



Evaluación de la contracción por secado de concretos de ultra- altas prestaciones con y sin fibras.

David Mauricio Saavedra Ríos

Escuela Colombiana de ingeniería Julio Garavito

Facultad de ingeniería civil

Bogotá, Colombia

2020

Evaluación de la contracción por secado de concretos de ultra- altas prestaciones con y sin fibras.

David Mauricio Saavedra Ríos

Directora:

Ph. D. Nancy Torres Castellanos

Codirector:

Ing. Joaquín Abellán García

Énfasis en estructuras

Línea de investigación:

Materiales para estructuras en ingeniería civil

Grupo de investigación:

Centro de estudios de estructuras, materiales y construcción

Escuela Colombiana de ingeniería Julio Garavito

Facultad de ingeniería civil

Bogotá, Colombia

2020

Resumen

En la presente investigación se evaluó para concretos de ultra alto desempeño (UHPC), adicionados con humo de sílice, el efecto de la incorporación de fibras de acero rectas y otros materiales cementantes suplementarios (MCS). Se realizaron tres muestras de concreto UHPC: la muestra de referencia (compuesta por cemento, humo de sílice, arena de sílice, agua y aditivo superplastificante) y dos dosificaciones en donde se sustituye parcialmente el cemento y el humo de sílice por materiales cementantes suplementarios. En la muestra D2 se adiciona carbonato cálcico y polvo de vidrio pulverizado de 28 micras de diámetro y en la muestra D3 se adiciona carbonato cálcico y polvo de vidrio de 28 y 7 micras como sustitución parcial del cemento y el humo de sílice. Se busca, por una parte, que la reducción de la cantidad de cemento en la mezcla disminuya el calor liberado por la reacción exotérmica de la hidratación del clinker del cemento y por otro lado que la reducción de la cantidad de humo de sílice permita reducir la cantidad de agua en la mezcla del UHPC, ambos efectos contribuyen a la disminución de la contracción por secado del concreto. Adicionalmente la adición de fibras metálicas debería contribuir a absorber los esfuerzos de tracción internos del concreto impuestos por la contracción de la matriz y debido al alto módulo de elasticidad de las fibras impedir grandes deformaciones en la masa de concreto (*Weina Meng, Kamal H. Khayat. 2018*). El programa experimental desarrollado, se enfocó en la medición de la contracción por secado en los primeros días de edad del concreto (20 primeros días) pues en este periodo ocurren las máximas contracciones por secado del concreto UHPC (*Hyung-Joo Lee, et al., 2019*).

Se determinó que el concreto UHPC con sustitución parcial del cemento hidráulico y humo por carbonato cálcico y polvo de vidrio reciclado de 28 micras, con incorporación de un 2% fibras de acero rectas sobre volumen de concreto, es capaz de reducir hasta un 46% la contracción por secado del concreto en los 5 primeros días de edad, en relación con un concreto UHPC de referencia. En dicha mezcla se redujo la cantidad de cemento y humo de sílice de 852 kg/m³ y 271.7 kg/m³ a 600 kg/m³ y 100 kg/m³ respectivamente, gracias a la adición de 209 kg/m³ de carbonato cálcico y 322.8 kg/m³ de polvo de vidrio de 28 micras de diámetro, materiales cementantes suplementarios con un precio muy inferior.

En el concreto UHPC de referencia, la adición de un 2% de microfibras metálicas supuso una reducción en el valor de la contracción seca de un 10.8% en los 5 primeros días. Por otro lado, el reemplazo parcial del cemento hidráulico y humo de sílice por carbonato cálcico y polvo de vidrio reciclado de 7 y 28 micras, supuso una reducción en la contracción por secado de un 36.1% con respecto a la mezcla de referencia, en los primeros 5 días.

Palabras clave: Concreto, UHPC, UHPCFRC, contracción por secado, materiales cementicios suplementarios, durabilidad, resistencia mecánica.

Contenido

Página:

Resumen.....	V
Lista de imágenes.....	VIII
Lista de Gráficas	VIII
Lista de tablas	VIII
Introducción	10
1. Marco teórico	12
1.1. Concreto de ultra altas prestaciones con y sin fibras.....	12
1.2. Materiales cementantes suplementarios (MCS):.....	16
1.3. Contracción del concreto:	20
2. Estado del arte	23
2.1. Contracción por secado de concreto con adiciones y materiales cementantes suplementarios.....	23
2.2. Contracción por secado de concreto UHPC reforzado con fibras.....	24
3. Objetivos	26
3.1. Objetivo general.....	26
3.2. Objetivos específicos:	26
4. Metodología	27
4.1. Materiales utilizados.....	27
4.1.1. Composición Química de los materiales utilizados:	31
4.1.2. Granulometría de los materiales utilizados.....	32
4.2. Dosificación de los UHPC.....	33
4.3. Especímenes y mediciones	35
4.4. Procedimiento de mezcla:.....	36
5. Resultados.....	39
6. Conclusiones	46
7. Recomendaciones	48
8. Bibliografía	49
Anexo: Contracción por secado de los especímenes	52

Lista de imágenes

Imagen 1.1 - Densidad de empaquetamiento en concreto UHPC.....	12
Imagen 1.2 - Densidad de empaquetamiento en concreto UHPFRC	14
Imagen 1.3 - Microscopia de partículas de humo de sílice, microscopio de fuerza atómica.....	18
Imagen 1.4 - Microscopia electrónica de barrido de partículas de polvo de vidrio pulverizado	19
Imagen 1.5 - Microscopia electrónica de barrido de partículas de carbonato cálcico pulverizado.....	20
Imagen 1.6 - Microscopia de las micro fisuras causadas por la contracción de la matriz de concreto UHPC.	21
Imagen 4.7 - Fotografía del cemento hidráulico tipo HE utilizado	27
Imagen 4.8 - Fotografía del humo de sílice utilizado.....	28
Imagen 4.9 - Fotografía del carbonato cálcico pulverizado utilizado	28
Imagen 4.10 - Fotografía del polvo de vidrio reciclado utilizado.....	29
Imagen 4.11 - Fotografía del polvo de la arena de sílice utilizada.....	29
Imagen 4.12 - Fotografía de las fibras de acero rectas utilizadas en el concreto UHPFRC	30
Imagen 4.13 – Moldesutilizados según norma ASTM C596-18 para los especímenes de concreto.....	35
Imagen 4.14 – Instrumento de medición ASTM C596-18	36
Imagen 4.15 – Procedimiento de pesado de material y mezclado de concreto UHPC y UHPFRC	37
Imagen 4.16 – Vista lateral de especímenes prismáticos de UHPC y UHPFRC	37
Imagen 4.17 - Vista superior de especímenes prismáticos de UHPC y UHPFRC.....	38
Imagen 4.18 – Especímenes prismáticos de UHPC y UHPFRC	38

Lista de Gráficas

Gráfica 2.1 - Cambios volumétricos de muestras mantenidas en ambiente seco	23
Gráfica 4.2 – Curvas granulométricas del cemento, humo de sílice, carbonato cálcico pulverizado, polvo de vidrio grueso y fino y humo de sílice y teórica del concreto UHPC.....	32
Gráfica 5.3 - Contracción por secado de concretos UHPC sin fibras	¡Error! Marcador no definido.
Gráfica 5.4 - Contracción por secado de concretos UHPFRC con fibras metálicas	¡Error! Marcador no definido.
Gráfica 5.5 - Contracción por secado de concreto UHPC de referencia con y sin fibras.....	40
Gráfica 5.6 - Contracción por secado de concreto UHPC adicionado del tipo D2 con y sin fibras.....	41
Gráfica 5.7 - Contracción por secado de concreto UHPC adicionado del tipo D3 con y sin fibras.....	42
Gráfica 5.8 - Contracción por secado de concretos UHPC con y sin fibras metálicas.....	42

Lista de Tablas

Tabla 1.1 - Aplicaciones del concreto UHPFRC	15
Tabla 4.2 - Caracterización química del cemento, humo de sílice, carbonato cálcico pulverizado, polvo de vidrio reciclado y humo de sílice.....	31
Tabla 4.3 - Dosificación de los componentes en las mezclas realizadas	34
Tabla 5.4 - Tabla resumen de porcentaje de reducción de contracción unitaria promedio con respecto a la muestra de referencia	44

Introducción

El concreto de ultra alto desempeño (UHPC) es un concreto de alta durabilidad y resistencia a la compresión por encima de 150 MPa que recibe el nombre de concreto UHPFRC cuando es reforzado con fibras de cualquier tipo, pues, la adición de fibras con una adecuada dosificación, resulta en una mejora apreciable en su comportamiento mecánico y de durabilidad (Serna, Lopez, & Camacho, 2012). Por un lado, las fibras contribuyen a evitar la propagación de fisuras bajo esfuerzos elevados o acción de fatiga, otorgándole al material una resistencia a la tracción mucho más elevada que el concreto convencional y una mayor capacidad de disipar energía durante la deformación, otorgándole una mayor ductilidad (Park, Kim, Ryu, & Koh, 2012; Parra-Montesinos, 2005), por lo cual el potencial de los concretos de ultra-alto desempeño se desarrolla realmente cuando son reforzados con fibras adecuadamente dosificadas.

Su alta resistencia a la compresión y a la tracción en comparación con un concreto convencional permite diseñar elementos más esbeltos y con geometrías irregulares. Pues la adición de fibras permite reemplazar parcialmente el refuerzo de acero convencional (barras corrugadas), e incluso se están realizando estudios con el fin de determinar si es posible reemplazar totalmente el refuerzo convencional (*Moncef L. Nehdi, et al, 2016*)

La producción de concretos UHPC, se caracteriza por los altos contenidos de cemento en su composición, por lo que es necesario utilizar cementos con bajo contenido en C_3A (<5%) para reducir el calor de hidratación liberado y evitar una contracción y fisuración excesiva del concreto (*Abbas, et al, 2016*). El alto aumento de la temperatura interna del concreto en el proceso de hidratación del cemento tiene una gran afección a la durabilidad del UHPC, ya que puede producir fisuras y micro fisuras en la matriz de concreto que permiten el paso de agentes agresivos que pueden afectar la integridad del concreto. Por un lado, al realizar una sustitución parcial del cemento hidráulico por otro tipo de materiales puzolánicos, se reduce el calor de hidratación del cemento en la mezcla, lo que reduce el valor de la contracción por secado del concreto. Por otro lado, al utilizar un menor contenido de humo de sílice, debido a su bajo tamaño de partícula, se reduce la cantidad de agua necesaria para el amasado de los UHPC, disminuyendo también la contracción por secado del concreto debido a una menor pérdida de humedad. Finalmente, la adición de fibras confiere al material la capacidad de absorber las sollicitaciones de tracción interna que se originan durante el proceso de contracción, limitando el valor de esta, así como la aparición de fisuras. Por lo cual el reforzamiento con fibras y la sustitución parcial del cemento y humo de sílice por MCS promete reducir

la contracción por secado del concreto, disminuir la probabilidad de fisuración y microfisuración en la matriz de concreto y por ende, evitar que los concretos UHPC pierdan parte de sus propiedades de alto desempeño. Por esta razón, es importante evaluar el impacto de materiales cementantes suplementarios y el contenido de fibras en la contracción por secado de concretos adicionados a diferentes edades de ensayo.

1.Marco teórico

1.1. Concreto de ultra altas prestaciones con y sin fibras

Concreto de ultra-altas Prestaciones: El concreto UHPC es aquel que cuenta con características de durabilidad y de resistencia a la compresión por encima del concreto convencional y el concreto de alta resistencia. Este tipo de concretos son concebidos bajo el principio de lograr la máxima densificación posible en la masa de concreto, es decir, disminuir los vacíos con aire del concreto aumentando el empaquetamiento de las partículas a nivel micro (*Shah, S., & Weiss, W., 1998*), impidiendo así la formación de cristales de portlandita, la cual constituye zonas de fragilidad y de alta vulnerabilidad, ante ataques de agentes químicos al ser altamente soluble en comparación a los otros constituyentes del concreto. Adicionalmente esta disminución de la porosidad, dificulta el ingreso de sustancias agresivas que puedan afectar la integridad del concreto, aumentando considerablemente su durabilidad. En cuanto a su comportamiento mecánico el concreto UHPC al tener una densificación de empaquetamiento alta se disminuyen las zonas frágiles o zonas de transición que constituyen los vacíos (ITZ) y se dificulta la conformación de una superficie de falla. En la *imagen 1.1* se observa la densidad de empaquetamiento producida por partículas de diversos tamaños.

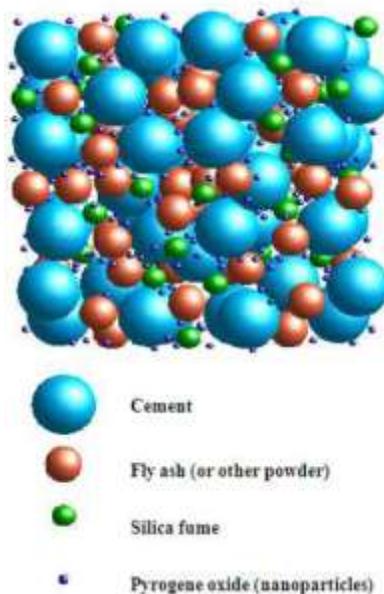


Imagen 1.1 – Densidad de empaquetamiento en concreto UHPC

(Fuente: Kellough C. 2008)

El concreto UHPC cuenta con los mismos materiales constituyentes que el concreto convencional: material cementante, agregados pétreos y agua: con las siguientes características.

- ✓ Material Cementante: se usa cemento hidráulico de alta finura con bajo contenido en C_3A para reducir el calor de hidratación en dosificaciones altas. Adicionalmente se suelen agregar adiciones que mejoren el comportamiento mecánico del concreto, tales como el humo de sílice el cual al tener un tamaño de partícula mucho más pequeña que el resto de los componentes de la mezcla (0.15 micras), ayuda a densificar la matriz de concreto aumentando su empaquetamiento y mejorando sus propiedades mecánicas y su durabilidad (*Caijun Shi, et al, Zemei Wu, 2015*).
- ✓ Agregados pétreos: para el concreto UHPC solo se utilizan agregados ultrafinos (arenas finas) por las siguientes razones: mejor homogeneidad de la mezcla de concreto, menor ITZ (zonas de transición) en la matriz de concreto y mejor funcionamiento de las fibras de refuerzo por su reducido tamaño.
- ✓ Agua: Se utiliza la menor cantidad de agua en la mezcla de concreto UHPC, pues una relación grande de agua/material cementante conlleva a una mayor formación de poros y capilares que se traducen en pérdidas de resistencia y durabilidad del concreto endurecido, La relación w/b sin embargo, está fuertemente influenciada por la cantidad de humo de sílice en la mezcla, pues con un diámetro de partícula de tan solo 0.15 micras, el consumo de agua para cubrir toda su superficie específica es muy alto (*Caijun Shi, et al, Zemei Wu, 2015*).

Este tipo de concretos serían imposibles de mezclar y moldear en su estado fresco por su poca manejabilidad derivada de su baja relación agua/material cementante, por lo cual es necesario la incorporación de aditivos superplastificantes los cuales rompen la tensión superficial entre partículas generando que la mezcla tenga un grado de manejabilidad suficiente para ser mezclada y vertida sin afectar el comportamiento mecánico del concreto en estado endurecido. Sin embargo, es de recalcar que estos concretos cuentan con tiempos de fraguado muy cortos.

Las primeras obras que se desarrollaron alrededor del mundo con concreto UHPC fueron en Europa, Norte América, Australia, Asia y Nueva Zelanda, la primera obra que aplicó este tipo de concretos fue un puente peatonal realizado con concreto pre-esforzado y se completó en 1997 en Sherbooke Canadá. En 1997 y 1998 los concretos UHPCs fueron utilizados en vigas como su primera aplicación industrial. En 2001, el primer puente vehicular de concreto UHPC fue diseñado y construido en Bourg-les-Valence en Francia (*Caijun Shi, et al, Zemei Wu, 2015*).

Concreto de ultra-altas prestaciones reforzado con fibras: La sigla UHPFRC corresponde al concreto de ultra-altas prestaciones reforzado con fibras. Existen fibras de diferentes materiales y disposiciones (metálicas, vidrio, polipropileno, sintéticas entre otros), las cuales son agregadas al concreto con distintos objetivos, en general, se busca que este tipo de fibras no rompa la interfaz pasta-agregado y por el contrario interrumpa la propagación de fisuras bajo esfuerzos de tensión en el concreto, aumentando considerablemente la resistencia a la tracción del concreto y a su vez aumentando su durabilidad por su cualidad de “coser” las grietas que se puedan generar bajo esfuerzos grandes y por efectos de fatiga, esta característica le entrega al concreto UHPFRC un amplio espectro de aplicaciones, pues su alta resistencia a la tracción lo hace propicio para ser utilizado en regiones de geometrías irregulares y elementos de poco espesor y área considerable, donde se hace inviable la colocación de barras de refuerzo tradicional (*Zemei Wu, Caijun Shi, et al. 2017*). La resistencia a la tracción del concreto UHPFRC depende de las propiedades inherentes de la fibra (incluyendo la fracción sobre el volumen de fibra, la geometría y forma de la fibra), la orientación y la distribución de las fibras en la matriz de concreto, así como el rendimiento de la interfaz entre la fibra y la matriz (F. Ekkehard, et al, 2014).

En la *imagen 1.2*, se presenta esquemáticamente la posición de las fibras dentro del empaquetamiento del concreto UHPFRC

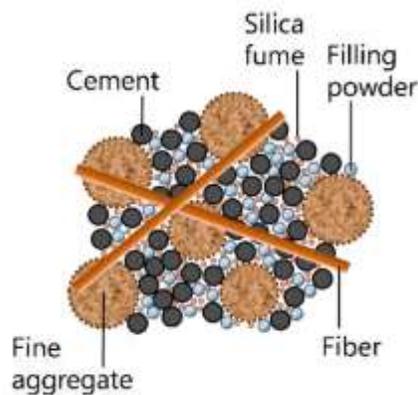


Imagen 1.2 – Densidad de empaquetamiento en concreto UHPFRC

(Fuente: Park et al. 2015)

Aplicaciones del concreto UHPFRC: Las ventajas del UHPFRC incluyen mayor durabilidad, ductilidad y resistencia en comparación con a un concreto reforzado convencional, debido a su extremadamente baja porosidad, densidad de la matriz, mayor resistencia a la compresión y a la tracción y comportamiento dúctil de tracción, la aplicación del concreto UHPFRC se da principalmente en edificaciones e infraestructura sometida a cargas mecánicas y ambientales extremas (*Dong Joo Kim, et al, 2011*). A continuación se presenta una tabla resumen con las principales estructuras que han aplicado concreto UHPFRC

Tabla 1.1 - Aplicaciones del concreto UHPFRC

(Fuente: Joaquín Abellán, et al. Lima, 2018)

Estructura/Aplicación	Localización	Año de finalización	Resistencia a compresión (MPa)	Referencia
Puente peatonal Sherbrooke	Sherbrooke, Canada	1997	200	(Man-Chung Tang 2004)
Joppa silo para clinker	Illinois, USA	2001	220	(Abbas, Nehdi, and Saleem 2016)
Pasarela Seynou	Seúl, Corea	2002	180	(Man-Chung Tang 2004)
Pasarela Sakata Mirai	Sakata, Japón	2002	238	(Acker and Behloul 2004)
Cubierta Peaje Viaducto Millau	Autopista 75, Francia	2004	165	(de Matteis et al. 2008)
Puente viario Shepherds	Sidney, Australia	2005	180	(Abbas, Nehdi, and Saleem 2016)
Puente peatonal Papatoetoe	Auckland, Nueva Zelanda	2006	160	(Abbas, Nehdi, and Saleem 2016)
Cimentación torre de aerogenerador	Dinamarca	2008	210	(Abbas, Nehdi, and Saleem 2016)
Plataforma del aeropuerto Haneda	Tokio, Japón	2010	210	(Walraven 2012)
Puente Whiteman Creeck	Brantford, Canada	2011	140	(Abbas, Nehdi, and Saleem 2016)
Fachada estadio Jean Bouin	Paris, Francia	2011	150-175	(Resplendino and Toutlemonde 2011)
Puente peatonal Barranco de las Ovejas	España	2012	150	(Torregrosa 2013)

1.2. Materiales cementantes suplementarios (MCS):

Un material cementante suplementario es aquel que puede semejar y/o mejorar la acción cohesiva y adhesiva del cemento portland en una mezcla de concreto. Se pueden dividir en dos grandes grupos. Por un lado, encontramos las adiciones hidráulicas, las cuales son capaces de reaccionar con el agua y desarrollar su actividad cementante en contacto con un activador como cal, clinker de cemento portland, yeso u otro activador químico (*Nancy Torres, 2014*). Por otro lado, están las adiciones puzolánicas, constituidas principalmente por sílice y alúmina, las cuales por sí solas no poseen propiedades cementantes (*R. Matallana, 2019*), sin embargo reaccionan químicamente con la portlandita derivada del Clinker del cemento portland hidratado y es capaz de desarrollar su actividad puzolánica, la cual consiste en la formación de cristales CASH o CSH (silicato de calcio hidratado o gel de tobermorita) y generar una estabilidad en los compuestos, reemplazando la portlandita o cal libre de la mezcla por cristales de alta resistencia como el gel de tobermorita, sin embargo esta reacción química solo es posible en presencia del Clinker hidratado del cemento portland.

La cantidad de cristales de CHS y CAHS formados por el MCS, de la cual depende su actividad puzolánica, está influenciada por muchos factores como: composición química y origen geológico, estructura molecular, tratamiento térmico, diámetro de partícula (finura), temperatura de mezcla, composición del cemento portland, entre otros.

Dentro de las principales adiciones se pueden encontrar las siguientes: Metacaolín, cenizas volantes, escoria de alto horno, humo de sílice, polvo de vidrio pulverizado, carbonato cálcico de alta finura entre otros.

El metacaolín o arcilla caolinita, luego de ser sometida a altas temperaturas y molida a un tamaño de partícula de entre 10 y 20 micras logra su potencial puzolánico, otorgándole al concreto un aumento apreciable en la resistencia mecánica por su capacidad de formar productos estables, adicionalmente debido a su pequeño tamaño de partícula puede aumentar la densidad de empaquetamiento del concreto otorgándole una menor permeabilidad, otros efectos que se han apreciado derivados de la adición con metacaolín son la disminución del calor de hidratación cuando sustituye parcialmente la cantidad de cemento en la mezcla y alta resistencia a los sulfatos atenuando efectivamente la reacción álcalis-Sílice (*R. Matallana, 2019*).

Las cenizas Volantes o fly ash es procedente de la combustión del carbón en las centrales generadoras de energía térmica, y debe tener un contenido mínimo del 70% en sílice alúmina y óxido férrico para ser adicionado al cemento según la norma ASTM-C618 (*R. Matallana, 2019*). La adición de ceniza volantes en el concreto conlleva a una pérdida de resistencia en las propiedades mecánicas del concreto endurecido, pero reduce la contracción autógena del concreto y aumenta la manejabilidad en estado fresco. (*E. Ghafari et al. 2016*).

Las escorias de alto horno o las escorias siderúrgicas son un subproducto del tratamiento de minerales de hierro en el alto horno, durante la manufactura del acero. Caracterizados por tener, en esencia, los mismos componentes químicos del cemento: Cal, sílice y alúmina, por ser una adición hidráulica tiene actividad química intrínseca y potencial de formar productos cementantes estables (*R. Matallana, 2019*). Dado el reconocimiento y los diferentes estudios llevados a cabo para evaluar el comportamiento mecánico y de durabilidad de los concretos adicionados con los anteriores materiales cementicios, la presente investigación, se enfocó en otros materiales no tan conocidos a excepción del humo de sílice, que son más usados en el área de los concretos UHPC.

Humo de sílice (SF): El humo de sílice es un material puzolánico de alta reactividad y naturaleza inorgánica compuesto principalmente por óxido de silicio SiO_2 , el cual se ha descubierto que mejora en gran medida las cualidades mecánicas del concreto. El humo de sílice o SF por sus siglas en inglés es un subproducto de la industria de elaboración del silicio metálico y ferro silicato, destacando que genera grandes problemas de contaminación ambiental por su composición inorgánica difícil de biodegradar.

Sin embargo, hoy en día es uno de los materiales más utilizados en las nuevas tecnologías del concreto, consumiéndose mundialmente más de 300 mil millones de toneladas de humo de sílice al año (*I. E. Vidaud, Revista CYT*)., la mayoría de los cuales no son provenientes del producto de reciclaje sino son producidos expresamente para ser usado en la industria del concreto.

El de humo de sílice tiene un alto costo, En Colombia puede llegar a ser 6 o 7 veces más elevado que el costo del cemento, por lo cual su optimización es de gran importancia en las nuevas tecnologías de concreto UHPC (*Joaquín Abellán, et al. Lima, 2018*). El humo de sílice es comúnmente utilizado en concretos de altas prestaciones, debido a que su pequeño tamaño de partícula (10 veces más pequeño que una partícula de cemento) densifica la masa de concreto otorgándole mayor resistencia a la compresión y menor permeabilidad al disminuir los vacíos en la matriz de concreto, aumentando sus cualidades mecánica y de durabilidad (*R. Matallana, 2019*), sin embargo, la adición de humo de sílice también conlleva a un mayor consumo de agua por su gran superficie específica, aumentando la contracción por secado del concreto al perder humedad (*Caijun Shi, et al, Zemei Wu, 2015*). Adicionalmente el humo de sílice afecta la manejabilidad del concreto, por lo que es necesario mayor adición de aditivo superplastificante, el cual afecta la viscosidad de la mezcla en estado fresco (*E. Ghafari et al. 2016*). En la *imagen 1.3* se observan las partículas de humo de sílice a través de un microscopio de fuerza atómica.

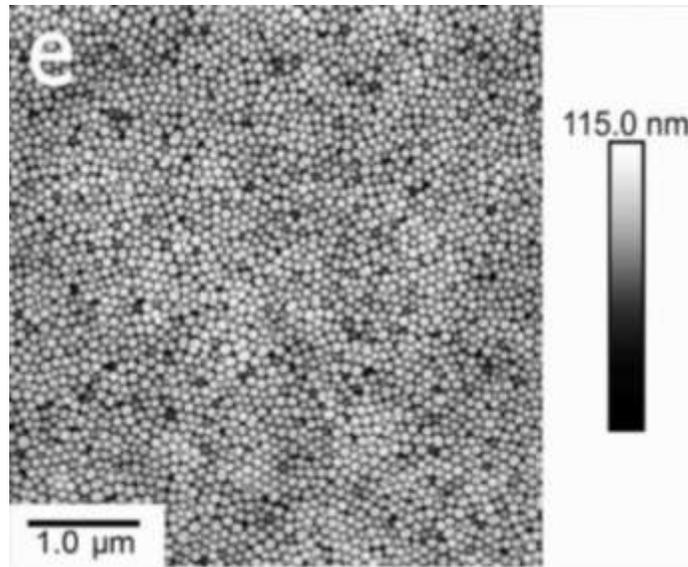


Imagen 1.3 – Microscopia de partículas de humo de sílice, microscopio de fuerza atómica
(Fuente: Kryuchkova, 2016)

Polvo de vidrio (GP): numerosos estudios han demostrado que el polvo de vidrio, es decir, vidrio reciclado de diferentes usos y molido a altos grados de finura (tamaños de partículas menores a 100 micras), es capaz de generar reacciones puzolánicas, pues provee sílice amorfa que reacciona con la cal libre (portlandita CH) del cemento portland generando productos hidratados CSH secundarios (M. rodriguez, M. Ruiz. 2016).

La composición química del polvo de vidrio varía según el origen y el proceso de fabricación del vidrio reciclado. En general, el vidrio común en Colombia tiene alrededor del 70% de SiO_2 y en menor proporción otros compuestos como óxido de calcio y óxido de sodio que no generan efectos apreciables en las propiedades mecánicas del concreto (Joaquín Abellán, et al., 2020). La tonalidad del polvo de vidrio molido depende de distintos contaminantes que pueda contener el vidrio original o los colorantes usados en la fabricación del mismo.

Es importante tener en cuenta que la acción puzolánica del material mejora en relación de la superficie específica del mismo, pues existe una mayor área de contacto entre las partículas que reaccionan químicamente aumentando la posibilidad de transferir iones a la portlandita para formar productos hidratados secundarios y aumentando, por ende, sus cualidades puzolánicas (M.M. Reda, et al, 1999)

Otra característica para destacar del polvo de vidrio utilizado como material cementante suplementario en las mezclas de concreto es el hecho que no tienen absorción del agua de mezcla, por lo cual favorece la manejabilidad de la mezcla de concreto en estado fresco. En la *imagen 1.4* se observan las partículas de polvo de vidrio pulverizado a través de un microscopio electrónico.

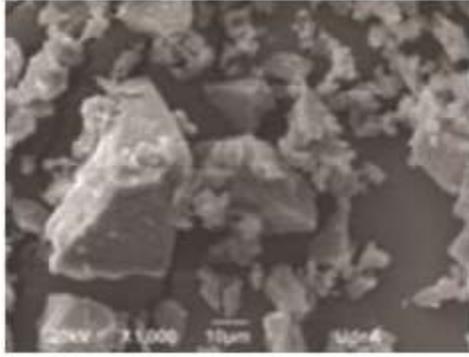


Imagen 1.4 - Microscopía electrónica de barrido de partículas de polvo de vidrio pulverizado

(Fuente Abellán-García, et al, 2020)

Carbonato Cálcico pulverizado (MLP): (esta sigla corresponde a su denominación en inglés de micro-limestone powder). Es un mineral bastante abundante en la corteza terrestre, extraído principalmente de las rocas calizas producto de la sedimentación a lo largo de los años de esqueletos y conchas de moluscos su composición química es CaCO_3 el cual no tiene propiedades puzolánicas propiamente dichas, sin embargo al ser molida a un grado suficiente de finura, le aporta al concreto algunas propiedades benéficas tales como aumento en la trabajabilidad y la densidad del concreto, así como una disminución de la permeabilidad y la exudación (R. Matallana, 2019).

(Li et al. 2020) demostraron que la incorporación de polvo de carbonato cálcico en UHPC mejoró el proceso de hidratación a una edad temprana, acelerando la hidratación del cemento y el humo de sílice (W. Z. Zhu, et al, 2005) lo que condujo a un relleno de partículas más denso y a mejorar las propiedades mecánicas (Abellán-García, et al, 2020) lo cual podría disminuir la contracción por secado del concreto UHPC, adicionalmente la incorporación de CaCO_3 aumenta la resistencia a la contracción del concreto UHPC (Huang Z., et al, 2012). Generando efectos positivos en la generación de gel de tobermorita en el concreto (M. Nehdi, et al, 1996). En la imagen 1.5 se observan las partículas de carbonato cálcico a través de un microscopio electrónico.

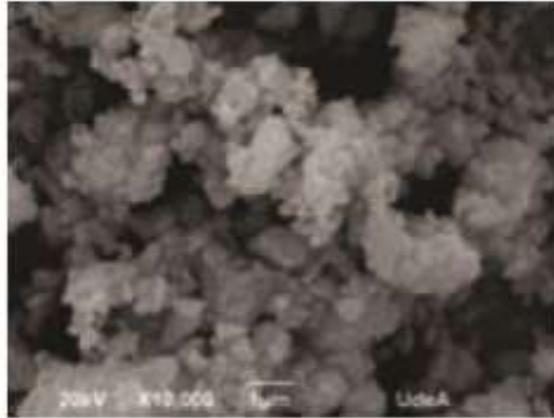


Imagen 1.5 - Microscopia electrónica de barrido de partículas de carbonato cálcico pulverizado
(Fuente Abellán-García, et al, 2020)

1.3. Contracción del concreto:

Existen múltiples tipos de contracción o retracción que puede sufrir un elemento de concreto desde su mezclado hasta su vida de servicio, todas pueden llegar a causar fisuras o agrietamientos en el concreto, pero no en todo el caso llegan a afectar las propiedades mecánicas del concreto endurecido. A los tipos de contracción se les otorgan diferentes nombres de acuerdo con el fenómeno que los causa. La contracción autógena, ocurre por la formación de meniscos internos de agua, los cuales a medida que avanza el proceso de hidratación, reducirán su diámetro, lo que conducirá a mayores tensiones capilares, y en consecuencia a una mayor contracción de auto desecación, (Jansen OM, et al, 1999). La contracción plástica ocurre por una rápida pérdida de agua en la superficie del concreto antes de que este haya fraguado, pues el agua que se encuentra por debajo de la superficie del concreto forma un menisco entre las partículas finas de cemento y agregados causando una fuerza de tensión que se desarrolla en las capas superficiales, si la superficie del concreto no ha adquirido la resistencia suficiente para resistir dichas tensiones, la superficie se agrietara (Bruce A. et al, 1997), también existe la contracción térmica causada por una disminución en la temperatura del concreto luego de ser colocado y la contracción química causada por distintos agentes químicos externos que pueden reaccionar con los componentes del concreto y causar contracción en el elemento, como por ejemplo la contracción causada por la carbonatación del concreto (A. Montejo, et al, 2013). Se describirá más a detalle la contracción por secado del concreto para efectos de esta investigación:

Contracción por secado del concreto: todos los tipos de concreto sufren un cierto cambio volumétrico en el proceso de endurecimiento y ganancia de resistencia del concreto. Esto se debe en primer lugar a la hidratación del Clinker del cemento que contienen, pues se genera una reacción exotérmica en la que el cemento al hidratarse y endurecerse libera energía en forma de calor, lo cual aumenta la temperatura interna del concreto. Dicho aumento de temperatura es directamente proporcional al contenido de cemento de la mezcla y al volumen del elemento, lo cual significa que los concretos UHPC al tener contenidos muy altos de cemento, el aumento de temperatura en los elementos es alta, induciendo a la pérdida de humedad y por ende a la contracción de las secciones. Esto, aunado con los efectos ambientales de humedad relativa y temperatura del aire que afectan las áreas expuestas del concreto, se le denomina contracción por secado. Pues está pérdida de humedad dentro de los capilares forman meniscos, y la tensión superficial del agua dentro de dichos meniscos atrae a los poros contiguos unos a otros ejerciendo esfuerzos de tracción que causa la contracción por secado. Siendo una causa común de fisuración y micro fisuración de los elementos de concreto, causando una reducción en su resistencia mecánica y problemas de durabilidad del concreto en estado endurecido. (A. M. Soliman, et al, 2014), En la *imagen 1.6* se observan las micro fisuras en la matriz de concreto causadas por la contracción por secado del UHPC.

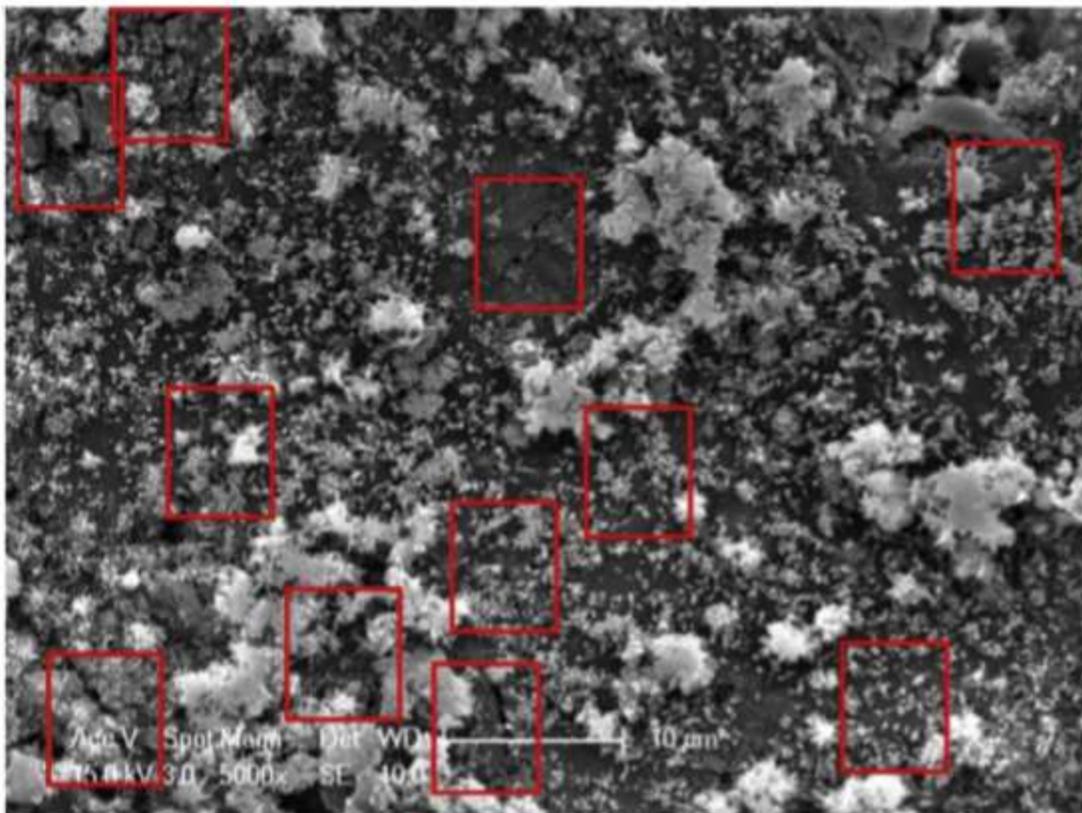


Imagen 1.6 - Microscopía de las micro fisuras causadas por la contracción de la matriz de concreto UHPC

(Fuente T. Xie, et al, 2018)

Al reducir la contracción por secado en el concreto se mitigan las afecciones que este puede causar a la durabilidad y a las propiedades mecánicas del concreto, en particular en los concretos UHPC es común la formación temprana de fisuras y micro-fisuras en las unidades de concreto debido a la contracción por secado de los elementos (*Caijun Shi, Zemei Wu, et al. 2015*), dando inicio a un proceso patológico que se puede ver acelerado al someter a la estructura a ambientes extremos, los cuales pueden contener múltiples agentes agresivos que pueden penetrar el concreto por medio de las fisuras y degradar la masa de concreto, razón por la cual el disminuir la contracción por secado del concreto UHPC es fundamental para desarrollar en plenitud su principal aplicación de ser utilizado en estructuras ubicadas en ambientes altamente agresivos y con altos requerimientos de durabilidad.

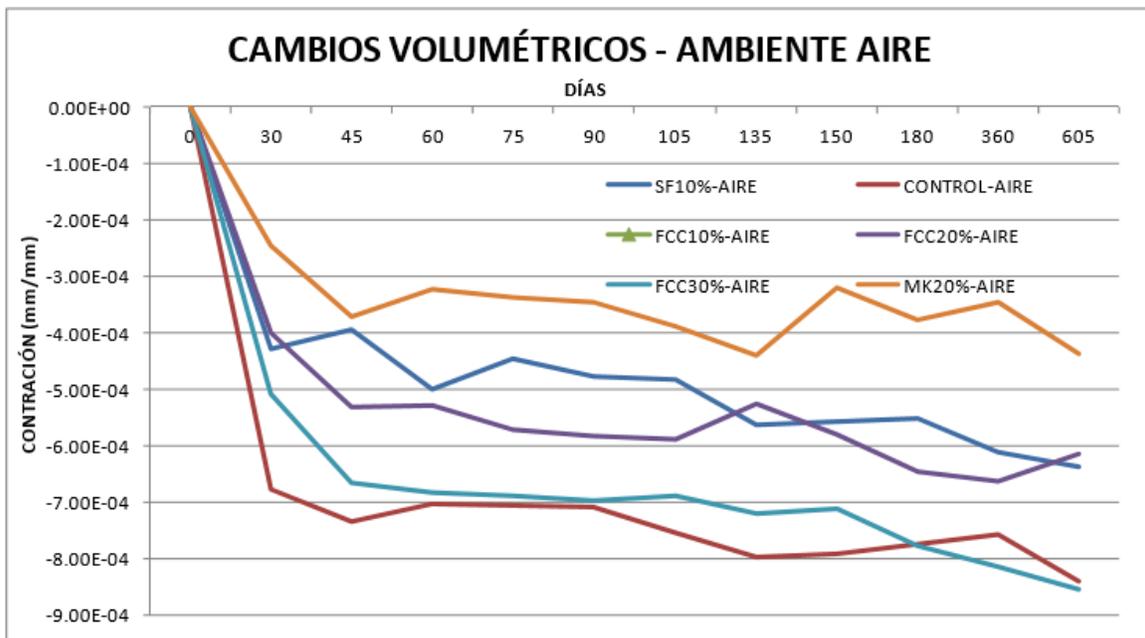
2. Estado del arte

A continuación, se presentan los resultados de los estudios más recientes y relevantes relacionados con la influencia en la contracción por secado de concretos UHPC, donde se realizan reemplazos parciales de cemento y humo de sílice por otros materiales cementantes suplementarios y donde también se evalúa la influencia en la contracción al contener los concretos micro-fibras, especialmente en edades tempranas, ya que en dicho periodo es máxima la contracción por secado del concreto

2.1. Contracción por secado de concreto con adiciones y materiales cementantes suplementarios

(Nancy Torres Castellanos, 2014) determinó que en concretos convencionales con relación agua-material cementante de 0.5 los especímenes adicionados con 20% de metacaolín y con 10% de humo de sílice (porcentaje de sustitución sobre la cantidad de cemento de la mezcla de control) presentaba menor contracción por secado que un concreto no adicionado, en condiciones controladas de humedad relativa y temperatura de 55% y 23 °C respectivamente.

Gráfica 2.1 - Cambios volumétricos de muestras mantenidas en ambiente seco
(Nancy Torres, 2014)



2.2. Contracción por secado de concreto UHPC reforzado con fibras.

(Wu L., Shi C., Zhang Z., Wang, H., 2017) estudiaron la influencia de las fibras de acero en la contracción por secado del concreto de ultra alto rendimiento (UHPC) con un contenido fibra de 0%, 1%, 2% y 3% del volumen, bajo condiciones de temperatura de (20 ± 2) °C y humedad relativa del (50 ± 5) %. Sus resultados demostraron que las propiedades físicas de la fibra de acero pueden reducir efectivamente la contracción por secado. Sin embargo, cuando la fibra de acero excede un volumen óptimo, no se refleja en una disminución importante de la contracción por secado, pues se obtuvo que los especímenes que contenían un 3% de fibras tan solo reflejaron una disminución de un 1.5% de la contracción con respecto a los que contenían un 2% de fibras metálicas. Esto se debió a que el exceso de fibras aleatoriamente dispuestas puede causar una interfaz débil con el contacto de la pasta y el agregado, dejando micro vacíos que favorecen la contracción por secado y atenuando su cualidad de interrumpir las microgrietas causadas por los esfuerzos de contracción del concreto.

(Weina Meng and Kamal H. Khayat, 2018) Realizaron especímenes prismáticos con agregado fino de distintos orígenes, utilizando 3 tipos de fibras, fibras de acero con final en gancho, fibra de acero rectas y fibras sintéticas de PVA, una relación agua-material cementante de 0.2 y distintas adiciones como humo de sílice y ceniza volante. Se concluyó así que la contracción autógena disminuía con relación al aumento del contenido de fibras metálicas rectas, desde 0% hasta 5% de fibras, reduciéndose la contracción hasta un 60% con el espécimen que contenía 5% de este tipo de fibras, y se reducía un 45%, 35%, 30% y 15% la contracción para los que contenían un 4%, 3%, 2% y 1% de fibras rectas metálicas respectivamente.

Se encontró que la mayor reducción de la contracción autógena corresponde al espécimen que contenía un 1% de fibra metálica recta y un 1% de fibra metálica con forma de gancho, reduciéndose en un 72% la contracción con respecto a la mezcla de control sin fibras.

(Hyung-Joo Lee, Seung-Ki Kim, et al., 2019) midieron la contracción por secado de elementos prismáticos de concreto reforzado con dos tipos diferentes de fibras, fibras de lino de 10mm de longitud y de 40 a 600 micras de diámetro y fibras de acero rectas de 13 mm de longitud y de 200 a 600 micras de diámetro. Realizaron especímenes de control con relación agua-material cementante de 0.33, especímenes con un 1% del tipo de fibra correspondiente dosificado en volumen y adicionalmente especímenes con 1% de la fibra correspondiente y adicionando Nanocristales de celulosa con contenidos desde 0.4 a 1.2% de volumen de concreto, obteniendo como conclusión que los especímenes con menor contracción por secado correspondían a los que contenían 0.8% de Nanocristales y 1% de fibra de lino, sin embargo las muestras que contenían fibras de lino, fibras de acero y Nanocristales de celulosa redujeron en un 47.4% y 30% respectivamente la contracción por secado con respecto a la dosificación de control.

3.Objetivos

3.1. Objetivo general

Evaluar experimentalmente el efecto de los materiales cementantes suplementarios y la adición de fibras de acero en la contracción por secado del concreto UHPC y UHPFRC.

3.2. Objetivos específicos:

- Determinar la influencia del reforzamiento con fibras metálicas en la contracción por secado del concreto de ultra-altas prestaciones.
- Analizar el comportamiento de las deformaciones por contracción del concreto de ultra-altas prestaciones con diferentes tipos de materiales cementantes suplementarios en un ambiente seco a lo largo de las primeras edades del concreto.
- Comprobar experimentalmente los periodos de tiempo en los que los concretos UHPC y UHPFRC sufren una mayor contracción por secado.

4. Metodología

Este proyecto está enmarcado en la investigación llevada a cabo por el ingeniero Joaquín Abellán García sobre Optimización de concretos de altas prestaciones reforzados con fibras y aplicaciones sismo resistentes. En este trabajo la metodología consistirá en realizar ensayos de medidas de la contracción en los concretos conforme a la norma ASTM C596-18, midiendo la deformación diariamente en una misma franja horaria para todos los prismas realizados, se buscará determinar la contracción del concreto UHPC de referencia, para compararlo con las contracciones de las dos dosificaciones que cuentan con sustitución parcial de cemento y humo de sílice por MCS y estas mismas dosificaciones con MCS y reforzadas con fibras metálicas, así como realizar la comparativa con la mezcla que cuenta con los mismos componentes de la dosificación de referencia pero reforzada con fibras metálicas.

4.1. Materiales utilizados

A continuación, se presentan los materiales usados en los amasados de concretos UHPC y UHPFRC y las *imágenes 4.7 a 4.12* muestran sus respectivas imágenes fotográficas.

- **Cemento hidráulico:**
Cemento ASTM tipo HE, con 8 micras de diámetro medio de partícula (d50), gravedad específica de 3.16 g/cm^3 . También se le conoce como cemento estructural debido a que posee altas resistencias iniciales es decir que tiene una ganancia acelerada de resistencia lo cual le entrega un alto desempeño.



Imagen 4.7 - Fotografía del cemento hidráulico tipo HE utilizado.

(Fuente: Joaquín Abellán)

- **Humo de sílice (SF):**

El SF utilizado cumple especificaciones ASTM C1240, con gravedad específica de 2.20g/cm^3 y d_{50} de 0.15 micras.



Imagen 4.8 - Fotografía del Humo de sílice utilizado.

(Fuente: Joaquín Abellán)

- **Carbonato cálcico pulverizado (MLP):**

Este material se obtiene de la molienda de la piedra caliza a altos grados de finura. El utilizado cuenta con una gravedad específica de 2.73 g/cm^3 y d_{50} de 2.1 micras.



Imagen 4.9 - Fotografía del carbonato cálcico pulverizado utilizado.

(Fuente: Joaquín Abellán)

- **Polvo de vidrio:** Se obtuvo a partir de la molienda de vidrio reciclado obtenido en el medio local, a través de un molino de chorro aplicando distintas velocidades de molienda para lograr diferentes grados de finura.

(GP 28) con gravedad específica de 2.55 g/cm^3 y d50 de 28 micras, también llamado polvo de vidrio grueso (GGP)

(GF 7) con gravedad específica de 2.55 g/cm^3 y d50 de 7 micras, también llamado polvo de vidrio fino. (FGP)



Imagen 4.10 - Fotografía del polvo de vidrio reciclado utilizado.
(Fuente: Joaquín Abellán)

- **Arena de sílice (SS):** Se obtiene mediante la explotación de canteras ricas en este tipo de arena y se realiza un tratamiento posterior para la eliminación de impurezas. La utilizada cuenta con gravedad específica de 2.65 g/cm^3 , con d50 de 165 micras y tamaño máximo de partícula de 600 micras



Imagen 4.11 - Fotografía del polvo de la arena de sílice utilizada.
(Fuente: Joaquín Abellán)

- **Fibras metálicas:**

Fibras OL 13/0.2 fibras de acero rectas bañadas en latón para evitar corrosión de la fibra que afecte la durabilidad de la masa de concreto o las propiedades mecánicas del conjunto fibra-matriz dentro del concreto. Las utilizadas cuentan con longitud de 13mm y diámetro promedio de 0.12 mm del fabricante Dramix (Bekaert). Este tipo de fibras tiene una resistencia a la tensión y un módulo de elasticidad promedio de 1.9GPa y 203 GPa.



Imagen 4.12 - Fotografía de las fibras de acero rectas utilizadas en el concreto UHPFRC.

(Fuente: Hyung-Joo Lee, et al, 2019)

- **Aditivo superplastificante (HRWR):**

Superplastificante a base de éter de policarboxilato marca Toxement con gravedad específica de 1.07 g/cm³ y un contenido de sólidos del 40%

- **Agua**

Del acueducto local

4.1.1. Composición Química de los materiales utilizados:

La Tabla 4.2 muestra los principales componentes químicos de los materiales utilizados en este estudio, así como la gravedad específica y pérdida de masa por ignición de cada uno de ellos.

Tabla 4.2 - Caracterización química del cemento, humo de sílice, carbonato cálcico pulverizado, polvo de vidrio reciclado y humo de sílice

(Joaquín Abellán, et al., 2020)

Chemical analysis, %	Cement	Silica fume	Micro limestone powder	Recycled glass	Silica sand
Specific gravity, g/cm ³	3.16	2.20	2.73	2.55	2.65
Loss of ignition, %	2.58	0.60	42.21	1.00	0.20
SiO ₂ , %	19.42	92.29	0.90	72.89	99.80
Al ₂ O ₃ , %	4.00	0.59	0.10	1.67	0.14
CaO, %	64.42	3.89	55.51	9.73	0.17
MgO, %	1.52	0.26	0.70	2.08	0.01
SO ₃ , %	1.93	0.07	0.10	0.01	—
Na ₂ O, %	0.19	0.31	0.03	12.54	—
K ₂ O, %	0.39	0.54	0.00	0.76	0.05
TiO ₂ , %	0.38	0.01	0.00	0.04	—
Mn ₃ O ₄ , %	0.05	0.01	0.01	0.01	—
Fe ₂ O ₃ , %	3.61	0.24	0.05	0.81	0.04

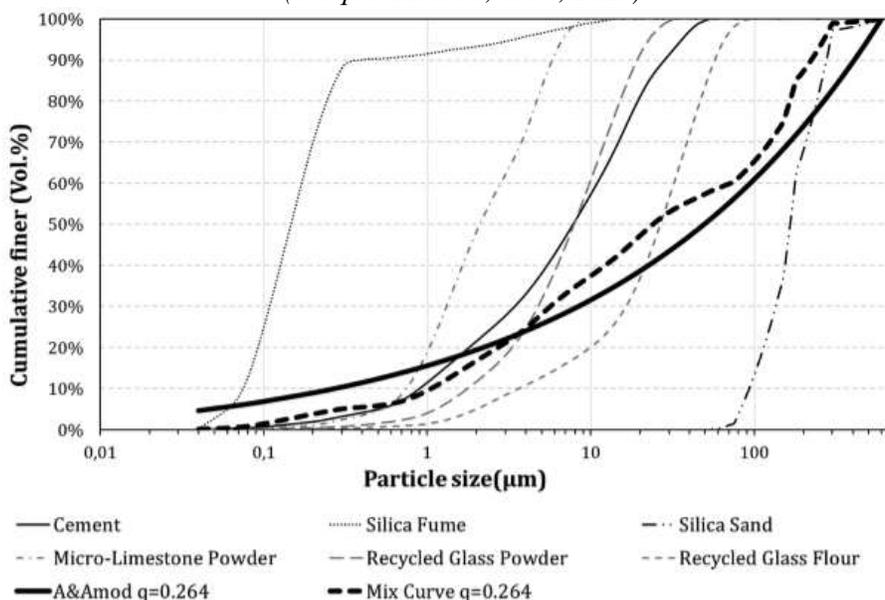
Como se puede observar los materiales cementicios suplementarios se componen en su mayoría de sílice amorfa SiO₂ y alúmina Al₂O₃ a las cuales se debe su actividad puzolánicas. El carbonato cálcico pulverizado o polvo de piedra caliza, como se indicó en el marco teórico, se usa para sustituir parcialmente el cemento y humo de sílice por su cualidad de mejorar el proceso de hidratación dentro de la matriz del concreto, otorgándole una mayor densidad de empaquetamiento, mejorando su resistencia a la compresión y durabilidad.

4.1.2. Granulometría de los materiales utilizados

En la *gráfica 4.2* Se presentan las curvas granulométricas de los materiales utilizados, así como la curva granulométrica teórica promedio del conjunto de partículas que conforman el concreto UHPC de referencia.

Gráfica 4.2 – Curvas granulométricas del cemento, humo de sílice, carbonato cálcico pulverizado, polvo de vidrio grueso y fino y humo de sílice y teórica del concreto UHPC

(Joaquín Abellán, et al., 2020)



Como se indicó en el marco teórico, el principio fundamental de los diferentes materiales que componen el UHPC es lograr la mayor densidad de empaquetamiento posible dentro de la matriz de concreto, esto se logra con una variedad suficiente de tamaños de partículas constituyentes para lograr una gradación óptima; por ello, teóricamente al agregar carbonato cálcico pulverizado con d_{50} de 2.1 micras, se puede reducir la cantidad de humo de sílice de 0.6 micras y cemento de 8 micras, materiales que se encuentran a izquierda y derecha respectivamente de la curva granulométrica del carbonato cálcico.

Asimismo la adición de harina de vidrio o polvo de vidrio fino con d_{50} de 7 micras también permite reducir la cantidad de humo sílice y cemento, pues su tamaño de partícula se encuentra en medio de estos dos, sin embargo, al tener una finura tan similar a la del cemento usado, la reducción que puede proveer de humo de sílice sin afectar la densidad de empaquetamiento es baja. Por otra parte, el polvo de vidrio

grueso con d50 de 28 micras tiene una finura entre las 8 micras del cemento y las 165 micras de la arena de sílice, permitiendo la reducción en la dosificación de ambos materiales. Observando los rangos granulométricos cubiertos por el polvo de vidrio grueso y el carbonato cálcico se podría deducir, desde la teoría, que son los materiales que mayor aportan a la densificación de la masa de concreto, principios básicos para las dosificaciones de los concretos UHPC.

4.2. Dosificación de los UHPC

Como ya se mencionó, las dosificaciones de las diferentes mezclas, fueron proporcionadas por el ingeniero Joaquín Abellán García enmarcado en su investigación sobre optimización de concretos de altas prestaciones reforzados con fibras y aplicaciones sismo resistentes; este se presenta en la *tabla 4.3*; donde se realizó la dosificación por m³ de concreto de acuerdo con las siguientes referencias: *Mezcla D3: (Joaquín Abellán, et al, 2020). Mezcla de referencia y mezcla D2: (Joaquín Abellán, et al, Kassel, 2020).*

A continuación, se presentan los componentes de las diferentes mezclas realizadas:

- ✓ La Mezcla denominada como REF, corresponde a la muestra de referencia, con una dosificación optimizada para lograr una gran densificación de empaquetamiento dentro de la matriz de concreto, caracterizada por altas cantidades de cemento y humo de sílice en su dosificación. Esta alta cantidad de SF conlleva a una relación agua material cementante alta y un consumo más alto de aditivo superplastificante para su amasado.
- ✓ La mezcla REF 2%OL corresponde a la misma dosificación de referencia, pero reforzado con un 2% de fibras de acero rectas sobre volumen de concreto, constituyendo así, un concreto UHPFRC.
- ✓ En la mezcla D2 se sustituye parcialmente el cemento y el humo de sílice de la dosificación REF, por carbonato cálcico pulverizado (MLP), y polvo de vidrio grueso de 28 micras de diámetro (GP28), al reducir la cantidad de humo de sílice en el concreto, se reduce la relación w/b de la mezcla y la cantidad de aditivo superplastificante utilizado
- ✓ La muestra D2 2%OL corresponde a la misma dosificación D2, pero reforzada con un 2% de fibras de acero rectas.
- ✓ En la mezcla D3 se usó carbonato cálcico pulverizado (MLP), polvo de vidrio fino (GP7) y polvo de vidrio Grueso (GP28) para sustituir parcialmente el cemento y el humo de sílice en la mezcla, téngase en cuenta que al agregar polvo de vidrio fino de 7 micras se reduce la cantidad de MPL adicionado, pues ambos materiales tienen un diámetro medio entre el humo de sílice (0.6 micras) y el cemento (8 micras):

- ✓ La dosificación D3 2%OL corresponde a la muestra D3 reforzada con un 2% de fibras de acero rectas.

A continuación, en la *tabla 4.3*, se presentan las cantidades de material utilizados en cada una de las mezclas analizadas calculadas por metro cubico de concreto.

Tabla 4.3 - Dosificación de los componentes en las mezclas realizadas

Nombre	cemento	SF	MLP	GP 28	GP 7	Arena	Hrwr	Agua	Fibra	w/b
	[kg/m ³]	[% Vol.]								
REF	852.26	271.73	-	-	-	834.27	26.46	245.24	-	0.218
REF 2%OL	852.26	271.73	-	-	-	834.27	26.46	245.24	2%	0.218
D2	600.00	100.00	209.48	322.51	-	835.99	21.00	221.75	-	0.180
D2 2%OL	600.00	100.00	209.48	322.51	-	835.99	21.00	221.75	2%	0.180
D3	620.00	100.00	118.44	168.60	177.19	888.84	20.00	205.00	-	0.173
D3 2%OL	620.00	100.00	118.44	168.60	177.19	888.84	20.00	205.00	2%	0.173

Las dosificaciones se ajustaron para alcanzar un comportamiento autocompactante en estado fresco (flujo estático de 260 mm) con el menor contenido de agua y una limitación del superplastificante del 3% sobre el peso del cemento como máximo (*Joaquín Abellán, et al., Kassel, 2020*). La limitación del superplastificante tiene que ver con la excesiva viscosidad que proporciona al concreto, dificultando la expulsión del aire (*Ghafari, et al, 2012*). Esto último tiene como resultado que las dosificaciones con elevado contenido de humo de sílice, como nuestra muestra de referencia (REF), precisen una mayor cantidad de agua para reaccionar durante el amasado (*Caijun Shi, Zemei Wu, et al. 2015*).

4.3. Especímenes y mediciones

Los especímenes de prueba se realizaron de acuerdo con la norma ASTM C596-18 como prismas de concreto de sección 5x5 cm y 30 cm de longitud con piezas cilíndricas metálicas redondeadas acopladas en ambos extremos para la medición posterior de la contracción. Los especímenes se fundieron en los moldes presentados en la *imagen 4.13*, todo el programa de evaluación experimental se llevó a cabo en los laboratorios de estructuras y materiales de la escuela colombiana de ingeniería Julio Garavito.



Imagen 4.13 - Moldes utilizados según norma ASTM C596-18 para los especímenes de concreto
(fuente propia)

Se fundieron en total de 12 especímenes (2 por cada dosificación), los cuales se almacenaron bajo condiciones controladas simulando condiciones ambientales normales, temperatura de 20 °C y humedad relativa del 45%. La contracción por secado de cada prisma se midió todos los días en una misma franja horaria de acuerdo con los parámetros indicados en la norma ASTM C596-18. La *imagen 4.14* muestra el instrumento especializado para realizar las mediciones, el cual posee un deformímetro con precisión de 0.001 mm, en la *imagen 4.14* se observa el instrumento utilizado para la medición de la contracción por secado de los prismas de concreto.



Imagen 4.14 - Instrumento de medición ASTM C596-18
(fuente propia)

4.4. Procedimiento de mezcla:

El procedimiento de mezcla para el concreto UHPC y UHPFRC se realizó en una mezcladora Hobart de 3 litros de capacidad y con 3 velocidades de mezclado

Se siguieron específicamente los siguientes pasos:

1. Mezclar el agua y el aditivo a velocidad 1 por 1.5 minutos.
2. Añadir los materiales cementantes previamente mezclados y homogenizados
3. Mezclar a velocidad 1 hasta que fluya la mezcla
4. Subir a velocidad 2 y mezclar por 1 minuto, una vez transcurrido raspar la olla con una espátula.
5. Mezclar a velocidad 3 por 3 minutos
6. Añadir la arena gradualmente por 1 minuto mientras se mezcla a velocidad 1
7. Mezclar durante 4 minutos a velocidad 2
8. **Añadir las fibras gradualmente durante 1 minuto mientras se mezcla a velocidad 1*
9. **Raspar la olla con la espátula*
10. **Mezclar a velocidad 2 durante 2 minutos*

**Pasos solo aplicables a la mezcla de concreto UHPFRC*



Imagen 4.15 - Procedimiento de pesado de material y mezclado de concreto UHPC y UHPFRC
(fuente propia)

Los especímenes fueron desencofrados y marcados con el tipo de muestra correspondiente al día siguiente de ser fundidos. Inmediatamente después de desencofrarlos, se mide su longitud, siendo ésta su medida de referencia para determinar la contracción por secado los días posteriores. En las *imágenes 4.16, 4.17 y 4.18* se observan los elementos prismáticos de concreto luego de ser desencofrados.



Imagen 4.16 - Vista lateral de especímenes prismáticos de UHPC y UHPFRC
(fuente propia)



Imagen 4.17 - Vista superior de especímenes prismáticos de UHPC y UHPFRC
(Fuente propia)



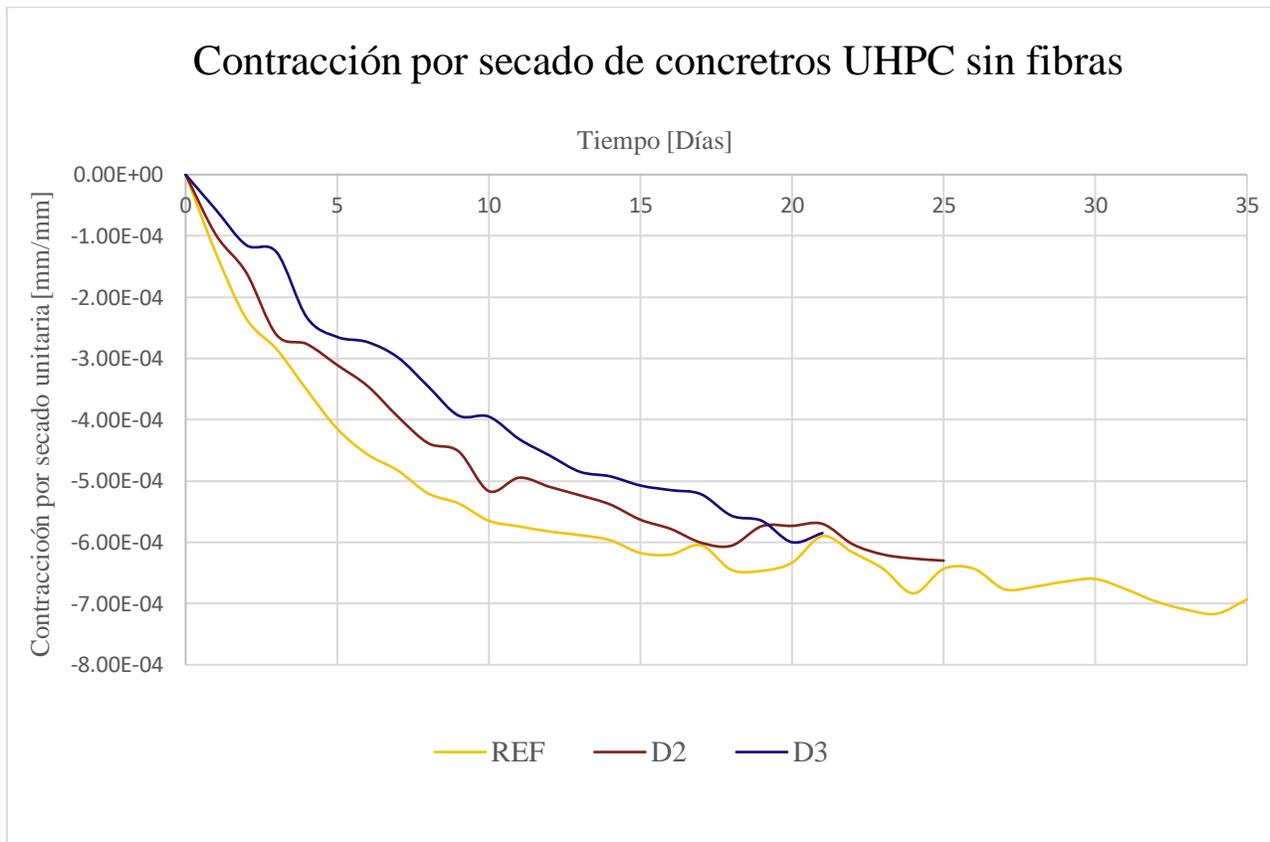
Imagen 4.18 - Especímenes prismáticos de UHPC y UHPFRC
(Fuente propia)

5. Resultados

Se presenta a continuación la representación gráfica de las mediciones realizadas de la contracción por secado promedio de dos muestras por mezcla, de los especímenes en estudio; como ya se mencionó, esta investigación estuvo centrada en analizar la contracción por secado durante los 20 primeros días de edad del concreto, algunos especímenes fueron medidos durante un periodo más prolongado de tiempo con la única finalidad de comprobar que la variación de la contracción por secado más allá de dicho periodo es muy pequeña, en el **anexo: contracción por secado de los especímenes**, se presentan los valores con los cuales se realizaron las graficas presentadas en los resultados de la investigación.

A continuación, en la *gráfica 5.3*, se presenta gráficamente los registros de contracción por secado promedio para las mezclas REF, D2 y D3.

Gráfica 5.3 - Contracción por secado de concretos UHPC sin fibras

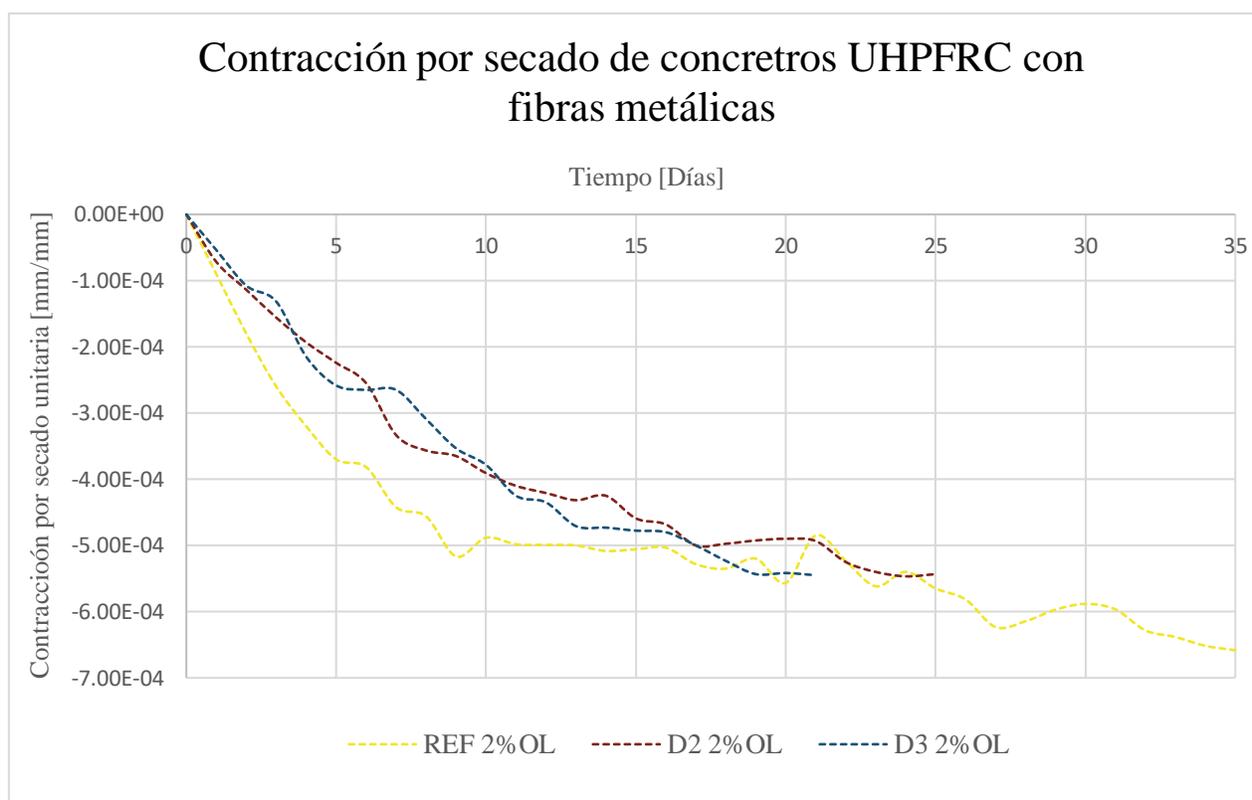


En la *gráfica 5.3* se observa que los concreto D2 y D3 los cuales tenían reemplazo parcial del cemento y humo de sílice por MCS sufren una contracción por secado menor al de la muestra de referencia, esto se debe por un lado al menor contenido de cemento en

las mezclas D2 y D3 (con respecto a la muestra de referencia, véase *tabla 4.3*), que conlleva a una menor liberación de calor de hidratación y por otro lado al menor contenido de agua en las mezclas adicionales (D2 y D3) debido a su bajo contenido de humo de sílice, lo que conlleva a una menor pérdida de humedad dentro de la masa de concreto en su proceso de endurecimiento.

En la *gráfica 5.4*, se presenta gráficamente los registros de contracción promedio para los concretos UHPFRC correspondientes a las mezclas a las mezclas REF2%OL, D22%OL y D3 2%OL.

Gráfica 5.4 - Contracción por secado de concretos UHPFRC con fibras metálicas



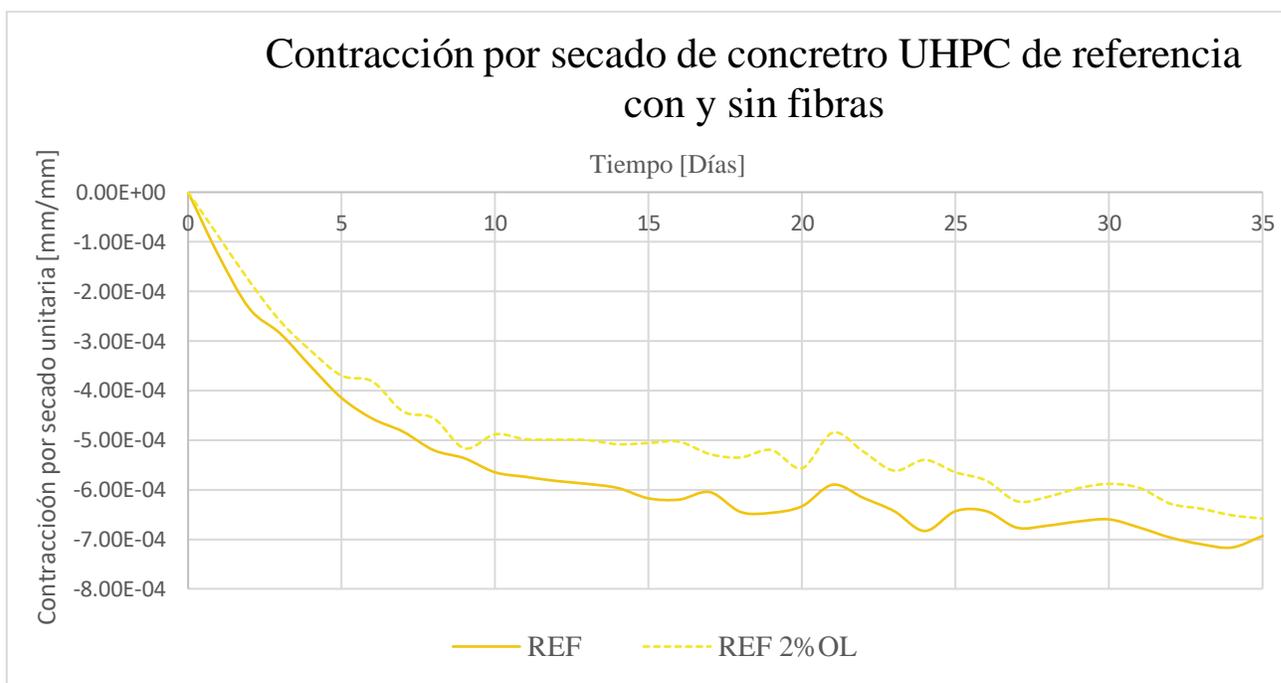
En el caso del concreto UHPFRC, (*figura 5.4*) las mezclas adicionales presentan una considerable reducción de la contracción por secado, especialmente en edades tempranas donde ocurren las contracciones críticas del concreto. Sin embargo, a edades posteriores (luego de 15 días) se observa que los concretos adicionales sufren una contracción por secado similar a la experimentada por el concreto de referencia. Este comportamiento es independiente del contenido de fibras, (*véase gráfica 5.3*). Esto se debe muy probablemente a que, una vez concluida la máxima liberación de calor de hidratación del cemento, los concretos con menor contenido de cemento y humo de sílice (concretos adicionales) y por ende con menor grado de empaquetamiento son más propensos a los cambios volumétricos inducidos por las condiciones exteriores del

ambiente. Es decir, al ser más permeables y tener una mayor cantidad de vacíos con aire que el concreto de referencia son más propensos a la pérdida de humedad extraída por el aire adyacente circulante, lo cual induce a contracciones en la unidad de concreto. Sin embargo, es importante recalcar que el cambio volumétrico inducido por las condiciones exteriores (en condiciones ambientales normales) es muy inferior a la contracción generada por la liberación del calor de hidratación del concreto en edades tempranas, por lo cual este último parámetro influye en mayor medida a la formación de fisuras y micro fisuras que afecten la resistencia mecánica y la durabilidad del concreto UHPC.

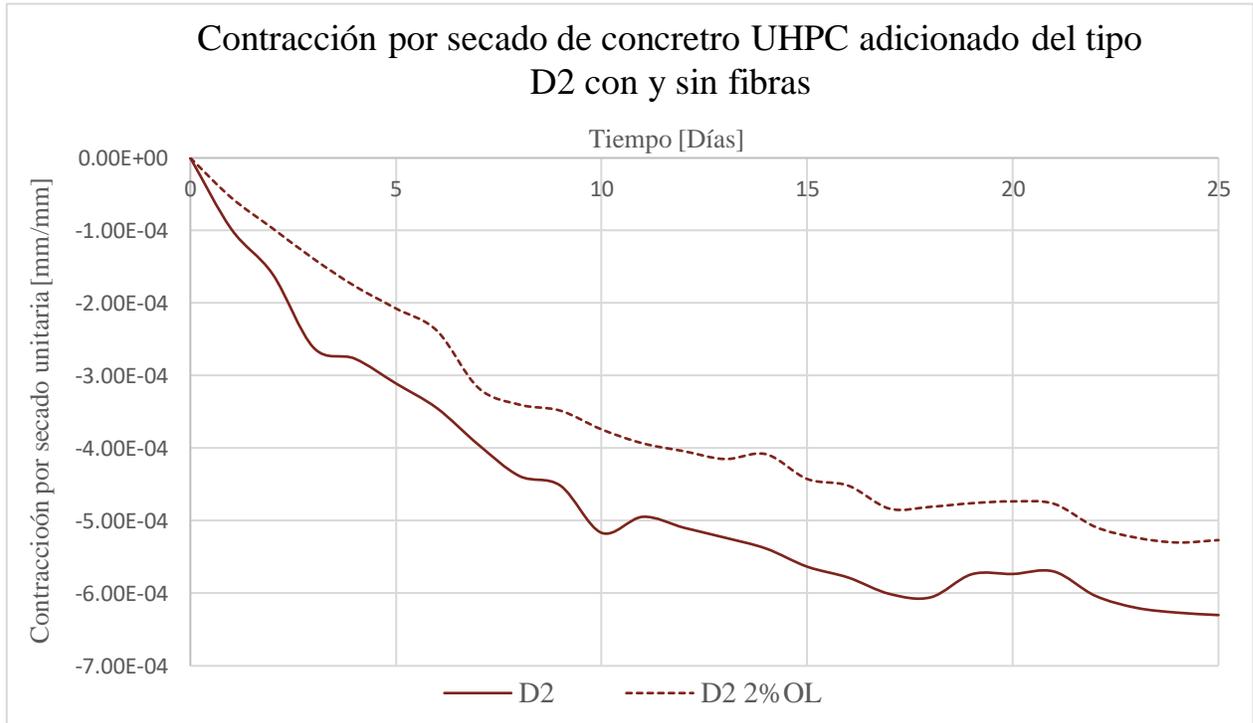
En conclusión, las gráficas 5.3 y 5.4 dejan entrever que la sustitución parcial del cemento y humo de sílice por otros MCS reducen eficazmente la contracción por secado de los concretos UHPC y UHPFRC en los primeros días de edad del concreto, donde la liberación de calor de hidratación es máxima, sin embargo luego de los 15 primeros días de edad los concretos adicionados con y sin fibras son más susceptibles a la pérdida de humedad, debido a su mayor porosidad derivada de su menor grado de empaquetamiento con respecto a los concretos de referencia (REF y REF2%OL), mitigando la eficacia de la sustitución parcial de cemento y humo de sílice por MCS en la reducción de la contracción por secado en estos días posteriores.

Las gráficas 5.6, 5.7 y 5.8 presentan la comparativa entre el UHPC con fibras y sin fibras para cada dosificación realizada.

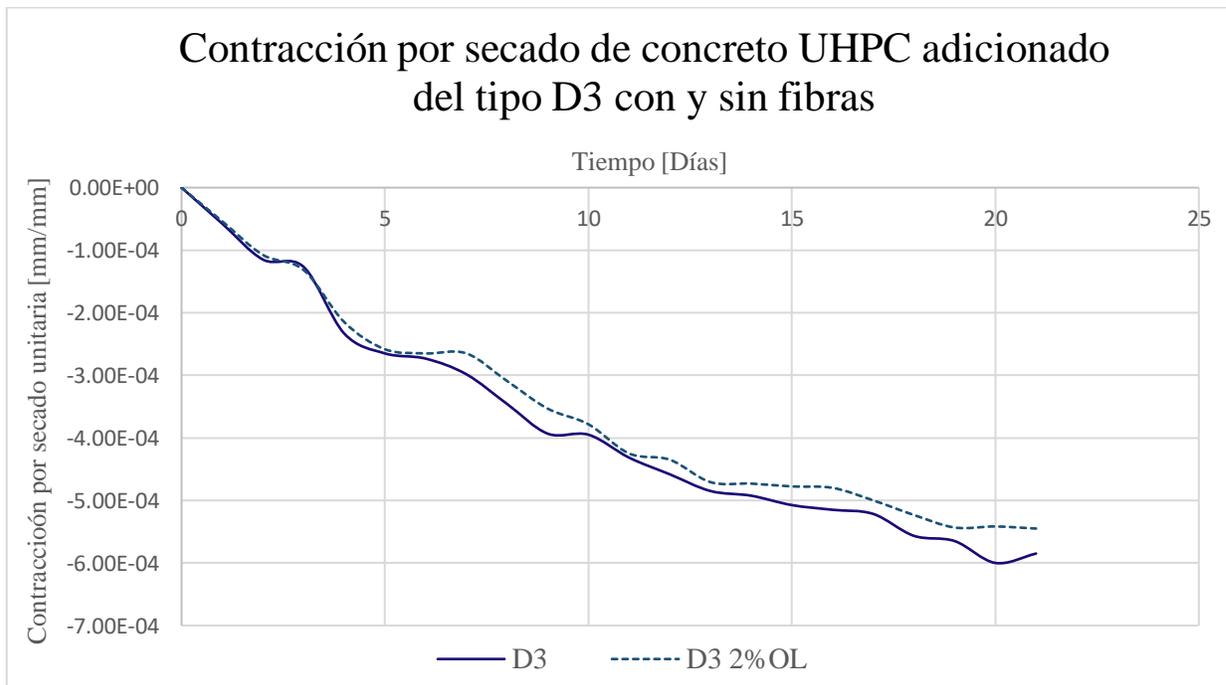
Gráfica 5.5 - Contracción por secado de concreto UHPC de referencia con y sin fibras



Gráfica 5.6 - Contracción por secado de concreto UHPC adicionado del tipo D2 con y sin fibras



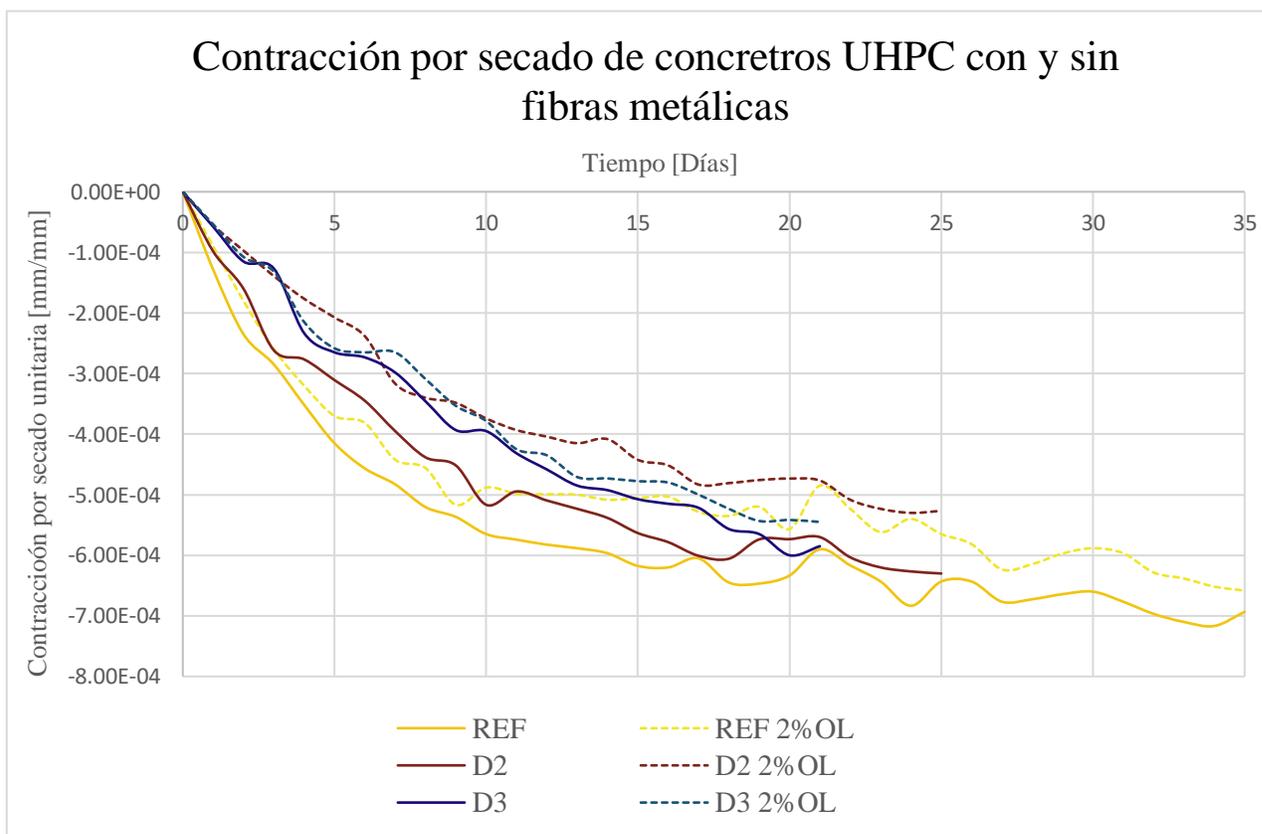
Gráfica 5.7 - Contracción por secado de concreto UHPC adicionado del tipo D3 con y sin fibras



Como se observa en las *gráficas 5.5, 5.6 y 5.7*, la adición de fibras en todos los casos redujo la contracción por secado del concreto. Esto posiblemente se puede atribuir a que el módulo de elasticidad de las fibras es mucho más alto que el de la masa de concreto, las cuales resisten los esfuerzos de tracción impresos por la contracción de la masa de concreto sin sufrir grandes deformaciones, disminuyendo su contracción. Se comprueba así que este tipo de fibras rectas con 13mm de longitud y 0.2 mm de diámetro, dosificadas en un 2% por volumen de concreto, es una buena opción para disminuir la contracción por secado del concreto independientemente de las adiciones agregadas en el concreto UHPC, apoyando lo encontrado por Wu L., Shi C., Zhang Z., Wang, H., (2017) los cuales concluyeron que un contenido óptimo de fibras metálicas para reducir la contracción por secado en concretos UHPFRC estaba alrededor del 2% de fibras sobre volumen de concreto.

En la *gráfica 5.8* se presenta gráficamente la contracción por secado promedio de cada uno de los 6 tipos de mezclas realizadas.

Gráfica 5.8 - Contracción por secado de concretos UHPC con y sin fibras metálicas



Se observa en la gráfica 5.8 y como se observó anteriormente, en todos los casos, los especímenes con fibras metálicas rectas sufrieron menor contracción por secado que las muestras con sus mismos componentes de mezcla, pero sin adición de fibras. Sin embargo, es importante recalcar que la dosificación D3, correspondiente a concreto adicionado con carbonato cálcico, y polvo de vidrio de 28 y 7 micras, sufrió una contracción por secado menor a la muestra de referencia sin adiciones, pero reforzado con fibra.

El aumento de la contracción por secado es máximo en los primeros 7 a 10 días para todas las muestras analizadas tal como describió Wu L., et al, (2017) y Hyung Joo Lee, et al, (2019). Sin embargo, se observa una reducción en la “la “pendiente” inicial de la curva en los concretos adicionados, lo cual significa que el cambio volumétrico no es tan acelerado a edades tempranas, reduciendo con ello el riesgo de micro fisuración del concreto. El aumento en la contracción se atenúa paulatinamente hasta los 20 a 25 días de edad del concreto, donde el cambio volumétrico es muy pequeño y se puede atribuir en mayor medida a las condiciones ambientales (temperatura y humedad relativa) al que se someta el concreto que al calor de hidratación liberado por el cemento.

A continuación, se presenta la *tabla 5.3*, en ella se indica numéricamente la contracción por secado promedio sufrida por cada una de las mezclas realizadas, así como su cambio porcentual con respecto a la muestra de referencia.

Tabla 5.4 - Tabla resumen de porcentaje de reducción de contracción unitaria promedio con respecto a la muestra de referencia

	Contracción por secado unitaria [mm/mm]			% de cambio con respecto a la mezcla de referencia		
	5días	15días	20días	5días	15días	20días
REF	-4.1500E-04	-6.1750E-04	-6.3333E-04			
REF 2%OL	-3.7000E-04	-5.0583E-04	-5.5667E-04	10.8%	18.1%	12.1%
D2	-3.1083E-04	-5.6333E-04	-5.7333E-04	25.1%	8.8%	9.5%
D2 2%OL	-2.2417E-04	-4.5917E-04	-4.9000E-04	46.0%	25.6%	22.6%
D3	-2.6500E-04	-5.0750E-04	-6.0000E-04	36.1%	17.8%	5.3%
D3 2%OL	-2.5833E-04	-4.7771E-04	-5.4167E-04	37.8%	22.6%	14.5%

En la *tabla 5.3* se observa que el concreto tipo D2 2%OL es decir el concreto adicionado con carbonato cálcico, polvo de vidrio de 28 micras y reforzado con fibras evidenció una reducción de hasta un 46% la contracción por secado con respecto a la muestra de referencia en las edades más tempranas. A medida que aumenta la edad del concreto y se reduce el calor de hidratación liberado por el cemento, la eficacia en reducción de la contracción por secado disminuye en todas las muestras adicionadas.

A 20 días de edad, la muestra con menor cambio volumétrico es la D2 2%OL mencionado anteriormente, reduciendo en un 22.6% la contracción con respecto a la muestra de referencia, seguido por la muestra D3 2%OL con una reducción del 14.5% de la contracción por secado.

Hyung-Joo Lee, Seung-Ki Kim, et al, (2019) determinaron que un concreto con un 1% fibras metálicas y Nanocristales de celulosa sufría una contracción por secado 30% menor que un concreto UHPC de referencia, mientras que en la presente investigación se determinó que la adición de un 2% de fibras y la adición de MCS puede reducir hasta un 46% la contracción por secado del concreto en los 5 primeros días, sin embargo únicamente el reforzamiento con un 2% de fibras, se reflejó en apenas un 18% de la reducción en la contracción por secado del concreto a 15 días, es decir, el reforzamiento con un 2% de fibras presentó una influencia en la contracción por secado menor a la esperada de acuerdo a las experiencias previas, esto se puede deber a una distribución no del todo homogénea de las fibras dentro de la matriz de concreto al ser dispuestas de manera aleatoria, por lo cual se puede reducir la efectividad de las fibras en la mitigación de la contracción por secado del concreto .

6. Conclusiones

- El reforzamiento del concreto UHPC con fibras de acero rectas dosificadas al 2% de volumen de concreto reduce la contracción por secado del concreto indiferentemente de los materiales cementantes que lo constituyen. su alto módulo de elasticidad, muchas veces mayor que el de la matriz del concreto conlleva a que resista los esfuerzos internos de tracción inducidos por la contracción del concreto y evitando la deformación excesiva de la masa de concreto y por ende la pérdida de volumen, evitando fisuración y micro fisuración de los elementos.
- La sustitución parcial del cemento y humo de sílice por materiales cementantes suplementarios y en particular por carbonato cálcico y polvo de vidrio reciclado, reduce la contracción por secado del concreto. Se puede observar una reducción de dicha contracción a los 5 días de hasta del 36% para el caso de una dosificación con carbonato cálcico y polvo de vidrio de 28 y 7 micras de diámetro (D3) como sustituyentes parciales de la mezcla de concreto, al reducir estas altas contracciones iniciales se disminuye la posibilidad de formación de fisuras y micro fisuras dentro de la masa del concreto que puedan afectar su resistencia mecánica por la creación de planos débiles que conformen superficies de falla ante cargas impuestas y su durabilidad al permitir el paso de agentes químicos agresivos del ambiente que degraden la masa del concreto
- En las mezclas adicionadas D2 y D3 se redujo la contracción por secado a 5 días en un 25% y 36% respectivamente, recalando el hecho que en ambas dosificaciones se redujo la cantidad de cemento empleado en más de 200 kg/m^3 y el humo de sílice utilizado en más de 170 kg/m^3 para ambas dosificaciones con respecto a la muestra de referencia, lo cual supone una reducción muy importante en los costos del concreto UHPC, a la vez que se reduce la huella de carbono del concreto derivada de la utilización de estos dos compuestos cuya elaboración es altamente contaminante.

- El reforzar un concreto UHPC convencional con un 2% de fibras de acero rectas redujo la contracción del concreto un 10.8% en sus 5 primeros días y un 18.1% para los 15 primeros días de endurecimiento del concreto con respecto a la muestra de referencia, mientras que la sustitución parcial del cemento por carbonato cálcico y polvo de vidrio de 28 y 7 micras, redujo la contracción del concreto en un 36.1% en los 5 primeros días y un 17.8% durante los 15 primeros días, lo cual significa que el reemplazo parcial de la cantidad de cemento y humo de sílice en el concreto puede llegar a ser mucho más efectivo para reducir la contracción por secado inicial del concreto que el reforzamiento con fibras metálicas.
- Las contracciones críticas en el concreto suceden en los primeros días de endurecimiento, donde existe una probabilidad mucho mayor de aparición de fisuras y micro fisuras que afecten la integridad del concreto, por ende, la sustitución parcial del cemento y humo de sílice por MCS es efectiva para reducir en gran medida las contracciones por secado más críticas, disminuyendo así la probabilidad de aparición fisuras y micro fisuras en la masa de concreto.
- Si bien el reforzamiento con fibras de acero y la sustitución parcial del cemento y humo de sílice de la mezcla por separado, logran reducir la contracción por secado del concreto UHPC simple, se determinó que al realizar ambos procedimientos, es decir, los concretos UHPC adicionados y reforzados con fibras, se redujo hasta un 46% la contracción por secado en los primeros 5 días, utilizando como materiales cementantes suplementarios carbonato cálcico y polvo de vidrio de 28 micras de diámetro.
- Una vez comprobado que ambas alternativas reducen la contracción por secado del concreto UHPC se abre un abanico de múltiples opciones para aumentar la durabilidad del concreto según los requerimientos a los cuales van a estar sometidos los elementos, teniendo en cuenta que las nuevas corrientes de diseño civil dejan en un segundo plano las características mecánicas de los materiales (resistencias y módulos) y se centran en optimizar las características de durabilidad de las estructuras ante los esfuerzos y las condiciones ambientales a los que van a estar sometidos, y de esta manera construir estructuras que perduren durante un largo periodo de tiempo, contribuyendo a un sector constructivo más amigable con el medio ambiente y aportando confiabilidad a las estructuras, al garantizar que los materiales y en particular el concreto va a mantener su capacidad resistente durante toda su vida de servicio.

7. Recomendaciones

A toda persona que desee realizar un trabajo de investigación relacionado con la medición de la contracción por secado de elementos de concreto UHPC le realizo las siguientes recomendaciones:

- Disponer de tiempo suficiente para realizar el amasado de concretos UHPC y UHPFRC, pues la alta densidad del concreto conlleva a que su mezclado y vibrado pueda tornarse largo y tedioso.
- Realizar la colocación del concreto en el menor tiempo posible, pues sus cortos tiempos de fraguado conllevan a una alta facilidad en la formación de juntas frías en los elementos, lo cual puede afectar la contracción del elemento alterando los resultados.
- Manipular los elementos de concreto UHPFRC reforzado con fibras metálicas con elementos de seguridad, pues las fibras, al estar aleatoriamente dispuestas pueden sobresalir del elemento y causar lesiones o ser difíciles de manipular para realizar las mediciones.

8. Bibliografía

Nancy Torres (2014). *Estudio en estado fresco y endurecido de concretos adicionados con catalizador de craqueo catalítico usado (FCC)*. Universidad Nacional de Colombia.

Wu, L., Shi, C., Zhang, Z., Wang, H. (2017). *Effects of Steel Fiber on Drying Shrinkage of Ultra High Performance Concrete*.

Hyung-Joo Lee, Seung-Ki Kim, Heon-Seok Lee and Woosuk Kim (2019). *A Study on the Drying Shrinkage and Mechanical Properties of Fiber Reinforced Cement Composites Using Cellulose Nanocrystals*.

Weina Meng, and Kamal H. Khayat, (2018). *Effect of Hybrid Fibers on Fresh Properties, Mechanical Properties, and Autogenous Shrinkage of Cost-Effective UHPC*.

Ghafari, E., Bandarabadi, M., Costa, H., & Júlio, E. (2015). *Prediction of Fresh and Hardened State Properties of UHPC: Comparative Study of Statistical Mixture Design and an Artificial Neural Network Model*. *Journal of Materials in Civil Engineering*.

Ghafari, E., Costa, H., & Júlio, E. (2014). *RSM-based model to predict the performance of self-compacting UHPC reinforced with hybrid steel micro-fibers*. *Construction and Building Materials*, pp. 375–383.

Ghafari, E., Costa, H., & Júlio, E. (2015). *Statistical mixture design approach for eco-efficient UHPC*. *Cement and Concrete Composites*, pp. 17–25.

Oostra, A. J. (2015). *Ultra - high performance fiber - reinforced concrete in incremental bridge launching A study on the application of UHPFRC in the superstructure of an incrementally launched box girder bridge in The Netherlands*.

Park, S. H., Kim, D. J., Ryu, G. S., & Koh, K. T. (2012). *Tensile behavior of ultra high performance hybrid fiber reinforced concrete*. *Cement and Concrete Composites*, pp. 172–184.

Parra-Montesinos, G. J. (2005). *High-performance fiber-reinforced cement composites: An alternative for seismic design of structures*. *ACI Structural Journal*, pp. 668–675.

Serna, P., Lopez, J. A., & Camacho, E. (2012). *UHPFRC : De los componentes a la estructura*. *Anais Do 54o Congresso Brasileiro Do Concreto* pp. 1–21.

Talebinejad, I., Asadollah, S., Iranmanesh, A., & Shekarchizadeh, M. (2004). *Optimizing mix proportions of Normal Weight Reactive Powder Concrete with Strengths of 200 - 350 MPa*. *Proceedings of the International Symposium on Ultra High Performance Concrete*.

- Taylor, C. W., Weldon, B. D., Jáuregui, D. V., & Newtson, C. M. (2013). *Case Studies Using Ultrahigh-Performance Concrete for Prestressed Girder Bridge Design*. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, pp. 261–267.
- E. Ghafari, H. Costa, E. Júlio, A. Portugal, L. Durães (2012). *Enhanced durability of ultra high performance concrete by incorporating supplementary cementitious materials*
- Ricardo Matallana rodriguez, "El concreto, fundamentos y nuevas tecnologías".
- Caijun Shi, Zemei Wu, Jianfan Xiao, Dehui Wang, Zhengyu Huang, Zhi Fan. (2015). *A review on ultra high performace concrete: Part I. Raw materials and mixture design*.
- Zemei Wu, Caijun Shi, Wen He, (2017), *Comparative study on flexural properties of ultra-high performance concrete with supplementary cementitious materials under different curing regimes*.
- Shah, S., & Weiss, W. (1998). *Ultra high strength concrete; Looking toward the future*. In *ACI Special Proceedings from the Paul Zia Symposium Atlanta, GA*.
- J. Abellán, J. Fernández, N. Torres, and A. Núñez, (2020) *Development of cost-efficient UHPC with local materials in Colombia, in Proceedings of Hipermat. 2020 - 5th International Symposium on UHPC and Nanotechnology for Construction Materials, Kassel (Alemania)*
- J. Abellan, Torres, N., Núñez, A., Fernández, J., (2018). *Influencia del exponente de Fuller, la relación agua conglomerante y el contenido en policarboxilato en concretos de muy altas prestaciones. IV Congreso Internacional de Ingeniería Civil. Havana, Cuba*.
- J. Abellan, N. Torres, A. Núñez, J. Fernández, (2018). *Ultra-high performance fiber reinforced concrete: state of the art, applications and possibilities into the latin american market.*"XXXVIII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural. Lima, Peru.
- J. Abellán, J. Fernández, N. Torres, and A. Núñez, (2020) *Statistical Optimization of Ultra-High-Performance glass concrete*.
- J. Abellan, Núñez, A., Torres, N. Fernández J., (2020), *Factorial design reactive concrete poder containing electric arc slag furnace and recycled glass poder*.
- Dong Joo Kim, Seung Hun Park, Gum Sung Ryu, Kyung Taek Koh, (2011). *Comparative flexural behavior of Hybrid Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete with different macro fibers*
- S. Abbas, M. L. Nehdi, M. A. Saleem, (2016), *Ultra-High Performance Concrete: Mechanical Performance, Durability, Sustainability and Implementation Challenges*.
- Huang, Z., and Cao, F., "Effects of Nano-Materials on the Performance of UHPC," *Materials*

- Review, V. 26, No. 9, (2012).*
- W.Z. Zhu, J.C. Gibbs, Use of different limestone and chalk powders in selfcompacting concrete, cem. Concr. Res. 35 (8) (2005).*
- M. Nehdi, S. Mindess, P.C Aitcin, Optimization of high strength limestone filler cement mortars, cem. Concr. Res, 26. (1996)*
- M. M. Reda, N.G. Shrive, J.E. Gillott, Microstructural investigation of innovative UHPC, Cem. Concr. Res. (1999).*
- T. Xie, C. Fang, M.S. Mohamad Ali, P. Visintin, (2018) Characterizations of autogenous and drying shrinkage of ultra-high performance concrete (UHPC): An experimental study.*
- F. Ekkehard, S. Michael, W. Joosr, L. Torsten, F. Susanne, (2014), Ultra-high performance concrete UHPC fundamentals, design, examples, Ernst & Sohn.*
- Abbas, S., M. L. Nehdi, and M. A. Saleem. 2016. "Ultra-High Performance Concrete: Mechanical Performance, Durability, Sustainability and Implementation Challenges." International Journal of Concrete Structures and Materials 10(3).*

Anexo: Contracción por secado de los especímenes

Medidas de los especímenes con respecto a la medida de referencia a diferentes días de ensayo [mm]

Edad (Días)	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Calibración	1.858	1.864	1.87	1.868	1.858	1.856	1.850	1.850	1.851
REF-01									
Medida 1	-2.280	-2.256	-2.222	-2.214	-2.182	-2.177	-2.172	-2.144	-2.148
Medida 2	-2.270	-2.250	-2.230	-2.222	-2.190	-2.175	-2.160	-2.152	-2.142
REF-02									
Medida 1	-3.962	-3.925	-3.888	-3.862	-3.852	-3.836	-3.836	-3.830	-3.818
Medida 2	-3.958	-3.921	-3.884	-3.858	-3.848	-3.832	-3.834	-3.828	-3.815
REF-2%LO-01									
Medida 1	-2.024	-1.989	-1.954	-1.934	-1.926	-1.912	-1.912	-1.897	-1.867
Medida 2	-2.016	-1.982	-1.948	-1.928	-1.920	-1.908	-1.908	-1.893	-1.863
REF-2%LO-02									
Medida 1	-2.754	-2.723	-2.692	-2.666	-2.660	-2.644	-2.650	-2.646	-2.637
Medida 2	-2.744	-2.712	-2.680	-2.658	-2.648	-2.638	-2.642	-2.634	-2.618
D-02-01									
Medida 1	-2.732	-2.714	-2.700	-2.650	-2.638	-2.643	-2.648	-2.628	-2.616
Medida 2	-2.724	-2.700	-2.690	-2.644	-2.652	-2.646	-2.640	-2.636	-2.628
D-02-02									
Medida 1	-3.808	-3.758	-3.736	-3.714	-3.688	-3.688	-3.688	-3.616	-3.648
Medida 2	-3.780	-3.746	-3.724	-3.702	-3.670	-3.664	-3.658	-3.630	-3.630
REF-2%-02-01									
Medida 1	-1.856	-1.836	-1.820	-1.804	-1.772	-1.776	-1.780	-1.732	-1.752
Medida 2	-1.862	-1.830	-1.815	-1.800	-1.786	-1.780	-1.774	-1.726	-1.746
REF-2%-02-02									
Medida 1	-2.748	-2.718	-2.704	-2.689	-2.656	-2.658	-2.660	-2.600	-2.624
Medida 2	-2.740	-2.704	-2.687	-2.670	-2.664	-2.655	-2.646	-2.612	-2.616
D3-01									
Medida 1	-3.630	-3.611	-3.592	-3.556	-3.524	-3.520	-3.508	-3.492	-3.489
Medida 2	-3.622	-3.605	-3.588	-3.530	-3.532	-3.526	-3.542	-3.486	-3.481
D3-02									
Medida 1	-3.988	-3.983	-3.978	-3.974	-3.968	-3.968	-3.952	-3.940	-3.939
Medida 2	-3.984	-3.984	-3.984	-3.972	-3.976	-3.972	-3.950	-3.956	-3.948
D3-2%-01									
Medida 1	-3.938	-3.928	-3.918	-3.892	-3.874	-3.870	-3.856	-3.820	-3.814
Medida 2	-3.930	-3.919	-3.908	-3.862	-3.858	-3.850	-3.840	-3.840	-3.831
D3-2%-02									
Medida 1	-3.988	-3.979	-3.969	-3.946	-3.964	-3.950	-3.950	-3.954	-3.944

Medida 2	-3.998	-3.992	-3.986	-3.956	-3.956	-3.954	-3.946	-3.930	-3.942
Edad (Días)	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Calibración	1.852	1.858	1.866	1.869	1.872	1.882	1.875	1.868	1.892
REF-01									
Medida 1	-2.142	-2.128	-2.130	-2.133	-2.134	-2.116	-2.122	-2.120	-2.118
Medida 2	-2.152	-2.136	-2.134	-2.129	-2.126	-2.122	-2.130	-2.128	-2.124
REF-02									
Medida 1	-3.812	-3.800	-3.788	-3.783	-3.778	-3.762	-3.771	-3.780	-3.766
Medida 2	-3.808	-3.796	-3.784	-3.779	-3.774	-3.766	-3.772	-3.778	-3.768
REF-2%LO-01									
Medida 1	-1.852	-1.870	-1.864	-1.859	-1.854	-1.838	-1.845	-1.852	-1.824
Medida 2	-1.848	-1.874	-1.858	-1.853	-1.848	-1.842	-1.849	-1.856	-1.826
REF-2%LO-02									
Medida 1	-2.632	-2.608	-2.590	-2.592	-2.594	-2.580	-2.589	-2.598	-2.564
Medida 2	-2.610	-2.600	-2.596	-2.591	-2.586	-2.572	-2.580	-2.588	-2.554
D-02-01									
Medida 1	-2.618	-2.606	-2.607	-2.608	-2.608	-2.584	-2.604	-2.590	-2.584
Medida 2	-2.628	-2.598	-2.598	-2.598	-2.598	-2.594	-2.590	-2.600	-2.596
D-02-02									
Medida 1	-3.654	-3.626	-3.622	-3.629	-3.636	-3.600	-3.600	-3.606	-3.595
Medida 2	-3.630	-3.602	-3.610	-3.608	-3.606	-3.620	-3.630	-3.622	-3.608
REF-2%-02-01									
Medida 1	-1.758	-1.731	-1.722	-1.729	-1.736	-1.720	-1.722	-1.726	-1.702
Medida 2	-1.746	-1.754	-1.716	-1.723	-1.730	-1.732	-1.728	-1.722	-1.710
REF-2%-02-02									
Medida 1	-2.630	-2.616	-2.600	-2.601	-2.602	-2.596	-2.605	-2.600	-2.594
Medida 2	-2.618	-2.596	-2.588	-2.600	-2.612	-2.608	-2.592	-2.612	-2.600
D3-01									
Medida 1	-3.486	-3.468	-3.466	-3.466	-3.464	-3.463	-3.460	-3.458	-3.436
Medida 2	-3.476	-3.484	-3.478	-3.470	-3.458	-3.457	-3.454	-3.452	-3.446
D3-02									
Medida 1	-3.938	-3.922	-3.920	-3.920	-3.896	-3.899	-3.904	-3.906	-3.894
Medida 2	-3.940	-3.932	-3.930	-3.930	-3.920	-3.916	-3.907	-3.902	-3.902
D3-2%-01									
Medida 1	-3.808	-3.790	-3.784	-3.784	-3.785	-3.784	-3.781	-3.780	-3.760
Medida 2	-3.822	-3.804	-3.792	-3.802	-3.792	-3.791	-3.789	-3.788	-3.776
D3_2%-02									
Medida 1	-3.934	-3.942	-3.940	-3.944	-3.902	-3.903	-3.904	-3.904	-3.888
Medida 2	-3.954	-3.920	-3.916	-3.914	-3.906	-3.909	-3.915	-3.918	-3.910

Edad (Días)	19	20	21	22	23	24	25	26	27
Calibración	1.868	1.862	1.868	1.88	1.87	1.860	1.868	1.86	1.854
REF-01									
Medida 1	-2.086	-	-	-	-	-	-	-	-
Medida 2	-2.098	-	-	-	-	-	-	-	-
REF-02									
Medida 1	-3.758	-3.758	-3.758	-3.768	-3.768	-3.768	-3.760	-3.768	-3.764
Medida 2	-3.768	-3.766	-3.762	-3.754	-3.758	-3.762	-3.730	-3.762	-3.778
REF-2%LO-01									
Medida 1	-1.844	-1.860	-1.832	-1.864	-1.852	-1.840	-1.838	-1.846	-1.844
Medida 2	-1.846	-1.852	-1.836	-1.862	-1.854	-1.846	-1.846	-1.840	-1.848
REF-2%LO-02									
Medida 1	-2.586	-2.596	-2.580	-2.574	-2.581	-2.588	-2.576	-2.578	-2.574
Medida 2	-2.580	-2.590	-2.582	-2.568	-2.575	-2.582	-2.590	-2.588	-2.590
D-02-01									
Medida 1	-2.562	-	-	-	-	-	-	-	-
Medida 2	-2.546	-	-	-	-	-	-	-	-
D-02-02									
Medida 1	-3.596	-3.597	-3.598	-3.608	-3.618	-3.612	-3.594	-3.576	-
Medida 2	-3.610	-3.613	-3.614	-3.590	-3.600	-3.596	-3.610	-3.560	-
REF-2%-02-01									
Medida 1	-1.707	-1.716	-1.720	-1.716	-1.728	-1.716	-1.722	-1.692	-
Medida 2	-1.715	-1.724	-1.728	-1.710	-1.720	-1.726	-1.714	-1.682	-
REF-2%-02-02									
Medida 1	-2.595	-2.596	-2.596	-2.594	-2.602	-2.584	-2.594	-2.562	-
Medida 2	-2.598	-2.593	-2.590	-2.578	-2.590	-2.596	-2.584	-2.550	-
D3-01									
Medida 1	-3.448	-3.444	-3.444	-3.410	-	-	-	-	-
Medida 2	-3.450	-3.450	-3.436	-3.404	-	-	-	-	-
D3-02									
Medida 1	-3.912	-3.902	-3.904	-3.870	-	-	-	-	-
Medida 2	-3.906	-3.910	-3.880	-3.866	-	-	-	-	-
D3-2%-01									
Medida 1	-3.782	-3.768	-3.780	-3.748	-	-	-	-	-
Medida 2	-3.770	-3.762	-3.762	-3.728	-	-	-	-	-
D3_2%-02									
Medida 1	-3.904	-3.902	-3.924	-3.888	-	-	-	-	-
Medida 2	-3.930	-3.930	-3.898	-3.864	-	-	-	-	-

Edad (Días)	28	29	30	31	32	33	34	35	36
Calibración	1.858	1.856	1.856	1.854	1.862	1.842	1.842	1.842	1.875
REF-01									
Medida 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Medida 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
REF-02									
Medida 1	-3.758	-3.761	-3.767	-3.770	-3.752	-3.770	-3.760	-3.762	-3.726
Medida 2	-3.756	-3.758	-3.761	-3.762	-3.754	-3.764	-3.766	-3.760	-3.744
REF-2%LO-01									
Medida 1	-1.836	-1.838	-1.842	-1.844	-1.828	-1.838	-1.836	-1.840	-1.800
Medida 2	-1.832	-1.834	-1.837	-1.838	-1.834	-1.844	-1.840	-1.836	-1.796
REF-2%LO-02									
Medida 1	-2.564	-2.568	-2.575	-2.578	-2.568	-2.586	-2.576	-2.570	-2.546
Medida 2	-2.558	-2.566	-2.581	-2.588	-2.576	-2.580	-2.584	-2.574	-2.538
D-02-01									
Medida 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Medida 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D-02-02									
Medida 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Medida 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
REF-2%-02-01									
Medida 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Medida 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
REF-2%-02-02									
Medida 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Medida 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-01									
Medida 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Medida 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-02									
Medida 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Medida 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3-2%-01									
Medida 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Medida 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3_2%-02									
Medida 1	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Medida 2	-	-	-	-	-	-	-	-	-

**Medidas en milímetros*

Contracción unitaria promedio de las muestras [mm/mm]

Edad (Días)	0	1	2	3	4	5	6	7	8
REF	0.000E+00	-1.283E-04	-2.350E-04	-2.850E-04	-3.517E-04	-4.150E-04	-4.567E-04	-4.829E-04	-5.204E-04
REF 2%OL	0.000E+00	-9.000E-05	-1.800E-04	-2.600E-04	-3.200E-04	-3.700E-04	-3.817E-04	-4.423E-04	-4.560E-04
D2	0.000E+00	-9.833E-05	-1.600E-04	-2.617E-04	-2.767E-04	-3.108E-04	-3.450E-04	-3.950E-04	-4.383E-04
D2 2%OL	0.000E+00	-5.500E-05	-9.708E-05	-1.392E-04	-1.767E-04	-2.075E-04	-2.383E-04	-3.167E-04	-3.400E-04
D3	0.000E+00	-5.750E-05	-1.150E-04	-1.267E-04	-2.333E-04	-2.650E-04	-2.733E-04	-2.983E-04	-3.458E-04
D3 2%OL	0.000E+00	-5.375E-05	-1.075E-04	-1.317E-04	-2.150E-04	-2.583E-04	-2.650E-04	-2.650E-04	-3.092E-04

Edad (Días)	9	10	11	12	13	14	15	16	17
REF	-5.367E-04	-5.650E-04	-5.742E-04	-5.825E-04	-5.883E-04	-5.967E-04	-6.175E-04	-6.200E-04	-6.050E-04
REF 2%OL	-5.167E-04	-4.883E-04	-4.983E-04	-4.992E-04	-5.000E-04	-5.083E-04	-5.058E-04	-5.033E-04	-5.283E-04
D2	-4.517E-04	-5.167E-04	-4.946E-04	-5.096E-04	-5.233E-04	-5.383E-04	-5.633E-04	-5.783E-04	-6.008E-04
D2 2%OL	-3.483E-04	-3.742E-04	-3.933E-04	-4.042E-04	-4.150E-04	-4.083E-04	-4.425E-04	-4.517E-04	-4.833E-04
D3	-3.933E-04	-3.950E-04	-4.317E-04	-4.583E-04	-4.850E-04	-4.925E-04	-5.075E-04	-5.150E-04	-5.217E-04
D3 2%OL	-3.533E-04	-3.783E-04	-4.250E-04	-4.350E-04	-4.708E-04	-4.731E-04	-4.777E-04	-4.800E-04	-5.000E-04

Edad (Días)	18	19	20	21	22	23	24	25	26
REF	-6.450E-04	-6.467E-04	-6.333E-04	-5.900E-04	-6.167E-04	-6.433E-04	-6.833E-04	-6.433E-04	-6.433E-04
REF 2%OL	-5.350E-04	-5.200E-04	-5.567E-04	-4.850E-04	-5.233E-04	-5.617E-04	-5.400E-04	-5.650E-04	-5.817E-04
D2	-6.056E-04	-5.738E-04	-5.733E-04	-5.700E-04	-6.033E-04	-6.200E-04	-6.267E-04	-6.300E-04	-
D2 2%OL	-4.808E-04	-4.758E-04	-4.733E-04	-4.767E-04	-5.083E-04	-5.233E-04	-5.300E-04	-5.267E-04	-
D3	-5.567E-04	-5.650E-04	-6.000E-04	-5.850E-04	-	-	-	-	-
D3 2%OL	-5.233E-04	-5.433E-04	-5.417E-04	-5.450E-04	-	-	-	-	-

Edad (Días)	27	28	29	30	31	32	33	34	35
REF	-6.767E-04	-6.725E-04	-6.642E-04	-6.600E-04	-6.767E-04	-6.967E-04	-7.100E-04	-7.167E-04	-6.933E-04
REF 2%OL	-6.233E-04	-6.146E-04	-5.971E-04	-5.883E-04	-5.967E-04	-6.283E-04	-6.383E-04	-6.517E-04	-6.583E-04
D2	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D2 2%OL	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
D3 2%OL	-	-	-	-	-	-	-	-	-