000°C a una velocidad de 10°C/min con un flujo de nitrógeno de 20 ml/min
- Se tuvieron dos isotermas, una a 28° y otra a 105°C por espacio de 10 minutos.

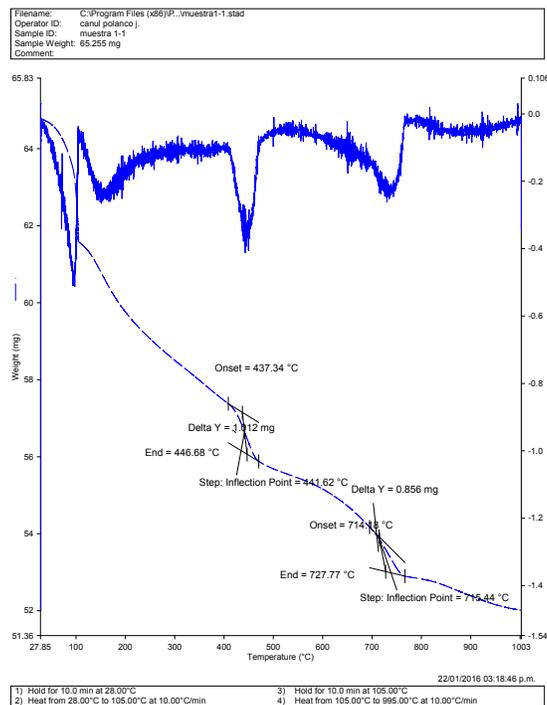


Figura 7.16 Termograma modelo de las pastas de cemento/micro sílice

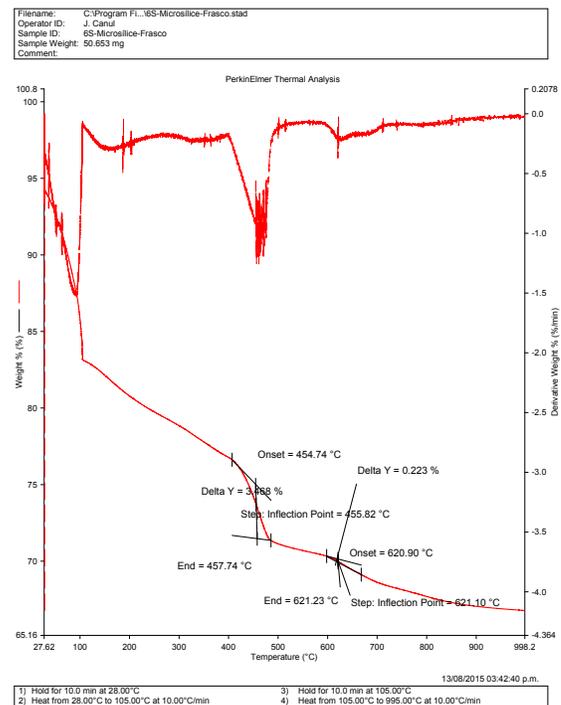


Figura 7.17 Termograma modelo de la pasta micro sílice/hidróxido de calc

De los análisis de pastas de cemento se obtuvieron los siguientes datos:

- Agua ligada químicamente
- Cantidad de hidróxido de calcio producido

- Cantidad de hidróxido de calcio consumido

De los análisis de la pasta de micro sílice se obtuvieron los siguientes datos:

- Relación calcio silicio del producto
- Cantidad hidróxido de calcio consumido

Pastas de cemento

La estimación del hidróxido de calcio y del Carbonato de Calcio se hizo de manera gráfica a partir de los termogramas. Para determinar los puntos de inicio y final de la descomposición de los compuestos de interés se usó el siguiente método [85], el cual se apoya en la Figura 7.18:

- La curva se divide en tres secciones: A, B y C, siendo la sección B la de interés
- Dos pendientes se dibujan: una como extensión del segmento A y otra como extensión del segmento C, éstas líneas se conocen como A' y C'
- Dos líneas verticales se dibujan donde las líneas A' y C' se separan de las líneas de pérdida de peso (líneas 1 y 2)
- Otra línea (3) se dibuja en medio de las líneas 1 y 2.

La pérdida de peso es calculada con la diferencias entre el valor superior e inferior cuando la línea 3 intersecta las líneas A' y C'

El hidróxido de calcio se descompone a una temperatura entre 350° y 550°C, temperatura a la cual pierde una molécula de agua, mientras que el carbonato de calcio se descompone a una temperatura entre 500 y 700°C, temperatura a la cual pierde una molécula de dióxido de carbono [86]

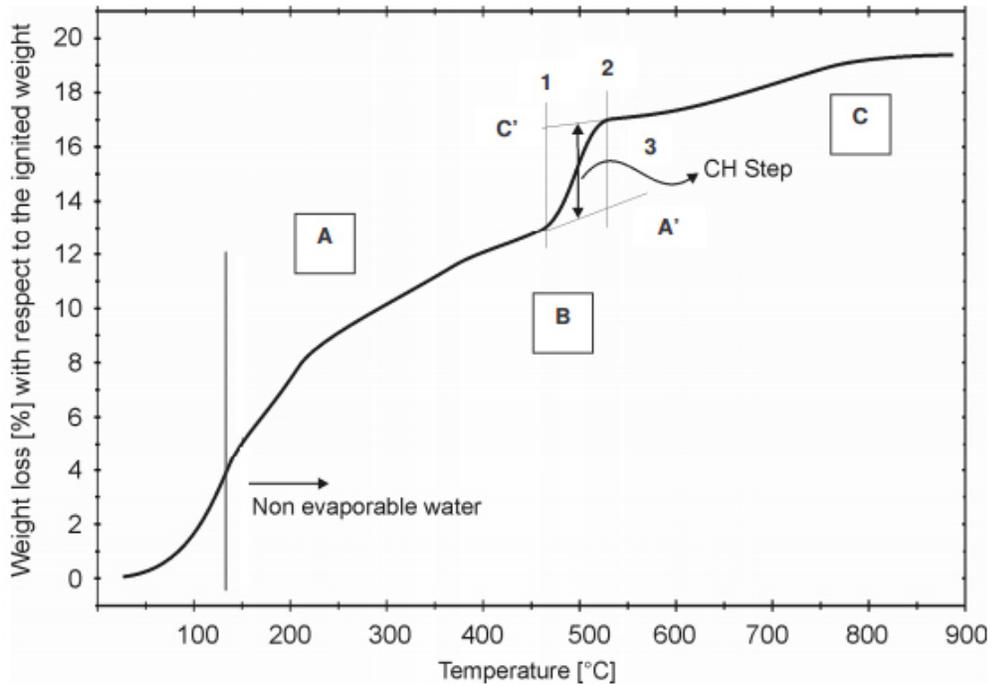


Figura 7.18 Medición de la pérdida del hidróxido de calcio [85]

Para la determinación de cantidad de agua ligada químicamente, se hizo la resta entre la masa restante a 1000 °C Y la masa 105 °C. Debido a que el carbonato de calcio no es un producto de hidratación del cemento Portland o de la reacción puzolánica de la micro sílice con el hidróxido de calcio, la pérdida de masa debido a la volatilización del dióxido de carbono fue sustraída de los cálculos.

$$ALQ: \frac{M_{1000^{\circ}C} - M_{105^{\circ}C} - M_{CO_2}}{Cm} \quad (7.8)$$

Donde:

ALQ= Agua ligada químicamente

$M_{105^{\circ}C}$ = Masa a 1000 °C

M_{CO_2} = Masa pérdida en el intervalo entre 500 y 700°C debido a la volatilización del dióxido de carbono.

A partir de los resultados de la pasta de únicamente cemento se determinó cuál era la máxima cantidad de agua ligada por el cemento para la relación a/c de .25

al igual de cual era la cantidad de hidróxido de calcio producido para ese grado de hidratación.

Debido a que la micro sílice es una puzolana reactiva ésta reduce la cantidad de hidróxido de calcio en las muestras, para el cálculo del consumo de hidróxido de calcio por unidad de microsílíce se utilizó la ecuación

$$CHC = \frac{CH_p * Cm - CH_m}{Sm} \quad (7.9)$$

Donde:

CHC= Hidróxido de calcio consumido por unidad de micro sílice en la muestra

CHp= Cantidad de hidróxido de calcio potencial por unidad de cemento, éste se toma de la cantidad de hidróxido de calcio producida por la mezcla PCI250-A13

Pasta de micro sílice/hidróxido de calcio

Para la estimación de la relación Calcio/Silicio del CSH producido por la reacción puzolánica se realizó el siguiente procedimiento:

Debido a que se conocen las cantidades iniciales tanto de micro sílice como de hidróxido de calcio en la pasta lo siguiente se propone:

$$M_{pms_{1000^{\circ}C}} = Ms - Ms * LOIs + Ms \left(\frac{CH}{Ms} \right) - Ms \left(\frac{CH}{Ms} \right) * \left(\frac{H}{CH} \right) Ms \quad (7.10)$$

$$= \frac{M_{pms_{1000^{\circ}C}}}{1 - LOIs + \frac{CH}{Ms} * \left(1 - \frac{H}{CH} \right)}$$

$$CHo = Ms * \frac{CH}{Ms} \quad (7.11)$$

$$CHc = \frac{CHo - CHm}{Ms} \quad (7.12)$$

$$\frac{Ca}{Si} = \frac{\frac{CHc * Ms * \frac{Ca}{CH}}{\text{Peso molar Ca}}}{\frac{Ms * \%SiO_2 * \frac{Si}{SiO_2}}{\text{Peso Molar Si}}} \quad (7.13)$$

Donde:

M_s = Es la cantidad de micro sílice contenida en la muestra

$M_{pms_{1000^{\circ}C}}$ = Masa de una muestra de paste micro sílice/hidróxido de calcio

LOIs= Pérdida por ignición de la micro sílice

CH/M_s = Es la relación en peso entre el hidróxido de calcio y la micro sílice añadida en el diseño de la pasta

CH_o = Es la cantidad original de hidróxido de calcio (previa a ser consumida por la reacción puzolánica)

CH_c = Es la cantidad de hidróxido de calcio consumido por unidad de micro sílice en la muestra

Ca/Si = Es la relación calcio silicio molar de la reacción puzolánica

Ca/CH = Es la relación que hay entre la masa total del hidróxido de calcio y el calcio por un mol del mismo

Peso molar Ca = 40.078 gr/mol

$\%SiO_2$ = Es el porcentaje en masa de dióxido de silicio contenido en la micro sílice obtenido por fluorescencia de rayos x

Si/SiO_2 = Es la relación que hay entre la masa del dióxido de silicio y el silicio por un mol del mismo

Peso molar Si = 28.086 gr/mol

Capítulo 8 Resultados y discusión

8.1 Caracterización de los materiales utilizados

Se realizó la caracterización de los materiales para obtener las propiedades físicas y químicas necesarias para el diseño de las mezclas de concreto, así como para respaldar el análisis y la discusión de los resultados.

8.1.1 Caracterización necesaria para el diseño de mezclas

En la Tabla 8.1 se encuentran los resultados de la caracterización de los materiales necesaria para el diseño de mezclas.

Tabla 8.1 Datos requeridos para el diseño de mezclas

	Densidad g/cm ³	Absorción (%)	Contenido de sólidos (%)
Cemento I	3.13	-	-
CementoII	3.13	-	-
Cemento III	3.09	-	-
Cemento IV	3.12	-	-
Micro Sílice	2.2	-	-
Agregado fino	2.62	1.56	-
Agregado grueso	2.67	0.5	-
Filler (Micro polvo de caliza)	2.68	-	-
Aditivo reductor de agua	1.12	-	54.4

8.1.2 Granulometría de los agregados y distribución de tamaño de partícula de los polvos

En la Figura 8.1 se encuentra la granulometría tanto del agregado grueso como del agregado fino, en el caso del agregado fino se le realizó una distribución de tamaño de partícula por láser a la sección del material que pasó la malla 100.

Los resultados de la distribución de tamaño de partícula de los polvos utilizados se encuentran en la Figura 8.2.

Asumiendo a las partículas analizadas como esferas rígidas, a partir de los resultados de distribución de tamaño de partícula por láser es posible obtener

un valor de área superficial en m^2/cm^3 , y al dividir este valor entre su densidad, podemos obtener su área superficial en m^2/g . Dichos resultados son presentados en la Tabla 8.2.

Tabla 8.2 Área superficial de los polvos utilizados

Material	Área m^2/cm^3	Área superficial m^2/gr
Cemento I	0.67	0.21
Cemento II	0.67	0.21
Cemento III	0.79	0.25
Cemento IV	0.72	0.23
Micro sílice	0.93	0.42
Micro polvo de caliza	4.52	1.69

Los resultados de área superficial obtenidos de esta manera no deben compararse con aquellos provenientes de los análisis BET, pues estos no asumen ningún tipo de forma de partícula, y contabilizan cada poro contenido en la muestra, al igual que las partículas que forman dentro de aglomeraciones de los materiales más finos. Por ello los valores de BET suelen ser varias veces mayores que los obtenidos mediante esta técnica o el análisis de fineza Blaine.

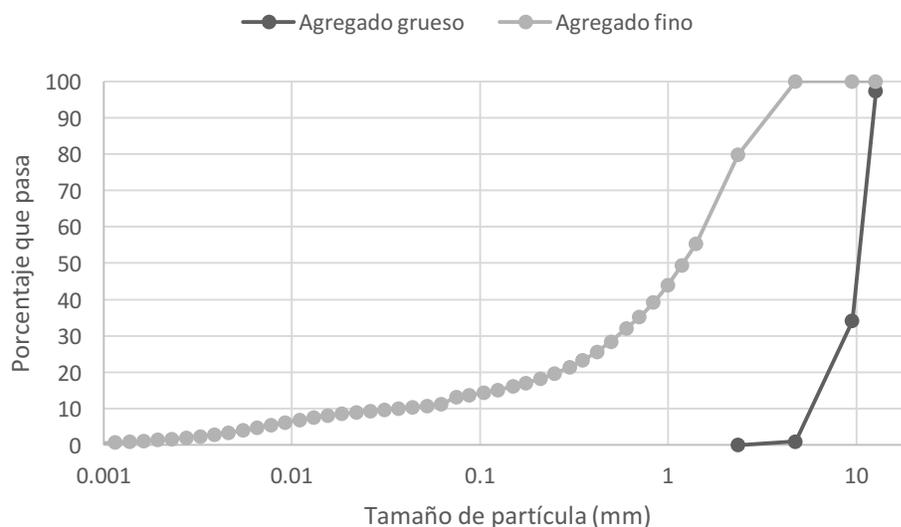


Figura 8.1 Distribución de tamaño de partícula de los agregados

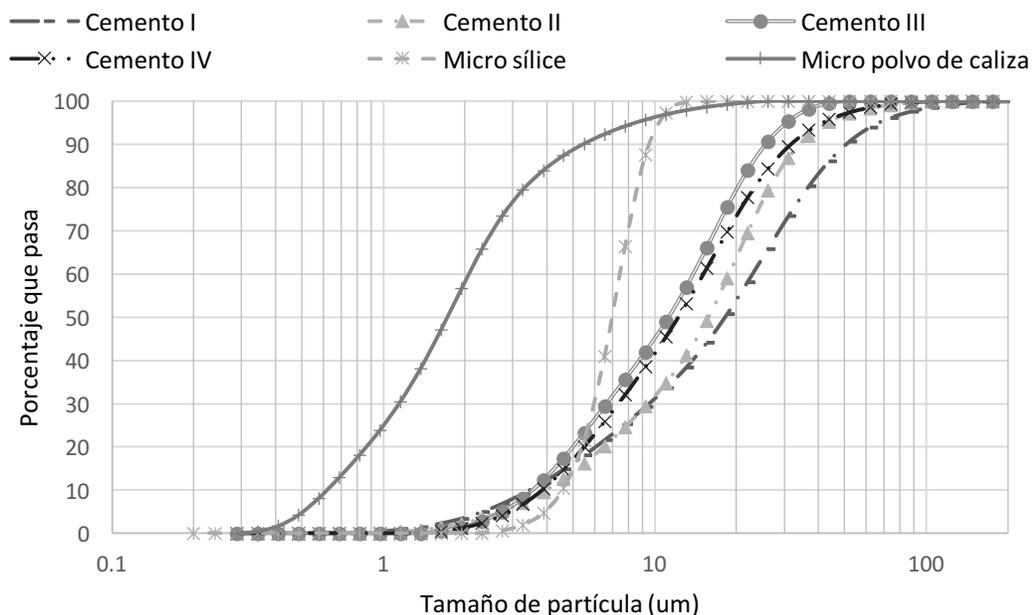


Figura 8.2 Distribución de tamaño de partícula de los polvos

8.1.3 Área superficial BET

Se caracterizaron los materiales cementantes a través de la técnica BET, puesto que el área superficial es considerada como un indicador de su reactividad, los resultados se presentan en la Tabla 8.3.

Tabla 8.3 Resultados de área superficial BET

Material	Área superficial BET m ² /gr
Cemento I	3.74
Cemento II	3.49
Cemento III	4.38
Cemento IV	4.2
Micro sílice	21.63

Los resultados de la Tabla 8.2 y la Tabla 8.3 son congruentes con respecto a que el orden de finura de los materiales es el mismo, sin embargo, en el caso de

la micro sílice los resultados de la distribución de tamaño de partículas la muestran mucho más fina, indicando esto, una posible aglomeración que no fue posible eliminar con el ultrasonido. Esto se puede apreciar en la Figura 8.3

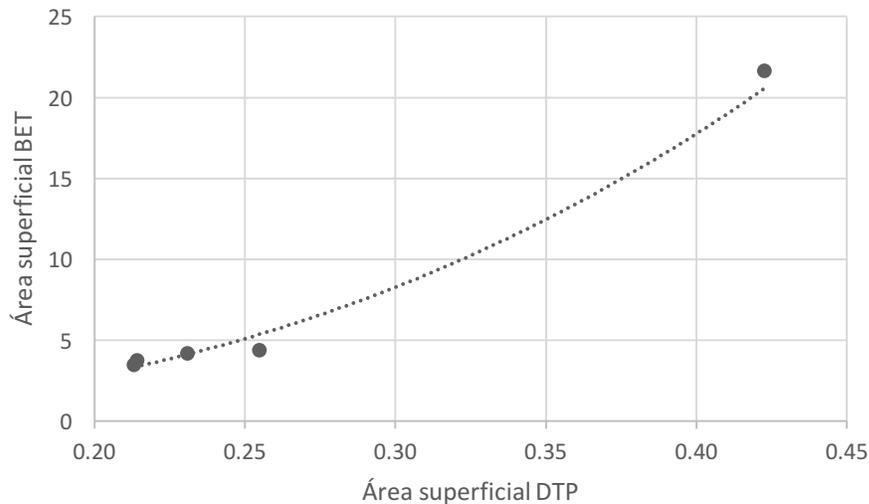


Figura 8.3 Comparación entre métodos de determinación del área superficial.

8.1.4 Composición química de los cementantes y compuestos potenciales de Bogue de los cementos

Se caracterizaron los materiales cementantes por fluorescencia de rayos (FRX) para determinar su composición química. Los resultados tanto de los óxidos, la pérdida por ignición así como las fases teóricas de los cementos se presentan en la Tabla 8.4.

De la caracterización de los cementos se hace notar la cantidad que la cantidad de la fase C_3A es mucho menor en los cementos resistentes a los sulfatos, por otro lado los caracterización de la micro sílice indica que es altamente rica en dióxido de silicio como era de esperarse.

Tabla 8.4 Análisis de FRX y pérdida por ignición(LOI)

Material	Cemento I	Cemento II	Cemento III	Cemento IV	Micro Sílice
Tipo	CPO 30 R RS BRA	CPO 40	CPC 40 RS	CPC 40 R RS	Densificada
SiO ₂	20.5	19.32	20.66	19.78	94.93
Al ₂ O ₃	3.6	4.66	4.51	4.32	0.76
Fe ₂ O ₃	4.46	3.05	4.45	4.40	0.05
CaO	64	64.29	60.66	61.67	0.41
SO ₃	2.68	2.5	3.13	2.99	
MgO	1.6	1.47	1.60	1.59	0.36
Na ₂ O	0.17		0.35	0.30	
K ₂ O	0.27		0.92	0.89	0.81
Cl-			0.02	0.06	
LOI	3.37	3.7	3.57	3.88	2.3
C3S	66.3	72.1	54.4	55.0	
C2S	8.7	1	11.47	11.60	
C3A	2.1	7.2	3.8	3.9	
C4AF	13.6	9.3	12.26	12.40	

8.1.5 Identificación de fases cristalinas

A través de la técnica Difracción de Rayos X se identificaron las fases cristalinas en los materiales cementantes. De la Figura 8.4 a la Figura 8.7 se muestran los difractogramas de los cementos utilizados, donde se observa que destaca la presencia de silicato tricálcico (C₃S), silicato dicálcico (C₂S), aluminato tricálcico (C₃A), ferroaluminato tetracálcico (C₄AF) y, yeso en sus fases hemihidrato (CaSO₄·½H₂O) y dihidrato (CaSO₄·2H₂O).

En la Figura 8.8 se presenta el difractograma de la micro sílice y se puede observar la nula presencia de fases cristalinas.

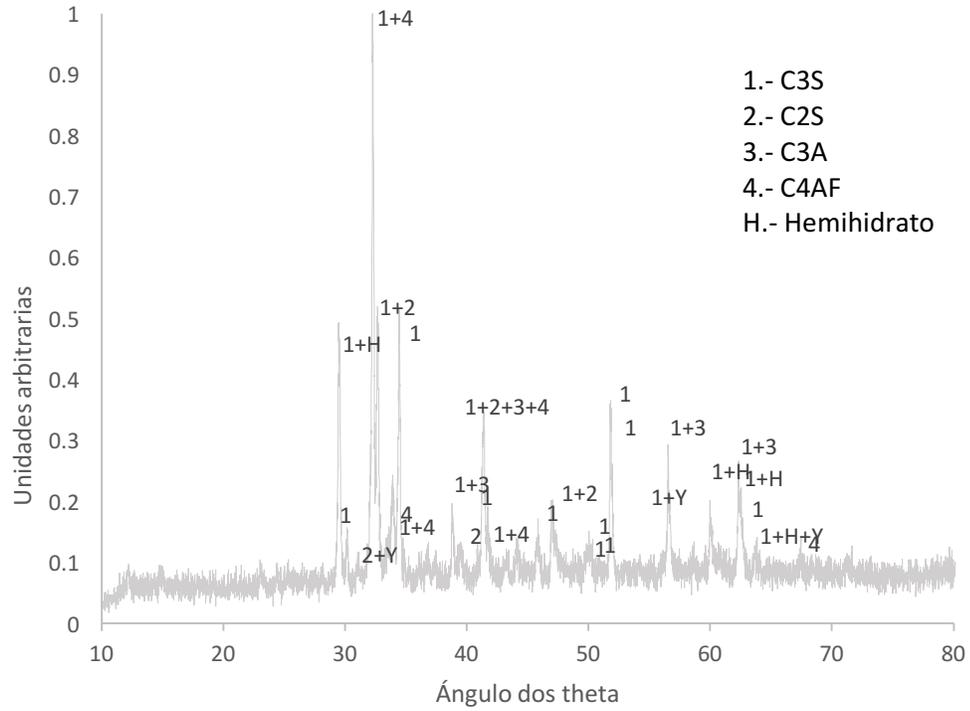


Figura 8.4 Difractograma del Cemento I

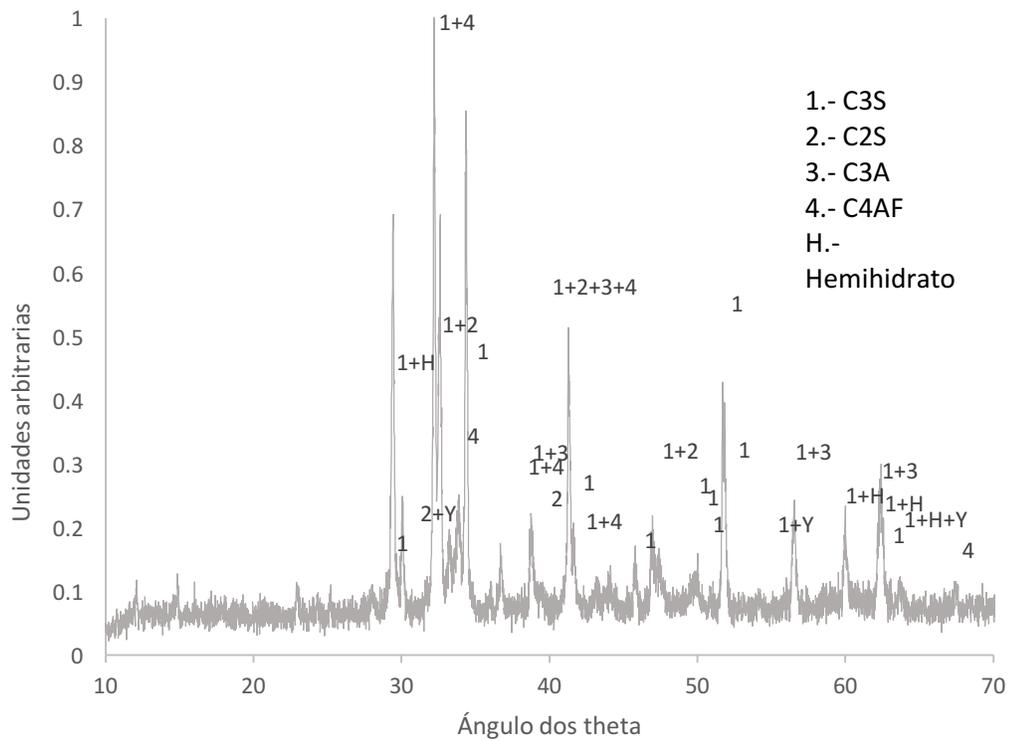


Figura 8.5 Difractograma del Cemento II

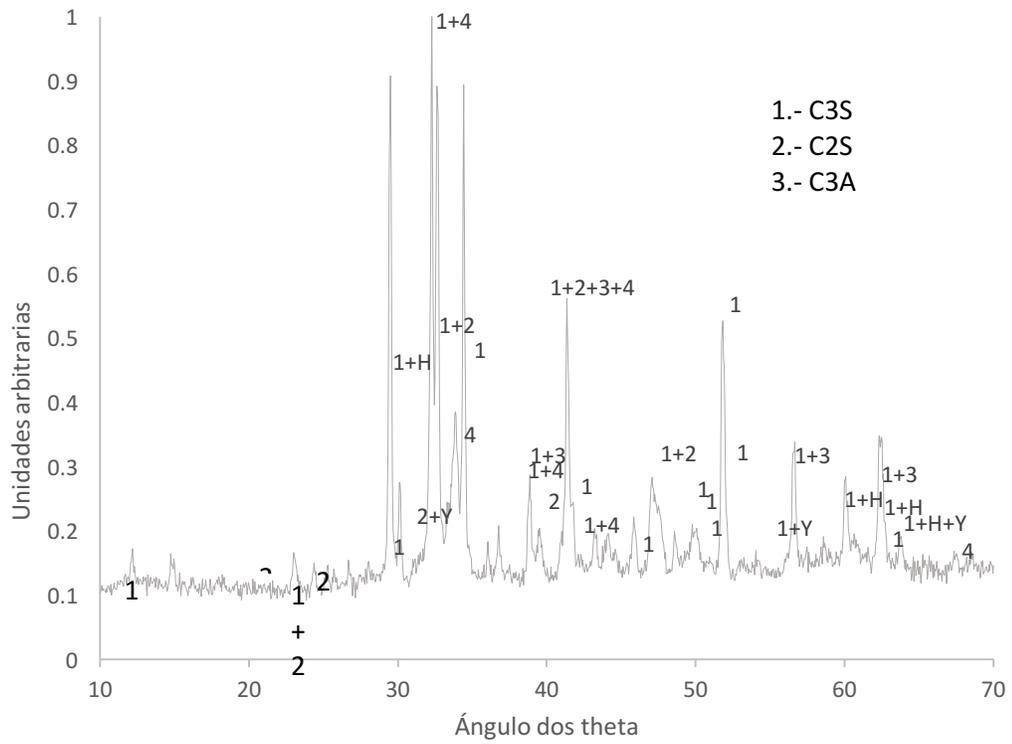


Figura 8.6 Difractograma del Cemento III

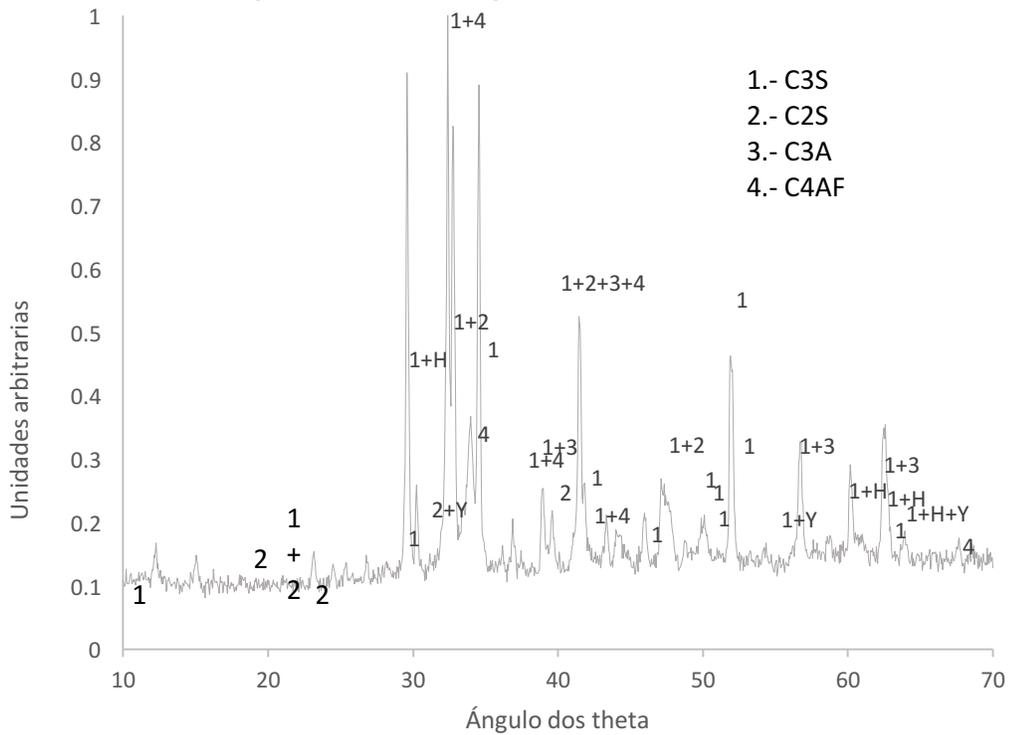


Figura 8.7 Difractograma del Cemento IV

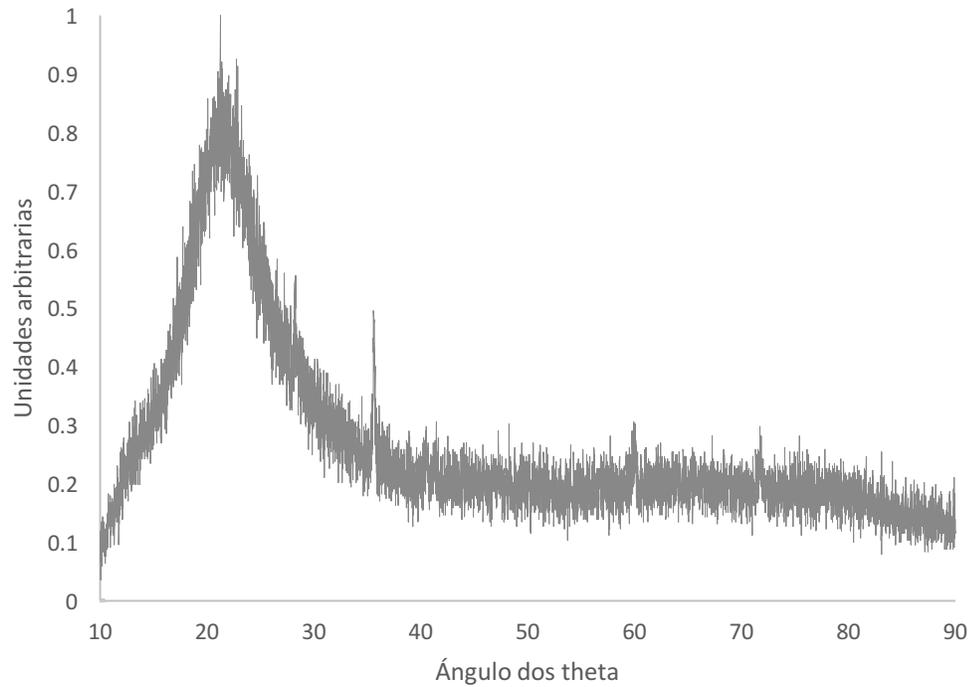


Figura 8.8 Diffractograma de la micro sílice

8.1.6 Microscopía electrónica de barrido

Los cementantes fueron observados bajo el microscopio electrónico de barrido para identificar su morfología a pequeña escala, las fotografías de los cementantes se pueden observar de la Figura 8.9 a la Figura 8.13.

Como se puede observar, los cementos están formados de particular angulosas y la micro sílice de esferas, como era de esperarse. Acerca del tamaño de la micro sílice que parece ser mayor a del cemento, esto puede deberse a que ésta pudo haber sido sometida a un proceso de densificación para facilitar su manejo.

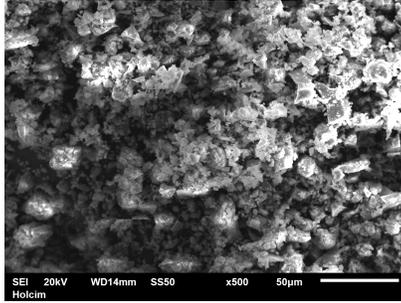


Figura 8.9 Morfología del Cemento I

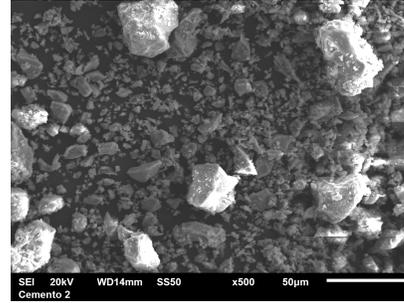


Figura 8.10 Morfología del Cemento II

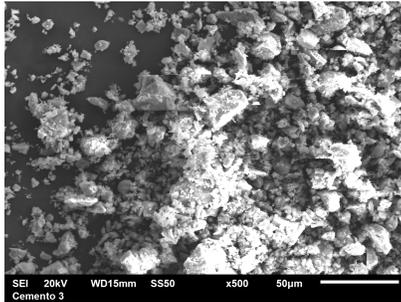


Figura 8.11 Morfología del Cemento III

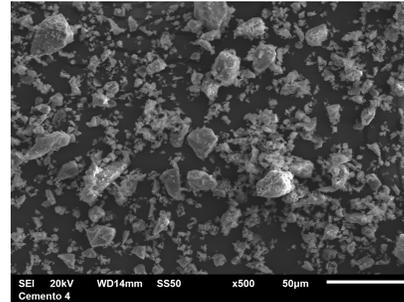


Figura 8.12 Morfología del Cemento IV

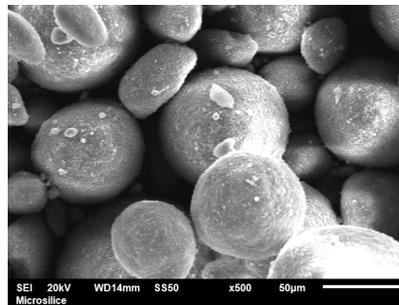


Figura 8.13 Morfología de la Micro sílice

8.2 Determinación de la extensibilidad de proyecto

Es conocido que a menor aire en una mezcla de concreto mayor será la resistencia a compresión, por lo que se evaluaron las mezclas CI2514, CII250 y CII2514 con tres distintas dosificaciones de aditivo fluidificantes para determinar cómo el aire atrapado y la extensibilidad afectan a la resistencia a compresión a 28 días. Los datos resultantes de la experimentación concerniente a esta etapa de la investigación se encuentran en la Tabla 8.5.

Tabla 8.5 Propiedades en estado fresco y Resistencia a compresión de las mezclas.

Mezcla	Resistencia a la compresión (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Extensibilidad (cm)	Desviación estándar (cm)	Aire (%)	Desviación estándar (%)
CI2514-A11	154.9	10.3	29.6	-	2.3	-
CI2514-A13	157.6	11.3	30.7	-	0.5	-
CI2514-A15	135.6	1.3	34.3	-	0.1	-
CII250-A7	100.6	10.0	26.8	1.9	3.5	0.3
CII250-A7.6	106.3	4.7	29.5	0.0	3.9	0.3
CII250-A8.1	125.5	10.0	33.2	0.3	0.8	0.4
CII2514-A12.35	145.7	13.2	28.7	2.6	2.7	1.0
CII2514-A15	145.6	8.0	33.7	0.2	2.1	0.8
CII2514-A16	139.2	14.8	33.8	0.5	1.4	0.3

8.2.1 Influencia del contenido de aire en la resistencia a compresión.

Se presenta de manera gráfica de la Figura 8.14 a la Figura 8.16, la relación entre el contenido de aire de las mezclas con la resistencia a compresión de las mismas.

En la Figura 8.14 se aprecia que los mejores resultados de resistencia a compresión se consiguen a un contenido entre 1% y 2% de aire. En la Figura 8.15 se aprecian que los mejores resultados de resistencia a compresión se consiguen a un contenido de aire de alrededor 1%. En la Figura 8.16 se aprecian que los mejores resultados de resistencia a compresión se consiguen a un contenido de aire de alrededor un 2%.

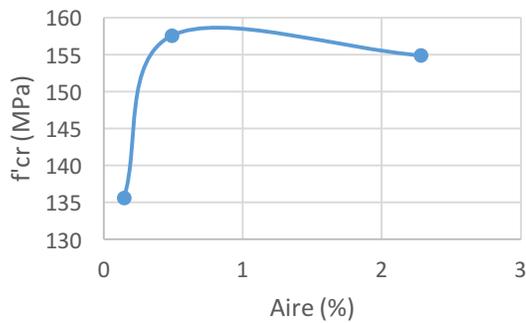


Figura 8.14 Influencia del contenido de aire en la resistencia (Mezcla CI2514)

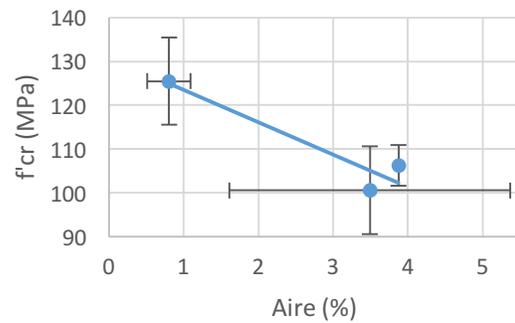


Figura 8.15 Influencia del contenido de aire en la resistencia (Mezcla CII250)

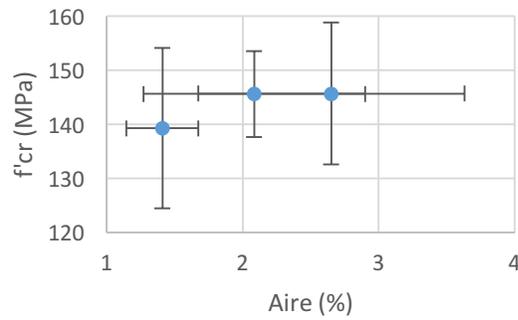


Figura 8.16 Influencia del contenido de aire en la resistencia (Mezcla CII2514)

En general en las tres figuras se observa un óptimo contenido de aire entre 1 y 2%, para contenidos mayores o menores se ve una reducción en la resistencia, esto puede deberse a que usualmente cuando hay contenidos muy bajos de aire las mezclas tienden a ser muy poco viscosas y puede existir segregación, mientras que a altos contenidos de aire éste podría reducir la continuidad en la matriz y con ello reducir la resistencia.

8.3 Influencia en la extensibilidad en la resistencia a compresión

La relación entre la extensibilidad de las mezclas con la resistencia a compresión de las mismas se presenta de manera gráfica de la Figura 8.17 a la Figura 8.19.

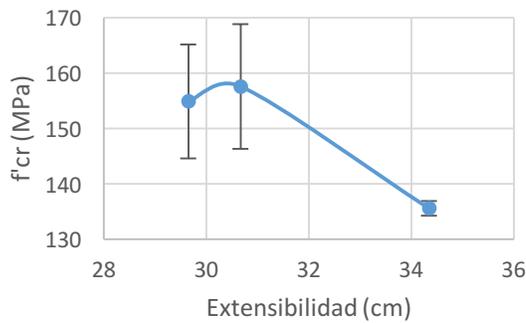


Figura 8.17 Influencia de la extensibilidad en la resistencia (Mezcla CI2514)

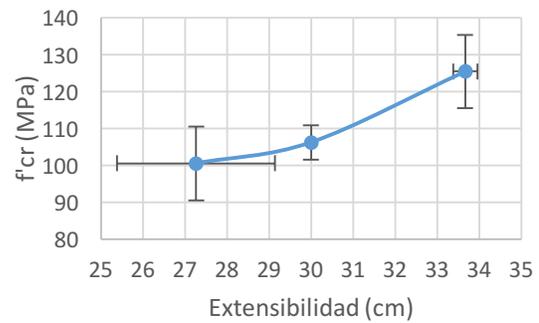


Figura 8.18 Influencia de la extensibilidad en la resistencia (Mezcla CII250)

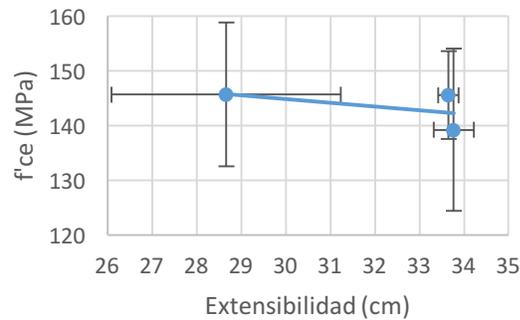


Figura 8.19 Influencia de la extensibilidad en la resistencia (Mezcla CII2514)

En la Figura 8.17 se aprecia que los mejores resultados de resistencia a compresión se consiguen a una extensibilidad de 31 cm, valores mayores y menores la reducen. En la Figura 8.18 se ve un desempeño siempre favorable al aumento de la extensibilidad en el intervalo entre 27 y 33.5 cm, sin embargo, antes de los 30 cm el aumento de extensibilidad no afecta en gran medida a la resistencia. En la Figura 8.19 se observa una aparente independencia entre la resistencia y la extensibilidad para el intervalo 28.5-33.5cm con una ligera reducción en la primera a partir los 33.5 cm.

A partir de los resultados se concluyó que los mejores resultados de resistencia a compresión se encuentra en el intervalo **29-33.5 cm**. Este intervalo puede estar relacionado con que, para las mezclas analizadas, una extensibilidad menor de 28.5 cm provoca mezclas con alta porosidad y que para valores mayores de 33.5 cm puede existir cierta segregación.

8.4 Definición de la relación agua cemento del proyecto

De las ecuaciones de Powers se sabe que la hidratación del cemento depende de la contracción química y la disponibilidad de agua del mismo, por lo que relaciones a/c bajas pueden no hidratarse del todo [1]. Para evaluar este efecto se hicieron cuatro mezclas con relaciones a/c distintas manteniendo constante el volumen de pasta (reemplazando cemento como micro polvo de caliza) y la adición de microsílíce al 14% del peso del cemento.

La matriz experimental de esta sección y los resultados de cada una de las mezclas se puede observar en la Tabla 8.6.

Tabla 8.6 Matriz experimental para evaluar el efecto de la relación (a/c)

Mezcla	Relación a/c	Edad (días)	Resistencia a compresión (MPa)	Desviación estándar (MPa)	Extensibilidad	Aire
CI2514-A12.35	0.25	3	98.3	2.0	30.7	2.2
CI2514-A12.36		7	113.9	4.3		
CI2514-A12.37		28	150.0	4.7		
CI3314-A16	0.33	3	72.2	1.8	30.8	1.9
CI3314-A17		7	89.5	0.7		
CI3314-A18		28	130.3	5.8		
CI4114-A25	0.41	3	53.7	1.5	28.0	1.8
CI4114-A26		7	73.2	1.8		
CI4114-A27		28	98.4	7.3		
CI4914-A33	0.49	3	40.6	0.9	23.3	2.5
CI4914-A34		7	50.0	2.6		
CI4914-A35		28	81.3	4.5		

Los resultados de ganancia de resistencia con respecto a la edad y conforme a la reducción de la relación a/c se pueden consultar de manera gráfica en la Figura 8.20.

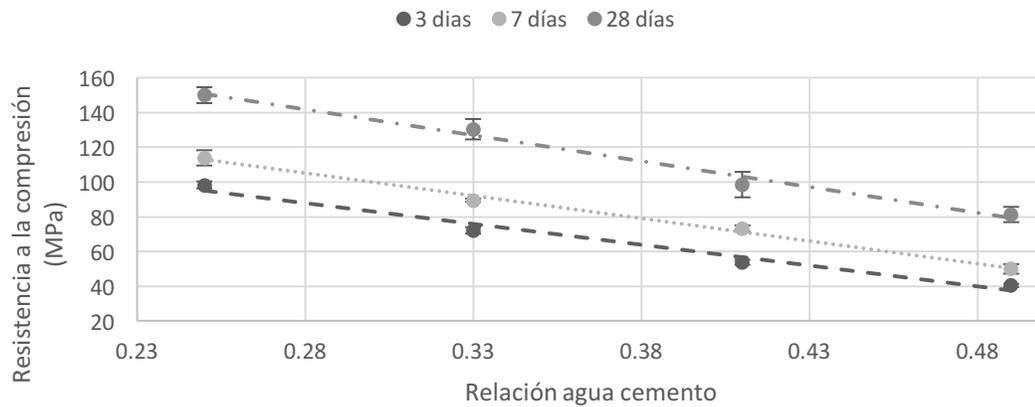


Figura 8.20 Resistencia a Compresión vs Relación a/c

En la Figura 8.20 se puede observar que a pesar de que las relaciones a/c más altas están mejor hidratadas tienen menor resistencia. Esto puede deberse a que el filler que se utilizó para reemplazar el cemento no es igual de resistente que el cemento anhidro y por ende se ve una reducción en la resistencia a compresión. A partir de este experimento se estableció que no se pueden utilizar relaciones a/c mayores a 0.25 si se quiere obtener el resultado de 150 MPa.

Dicha aseveración podría encontrar fundamento en pruebas de nano indentación en el cemento y sus productos de hidratación. En [87] se presenta la Tabla 8.7 donde se muestra la dureza del cemento, sus productos de hidratación principales (CSH de alta y baja densidad) y los materiales comúnmente encontrados en los UHPC.

Dichos resultados muestran que el cemento anhidro es alrededor de 10 veces más duro que la fase ligante CSH, adicional a esto en [88] se reporta que la dureza de la caliza 2.21 ± 0.16 GPa, valor que es 5 veces menor que el del clinker anhidro.

De esta manera se soportan los resultados obtenidos en esta sección de la investigación.

Tabla 8.7 Resultados de nano indentación en Concretos de Ultra Alto Desempeño [88]

Fase	Dureza (GPa)
CSH de baja densidad	0.55±0.03
CSH de alta densidad	1.36±0.35
Polvo de cuarzo	5.14±3.08
Arena de cuarzo	5.14±3.08
Cemento anhidro	9.12±0.90

La relación a/c de 0.25 se fijo como la base para las restantes fases experimentales por dos razones:

1. Se alcanzó la resistencia de 150 MPa.
2. El aditivo fluidificante no permitió reducir más dicho valor.

8.5 Optimización del uso de micro sílice

Al ser la micro sílice una puzolana de muy buen desempeño, se tiene la idea de que bajo cualquier circunstancia una mayor adición de la misma mejorará las propiedades mecánicas de una mezcla.

8.5.1 Influencia de la relación micro sílice cemento (sc) y el cemento en la resistencia a compresión

Para la evaluación del efecto de la micro sílice en la resistencia a compresión se hicieron mezclas con el Cemento I y el Cemento II. Los resultados de las mezclas se encuentran condensados en la Tabla 8.8 y en la Tabla 8.9.

En el caso del Cemento I se exploraron las relaciones sc 0.5, 0.8, 0.14 y 0.25, para las edades 3, 7 y 28 días. En el caso del Cemento I se exploraron las relaciones sc 0.5, 0.8, 0.10 y 0.14, para las edades 3, 7 y 28 días.

Cada mezcla se hizo por triplicado y cada ensayo de compresión constó de ensayo de 9 cubos.

Tabla 8.8 Influencia de la relación sc en el desarrollo de la resistencia a compresión (Cemento I)

Mezcla	Edad (días)	Relación sc	Resistencia (Mpa)	Desviación estándar (MPa)	Extensibilidad (cm)	Desviación estándar (cm)	Aire (%)	Desviación estándar (%)
CI250-A6	3	0	84.4	6.0	31.1	0.8	2.2	1.4
	7	0	95.0	7.1				
	28	0	116.2	5.7				
CI2505-A7.6	3	0.05	93.4	5.3	31.2	1.7	1.4	1.0
	7	0.05	105.7	6.8				
	28	0.05	135.4	6.7				
CI2508-A9.2	3	0.08	90.1	5.1	31.7	0.3	2.5	0.2
	7	0.08	116.9	5.6				
	28	0.08	149.1	5.2				
CI2514-A12.35	3	0.14	95.1	3.7	30.7	0.8	2.2	0.6
	7	0.14	115.2	8.4				
	28	0.14	146.6	7.4				
CI2525-A33	3	0.25	81.9	4.9	28.9	1.8	2.9	0.9
	7	0.25	106.1	6.9				
	28	0.25	138.5	9.0				

Tabla 8.9 Influencia de la relación sc en el desarrollo de la resistencia a compresión (Cemento II)

Mezcla	Edad (días)	Relación sc	Resistencia (Mpa)	Desviación (MPa)	Extensibilidad (cm)	Desviación estándar (cm)	Aire (%)	Desviación estándar (%)
CII250-A8.1	3	0	96.2	4.0	33.2	0.3	0.8	0.4
	7		106.0	5.9				
	28		125.5	10.0				
CII2505-A9	3	0.05	98.8	5.1	30.2	2.5	2.7	0.4
	7		114.7	8.6				
	28		128.7	8.3				
CII2508-A11.6	3	0.08	106.2	3.3	31.5	0.7	0.2	0.3
	7		125.7	5.9				
	28		155.5	7.8				
CII2510-A12	3	0.1	108.8	4.8	33.6	0.1	1.3	0.4
	7		132.1	9.0				
	28		145.4	8.4				
CII2514-A15	3	0.14	107.1	3.7	33.7	0.2	1.6	0.8
	7		130.4	3.0				
	28		145.6	8.0				

Se muestran de manera gráfica en las Figura 8.21 y Figura 8.22 el desarrollo de resistencia de las mezclas tanto del cemento I como del Cemento II con respecto a la relación micro sílice cemento (sc)

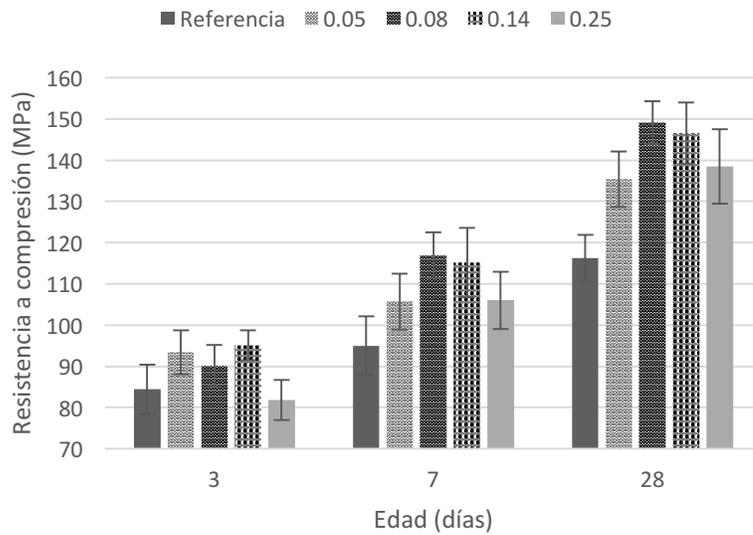


Figura 8.21 Desarrollo de la resistencia a compresión de las Mezclas con el Cemento I con respecto a la relación sc y la edad

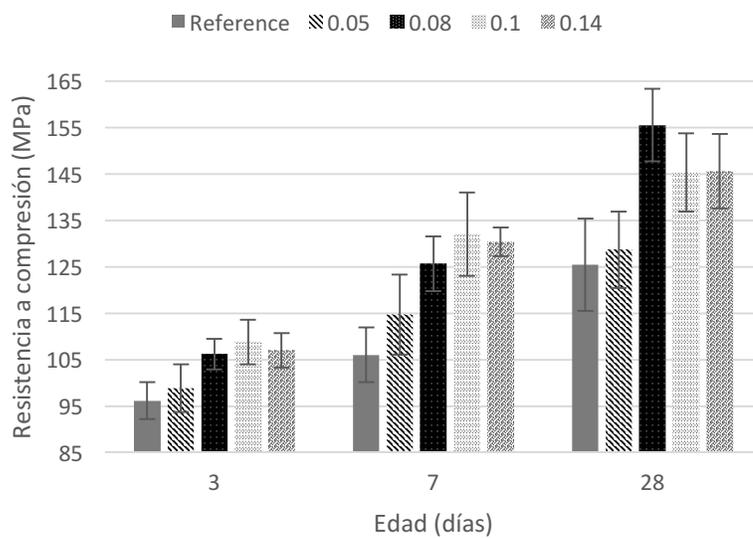


Figura 8.22 Desarrollo de la resistencia a compresión de las Mezclas con el Cemento II con respecto a la relación sc y la edad

El desempeño de las mezclas del cemento I de acuerdo a la edad fue el siguiente:

- 3 días: No se observó una tendencia con respecto al aumento de micro sílice en las mezclas teniendo todas las mezclas una resistencia promedio

de alrededor 90 MPa, viéndose menos favorecida la mezclas con relación sc de .25

- 7 días: Se observa un desempeño parabólico con un máximo para la mezcla de 8%
- 28 días: El desempeño de la edad 7 días se repite para un máximo de la mezcla de relación sc de 0.08.

El desempeño de las mezclas del cemento II de acuerdo a la edad fue el siguiente:

- 3 días: Se observa una ganancia de resistencia conforme la cantidad de microsílíce se incrementa hasta que permanece constante entre las mezclas de 8, 10 y 14% de adición
- 7 días: Se observa un aumento de resistencia con el aumento de la relación sc hasta que permanece constante para las mezclas de 8 y 10% de adición.
- 28 días: Se ve un aumento de resistencia que tiene un pico para 8% de adición y un valor constante para las mezclas de 10 y 14%

Como conclusión se elige la relación sc de 0.08, puesto que aunque no se tiene la mayor resistencia para todos las edades, para la edad objetivo de 28 días obtiene el máximo de resistencia.

Estos resultados pueden atribuirse a la reducción del empaquetamiento conforme se adicionaban mayores cantidades de micro sílice, en la Figura 8.23 se puede apreciar cómo a una mayor cantidad de micro sílice se ve una mayor desviación entre la curva sugerida por el modelo de Andreasen y Andersen para un q de .25 y las curvas de las mezclas granulares propias de cada mezcla, dicha variación se puede apreciar analíticamente con el coeficiente R^2 (Tabla 8.10).

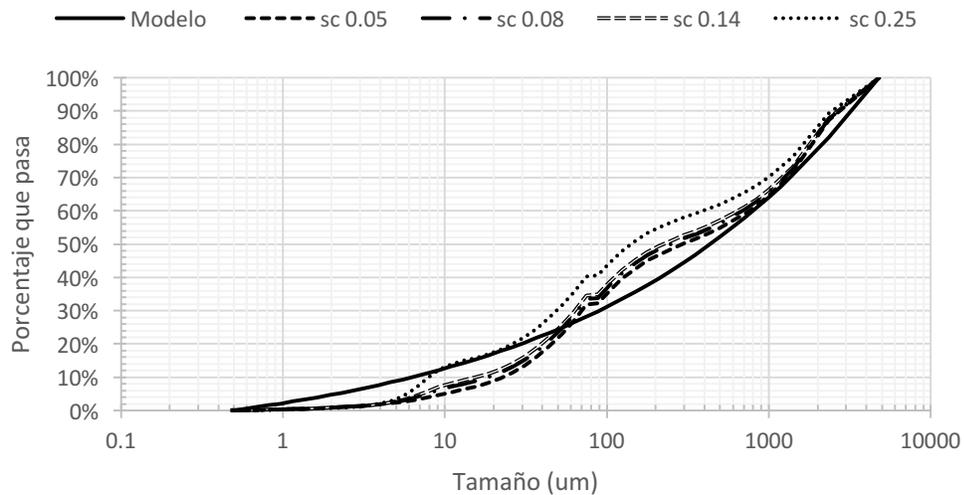


Figura 8.23 Desviación de las curvas granulométricas con respecto al modelo de Andreasen Andersen modificado

Tabla 8.10 Variación del coeficiente R^2 en función de la adición de micro sílice

Relación sc	Coficiente de Determinación R^2
0.05	0.978
0.08	0.977
0.14	0.974
0.25	0.965

Otra explicación de la reducción de resistencia conforme se aumentó la cantidad de micro sílice es que pudo deberse a que la reacción puzolánica se ve incompleta a relaciones agua/cemento muy bajas por la falta de dispersión de la micro sílice y la ausencia de agua para su disolución, dicho aspecto se explora posteriormente.

Las mezclas del Cemento I fueron probadas a la edad de 56 días para evaluar que tanto se podría de esperar que la resistencia avanzara a largo plazo producto de que la reacción puzolánica pudiera contribuir a un aumento en la resistencia, los resultados se encuentran en la Figura 8.24.

Del desarrollo de resistencia a largo plazo en las mezclas del Cemento I, se puede observar que la única mezcla que aumenta de resistencia a compresión es la mezcla de relación micro sílice cemento .05, la cual prácticamente alcanza en resistencia a la mezcla de 0.14 de adición, mientras que las mezclas de 0.14

y 0.25 mantienen la misma resistencia, por lo que se concluye que en condiciones de curado estándar no deber esperarse un desarrollo de resistencia mayor después de los 28 días y que para la cantidad de pasta existe un límite aparente de resistencia alrededor de los 150 MPa a compresión bajo un curado estándar.

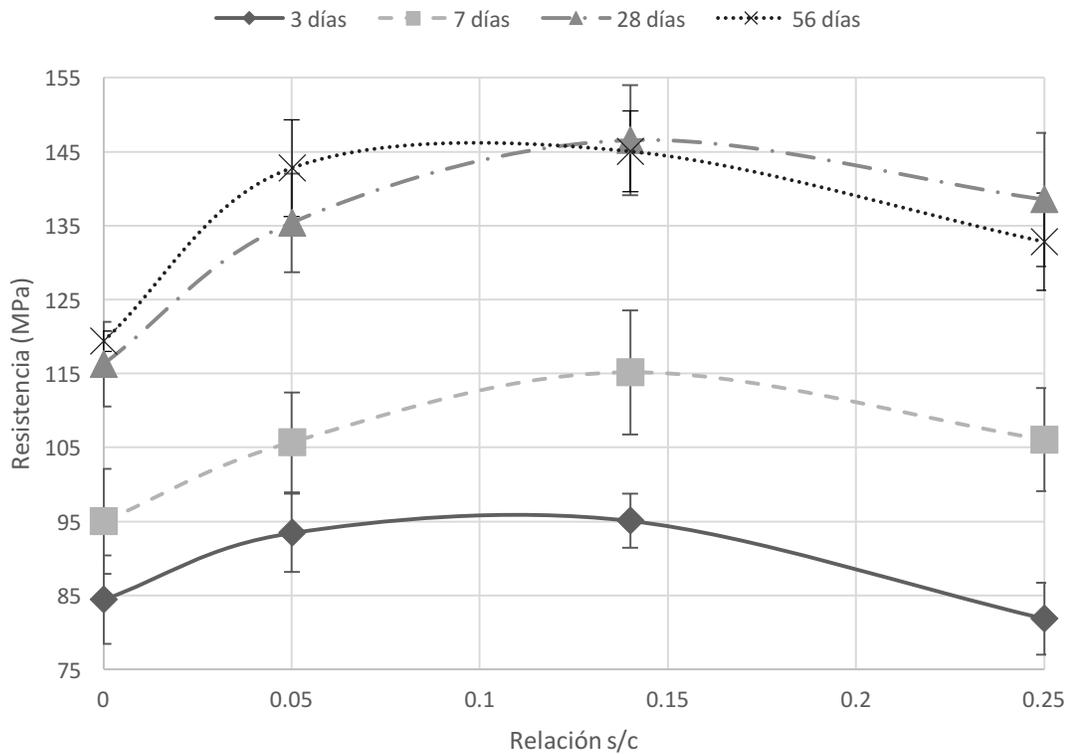


Figura 8.24 Resistencia a largo plazo de las mezclas del cemento I

Una vez definida la relación sc de 0.08 se probaron dos cementos resistentes a los sulfatos de alta finura con el objeto de incrementar los buenos resultados del Cemento I que había conseguido una resistencia similar al Cemento II con menores cantidades de aditivo fluidificante ingrediente, que con la micro sílice, es de los más costosos en la formulación de concretos de alto desempeño.

Los resultados de las mezclas de los cementos III y IV se encuentran en la Tabla 8.11

Tabla 8.11 Mezclas de los Cementos III y IV

Mezcla	Edad (días)	Relación sc	Resistencia (Mpa)	Desviación (MPa)	Extensibilidad (cm)	Desviación estándar (cm)	Contenido de aire (%)	Desviación estándar (%)
CIII2508-A23	3	0.08	89.2	4.1	32.0	0.0	0.3	0.0
	7		104.7	2.5				
	28		136.5	3.9				
CIV2508-A23	3	0.08	88.1	3.0	33.2	0.3	0.8	0.4
	7		109.2	3.6				
	28		146.1	7.3				

Los resultados de resistencia a compresión a 28 días del Cemento III y IV, favorecen al Cemento IV el cual es ligeramente menos fino que el cemento III (4.2 vs 4.38 m²/gr), esto puede deberse a una inadecuada dispersión de las partículas de cemento, sin embargo, la diferencia entre las resistencias es muy baja (6%).

8.5.2 Tiempos de fraguado de las mezclas

Los tiempos de fraguado de las mezclas realizadas se presenta de la Tabla 8.12 a la Tabla 8.14.

Al observar los resultados de tiempo de fraguado se podría pensar que es contradictorio que a mayor contenido de micro sílice el fraguado se haya retrasado más este, sin embargo, hay que considerar que para mantener la fluidez se aumentó la cantidad de aditivo fluidificante lo que pudo provocar un efecto retardante en las mezclas.

Para un análisis más a detalle se aíslan los diseños de mezclas con 8 por ciento de adición de micro sílice en la Tabla 8.15.

Al analizar la Tabla 8.15, se pueden observar dos tendencias, a mayor contenido de C₃A y a mayor área superficial, mayor demanda de aditivo fluidificante. De gran interés es el resultado de los cementos III y IV, cuya demanda de aditivo es de alrededor de 2 veces la cantidad de los cementos I y II teniendo éstos un área superficial solamente 1 m²/gr más pequeña.

Tabla 8.12 Tiempos de Fraguado de las mezclas del Cemento I

Relación sc	Fraguado inicial	Fraguado final
0	242	318
0.05	263	325
0.1	344	403
0.14	377	442

Tabla 8.13 Tiempos de fraguado de las mezclas del cemento II

Relación sc	Fraguado inicial	Fraguado final
0	259	337
0.05	280	346
0.1	329	386
0.14	396	453

Tabla 8.14 Tiempos de Fraguado de las mezclas del Cemento III y IV

	<i>Relación sc</i>	<i>Fraguado inicial</i>	<i>Fraguado final</i>
<i>Cemento III</i>	0.08	481	557
<i>Cemento IV</i>	0.08	427	497

Tabla 8.15 Influencia del cemento en la demanda de aditivo fluidificante

	Contenido de C ₃ A (%)	Área superficial m ² /gr	Dosificación de aditivo (gr/kg de cementante)
Cemento I	2.1	3.74	9.2
Cemento II	7.2	3.49	11.6
Cemento III	3.8	4.38	23
Cemento IV	3.9	4.2	23

Después de analizados los resultados de todos los cementos se eligió a la mezcla CI2508-A9.2 como la óptima debido a su bajo consumo de aditivo fluidificante y buen desempeño mecánico.

8.5.3 Permanencia de la trabajabilidad

Las grandes cantidades de cemento y micro sílice pueden producir una rápida pérdida de revenimiento en las mezclas debido a su hidratación. Este fenómeno podría evitar el uso de este tipo de material.

Las mezclas CI2508-A9.2, CII2508-A11.6, CIII2508-A23 y CIV2508-A23 fueron evaluadas para determinar cual es su pérdida de trabajabilidad conforme al paso del tiempo. Los resultados de las pruebas se observan de manera gráfica en la Figura 8.25.

De los cuatro cementos probados el cemento con mayor pérdida de trabajabilidad a las dos horas fue el cemento I, resultado que era esperado por la mayor cantidad de C_3A , sin embargo, las mezclas de los cuatro cementos mantuvieron al menos 29 cm de extensibilidad por 1 hora manteniéndose en el límite de trabajabilidad óptimo para la resistencia definido en el capítulo 8.3.

A manera de conclusión, se tiene que a pesar de las grandes cantidades de cemento y micro sílice la dosificación de aditivo superplastificante mantuvo a las mezclas trabajables por un período de tiempo suficiente.

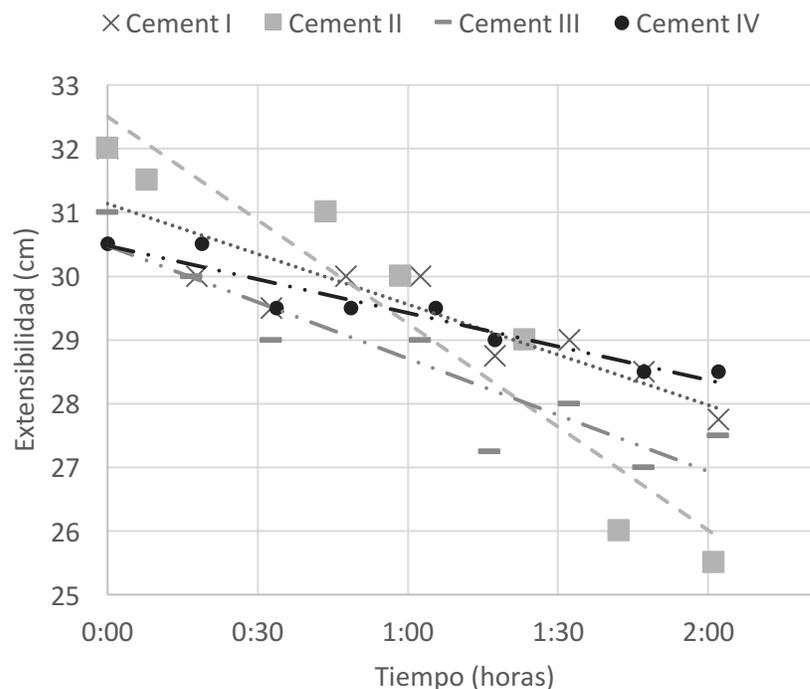


Figura 8.25 Pérdida de trabajabilidad de las mezclas

8.5.4 Contracción autógena de la mezcla óptima

La contracción autógena es un problema que se da usualmente en los concretos de alto desempeño debido a las grandes cantidades de cementantes que éstos llevan en su composición. Al hidratarse los cementantes producen una reducción de la humedad relativa lo cual produce un aumento de tensión capilar que eventualmente produce una auto desecación y contracción dentro de la pasta cementante [29].

Los UHPC invariablemente utilizan altos contenidos de cemento y micro sílice por lo que este problema está siempre presente. Se efectuó la prueba de contracción autógena sobre la mezcla óptima para evaluar su desempeño, los resultados de la prueba se presentan en la Figura 8.26.

El desempeño de contracción de la mezcla muestra 900 microdeformaciones a 28 días y 1060 a 80, dicho resultado va acorde a lo reportado en [89] y [90], donde se registran valores entre 700 y 800 microdeformaciones/metro a los 28 días.

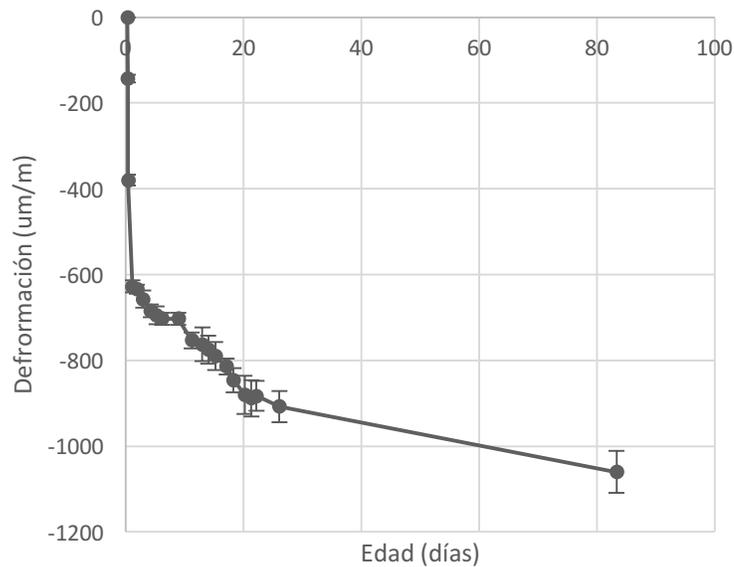


Figura 8.26 Contracción autógena de la mezcla optimizada

8.6 Durabilidad de las mezclas

La durabilidad de los Concretos fabricados se evaluó a través de la resistencia superficial y del coeficiente de migración de cloruros bajo condiciones no estacionarias.

8.6.1 Influencia de la adición de micro sílice en la resistividad superficial.

Es conocido que el hidróxido de calcio es un compuesto soluble en agua y que fácilmente puede salirse del concreto dejando porosidad tras su salida, la reacción puzolánica provoca que el hidróxido de calcio al ligarse con la micro sílice se convierta en CSH, dicho compuesto hidratado es insoluble y ocupa los espacios que dejaría el hidróxido de calcio al lixiviarse aumentando la densificación de la matriz.

Para investigar el efecto de la adición de micro sílice en la resistividad eléctrica superficial se evaluaron las mezclas CI250-A6, CI2508-A9.2, CI2510-A10.5 del cemento I y las mezclas CII250-A6, CII2508-A8.1, CII2510-A12 del cemento II.

Los sets de mezclas fueron conformados por mezclas sin micro sílice y con adiciones de 8 y 10%. Los resultados de la evolución de la resistividad eléctrica se pueden apreciar gráficamente en la Figura 8.27 y en la Figura 8.28.

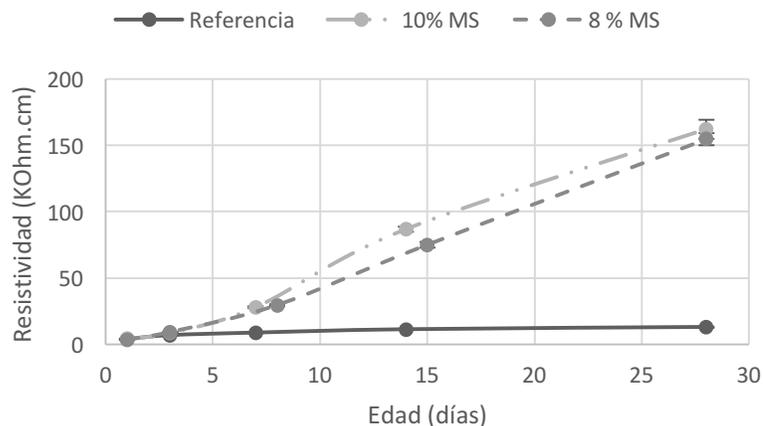


Figura 8.27 Resistividad eléctrica de las mezclas realizadas con el cemento I

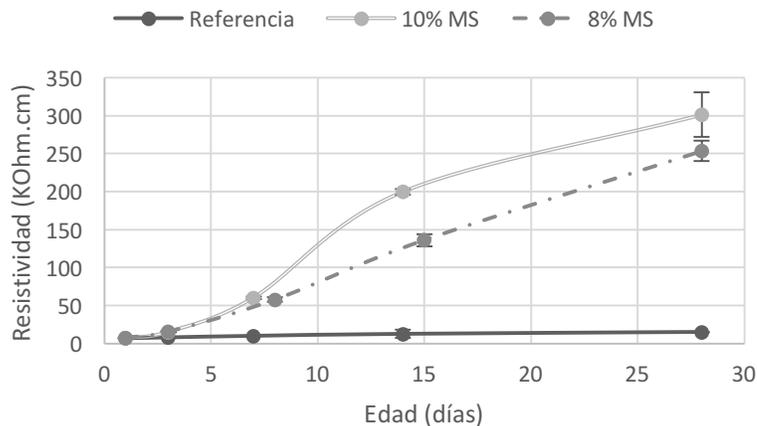


Figura 8.28 Resistividad eléctrica de las mezclas realizadas con el cemento I

Los resultado del cemento I mostraron un dramático aumento de las resistividad a 28 días pasando de 13 KOhm.cm a 155 KOhm.cm y a 162 KOhm.cm para las adiciones de 8 y 10% de Micro sílice respectivamente. En el caso del cemento II la resistividad pasó de 15 KOhm.cm a 254 y 301 KOhm.cm para las adiciones de 8 y 10% respectivamente.

Una vez vistos los resultados de la adición de micro sílice en el aumento de la resistividad eléctrica se probaron las mezclas de los cementos III y IV. Los resultados se pueden observar en la Figura 8.29.

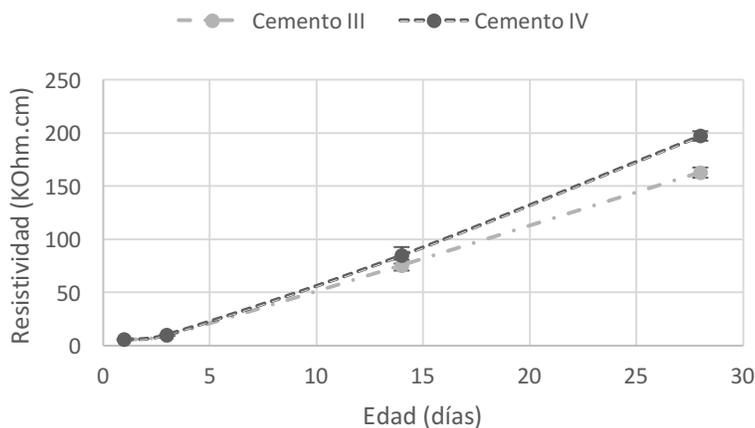


Figura 8.29 Resistividad eléctrica de las mezclas con los Cementos III y IV

La norma AASHTO TP 95 [63] basada en experimentación propone la Tabla 8.16. En función de ella, todas las mezclas con micro sílice de los cementos I, III y IV mostraron tener una probabilidad de penetración de cloruros muy baja, mientras que las mezclas del cemento II alcanzaron una resistividad en el rango de probabilidad insignificante de penetración del ión cloruro

Tabla 8.16 Resistencia a la penetración del ion cloruro en función de la resistividad

Penetración del ion cloruro	Resistividad superficial en cilindros de 10X20 cm
Alta	<12
Moderada	12-21
Baja	21-37
Muy baja	37-254
Insignificante	>254

8.6.2 Coeficiente de migración del ion cloruros a través de experimentos no estacionarios

Actualmente, existen muchos métodos para estimar el transporte de cloruros al interior del concreto, algunos de ellos son usados como herramientas para la optimización de mezclas y/o para asegurar la calidad en el campo. Para este propósito, la ASTM C 1202 [91] es el método acelerado más popular para cualificar la durabilidad/permeabilidad del concreto. Alternativamente, el método ASTM C 1556 [92] provee un procedimiento para determinar el coeficiente de difusión para los cloruros que después de 28 días de curado requiere al menos 35 días de exposición.

Ambos test tienen desventajas, el primero únicamente proporciona un valor cualitativo, mientras que el segundo, aunque es cuantitativo, lleva mucho tiempo. Una alternativa a la ASTM C1556, es la norma NT Build 492, el cual lleva hasta 4 días, dependiendo de la matriz, y da resultados similares [93].

El principio del estándar NT Build 492 consisten en lo siguiente:

Un potencial eléctrico es aplicado axialmente a través del espécimen. Después de cierto tiempo de duración, el espécimen es axialmente roto y una solución de

nitrate de plata se le aplica en una sección recientemente cortada. La profundidad de penetración de los cloruros se mide posteriormente por la precipitación blanca visible de cloruro de plata, a partir de dicha penetración el coeficiente de migración se puede calcular.

Los resultados de las mezclas evaluadas se presentan en la Tabla 8.17.

Tabla 8.17 Coeficiente de migración de las mezclas evaluadas

Mezcla	Relación sc	Coeficiente de Migración ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	Desviación estándar ($\times 10^{-12}$ m ² /s)
C1250-A6	0	6.92	0.06
C12508-A9.2	0.8	0.33	0.02
C12510-A10.5	0.1	0.36	0.03
CII250-A6	0	4.24	0.11
CII2508-A8.1	0.8	0.18	0.02
CII2510-A12	0.1	0.16	0.03
CI2508-A23	0.08	0.33	0.02
CIV2508-A23	0.08	0.25	0.02

En los resultados de las mezclas del cemento I y el cemento II, donde se evaluó la influencia de la adición de la micro sílice (8 y 10%) en el coeficiente de difusión, se observó un cambio similar al aumento de resistividad descrito anteriormente.

Las mezclas del cemento 1 vieron reducido su coeficiente de difusión 20 veces con la adición de 8 y 10 por ciento respectivamente. En el caso del cemento II hubo una reducción de 23 y 27 veces para las adiciones de 8 y 10% respectivamente.

Los resultados obtenidos en esta etapa son parecidos a los reportados por [94], donde un valor de 0.2×10^{-12} m²/s se obtiene de un concreto de ultra alto desempeño.

Los resultados de la resistividad se graficaron contra los resultados del coeficiente de difusión para establecer una relación entre ambos indicadores de durabilidad Figura 8.30. Se aplicó una regresión lineal potencial con los datos emparejados y se obtuvo un coeficiente de determinación R^2 de 0.99, lo que indica una fuerte correlación entre las variables estudiadas, el resultado de dicha regresión se muestra en la ecuación (8.1)

$$CD = 116.46 * R^{-1.156} \quad (8.1)$$

Donde:

CD: Es el coeficiente de migración de cloruros ($\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)

R: Es la resistividad superficial (KOhm.cm)

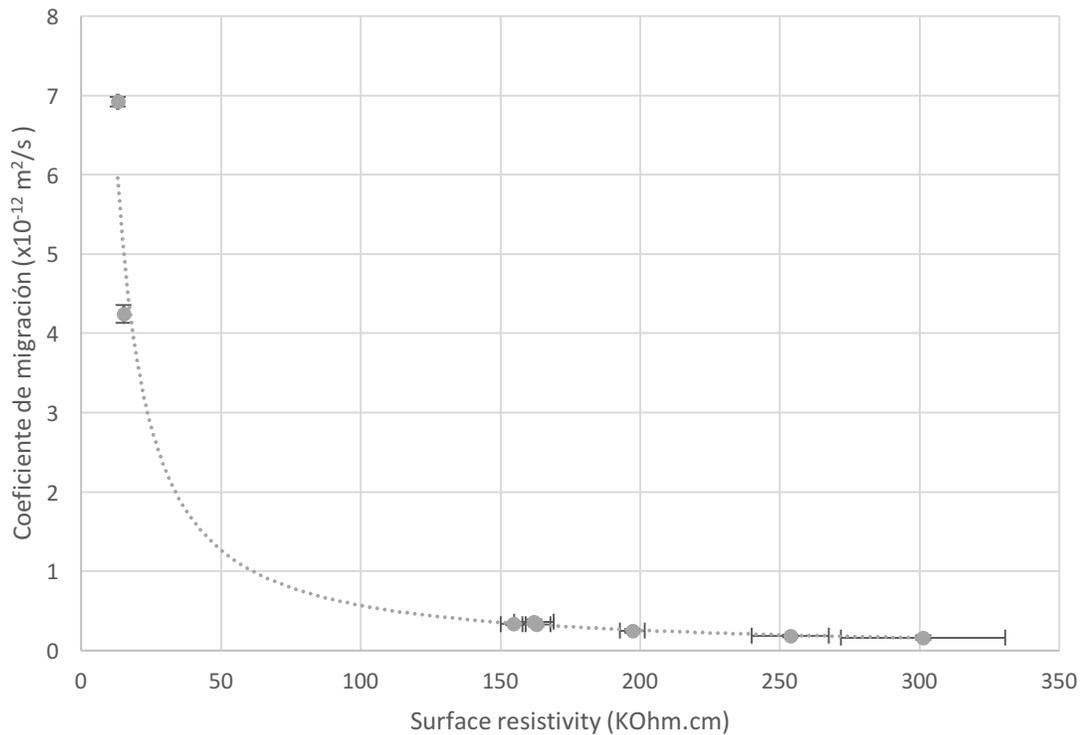


Figura 8.30 Resistividad vs Coeficiente de migración

8.6.3 Estimación de la vida útil de las mezclas optimizadas

Debido a que las mezclas con micro sílice mostraron un desempeño de aumento de la resistividad con respecto al tiempo para el intervalo de 28 días se repitieron los ensayos de resistividad en mezclas del mismo tipo que las mezclas CI2508-A9.6, CII2508-A11.6, CIII2508-A23 y CIV2508-A23 para observar el desarrollo de la resistividad a largo plazo, los resultados se pueden observar en la Figura 8.31.

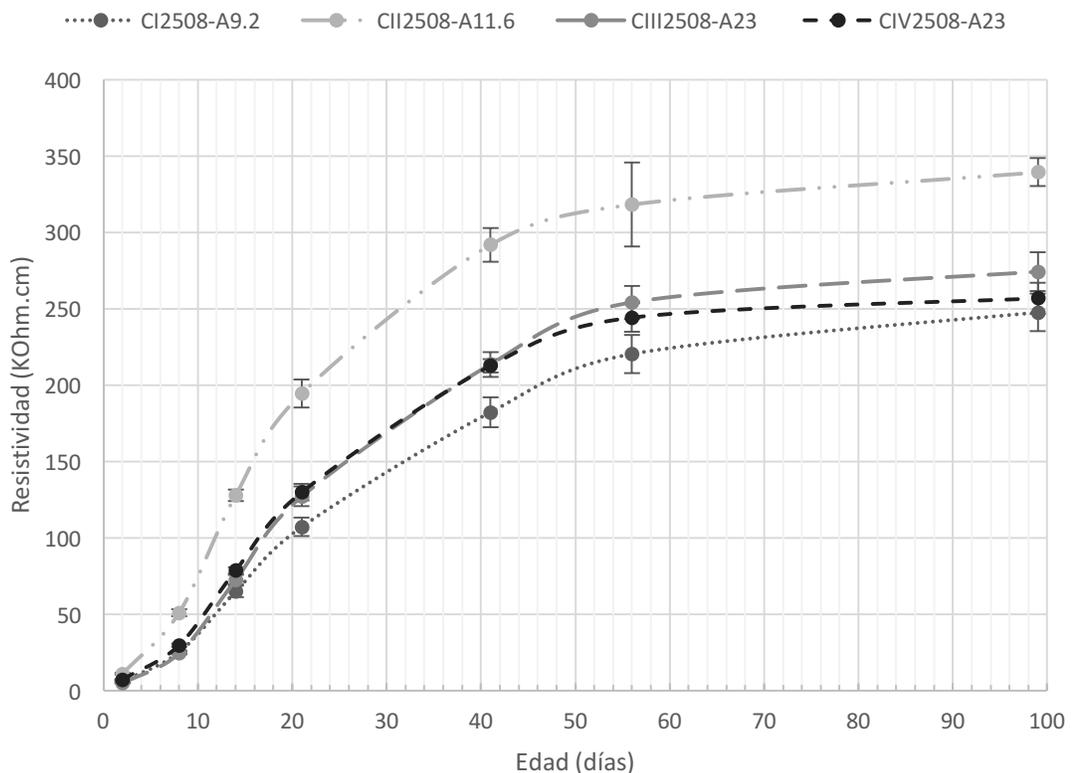


Figura 8.31 Evolución de la resistividad a largo plazo

La ganancia de resistividad de las mezclas fue muy alta en los primeros 15 días, después de los cuales hubo una desaceleración. Después de los 56 días de curado la ganancia fue muy baja por lo que se asumió la resistividad a 100 días como la resistividad terminal del sistema.

A partir de los resultados de resistividad a los 100 días se calculó el coeficiente de difusión de las mezclas a partir de la ecuación (8.1) y la vida útil mediante las ecuación (7.8), los resultados se ven plasmados en la Tabla 8.18. A falta de

experimentación a muy largo plazo la estimación de la vida útil de las formulaciones basadas en la consulta bibliográfica y la segunda ley de Fick indican que los sistemas estudiados podrían tener una vida útil entre 230 y 324 años.

Tabla 8.18 Resistividad y estimación del coeficiente de difusión y vida útil

Mezcla	Resistividad terminal (KOhm.cm)	Coeficiente de Migración ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	Vida útil (años)
CI2508-A9.6	247.54	0.20	230.76
CII2508-A11.6	332.37	0.14	324.42
CIII2508-A23	256.96	0.19	240.94
CIV2508-A23	259.82	0.19	244.04

8.7 Curado acelerado

Debido al control tan estricto que se tiene que tener en la fabricación de este tipo de mezclas se piensa que, al menos en esta etapa del desarrollo de este material, la tecnología permanezca en las plantas de concreto premezclado. Para acelerar la producción de especímenes la industria del premezclado utiliza tratamientos de curado acelerado. En este caso se probaron dos curados acelerados en la forma de dos rampas de calentamiento, una de 51°C/h y otra de 11°C/H, después de la rampa los especímenes permanecieron a 90°C durante 6 horas y sucesivamente se enfriaron dejándolos simplemente en un baño maría hasta que alcanzaron una temperatura de laboratorio de aproximadamente 23°C. Este procedimiento se hizo únicamente para la mezcla optimizada del Cemento I (CI2508-A9.6) a tres edades 3, 5 y 7 días. Los resultados se pueden observar en la Figura 8.32 y en la Figura 8.33.

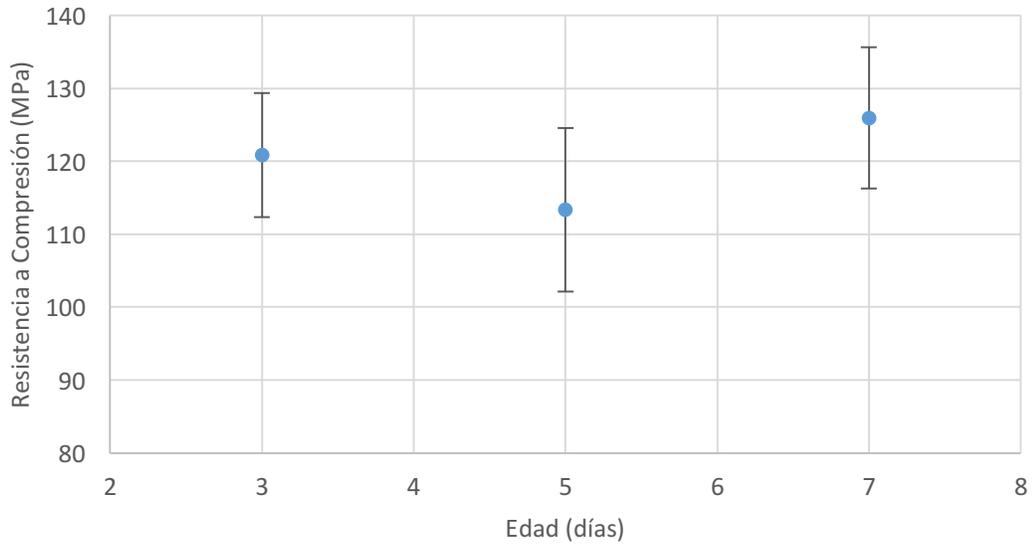


Figura 8.32 Resistencia a compresión de los especímenes sometidos a la rampa de 51°C/h

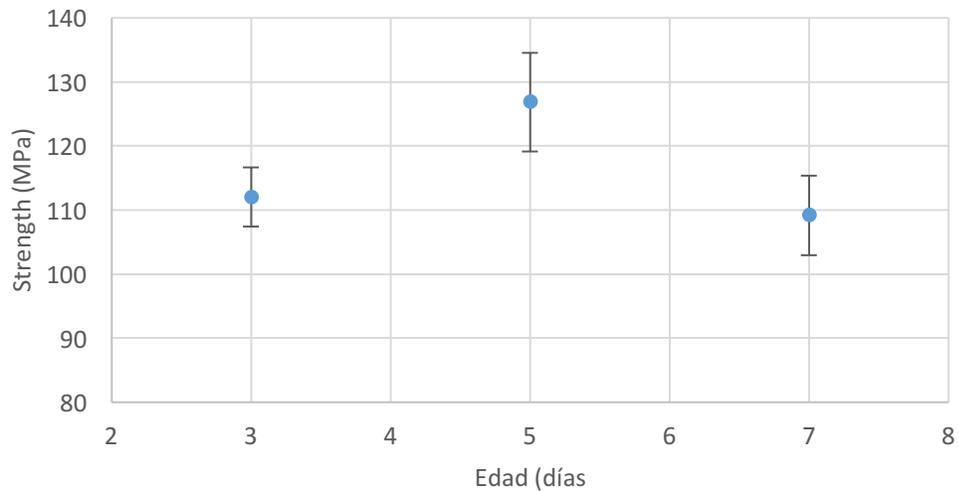


Figura 8.33 Resistencia a compresión de los especímenes sometidos a la rampa de 11°C/h

No se observa una tendencia con respecto a la edad en la que se inició el tratamiento de calor, mostrando todas las pruebas reducciones de la resistencia a compresión con respecto al valor de 149 MPa de curado estándar, teniendo como máximo valores de 130 MPa después del curado acelerado.

A temperaturas altas el CSH cuando no tiene una fuente de dióxido de silicio disponible sufre un efecto conocido como retrogresión de la resistencia, esto puede explicar el bajo desempeño de las mezclas [44].

Para corroborar que la reducción de resistencia haya sido por una falta de silicio se realizó una mezcla con el diseño CI2514-A12.35, que basada en el mismo cemento contuvo una adición de 14% de micro sílice.

Al observarse que el día en que se aplica el tratamiento no influye en la resistencia a compresión se hizo una prueba a dos días de curado con la rampa de 11°C/h con una meseta de 6 horas y otra con una meseta a de 24 horas para la mezcla con adición de 14% de micro sílice antes mencionada, los resultados se pueden ver en la Tabla 8.19.

Tabla 8.19 Influencia del curado acelerado en una mezcla con 14% de adición de micro sílice

Mezcla	Tratamiento	Resistencia (MPa)	Desviación estándar (MPa)
CI2514-A12.35	6 horas 90 grados	142.2	2.8
CI2514-A12.35	24 horas 90 grados	162.0	0.9

Los resultados de resistencia a compresión de la mezcla CI2514-A12.35 fueron satisfactorias, obteniéndose la resistencia de 28 días a 2 días después de 6 horas de curado y un aumento de 20 MPa después de 24 horas. Aunque estos resultados por si mismos no indican que la retrogresión de la resistencia haya tomado lugar puesto que no se hicieron pruebas de porosidad, ni de difracción de rayos x para determinar si los silicatos cálcicos hidratadas cristalinos se formaron, sí se puede concluir que para que los tratamientos de calor sean efectivos la cantidad de micro sílice adicionada no puede ser tan baja como 8%.

8.8 Aumento del tamaño del agregado

El concreto de Ultra Alto Desempeño siempre se ha caracterizado por la eliminación del agregado grueso, salvo algunas excepciones en que autores han

logrado tener éxito al añadir partículas grandes como se detalló en los antecedentes.

El uso de agregados más gruesos supone una ventaja con respecto a los más finos con respecto al consumo de agua, y en el caso de los concretos de alto desempeño, de aditivo fluidificante. Es por eso que se explora la posibilidad de sustituir una porción del agregado fino por agregado grueso manteniendo la pasta de la mezcla CI2508-A9.6. Los resultados en estado de la mezcla COCI2508-A7.36 se encuentran en la Tabla 8.20

Tabla 8.20 Pruebas en estado fresco del Concreto

Extensibilidad (cm)	Anillo J (cm)	T50 (s)	Embudo V (s)	Aire (%)	Peso volumetrico kg/m ³	Índice de estabilidad visual
71.5	69	1	2.5	1.70%	2397.2	0

El concreto fabricado fue de alta fluidez, bajo bloqueo, baja viscosidad de acuerdo al T50 y velocidad del Embudo V y nula segregación de acuerdo al índice de estabilidad visual, sin embargo, su desempeño mecánico fue superado en todas las edades por el mortero y a 28 días tuvo una resistencia 25 MPa menor como se puede observar en la Figura 8.34. Los resultados confirman lo reportado ampliamente en la literatura, a mayor tamaño de partícula, menor resistencia.

Aún cuando la resistencia a compresión se vio comprometida, el desarrollo de la resistividad entre la mezcla de concreto y la de mortero se siguieron a la par (Figura 8.35), haciendo suponer que las propiedades de transporte del concreto están dominadas principalmente por la pasta, la cual fue la misma en ambos casos.

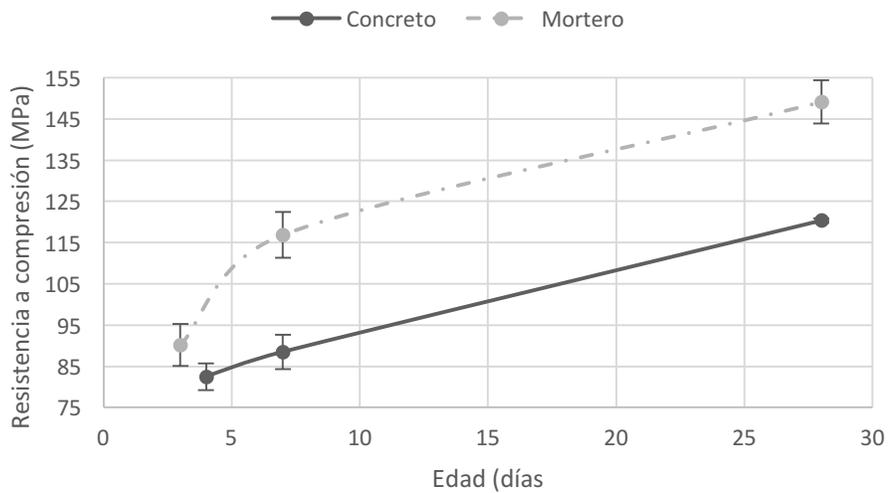


Figura 8.34 Comparación entre la resistencia de mortero y concreto.

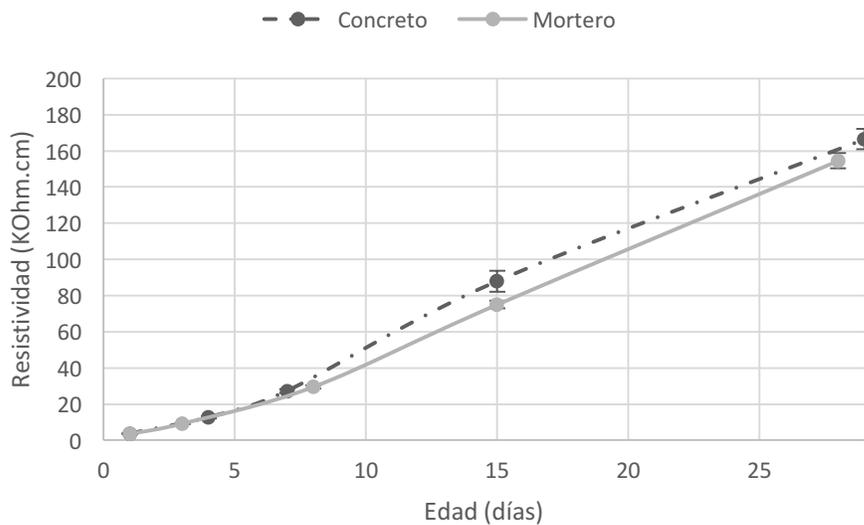


Figura 8.35 Resistividad superficial del mortero y el concreto

A manera de conclusión de esta etapa se puede decir que si se desea mantener la resistencia no se debe aumentar el tamaño del agregado, pero que mientras la mezcla sea fluida y estable, la impermeabilidad del concreto se mantiene constante a pesar del tamaño mayor de partícula del agregado.

8.9 Adición de fibras

Los concretos de ultra alto desempeño tienen la capacidad de resistir ciertos esfuerzos de tensión, esto implica que se pueden reducir la cantidad de acero de refuerzo, o en algunos casos, eliminarse por completo, aumentando la durabilidad. Además de la durabilidad es importante recordar que el concreto de alto desempeño presenta una falla frágil y explosiva así que al añadir fibras de acero se busca incrementar la ductilidad y tenacidad del material compuesto, mejorando su desempeño post-agrietamiento.

El programa experimental consistió de tres mezclas, se diseñó una mezcla control (CI2510-A10.5) y dos reforzadas con fibras CI2510-A10.5-F.5, CI2510-A10.5-F1 con adición de 39 y 78 kg/m³ de fibra de acero respectivamente.

Los requerimientos básicos para la colocación del concreto autocompactable son la excelente formabilidad, buena estabilidad y bajo riesgo de bloqueo. En esta investigación las tres propiedades son medidas. Dichas propiedades se presentan en la Tabla 8.21. Adicional a lo indicado en la tabla, la inspección visual del concreto en estado fresco descartó segregación o sangrado considerable en todas las mezclas.

Tabla 8.21 Propiedades en estado fresco de las mezclas fibra reforzadas.

Mezcla	Vf (%)	Extensibilidad (cm)	Anillo J (mm)	t ₅₀₀ (s)	Bloqueo (cm)	Cono V (s)	Peso Unit (kg/m ³)	Aire (%)
CI2510-A10.5	-	100	100	0.80	0	2.8	2416	0.4
CI2510-A10.5-F.5	0.5	100	100	0.21	0	2.5	2417	0.5
CI2510-A10.5-F1	1.0	96	94	1.20	2	2.8	2448	1.2

Los resultados de fluidez relacionada a la Extensibilidad y Anillo J se pueden observar mostraron que para todas las mezclas se cuenta con una alta autocompactabilidad a pesar de la adición de fibras. Los resultados que se presentaron indican que en cuanto al Cono V no existe una gran diferencia en el desempeño con ± 0.3 s; por otro lado los valores para t₅₀ señalan un concreto con buena fluidez.

Los valores para la resistencia a la compresión con respecto a la adición de fibras no varían de manera significativa, dicha variación se encuentra en el orden del 2% (Figura 8.36).

Los resultados de modulo elástico mostraron una reducción del módulo elástico con respecto a la adición de fibras pasando de 50 GPa para la mezcla sin fibras a 40 GPa para las adiciones de .5 y 1% de fibras, respectivamente (Figura 8.37). Esta reducción se debe a la mayor ductilidad que le confieren las fibras a la mezcla de concreto, reducción que permite reducir la ocurrencia de fallas explosivas (Figura 8.38).

En la Figura 8.39 se observan los resultados de resistencia a la tensión diametral en cilindros de concreto de 10 x 20 cm. Los ensayos muestran un incremento en la resistencia a la tensión con respecto al aumento de fibras de alrededor de un 40% para la adición 1%, lo que permite decir que el efecto en la resistencia a tensión de las fibras de acero embebidas en concreto aparentemente es favorable.

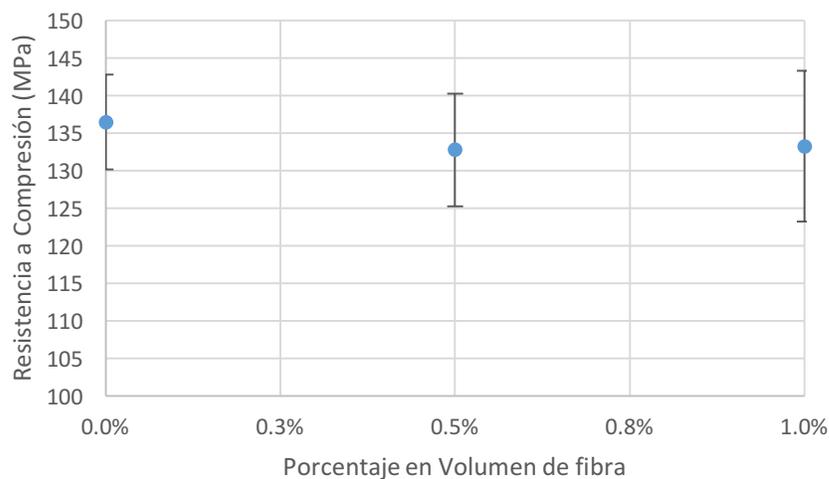


Figura 8.36 Influencia de la adición de fibras en la resistencia a compresión.

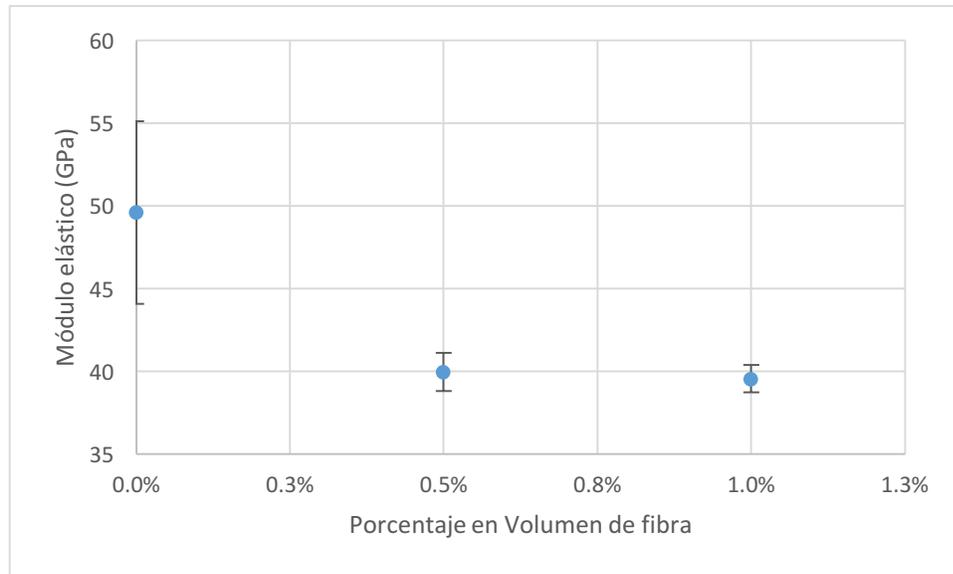


Figura 8.37 Influencia de las fibras en el módulo elástico



Figura 8.38 Concretos sin fibras vs concreto con fibras

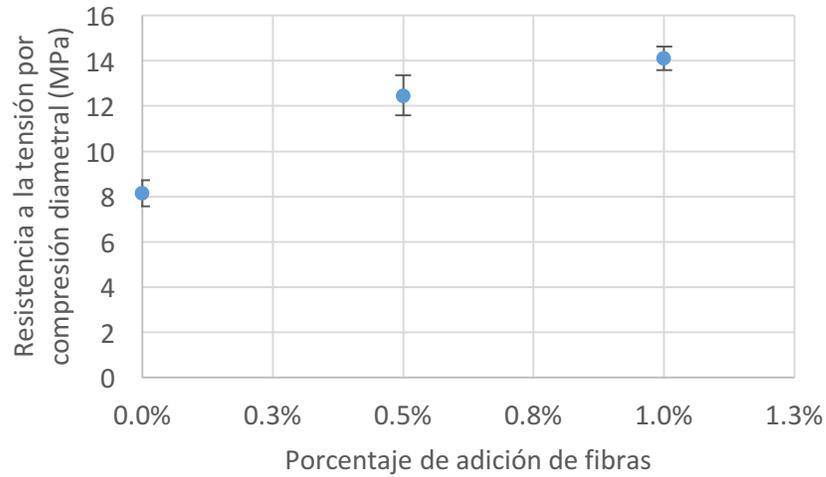


Figura 8.39 Influencia de la adición de fibras en la resistencia a la tensión por compresión diametral

La FHWA define entre las características deseables en un concreto de ultra alto desempeño a la resistencia a la tensión. Para ser considerado como un concreto de ultra alto desempeño, una mezcla de concreto debe tener una resistencia mínima a la flexión de 5 MPa antes y después del límite de proporcionalidad [3]. Los resultados de los ensayos de flexión en las mezclas de concreto reforzadas con fibras se encuentra en la Figura 8.40 y Figura 8.41.

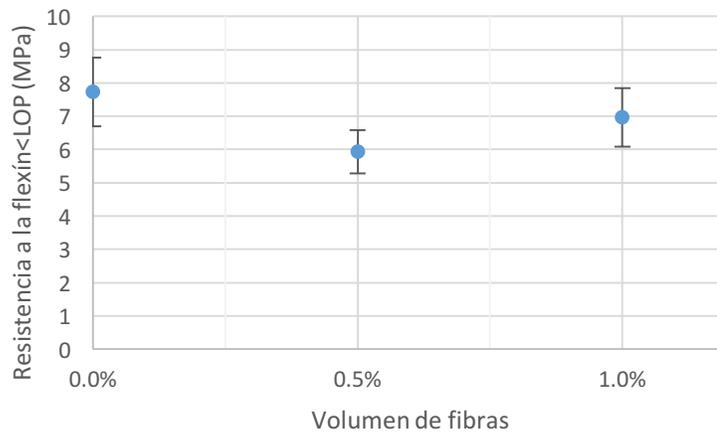


Figura 8.40 Influencia de adición de las fibras en el desempeño preagrietamiento

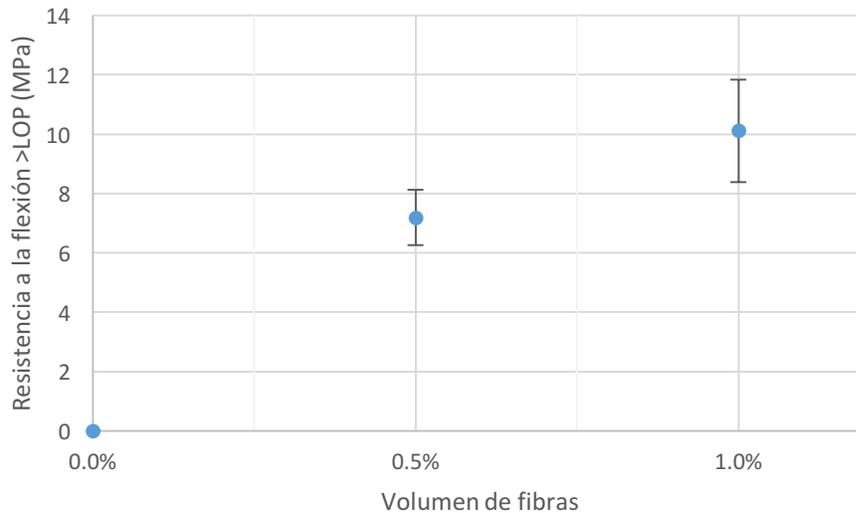


Figura 8.41 Influencia de la adición de fibras en el desempeño pos agrietamiento

La Figura 8.40 muestra el desempeño antes del límite de proporcionalidad de las mezclas. La adición de fibra reduce 2 MPa y 1 MPa la resistencia a la tensión para las adiciones de 0.5 y 1 % de fibras, respectivamente, sin embargo, la desviación estándar de las pruebas hace pensar que con un número mayor a 3 especímenes esa diferencia pueda disminuirse. Aún cuando la resistencia a la flexión pudiera verse mermada por la adición de fibras antes de alcanzarse el límite de proporcionalidad, este concreto cumple para las adiciones de .5 y 1% el mínimo de 5 MPa, obteniendo 6 y 7 MPa pre agrietamiento para las adiciones probadas.

La Figura 8.41 muestra la influencia de la adición de fibras en el desempeño post agrietamiento o después del límite de proporcionalidad (LOP). En el caso de la mezcla sin fibras, al ser muy rígida, no se observó resistencia alguna después del límite de proporcionalidad, sin embargo, al añadir .5 y 1% de fibras se obtuvo una resistencia a la flexión pico post agrietamiento de 7 y 10 MPa, respectivamente

A manera de conclusión de esta etapa se tiene:

- La adición de fibras en la mezcla no muestra influencia aparente en el desempeño del concreto en estado fresco para ambos volúmenes 0.5%

y 1.0% asegurando su trabajabilidad, fluidez y consistencia. Por otro lado contenido de aire incremento como era de esperarse conforme al incremento de la adición de fibras.

- El modo de falla de los especímenes a compresión varió con la adición de fibras, de ser una falla frágil y explosiva para los especímenes sin fibras a ser una falla dúctil y con pocos desprendimientos para los especímenes fibroreforzados
- La adición de fibras de acero en el concreto influye de manera significativa en su desempeño mecánico a flexión; así como la carga máxima, lo cual puede ser atribuido a la buena adherencia fibra – matriz y a las características propias de la mezcla y la fibra.
- Con una adición del 0.5% de fibra de acero es posible obtener el requerimiento de la FHWA de 5 MPa pre y post agrietamiento.

8.10 Análisis termogravimétrico

Puesto que la micro sílice es un elemento vital en la formulación de concretos de ultra alto desempeño la hidratación de la micro sílice utilizada fue estudiada mediante análisis termogravimétricos. Los resultados de la hidratación a 28 días de la reacción de la micro sílice con el hidróxido de calcio se presentan en la Tabla 8.22. Dichos resultados contrastan con lo supuesto para el diseño de mezclas en el Capítulo 7, donde se supuso que el CSH producto de la reacción puzolánica era parecido al de un CSH tipo Jenita de relación Ca/Si de 1.7, cuando en realidad es de 1.12 resultado que está en línea con lo reportado por [34] y [35].

Tabla 8.22 Caracterización de la hidratación de la Micro sílice a 28 días

Relación Ca/Si del CSH formado	1.12
Gr de CH consumidos por gramo de micro sílice	1.31

La hidratación de la relación a/c utilizada en la investigación fue evaluada para determinar la cantidad de hidróxido de calcio potencial que se generaría a largo plazo por la reacción del cemento, para ello se probó una pasta con 200 días de antigüedad, los resultados se presentan en la Tabla 8.23.

Tabla 8.23 Hidratación del cemento I a una relación a/c de 0.25

Agua ligada (gr/gr de cemento)	0.16
Hidróxido de calcio producido (gr/gr de cemento)	0.09

Una vez obtenidos los datos de la hidratación del cemento se conoció a que valor de agua ligada químicamente la hidratación del cemento está relativamente completa y a partir de la cantidad de hidróxido de calcio generado a una completa hidratación se hicieron los cálculos de consumo de hidróxido de calcio por parte de la micro sílice a distintas adiciones en pastas de cemento después de largos períodos de hidratación. Los resultados de consumo de hidróxido de calcio por unidad de micro sílice se presentan en la Figura 8.42.

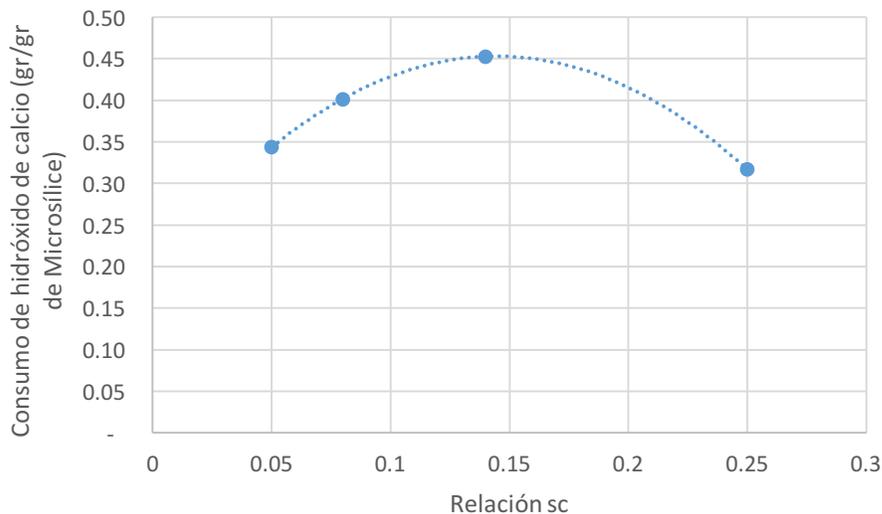


Figura 8.42 Consumo de hidróxido de calcio vs relación sc

Se pensaría que el consumo de hidróxido de calcio de la micro sílice siempre es constante y que a mayor adición de micro sílice su efectividad es la misma y por tanto sabiendo la cantidad de hidróxido de calcio generado por el cemento y lo

consumido por la micro sílice en un ambiente de hidróxido se podría definir la cantidad necesaria para ligarlo, sin embargo, el tamaño de partícula de la micro sílice y la alta cantidad de cemento anhidro en las pasta de baja relación agua/cemento como las del UHPC impide una buena distribución de la puzolana. Adicional al problema de la distribución uniforme de la micro sílice en el sistema de UHPC está que la baja cantidad de agua libre dejada por la hidratación del cemento puede no ser suficiente para que la micro sílice entre en disolución y reaccione con el hidróxido de calcio

Por éstas razones se supone la aparición de un máximo de consumo de Hidróxido de Calcio que se tiene con respecto a las adiciones de micro sílice en una pasta de relación a/c 0.25 el cual se da alrededor de 15% de adición cuando la micro sílice consume alrededor de 0.5 gramos de hidróxido de calcio por gramo, cantidad casi tres veces menor a la que consumiría en un ambiente rico en hidróxido de calcio, lo que hace pensar que existe parte de micro sílice anhidra como sugiere [36].

El efecto de la reacción puzolánica como mecanismo de mejora indiscutible de la resistencia no se ve tan claro de acuerdo a los resultados obtenidos en pastas de contenido de hidróxido de calcio restante a altas edades de hidratación cuando estos se comparan con la resistencia a compresión a 28 días de las mezclas de morteros, se eligió la resistencia a compresión a 28 días debido a que estudios a 56 días mostraron una mejora muy baja en la resistencia a compresión.

En la Figura 8.43 se observa que una cantidad más baja de hidróxido de calcio final no se traduce directamente en una mayor resistencia a compresión, sino que otros factores como el empaquetamiento, volumen de aire atrapado, etc, juegan un papel igual de importante en la resistencia a compresión de concretos de ultra alto desempeño que no son sometidos a curado acelerado.

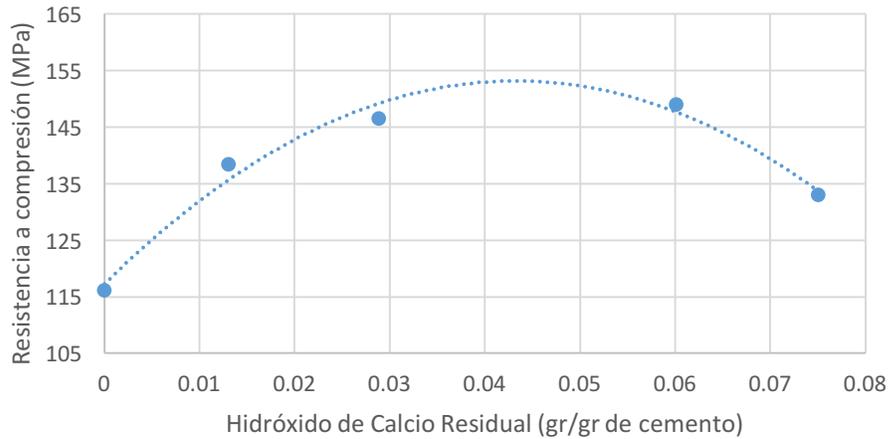


Figura 8.43 Relación entre la resistencia a compresión vs hidróxido de calcio residual

Por último la pasta del diseño de mezclas óptimo de esta investigación por resistencia a compresión y consumo de aditivo fluidificante (PCI2508-A9.6) fue analizada por análisis termogravimétricos para observar su hidratación a través de la cantidad de hidróxido de calcio presente por gr de cemento y la cantidad de agua ligada, con respecto al tiempo.

De la Figura 8.44 se concluye que el cemento de la pasta de cemento de relación a/c de 0.25 con una adición del 8% de micro sílice alcanza su máximo grado de hidratación a los 90 días.

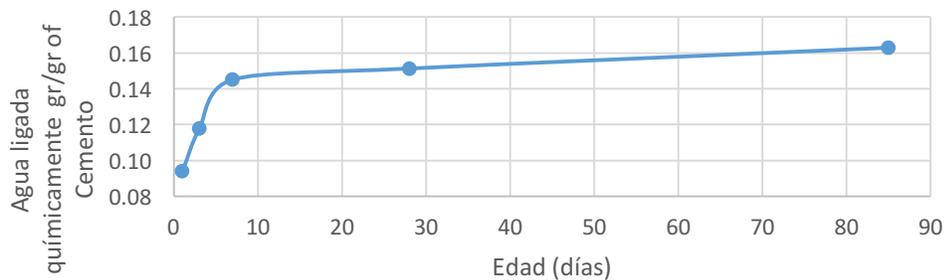


Figura 8.44 Agua ligada químicamente con respecto al tiempo

La Figura 8.45 muestra que el inicio de la reacción puzolánica se tiene alrededor del día 3 (primer día en que la ganancia de hidróxido de calcio se detiene) y que se mantiene durante fechas posteriores activa.

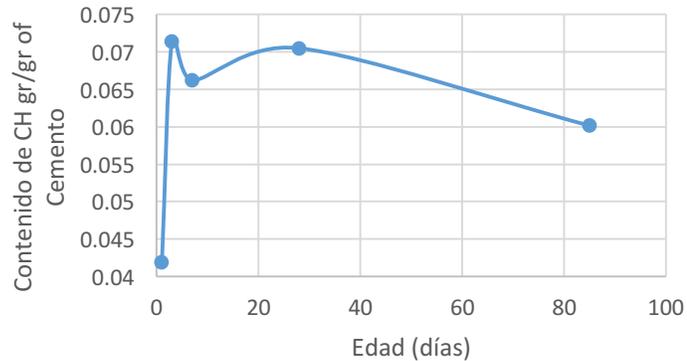


Figura 8.45 Contenido de hidróxido de calcio con respecto al tiempo.

Capítulo 9 Conclusiones

Con base en los resultados experimentales obtenidos durante el desarrollo del presente proyecto de investigación, y considerando tanto la investigación bibliográfica realizada, las hipótesis, como los objetivos propuestos; es posible llegar a las siguientes conclusiones:

9.1 Materiales a utilizarse

En contradicción con la creencia común de que un cemento mas fino conduce a mayores resistencias (lo cual resulta cierto para concretos convencionales), se encontró que los cementos mas gruesos presentaron los mejores desempeños: mayor resistencia a la compresión y menor demanda de aditivo (menor costo).

9.2 Extensibilidad objetivo

El rango en la extensibilidad medida con el mini-cono de revenimiento apropiado para maximizar la resistencia a la compresión resulto entre 29 a 34 cm.

9.3 Relación agua/cemento

Los cementos con superficie específica de $3 \text{ m}^2/\text{g}$ permitieron obtener la resistencia objetivo de 150 MPa en mezclas con una relación $a/c = 0.25$

9.4 Relación sílice/cemento (adición de micro sílice)

El porcentaje de adición de micro sílice para máxima resistencia resulto en 8 % con relación a la masa de cemento, cantidad 3 veces menor que la adición típica utilizada en estos compuestos (25 %).

9.5 Contracción autógena

Las retracción autógena resulto en 1000 um/m a los 80 días, lo cual representa una retracción 1.5 veces mayor a la típica para un concreto convencional (400 um/m)

9.6 Durabilidad de las mezclas

Con base en los resultados de resistividad eléctrica y a su clasificación en la norma, la permeabilidad de los concretos producidos podría clasificarse entre muy baja y despreciable.

La difusión de cloruros determinada mediante el NT Build 492 resulto en todos los casos menor a $0.4 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ condujo a estimar una vida útil de 230 a 340 años a través de la segunda ley de Fick.

9.7 Curado acelerado

Los tratamientos de curado acelerado no mejoran e incluso disminuyen la resistencia terminal de la mezcla óptima del proyecto, sin embargo, a mayores adiciones de micro sílice el tratamiento térmico mostró ser eficaz.

9.8 Tamaño del agregado

Para los concretos con 8% de adición de micro-sílice, el curado acelerado a 90 grados centígrados por seis horas no mejoro la resistencia a la compresión, pero para adiciones 14% si se mejoró la resistencia en un 10%

9.9 Adición de fibras

Los UHPC presentan una falla frágil y explosiva al final de la prueba de resistencia a compresión, la presencia de fibras origina una falla dúctil y aumento la resistencia post agrietamiento en 41% para una dosificación de 1% de fibras

en volumen de concreto con respecto a una dosificación de 0.5%. En los porcentajes evaluados no se modificaron las propiedades reológicas en estado fresco.

La adición de 0.5% de fibra de acero satisface el requerimiento de 5 MPa establecido por la FHWA mediante el ensaye de flexión en las etapas pre y post agrietamiento.

9.10 Caracterización de la hidratación de las pastas cementantes

Se observó que la adición de cantidades cada vez mayores de micro sílice reduce la efectividad de la misma, teniendo un máximo de efectividad en consumo de hidróxido de calcio alrededor de una adición de 15%, sin embargo, el consumo de calcio de la matriz no se tradujo en un mejor desempeño mecánico.

9.11 Conclusión general del proyecto

El diseño de mezclas de concreto de ultra alto desempeño fue posible con el agregado calizo del área metropolitana de Monterrey. El procedimiento que se siguió para la optimización de las proporciones que condujeron a alcanzar la resistencia objetivo de 150 MPa a los 28 días de edad, ilustra los pasos para establecer las dosificaciones tanto del superfluidificante como de la microsílíce. Los resultados de difusión de cloruros y de resistividad eléctrica sugieren una excelente durabilidad para las mezclas con proporciones optimizadas y presentan una fuerte correlación.

Para mejor ductilidad de los compuestos se mostró que una adición de 0.5% de fibras metálicas en volumen fue suficiente.

A continuación (Tabla 9.1) se presenta tanto las proporciones de la mezcla mas económica que satisface la resistencia objetivo a la compresión, así como los resultados de sus propiedades ingenieriles.

Tabla 9.1 Propiedades de la mezcla óptima y su dosificación

Clave	CI2508-A9.2	Resistencia a la compresión (MPa)	149.2
Dosificación de aditivo (gr/kg de cementante)	9.20	Resistividad terminal (KOhm.cm)	247.54 (permeabilidad muy baja)
Relación a/c	0.25		
Relación s/c	0.08	Coeficiente de Migración a los 28 días ($\times 10^{-12}$ m ² /s)	0.33
Agua (kg/m ³)	195.68		
Aditivo (kg/m ³)	7.92		
Cemento (kg/m ³)	797.18		
Micro sílice (kg/m ³)	63.77		
Arena (kg/m ³)	1293.15		
Aire (%)	2.49		
Extensibilidad (cm)	31.67		
Densidad (kg/m ³)	2370		

Capítulo 10 Recomendaciones para trabajo futuro

- Investigar el remplazo de cemento anhidro por distintos polvos inertes para reducir el costo de las mezclas de UHPC.
- Investigar el efecto del cambio de tipo de agregado en la resistencia a compresión.
- Investigar el efecto de distintos tamaños de agregado en la resistencia a compresión.
- Investigar el cambio de la micro sílice por arcillas calcinadas.
- Investigar el efecto de la adición de polímeros superabsorbentes en la contracción autógena de las mezclas de UHPC.
- Investigar la durabilidad bajo carbonatación, ataque de sulfatos y reacción álcali sílice en las mezclas de UHPC.

Capítulo 11 Referencias

- [1] Aïtcin, P. C. (2007). Binders for durable and sustainable concrete. CRC Press.
- [2] Tang, M. C. (2004, September). High performance concrete—past, present and future. In *Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete. Kassel, Germany* (pp. 3-9).
- [3] Russell, H. G., & Graybeal, B. A. (2013). Ultra-high performance concrete: A state-of-the-art report for the bridge community (No. FHWA-HRT-13-060).
- [4] Naaman, A. E., & Wille, K. (2012). The path to ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC): five decades of progress. In *Proceedings of Hipermat 2012 3rd international symposium on UHPC and nanotechnology for high performance construction materials, Kassel, Germany* (pp. 3-13).
- [5] Wille, K., Naaman, A. E., & Parra-Montesinos, G. J. (2011). Ultra-high performance concrete with compressive strength exceeding 150 MPa (22 ksi): A simpler way. *ACI Materials Journal*, 108(1).
- [6] Wille, K., & Boisvert-Cotulio, C. (2015). Material efficiency in the design of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 86, 33-43.
- [7] Richard, P., & Cheyrezy, M. (1995). Composition of reactive powder concretes. *Cement and concrete research*, 25(7), 1501-1511.
- [8] Yang, S. L., Millard, S. G., Soutsos, M. N., Barnett, S. J., & Le, T. T. (2009). Influence of aggregate and curing regime on the mechanical properties of ultra-high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC). *Construction and Building Materials*, 23(6), 2291-2298.
- [9] Aydin, S., Yazici, H., Yardimci, M. Y., & Yigiter, H. (2010). Effect of aggregate type on mechanical properties of reactive powder concrete. *ACI Materials Journal*, 107(5).
- [10] Collepardi, S., Coppola, L., Troli, R., & Collepardi, M. (1997). Mechanical properties of modified reactive powder concrete. *ACI Special Publications*, 173, 1-22.
- [11] Reda, M. M., Shrive, N. G., & Gillott, J. E. (1999). Microstructural investigation of innovative UHPC. *Cement and Concrete Research*, 29(3), 323-329.
- [12] Wang, C., Yang, C., Liu, F., Wan, C., & Pu, X. (2012). Preparation of ultra-high performance concrete with common technology and materials. *Cement and Concrete Composites*, 34(4), 538-544.
- [13] Durán Herrera, A. (2003). Desarrollo de compuestos densificados-reforzados base cemento Portland CPO 40 de la compañía CEMEX. Tesis Doctoral, UANL
- [14] Wu, K. R., Chen, B., Yao, W., & Zhang, D. (2001). Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 31(10), 1421-1425.

- [15] Camacho, E., López, J. Á., & Ros, P. S. (2012). Definition of three levels of performance for UHPFRC-VHPFRC with available materials. In *Ultra-High Performance Concrete and Nanotechnology in Construction. Proceedings of Hipermat 2012. 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials* (No. 19, p. 249). kassel university press GmbH.
- [16] Committee, A. C. I. (1991). 211. ACI 211.1, Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavy Weight and Mass Concrete.
- [17] ASTM C33. (2004). Standard Specification for Concrete Aggregates.
- [18] Quiroga, P. N., & Fowler, D. W. (2004). Guidelines for proportioning optimized concrete mixtures with high microfines. *International Center for Aggregates Research Report*, 104-2.
- [19] Yu, R., Spiesz, P., & Brouwers, H. J. H. (2014). Mix design and properties assessment of Ultra-High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPFRC). *Cement and Concrete Research*, 56, 29-39.
- [20] Brouwers, H. J. H., & Radix, H. J. (2005). Self-compacting concrete: the role of the particle size distribution. In *First International Symposium on Design, Performance and Use of SCC, Hunan, China* (pp. 109-118).
- [21] Sealey B “Elkem Materials Mixture Analyser “EMMA” User Guide”, Versión 2, Elkem. (35 pp. <http://www.elkem.com/en/silicon-materials/support/software-emma/>).
- [22] Myhre, B. (1994). The effect of particle-size distribution on flow of refractory castables. In *Proceedings of the Thirtieth Annual Symposium on Refractories, The St. Louis Section of The American Ceramic Society, St. Louis March* (Vol. 25, pp. 19-22).
- [23] De Larrard, F. (1999). *Concrete mixture proportioning: a scientific approach*. CRC Press.
- [24] Toledo Filho, R. D., Koenders, E. A. B., Formagini, S., & Fairbairn, E. M. R. (2012). Performance assessment of ultra high performance fiber reinforced cementitious composites in view of sustainability. *Materials & Design*, 36, 880-888.
- [25] Espinoza Montenegro, A. A. (2010). Estudio de dosificación de hormigón de ultra-alta resistencia, basado en el empaquetamiento de los áridos (Tesis de Maestría, Caminos).
- [26] Tagnit-Hamou, A., Soliman, N., Omran, A., Mousa, M., Gauvreau, N., & Provencher, F. (2015). Novel Ultra-High Performance Glass Concrete. *Concrete International*, 37(3).
- [27] Van Oss, H. (2005). Background Facts and Issues Concerning Cement and Cement Data. US Department of the Interior. *US Geological Survey. Available at pubs. usgs. gov/of/2005/1152/2005-1152.pdf*

- [28] Kosmatka, S. H., & Panarese, W. C. (2002). Design and control of concrete mixtures.
- [29] Jensen, O. M., & Hansen, P. F. (2001). Water-entrained cement-based materials: I. Principles and theoretical background. *Cement and concrete research*, 31(4), 647-654.
- [30] NMX-C-414 ONNCCE. Industria de la Construcción–Cementos Hidráulicos-Especificaciones y Métodos de Prueba, Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, SC.
- [31] Yazıcı, H., Yardımcı, M. Y., Yiğiter, H., Aydın, S., & Türkel, S. (2010). Mechanical properties of reactive powder concrete containing high volumes of ground granulated blast furnace slag. *Cement and Concrete Composites*, 32(8), 639-648.
- [32] Lothenbach, B., Scrivener, K., & Hooton, R. D. (2011). Supplementary cementitious materials. *Cement and Concrete Research*, 41(12), 1244-1256.
- [33] Papadakis, V. G. (1999). Experimental investigation and theoretical modeling of silica fume activity in concrete. *Cement and Concrete Research*, 29(1), 79-86.
- [34] Sellevold, E. J., Bager, D. H., Jensen, E. K., & Knudsen, T. (1982). Silica fume-cement pastes: hydration and pore structure. *Report BML*, 82, 19-50.
- [35] Ramachandran, V. S. (1987). Hydration reactions in cement containing condensed silica fume.
- [36] Jensen, O. M. (1993). Autogenous deformation and RH-change–self-desiccation and self-desiccation shrinkage. Danish:“Autogen deformation og RF-ændring–selvudtørring og selvudtørringssvind”) PhD thesis, Technical report TR284/93, Technical University of Denmark, Building Materials Laboratory, Lyngby.
- [37] Habel, K., Viviani, M., Denarié, E., & Brühwiler, E. (2006). Development of the mechanical properties of an ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPRFC). *Cement and Concrete Research*, 36(7), 1362-1370.
- [38] Soutsos, M. N., Millard, S. G., & Karaiskos, K. (2006). Mix design, mechanical properties, and impact resistance of reactive powder concrete (RPC). In G. Fischer, & V. C. Li (Eds.), *International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites in Structural Applications* (pp. 549-560). RILEM Publications SARL.
- [39] Cwirzen, A., Penttala, V., & Vornanen, C. (2008). Reactive powder based concretes: Mechanical properties, durability and hybrid use with OPC. *Cement and Concrete Research*, 38(10), 1217-1226.
- [40] Yunsheng, Z., Wei, S., Sifeng, L., Chujie, J., & Jianzhong, L. (2008). Preparation of C200 green reactive powder concrete and its static–dynamic behaviors. *Cement and Concrete Composites*, 30(9), 831-838.

- [41] Graybeal, B. (2011). *Ultra-High Performance Concrete. Technote*. FHWA-HRT-11-038, Federal Highway Administration, McLean.
- [42] Tue, N. V., Ma, J., & Orgass, M. (2008). Influence of addition method of superplasticizer on the properties of fresh UHPC. In *Proceedings of Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, University of Kassel, Germany* (pp. 93-100).
- [43] Heinz, D., & Ludwig, H. M. (2004). Heat treatment and the risk of DEF delayed ettringite formation in UHPC. In *Proceedings of the 1st international symposium on ultra high performance concrete, Kassel, Germany* (pp. 717-730).
- [44] Iverson, B., Maxxon, J., Boor, D., (2010) Strength retrogression in cements under high temperature condition, In PROCEEDINGS, Thirty-Fifth Workshop on Geothermal Reservoir Engineering
- [45] Sakai, E., Aizawa, K., Nakamura, A., Kato, H., & Daimon, M. (2008, March). Influence of superplasticizers on the fluidity of cements with different amount of aluminate phase. In *Proceedings of the 2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany* (pp. 85-92).
- [46] Racky, P. (2004, September). Cost-effectiveness and sustainability of UHPC. In *Proceeding from International Symposium on Ultra High Performance Concrete (UHPC), Kassel* (pp. 797-806).
- [47] Thomas, M., Green, B., O'Neal, E., Perry, V., Hayman, S., & Hossack, A. (2012). Marine performance of UHPC at Treat Island. In *Proceedings of Hipermat 2012 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials* (pp. 365-370).
- [48] ACI Committee, American Concrete Institute, & International Organization for Standardization. (2008). Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary. American Concrete Institute.
- [49] ASTM E11-15. (2015). Standard Specification for Woven Wire Test Sieve Cloth and Test Sieves, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [50] ASTM C494/C494M-10 (2010). Standard Specification for Chemical Admixtures for Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [51] ASTM C188-09 (2009). Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [52] AASHTO T84-10 (2010), Specific Gravity and Absorption of Fine Aggregate, AASHTO, Washington DC.
- [53] AASHTO T27-11 (2011), Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates, AASHTO, Washington DC.
- [54] AASHTO T85-10 (2010), Specific Gravity and Absorption of Coarse Aggregate, AASHTO, Washington DC.

- [55] ASTM C114-10 (2010). Standard Test Methods for Chemical Analysis of Hydraulic Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [56] ASTM C150/C150M – 09 (2009). Standard Specification for Portland Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [57] ASTM C230/C230M – 08 (2008). Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [58] ASTM C185 – 08 (2008). Standard Test Method for Air Content of Hydraulic Cement Mortar , ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [59] ASTM C109/C109M – 08 (2008). Standard Test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in. or [50-mm] Cube Specimens) , ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [60] ASTM C403/C403M – 08 (2008). Standard Test Method for Time of Setting of Concrete Mixtures by Penetration Resistance, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [61] ASTM C1698 – 09 (2009). Standard Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [62] Tex-403-A (2005). Test procedure for slump for slump loss of hydraulic cement concrete, Texas Department of Transportation.
- [63] AASHTO TP95-11 (2011), Standard Method of Test for Surface Resistivity Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, AASHTO, Washington DC.
- [64] NT BUILD 492 (2011), Chloride Migration Coefficient from Non-Steady-State Migration Experiments, Nordtest Method, Finland.
- [65] Moreno E., Solís R. (2007). Durabilidad del concreto. Notas de curso, FIUADY.
- [66] Mangat, P. S., & Molloy, B. T. (1994). Prediction of long term chloride concentration in concrete. *Materials and structures*, 27(6), 338-346.
- [67] Bleszynski, R., Hooton, R. D., Thomas, M. D., & Rogers, C. A. (2002). Durability of ternary blend concrete with silica fume and blast-furnace slag: laboratory and outdoor exposure site studies. *ACI Materials Journal*, 99(5).
- [68] Thomas, M., Green, B., O'Neal, E., Perry, V., Hayman, S., & Hossack, A. (2012). Marine performance of UHPC at Treat Island. In *Proceedings of Hipermat 2012 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials* (pp. 365-370).
- [69] Sandberg, P.; Pettersson, K.; Sørensen, H.E.; Arup, H.:(1995) Critical chloride concentrations for the onset of active reinforcement corrosion. In *Chloride Penetration into Concrete, Proceedings of the International RILEM Workshop in Saint-Rémy-Les-Chevreuse, Oct. 15-18. RILEM Publications 1997*, pp. 453-459.
- [70] Thomas, M. (1996). Chloride thresholds in marine concrete. *Cement and concrete Research*, 26(4), 513-519.

- [71] Manera, M., Vennesland, Ø., & Bertolini, L. (2008). Chloride threshold for rebar corrosion in concrete with addition of silica fume. *Corrosion Science*, 50(2), 554-560.
- [72] ACI 318 Committee. (2011). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-11) and Commentary. *Farmington Hills*.
- [73] ASTM C39/C39M – 09a (2009). Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [74] ASTM C1611/C1611M – 09b (2009). Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [75] ASTM C1621/C1621M – 09b (2009). Standard Test Method for Passing Ability of Self-Consolidating Concrete by J-Ring, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [76] BS EN 12350-9 (2010). Testing fresh concrete. Self-compacting concrete. V-funnel test.
- [77] ASTM C231/C231M – 09b (2009). Standard Test Method for Air Content of Freshly Mixed Concrete by the Pressure Method, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [78] ASTM C138/C138M – 09 (2009). Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [79] ASTM C138/C138M – 09 (2009). Standard Test Method for Density (Unit Weight), Yield, and Air Content (Gravimetric) of Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [80] ASTM C496/C496M – 04 (2004). Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [81] ASTM C469 – 02 (2002). Standard Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- [82] EN 14651 (2007). Test method for metallic fibered concrete - Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality (LOP), residual)
- [83] Jensen, O. M. (2012). The pozzolanic reaction of silica fume. In *MRS Proceedings* (Vol. 1488, pp. imrc12-1488). Cambridge University Press.
- [84] Zhang, J., & Scherer, G. W. (2011). Comparison of methods for arresting hydration of cement. *Cement and Concrete Research*, 41(10), 1024-1036.
- [85] Gómez-Zamorano, L. Y. (2004). Geothermal waste as a replacement material of Portland cement pastes. Tesis doctoral, Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del IPN Unidad Saltillo.

- ^[86] Kim, T., & Olek, J. (2012). Effects of sample preparation and interpretation of thermogravimetric curves on calcium hydroxide in hydrated pastes and mortars. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2290), 10-18.
- ^[87] Sorelli, L., Constantinides, G., Ulm, F. J., & Toutlemonde, F. (2008). The nano-mechanical signature of ultra high performance concrete by statistical nanoindentation techniques. *Cement and Concrete Research*, 38(12), 1447-1456.
- ^[88] Broz, M. E., Cook, R. F., & Whitney, D. L. (2006). Microhardness, toughness, and modulus of Mohs scale minerals. *American Mineralogist*, 91(1), 135-142.
- ^[89] Dudziak, L., & Mechtcherine, V. (2008). Mitigation of volume changes of ultra-high performance concrete (UHPC) by using super absorbent polymers. In *Proc. of 2nd Int. Symp. on Ultra High Performance Concrete*, E. Fehling et al eds., Kassel University Press GmbH (pp. 425-432).
- ^[90] Eppers, S., & Müller, C. (2008). Autogenous shrinkage strain of ultra-high performance concrete (UHPC). In *Proceedings of the 2nd International Symposium on UHPC, Kassel, Germany* (pp. 433-441).
- ^[91] ASTM C1202 – 12 (2012). Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ^[92] ASTM C1556 – 11a (2011). Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion, ASTM International, West Conshohocken, PA.
- ^[93] Luping T., Nilsson L. (1992). Rapid Determination of the Chloride Diffusivity in Concrete by Applying an Electrical Field. *ACI Materials Journal* V. 89 (1), 49-53.
- ^[94] Pierard, J., Dooms, B., & Cauberg, N. (2012). Evaluation of durability parameters of UHPC using accelerated lab tests. In *The 3rd International Symposium on UHPC and Nanotechnology for High Performance Construction Materials, Kassel, Germany* (pp. 371-376).

Resumen biográfico

Guillermo Hernández Carrillo

Estudiante de Maestría en Ciencias con Orientación a los Materiales de Construcción

Ingeniero Civil Egresado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán en 2013. Asistente de laboratorio bajo la supervisión del Dr. Eric I. Moreno de Julio de 2012 a Junio de 2013 en las instalaciones de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán. Certificación en ACI Concrete Field Testing Technician Grade I, ACI Aggregate Testing Technician Level 1, ACI Concrete Strength Testing Technician y ACI Concrete Laboratory Testing Technician Level 1. Participación en el taller “Fundamental of Rheology and Applications on Cement-Based Materials” llevado a cabo en la Universidad de Missouri S&T en Rolla, Missouri, del 14 al 17 de Julio del 2014. Participación en el taller doctoral del RILEM “Durabilidad del concreto” llevado a cabo en la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León del 23 al 28 de Julio de 2014. Estancia de estudios en la Universidad de Sherbrooke bajo la supervisión del profesor Arezki Tagmout durante octubre de 2015.

Contacto:

Correo electrónico: guihcarrillo@outlook.com