

ESCUELA
COLOMBIANA
DE INGENIERÍA
JULIO GARAVITO

**AVANCES, PRESTACIONES MECÁNICAS, PRODUCCIÓN,
DESARROLLO NORMATIVO, RETOS Y APLICACIONES
DE LOS CONCRETOS DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES**

DIANA MARCELA SUÁREZ LINEROS

Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría en Ingeniería Civil

Bogotá D.C, Colombia

2024

**AVANCES, PRESTACIONES MECÁNICAS, PRODUCCIÓN, DESARROLLO
NORMATIVO, RETOS Y APLICACIONES DE LOS CONCRETOS DE ULTRA
ALTAS PRESTACIONES**

DIANA MARCELA SUÁREZ LINEROS

Tesis o trabajo de investigación presentada(o) como requisito parcial para optar al
título de:

Magíster en Ingeniería Civil

Directora:

Nancy Torres Castellanos Ph.D.

Línea de Investigación:

Comportamiento de Materiales de Construcción

Universidad Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito

Maestría en Ingeniería Civil

Bogotá D.C, Colombia

2024

La tesis de maestría titulada “AVANCES, PRESTACIONES MECÁNICAS, PRODUCCIÓN, DESARROLLO NORMATIVO, RETOS Y APLICACIONES DE LOS CONCRETOS DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES”, presentada por Diana Marcela Suárez Lineros, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Ingeniería Estructural.

Nancy Torres Castellanos Ph.D.

Directora

Camilo José Vega Vargas Ph.D.

Jurado

Álvaro Guzmán Aponte Ph.D.

Jurado

Bogotá D.C., 01 de agosto de 2024

A mi mami y mi hermana,

Mis pilares, mi inspiración y mi guía.

Gracias por creer en mí y apoyarme incondicionalmente.

AGRADECIMIENTOS

A mi directora de trabajo de grado, Doctora Nancy Torres Castellanos, por su dedicación y guía durante el desarrollo de la investigación, por compartir sus conocimientos y su apoyo.

A la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito por formarme académicamente en un ambiente de excelencia y dedicación. Agradezco a los profesores y al personal administrativo por su compromiso y por haber contribuido de manera significativa a mi crecimiento profesional.

A mis compañeros de estudio, gracias por los momentos compartidos, por su amistad y colaboración. Juntos hemos superado retos y celebrado logros, construyendo recuerdos que llevaré siempre conmigo.

RESUMEN

El concreto de tipo UHPC, por sus siglas en inglés 'Ultra High Performance Concrete', representa una evolución significativa en el campo de los materiales y las estructuras. Gracias a su composición, es capaz de alcanzar resistencias a compresión superiores a 150 MPa, posee ductilidad a la tracción, un elevado módulo de elasticidad y una durabilidad superior a la de los concretos convencionales.

En este trabajo de grado, se examina la información bibliográfica disponible hasta la actualidad, abarcando desde los conceptos básicos de qué es el UHPC y la historia de su desarrollo, logrando así entender el surgimiento y la evolución de este novedoso material. También se destacan las propiedades mecánicas del material y cómo, a través de los diferentes enfoques de los diseños de mezcla, se logra alcanzar estas propiedades.

Asimismo, se aborda la producción del UHPC, revisando los componentes más comunes y cómo estos influyen en el desarrollo de las propiedades y características de las mezclas. Se presenta también el desarrollo normativo del material, comparando las premisas y consideraciones de diseño indicadas en las normativas existentes de tres países diferentes. Finalmente, se exploran las diversas alternativas para la aplicación de estos concretos en la construcción, incluyendo su uso en infraestructuras, elementos prefabricados, elementos no estructurales y otras aplicaciones.

Palabras clave: UHPC, diseño de mezcla, normas de diseño, aplicaciones.

ABSTRACT

Ultra High Performance Concrete (UHPC) represents a significant evolution in the field of materials and structures. Thanks to its composition, it is capable of reaching compressive strengths above 150 MPa, has tensile ductility, a high modulus of elasticity, and a durability superior to that of conventional concretes.

In this thesis, the bibliographic information available to date is examined, covering the basic concepts of what UHPC is and the history of its development, thus understanding the emergence and evolution of this novel material. It also highlights the mechanical properties of the material and how these properties are achieved through different approaches to mix designs.

The production of UHPC is also addressed, reviewing the most common components and how they influence the development of the properties and characteristics of the blends. The regulatory development of the material is presented as well, comparing the premises and design considerations indicated in the existing regulations of three different countries. Finally, the various alternatives for the application of these concretes in construction are explored, including their use in infrastructure, prefabricated elements, non-structural elements, and other applications.

Key words: UHPC, mix design, design standards, applications.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1 INTRODUCCIÓN	15
2 OBJETIVOS	17
2.1 OBJETIVO GENERAL	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3 METODOLOGÍA DE DESARROLLO	18
3.1 DEFINICIÓN DEL OBJETIVO	18
3.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	18
3.3 CLASIFICACIÓN Y ORGANIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN	19
3.4 SÍNTESIS Y COMPARACIÓN	19
3.5 ELABORACIÓN DEL DOCUMENTO	19
4 ¿QUÉ SON LOS CONCRETOS DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES?	21
4.1 HISTORIA DEL SURGIMIENTO DE LOS MATERIALES CEMENTICIOS	21
4.2 DEFINICIONES DE LOS CONCRETOS DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES	28
5 COMPONENTES Y DOSIFICACIONES DE LOS CONCRETOS DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES	32
5.1 CEMENTO PORTLAND	32
5.2 MATERIALES CEMENTANTES SUPLEMENTARIOS	34
5.2.1 METAKAOLÍN	37
5.2.2 CENIZAS VOLANTES	38
5.2.3 ESCORIAS	39
5.2.4 POLVO DE PIEDRA CALIZA	41
5.3 SUPERPLASTIFICANTES	43
5.4 FIBRAS	47
5.5 AGREGADOS	51
6 DISEÑOS DE MEZCLA DE LOS CONCRETOS DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES 54	
6.1 MÉTODO DE EMPAQUETAMIENTO	54
6.1.1 MODELOS DE EMPAQUETAMIENTO EN ESTADO SECO	55
6.1.2 MODELOS DE EMPAQUETAMIENTO COMPACTOS QUE CONSIDERAN EL ESTADO HÚMEDO DE LAS PARTÍCULAS	60

6.2	MÉTODO BASADO EN LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS DE LA MEZCLA....	61
6.3	MÉTODO DE DISEÑO ESTADÍSTICO DE MEZCLAS.....	63
6.4	DISEÑO DE MEZCLA CON EL MÉTODO DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES.....	66
7	PRODUCCIÓN DE LOS CONCRETOS DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES.....	70
8	PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS CONCRETOS DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES	72
8.1	ESFUERZO A COMPRESIÓN	72
8.2	MÓDULO DE ELASTICIDAD.....	74
8.3	ESFUERZO A TRACCIÓN.....	76
8.4	DURABILIDAD.....	78
9	HUELLA DE CARBONO DE LOS CONCRETOS DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES	80
10	DESARROLLO NORMATIVO DE LOS CONCRETOS DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES	82
10.1	ESTADOS UNIDOS.....	83
10.1.1	GENERALIDADES DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS	83
10.1.2	GENERALIDADES DEL DISEÑO ESTRUCTURAL DE ELEMENTOS CON UHPC	85
10.2	FRANCIA.....	87
10.2.1	GENERALIDADES DEL COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN	87
10.2.2	GENERALIDADES DEL COMPORTAMIENTO A TENSIÓN.....	88
10.3	CHINA	91
10.3.1	GENERALIDADES DEL COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN	92
10.3.2	GENERALIDADES DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO A TENSIÓN.....	93
11	USOS Y APLICACIONES DE LOS CONCRETOS DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES	96
11.1	PUENTES.....	96
11.1.1	PUENTE SHERBROOKE EN QUEBEC, CANADÁ.....	96
11.1.2	PUENTE MARS HILL EN EL CONDADO DE WAPELLO	97
11.1.3	PUENTE BOURG-LÈS-EN VALENCE – FRANCIA.....	98
11.1.4	PUENTE SAKATA-MIRAI EN JAPÓN.....	98
11.2	EDIFICACIONES Y ESTRUCTURAS.....	99

11.2.1	FUNDACIÓN LOUIS VUITTON EN FRANCIA.....	99
11.2.2	EDIFICIO LEOPOLDO EN SAO PAULO – BRASIL.....	100
11.2.3	WORLD TRADE CENTER EN BALLERUP, DINAMARCA	101
11.2.4	TORRES EÓLICAS	102
11.3	ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES	103
11.4	REFORZAMIENTOS ESTRUCTURALES	104
11.5	APLICACIONES EN COLOMBIA.....	105
11.5.1	PASARELA UNIVERSIDAD EAFIT	106
11.5.2	PUENTE UNIVERSIDAD NACIONAL MANIZALES	107
11.5.3	FACHADA UHPC TORRE ANTEJARDÍN	108
11.5.4	FACHADA AEROPUERTO INTERNACIONAL SIMÓN BOLÍVAR.....	109
12	INVESTIGACIONES DESARROLLADAS EN COLOMBIA	111
12.1	INFLUENCIA DEL PROCESO DE FABRICACIÓN SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS CONCRETOS UHPC	111
12.2	PLACAS DE CONCRETO UHPC COMO SOLUCIÓN PARA PISOS EN ESTACIONES DE TRANSMILENIO.....	111
12.3	INFLUENCIA DEL EXPONENTE DE FULLER, LA RELACIÓN AGUA CONGLOMERANTE Y EL CONTENIDO EN POLICARBOXILATO EN LAS PROPIEDADES DE CONCRETOS DE MUY ALTAS PRESTACIONES.....	112
12.4	PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD DE CONCRETOS DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES (UHPC), CON DIFERENTES MATERIALES CEMENTANTES SUPLEMENTARIOS	113
12.5	CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPEÑO CON CENIZA VOLANTE LOCAL CON ALTO CONTENIDO DE INQUEMADOS.....	113
12.6	COMPORTAMIENTO A LA FATIGA DE CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPEÑO REFORZADO CON FIBRA COMO UNA ALTERNATIVA EN LA REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS FLEXIBLES.....	114
12.7	ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE CONCRETOS TIPO UHPC Y UHPFRC CON ALTO VOLUMEN DE VIDRIO RECICLADO.....	114
13	FUTUROS RETOS DE LOS CONCRETOS DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES	116
14	CONCLUSIONES.....	118
15	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	120

LISTADO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 4-1 Imágenes de los planos de falla de las muestras recolectadas (Mallinowski & Garfinkel, 1991).	22
Figura 4-2 Cúpula templo panteón, Roma – año 127	23
Figura 4-3 Línea de tiempo de la creación del UHPC, adaptado (Amran et al., 2022).....	27
Figura 4-4 Tipos diferentes de concretos especiales, adaptado (Akhnoukh & Buckhalter, 2021).	30
Figura 5-1 Diagrama ternario de los materiales cementantes (Lothenbach et al., 2011)..	35
Figura 5-2 Resistencia a la compresión a 28 días de diferentes mezclas de UHPC considerando el reemplazo parcial de cemento por MCS (Park et al., 2021).	37
Figura 5-3 Desarrollo de la resistencia a la compresión en UHPC con escoria de acero (Zhang et al., 2019).	40
Figura 5-4 Efecto de la escoria de litio en la resistencia a compresión del UHPC (He et al., 2018).	41
Figura 5-5 Clasificación de los superplastificantes, según normativa europea EN 934.2 (Bragulat, 2021).	44
Figura 5-6 Tiempos de fraguado de las pastas (P. P. Li et al., 2016).	45
Figura 5-7 Tiempos de fraguado de las pastas (P. P. Li et al., 2016).	46
Figura 5-8 Observación de la unión fibra-matriz en microscopio electrónico de barrido (Hannawi et al., 2015).....	48
Figura 5-9 Resistencia a la compresión y a la flexión a los 28 días de las mezclas de UHPC investigadas hechas con diferentes volúmenes de fibra y contenidos de exopolisacárido (biopolímeros) (Teng et al., 2020).	49
Figura 5-10 Tipos de fibra de acero (Yan et al., 2021)	50
Figura 5-11 Efecto del contenido de ligante en la resistencia a compresión para diferentes tipos de arena (El-Mir et al., 2022).	52
Figura 6-1 Primicia base de la investigación de Furnas. Elaboración propia.	55
Figura 6-2 Empaquetamiento experimental y estimado. (Goltermann et al., 1997)	57
Figura 6-3 Método de diseño de mezcla iterativo basado en la densidad de empaquetamiento de partículas (Zhou et al., 2021c).	60
Figura 6-4 Cambios en la dispersión de fibras y coeficientes de orientación de UHPFRC con viscosidad plástica a diversos contenidos de fibra (Teng et al., 2020).	63
Figura 6-5 Pasos de metodología de diseño basada en Superficies de Respuesta (Zhou et al., 2021c).	65

Figura 6-6 Gráficos de contorno de la resistencia a la compresión y del asentamiento del UHPC con diferentes tipos y contenidos de materiales cementantes (Ghafari et al., 2015).	66
Figura 6-7 Estructura de los modelos RNA, (a) Modelo RNA de resistencia a la compresión, (b) Modelo RNA de resistencia a la flexión (Qu et al., 2018).	67
Figura 6-8 Diagrama de caja bivariado para las variables de resistencia a la compresión y contenido de agua (Abellán, 2021).	68
Figura 8-1 (a) Comportamiento a compresión del UHPC y del concreto convencional; (b) Comportamiento a compresión prepico del UHPC a diferentes edades (El-Helou et al., 2022b).	73
Figura 8-2 Modelo de esfuerzo – deformación a compresión propuesto para el diseño de UHPC (El-Helou et al., 2022b).	74
Figura 8-3 Relación entre la resistencia a la compresión y el módulo elástico (El-Helou et al., 2022b).	75
Figura 8-4 (a) Configuración del ensayo de tracción mediante la técnica DIC (Correlación de imágenes digitales); (b) Respuesta de esfuerzo-deformación a tracción y campo de deformación del UHPC en comparación con el concreto convencional; y (c) Patrón de fisuras al final del ensayo de tracción del UHPC (El-Helou et al., 2022b).	76
Figura 8-5 (a) Ejemplos de tendencias de esfuerzo-deformación de tracción características de materiales de clase UHPC; y modelos de tensión-deformación de tracción idealizados para: (b) endurecimiento por deformación con meseta de esfuerzo; y (c) endurecimiento por deformación con aumento continuo del esfuerzo posterior a la fisuración.	78
Figura 10-1 Ejemplos de comportamiento a tracción del concreto convencional, FRC y UHPC (ACI Committee 239, 2018b).	84
Figura 10-2 Ejemplo de relaciones constitutivas para el UHPC en el estado límite último, a) compresión; y(b) Endurecimiento por deformación en tensión. Adaptado. (ACI Committee 239, 2018b).	86
Figura 10-3 Relaciones constitutivas de flexión, a) UHPC y b) Concreto convencional. Adaptado. (ACI Committee 239, 2018b).	86
Figura 10-4 Modelo experimental del esfuerzo a compresión (Groupe de travail BFUP, 2013).	88
Figura 10-5 Modelos constitutivos a tensión a) Material con endurecimiento por deformación, b) Material con bajo endurecimiento por deformación y c) Material con ablandamiento por deformación (Groupe de travail BFUP, 2013).	89
Figura 10-6 Ejemplo de probetas extraídas para determinar el factor K en diferentes direcciones (Groupe de travail BFUP, 2013).	89
Figura 10-7 Ejemplo de aplicación del factor K (Groupe de travail BFUP, 2013).	90

Figura 10-8 Modelo esfuerzo – deformación a compresión uniaxial de concreto UHPC (Asociación de Normalización de la Construcción de Ingeniería de China, 2020).....	93
Figura 10-9 Comportamiento del UHPFRC a tensión (Asociación de Normalización de la Construcción de Ingeniería de China, 2020).	94
Figura 11-1 Primer puente en UHPC construido en el mundo, Quebec – Canadá (Federal Highway Administration, 2013).	97
Figura 11-2 Primer puente en UHPC construido en Estados Unidos, Iowa – USA (Federal Highway Administration, 2013).	97
Figura 11-3 Primer puente tipo carretera en Valence - Francia (Toutlemonde et al., 2013).	98
Figura 11-4 Puente Sakata Mirai – Japón (Tanaka et al., 2009)	99
Figura 11-5 Fundación Louis Vuitton – Francia (Azmeem & Shafiq, 2018).	100
Figura 11-6 Edificio Leopoldo en Sao Paulo – Brasil (Schokker, 2022).....	101
Figura 11-7 Edificio World Trade Center – Dinamarca (Hi-con, 2022).....	102
Figura 11-8 Render torres eólicas en UHPC (Lewin, 2010).....	103
Figura 11-9 Configuraciones de reforzamiento de vigas con UHPC (Zhu et al., 2020)...	105
Figura 11-10 Puente peatonal, Universidad EAFIT (Grupo Argos, 2019a).....	107
Figura 11-11 Puente peatonal UNAL Manizales (Céspedes, 2021)	108
Figura 11-12 Fachada en UHPC Edificio Antejardín (Cimbrados, 2020).	109
Figura 11-13 Fachada aeropuerto internacional Simón Bolívar (Acosta, 2017).....	110

LISTADO DE TABLAS

	Pág.
Tabla 4.1 Propiedades del UHPC según ASTM (Akhnoukh & Buckhalter, 2021).....	29
Tabla 4.2 Propiedades de diferentes concretos especiales (Marvila et al., 2021).	31
Tabla 5.1 Composición química cemento Portland tipo I y III (Ahmad et al., 2020; P. Li et al., 2023).....	33
Tabla 6.1 Resumen de modelos discretos de empaquetamiento de partículas (Zhou et al., 2021c)	58
Tabla 8.1 Comparación entre el concreto convencional y el UHPC. Adaptado de (ACI Committee 239, 2018a)	72
Tabla 11.1 Especificaciones técnicas concreto avanzado – Argos (Grupo Argos, 2019b).	106

1 INTRODUCCIÓN.

La industria concretera se encuentra en un estado constante de evolución, buscando continuamente transformar los concretos tradicionales en otros concretos que ofrezcan un rendimiento superior a los que actualmente han sido formulados. En esta búsqueda, los concretos de ultra Altas Prestaciones 'UHPC' por sus siglas en inglés 'Ultra High Performance Concrete' y los concretos de ultra altas prestaciones reforzados con fibra 'UHPFRC' por sus siglas en inglés 'Ultra High Performance Reinforced Fiber Concrete', han surgido como unos materiales revolucionarios que han redefinido los límites de las capacidades mecánicas de los concretos convencionales (Mishra & Singh, 2019), (El-Helou et al., 2022a). El UHPC/UHPFRC supera al concreto tradicional con su alta resistencia, durabilidad y ductilidad sin precedentes, abriendo nuevas posibilidades para los proyectos arquitectónicos y estructurales (Gannon, 2016). El UHPC/UHPFRC es elaborado mediante la selección cuidadosa de cada uno de sus componentes, proporciones precisas de cada uno de ellos y avanzadas técnicas de mezclado. Este material compuesto presenta una microestructura densa y homogénea que lo hace extraordinariamente resistente a factores ambientales como la humedad, la abrasión y la exposición a ambientes agresivos. (Akhnoukh & Buckhalter, 2021).

Para garantizar la fiabilidad e integridad de las estructuras construidas con UHPC/UHPFRC, se han establecido guías y directrices que abarcan la composición del material, los procedimientos de mezcla, los métodos de curado y los requisitos de rendimiento estructural. El cumplimiento de estas normas es imprescindible para aprovechar plenamente el potencial del UHPC/UHPFRC en diversas aplicaciones de construcción. Sin embargo, en Colombia aún no se cuenta con una especificación técnica que indique el proceso de dosificación y elaboración, así como tampoco una para la aplicación correcta de este material.

A medida que la construcción sigue evolucionando, la exploración y la utilización del UHPC/UHPFRC sigue posicionándose y participando de los avances transformadores, remodelando el panorama de las infraestructuras modernas y el diseño arquitectónico. El objetivo de este trabajo de grado es proporcionar un conocimiento amplio del UHPC/UHPFRC, abarcando sus consideraciones y premisas de diseño estructural, diseños de mezcla prestaciones mecánicas, y aplicaciones prácticas, contribuyendo así al estado del conocimiento en torno a este revolucionario material de construcción

En los siguientes capítulos se abordarán temas que abarcan desde las bases del UHPC/UHPFRCR, la historia de su surgimiento y sus conceptos básicos, así como los diseños de mezcla y sus propiedades mecánicas, desarrollo normativo y sus aplicaciones.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Establecer los avances de las propiedades mecánicas, diseño de mezcla, normativas, retos y usos a nivel global y local, de los concretos de ultra altas prestaciones.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Identificar las ventajas y desventajas del comportamiento mecánico de los concretos de ultra altas prestaciones.
- Conocer los avances de las normativas o guías de diseño, de los países con mayor desarrollo de investigaciones e implementación de los concretos de ultra altas prestaciones.
- Registrar las diversas aplicaciones de los concretos de ultra altas prestaciones en estructuras que existen actualmente a nivel mundial.
- Consignar las investigaciones más recientes, enfocadas en el marco de futuras aplicaciones de los concretos UHPC.

3 METODOLOGÍA DE DESARROLLO

El estado del arte tiene como objetivo la circulación de la información, generando demanda de conocimiento y estableciendo comparaciones en conocimientos paralelos (Nancy, 2005). Adicional, puede ser abordado desde 3 grandes pasos: Contextualización, clasificación y categorización, completados por una fase de análisis.

El procedimiento en el cual se basa el desarrollo de esta investigación abarca una fase heurística, en donde se busca e indaga fuentes de referencias bibliográficas, que da como resultado a la información base, y una fase hermenéutica, en la que se interpreta, traduce explica y se correlaciona la información encontrada.

A continuación, se presenta el resumen de los pasos seguidos en la realización de la presente investigación.

3.1 DEFINICIÓN DEL OBJETIVO

El primer paso en la metodología de desarrollo fue la definición del objetivo de la investigación, que como se mencionó anteriormente, este trabajo de grado busca proporcionar un amplio conocimiento en términos de consideraciones y premisas de diseño, mezclas de concreto, prestaciones mecánicas, desarrollo normativo y aplicaciones, todo esto con base a investigaciones y documentos existentes acerca del UHPC y del UHPFRC. El desglose de este objetivo principal se realiza en los 4 objetivos específicos que fueron indicados en el anterior capítulo.

3.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Para desarrollar el estado del arte, se llevó a cabo una revisión exhaustiva de la literatura existente. En este paso se incluyeron las siguientes actividades:

- **Selección de Fuentes:** Se identificaron y seleccionaron fuentes relevantes, provenientes de medios de divulgación científico, como artículos, conferencias, tesis previas y normativas internacionales. Se utilizaron bases de datos académicas como Scopus, Web of Science, ScienceDirect, entre otras.
- **Criterios de Inclusión y Exclusión:** Se establecieron criterios para la inclusión de estudios relevantes, tales como la fecha de publicación, el impacto de la revista, y la pertenencia temática.

- **Análisis de la Información:** Se realizó un análisis crítico de cada fuente, extrayendo datos clave sobre las propiedades del UHPC, métodos de fabricación, y aplicaciones. Para esta actividad se utilizó la matriz de análisis documental.

3.3 CLASIFICACIÓN Y ORGANIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN

La información recopilada se clasificó y organizó en diferentes categorías para facilitar su análisis. Las principales categorías incluyeron:

- **Prestaciones mecánicas y propiedades:** Resistencia a la compresión, resistencia a la tracción, resistencia a la flexión, módulo de elasticidad, durabilidad, etc.
- **Materiales y diseños de mezcla:** Tipos de cementos, materiales cementantes suplementarios, fibras, agregados, aditivos como superplastificantes. En el mismo sentido, se organizó la información de acuerdo con los métodos de diseño de mezcla utilizados, abarcando los más comunes.
- **Aplicaciones prácticas:** Uso en infraestructura como puentes y edificaciones, aplicaciones no estructurales en fachadas y losas, reforzamientos estructurales, y tesis en donde a través de modelos estructurales se estudian nuevas aplicaciones.
- **Desafíos y oportunidades:** Limitaciones actuales, áreas de investigación futura, barreras que se puedan presentar en Colombia.

3.4 SÍNTESIS Y COMPARACIÓN

Una vez organizada la información, se procedió a una síntesis y comparación de los datos extraídos. Se elaboró la matriz de análisis de información para identificar las diferencias y similitudes entre los estudios revisados. Esto permitió identificar tendencias generales y aspectos divergentes en la investigación del UHPC.

3.5 ELABORACIÓN DEL DOCUMENTO

Con la información sintetizada y comparada, se procedió a la redacción del documento final. La estructura del documento incluyó:

- **Introducción:** Contexto y justificación del estudio, objetivos y alcance.
- **Historia del surgimiento del UHPC:** Línea de tiempo del desarrollo de los concretos y de las investigaciones y materiales que son base fundamental de la creación de este material.
- **Componentes y dosificaciones:** Se abarca los materiales principales utilizados en los diseños de mezcla y las dosificaciones típicas encontradas.
- **Diseños de mezcla:** Principales métodos utilizados para la dosificación de mezclas de concreto de tipo UHPC/UHPFRC.
- **Propiedades mecánicas y físicas:** Comportamiento a compresión, a tracción, módulo elástico, y propiedades de durabilidad.
- **Huella de carbono:** Identificación del aporte a la reducción de emisiones de CO₂ a la atmósfera con la implementación de este material.
- **Desarrollo normativo:** Comparación de las premisas de diseño y modelos constitutivos indicados en 3 normativas internacionales diferentes.
- **Usos y aplicaciones del UHPC:** Estructuras existentes construidas en UHPC a nivel global y local, futuros estudios de posibles aplicaciones.
- **Investigaciones desarrolladas en Colombia:** Revisión de las investigaciones que han sido desarrolladas en desarrollos de tesis y por investigadores con amplios conocimientos en este nuevo material.
- **Futuros retos:** Análisis crítico de los resultados encontrados, identificación de barreras que se presentan en Colombia para la aplicación y divulgación del UHPC/UHPFRC, propuestas para estudios futuros.
- **Conclusiones:** Resumen de los hallazgos principales y la relevancia en el campo del concreto.

A continuación, se presenta el desarrollo de la investigación en el que se sigue el hilo conductor que fue anteriormente mencionado.

4 ¿QUÉ SON LOS CONCRETOS DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES?

4.1 HISTORIA DEL SURGIMIENTO DE LOS MATERIALES CEMENTICIOS

El término “Ultra High Performance Concrete” (UHPC), surge en 1993 por Larrand y Sedran, quienes desarrollaron un modelo para optimizar las prestaciones del concreto mediante el empaquetamiento de partículas (François de Larrard & Thierry Sedran, 1993), (ACI Committee 239, 2018a), contribuyendo al avance de la tecnología del concreto, ya que es un material que ha estado en constante evolución a lo largo de la historia y es gracias a esto que ha logrado posicionarse como el material de construcción con mayor presencia en el mundo.

La historia del concreto data su inicio en los años 7,000 y 6,000 a.c, en construcciones realizadas en territorio israelí y en la antigua Yugoslavia, donde inicialmente se usaba un material similar al mortero con el fin de conformar estructuras más estables, estos morteros estaban hechos a partir de arcilla, yeso o cal, mezcla que por su composición se asemeja a lo que para nosotros hoy en día son los morteros. Fue un arqueólogo quién a mediados de la década de 1960 encontró a orillas del río Danubio una cabaña con un piso hecho a partir de este material, de acuerdo con sus investigaciones la población se asentó desde el 7,000 a.c hasta el año 5.300 a.c. En el año 1986, el arqueólogo israelí llamado Garfinkel halló una losa de contrapiso construido en el año 7000 a.c, en un sitio llamado Yiftahel que se ubica a 8 km de Nazaret, esta losa posee un espesor variable entre 30 y 80 mm, la cual está hecha de un material muy similar al concreto. Garfinkel junto con el profesor Malinowski tomaron algunas muestras que fueron llevadas y analizadas en el laboratorio (Figura 4-1). Con los ensayos realizados a las muestras recolectadas, se pudo determinar que el material correspondía a una mezcla de agregados con una pasta similar a un mortero, los agregados tenían un tamaño superior a 10 mm y que la losa fue colocada en 2 etapas, puesto que se lograba distinguir las 2 capas. Los resultados de los ensayos arrojaron una resistencia a compresión de 40 MPa y el análisis químico de la muestra indicó que estaba compuesta en un 90% de calcita con trazos de cuarzo (Malinoski & Garfinkel, 1991).

En las imágenes que fueron captadas mediante un microscopio electrónico de barrido, se puede observar la microestructura de 3 muestras. La del lado izquierdo y del centro corresponden a morteros característicos (hechas a partir de travertino) y en la derecha se muestra el mortero de las muestras tomadas en Yiftahel, en donde se aprecia una buena unión de partículas y una estructura menos cristalina que la de las calizas artificiales como el travertino.



Figura 4-1 Imágenes de los planos de falla de las muestras recolectadas (Mallinowski & Garfinkel, 1991).

Para el año 2,570 a.c, el pueblo egipcio hacía uso de pastas obtenidas del yeso y calizas disueltas en agua, para unir los bloques de piedra y levantar sus construcciones, entre ellas las pirámides de Gizeh, que de acuerdo con investigaciones realizadas por Davidovits (1987), los bloques fueron fabricados en sitio.

Entre los años 800 a.c - 450 a.c, los griegos y romanos descubrieron que algunos materiales pétreos de procedencia volcánica, al ser mezclados con caliza, arena y agua, producían un material capaz de resistir la acción del agua dulce e incluso salada.

En el año 82 d.C., se continuó con el uso de esta mezcla, pero esta vez en los cimientos del Coliseo de Roma. Para el año 127 d.C., se data por primera vez el uso de concreto aligerado en la construcción de la cúpula del templo Panteón, la cual tiene un diámetro de 43.3 m. Para lograr esta estructura, los romanos modificaron la mezcla de concreto utilizada, mediante el uso de diferentes agregados con variaciones en sus densidades. Los agregados más densos se encuentran en la base del domo y, conforme sube la estructura, la densidad de los agregados es menor, disminuyendo así el peso de la estructura. El material de esta cúpula estaba compuesto por puzolana, limos, arena y agua.

En un estudio realizado en 1984, en el que se fallaron 80 probetas tomadas de diferentes estructuras en Roma, como 'The Great Hall' y la Basílica de Majencio, se evidenció que las mezclas de concreto podían alcanzar, en promedio, una resistencia a la compresión de 7-14 MPa, (Brune et al., 2010).



Figura 4-2 Cúpula templo panteón, Roma – año 127

Se estima que en el año 1756 se desarrolló lo que sería el primer conglomerante hidráulico, ante la necesidad de construir en zonas marinas, surgió la inquietud por crear materiales cementantes que pudiesen fraguar bajo el agua y que resistieran la acción del agua marina. John Smeaton fue el encargado de seleccionar los materiales a utilizar para la construcción del faro de Eddystone, el criterio experimental que utilizó consistió en realizar unas esferas con los conglomerantes mezclados con agua, formando una especie de mortero, luego las introducía en el agua y determinaba el endurecimiento. De este ensayo logró determinar que las que presentaban un mejor comportamiento correspondía a las calizas con mayor impureza. También determinó que la caliza calcinada al ser atacada por ácido nítrico producía un residuo arcilloso, infiriendo que este residuo reaccionaba con la cal hidráulica calcinada, produciendo así unos compuestos, que para la fecha no estaban determinados, que eran los responsables del comportamiento durable en el agua. De acuerdo con el químico Wilhelm Michaelis, este descubrimiento fue la base del cemento hidráulico (Sanjuán Barbudo & Chinchón Yepes, 2004).

En 1796 Jamer Parker fabrica en el Reino Unido un material denominado “cemento romano”, cemento que era obtenido por la cocción a una temperatura moderada de calizas arcillosas ricas en sílice y alúmina.

Fue hasta el año 1824, que James Parker y Joseph Aspdin patentaron el cemento Portland, proveniente de la combustión de la caliza y arcilla, sin embargo, esta

mezcla no era suficientemente calentada, de tal modo que no alcanzaba la sinterización, por lo que se correspondía más con una cal romana. Es en 1843 cuando William Aspdin, hijo de Joseph, instala una planta de producción de cemento cerca de Londres, este cemento resultó ser mejor que el fabricado por su padre, ya que si lograba la sinterización parcial de la mezcla. Finalmente, en 1844 Isaac Charles Johnson emplea temperaturas lo suficientemente altas para obtener el Clinker de la mezcla de arcilla y caliza, aunque en sus inicios el cemento no fue popularmente empleado dada la complejidad para su fabricación. Fue hasta el año 1890 que, gracias a la revolución industrial, el procedimiento de fabricación fue más sencillo, rápido y económico (Sanjuán Barbudo & Chinchón Yepes, 2004). Posterior a esto, en 1855, Joseph-Louis incorporó hierro como una forma de refuerzo a los elementos elaborados con la mezcla de concreto en búsqueda de mejorar la resistencia a las tracciones, creando un concreto reforzado similar al que actualmente se continúa usando en la construcción de las estructuras actuales.

Los materiales cementantes con grandes bondades ha sido un tema de investigación frecuente, encaminando las investigaciones en lograr obtener materiales de alta resistencia y mayor durabilidad, por lo que la historia del UHPC inicia años atrás, con investigaciones en donde se buscaba optimizar el diseño de mezcla y alcanzar altas resistencias en los materiales.

En 1952 el investigador Paul Klieger quiso investigar la relación existente entre el contenido de aire de una mezcla de concreto con la resistencia y durabilidad, para esto ensayó 45 mezclas diferentes de concreto, en donde variaba únicamente el tamaño de los agregados y el tipo de cemento. Logró determinar que, al disminuir el tamaño de los agregados, el volumen de aire incorporado en la mezcla también disminuiría, por lo que la cantidad de agua requerida en la mezcla disminuye, ocasionando el incremento de la resistencia (Walker & Bloem, 1960).

Las protecciones contra la radiación eran estudiadas en el año 1965, cuando se investigaba acerca de la eficacia del concreto para lograr protección ante ellas, para este tiempo se observaba que en cuanto más densa era la mezcla, mejores eran sus prestaciones contra la radiación. Junto con estas investigaciones también se demostró que la densidad del concreto mantenía una relación directa con la mejora en la resistencia a compresión. Para estos ensayos se realizaron probetas con cemento Portland tipo 1, tamaño con agregado máximo de $\frac{1}{2}$ o $1 \frac{1}{2}$ pulgada y manteniendo una relación agua/cemento entre el 0.30 y 0.35. En conclusión, se logró determinar que aquellas mezclas con baja relación agua/cemento y con el

menor tamaño de agregados, obtuvieron una resistencia mayor con respecto a las demás mezclas (Mather, 1965).

Los inicios del UHPC datan de tiempo atrás, aproximadamente en el año 1972 con investigaciones de pastas de altas resistencias. Estas pastas se caracterizaban por tener una baja relación agua/cemento y por lograr resistencias de hasta 200 MPa (Yudenfreund et al., 1972), con el fin de lograr una trabajabilidad óptima de las pastas de cemento, fue necesario la introducción de aditivos como los plastificantes, los cuales son altamente efectivos para lograr reducir la viscosidad del concreto, este efecto se logra ya que al recubrir las partículas de cemento estas se repelen entre sí, lo que reduce la resistencia al flujo del conjunto (reducción de la fricción), además contribuye a la eliminación de micro flóculos (aglutinación de partículas), lo que permite que el agua se distribuya de una mejor manera, logrando así crear pastas con una baja relación agua – cemento sin afectar su trabajabilidad.

Años más tarde se desarrollarían técnicas de curado en caliente. Una investigación desarrollada por Roy et al. (1972), en donde elaboraron especímenes los cuales fueron compactados a 250 °C y con resistencias a la compresión superiores a los 100,000 psi (690 MPa), con este método de compactación y curado se pudo obtener pastas de cemento de muy alta resistencia.

Una década más tarde, en 1985, emergieron nuevos materiales que fueron insumo base para el desarrollo del UHPC, dentro de estos nuevos materiales se puede destacar los materiales cementantes modificados con polímeros, conocidos como Cementos sin macrodefectos (MDF) y los cementos densos con partículas de sílice (DSP). El surgimiento del MDF inició en los años 70's, en donde se buscaba crear un material que fuese capaz de sustituir los polímeros y algunos metales como el aluminio, debido al encarecimiento de los hidrocarburos y el elevado coste energético presentado en la producción de plásticos. A nivel energético, el cemento tenía la ventaja de hidratarse con el agua a temperaturas normales, por lo cual no era necesario el uso de calor en este proceso, sin embargo, el concreto presentaba desventajas frente a los otros materiales, la baja resistencia a la tracción y flexión, y su baja tenacidad debido al aire atrapado por la alta porosidad. La eliminación de estos grandes defectos se pudo lograr por medio de la técnica de empaquetamiento de partículas, investigadores de 'Imperial Chemical Industries' (ICI) encontraron que al incorporar una proporción de polímeros solubles en agua a la mezcla de cemento y agua se reducía la fricción entre partículas, permitiendo a las partículas empaquetarse estrechamente y aumentar de manera significativa su resistencia a la tracción. Con el uso de esta técnica se creó una pasta de polímero de cemento

MFD similar a una masilla, esta masilla se laminó para eliminar las burbujas de aire y se moldeó con procesos similares a los usados en el prensado de plásticos. De este modo se logró la reducción de vacíos del cemento MDF a menos del 0.1% (Bennet, 2018).

En 1981 el gran impulsor del DSP fue Bache, quien se fundamentó en las investigaciones adelantadas por Birchard y su equipo. La alta resistencia se obtuvo mediante el control de la granulometría del cemento, para lograr minimizar los espacios vacíos entre las partículas más grandes del cemento, Bache adicionó sílice finamente particulada (con un tamaño de $0.1 \mu\text{m}$) y eliminó los agregados gruesos de las dosificaciones tradicionales del concreto. Estos concretos requerían bajas relaciones agua-cemento. Al tener partículas de menor tamaño en las adiciones y las arenas, se obtenía una mayor superficie específica. Por ello, fue necesaria la incorporación de plastificantes para mejorar la manejabilidad de la mezcla (Bennet, 2018).

Algunas investigaciones adicionales se realizaron con el objetivo de lograr concretos de muy alta resistencia. Para ello, se requería la utilización de técnicas especiales, tales como el autoclaveado, la compactación con altas presiones o la impregnación con polímeros. Sin embargo, estas técnicas elevaban los costos de fabricación del concreto y dificultaban su producción en sitio. También se evidenciaron algunas dificultades en técnicas como el autoclaveado, ya que, al requerir la incorporación de vapor caliente dentro de la mezcla, los elementos de concreto debían tener un espesor reducido, lo que limitaba la aplicación de dicha técnica a diferentes elementos estructurales (Mehta, 1989; Roy et al., 1993).

Otro de los grandes predecesores del UHPC es el concreto compuesto compacto reforzado o CRC (Compact Reinforced Composite). Este es un concreto reforzado con barras y cuya matriz incluye la adición de fibras. Estas fibras se agregaban con el objetivo de aumentar la capacidad a tracción y disminuir las deformaciones. En 1987, Bache realizó ensayos y determinó que los elementos estructurales hechos con este material podían alcanzar resistencias a flexión entre 8 y 10 veces mayores que los elementos elaborados con concreto tradicional, estableciendo un hito en la elaboración de concretos de alta resistencia (Bache, 1989).

Tal como muestra la documentación técnica, el desarrollo de los concretos de ultra altas prestaciones tiene lugar en Francia a inicios de los años 1990s, gracias a los grandes aportes generados en países como Dinamarca (Perry & America, 2020).

Fue en 1993 cuando Larrard y Sedran se propusieron desarrollar una mezcla de concreto utilizando materiales comunes, tales como cemento, agregados, humo de sílice y superplastificantes, así como una técnica de curado que pudiera aplicarse tanto en laboratorio como en sitio. Dieron a conocer el material que estaban desarrollando bajo el nombre de “Ultra High Performance Concrete” (UHPC). Para esa época, ya se habían creado concretos con resistencias que podían superar incluso los 200 MPa; sin embargo, estos requerían técnicas especiales de curado que no podían ser utilizadas en campo o agregados especiales que elevaban el costo de la mezcla. Finalmente, mediante modelos de empaquetamiento de partículas, lograron formular un concreto hecho a partir de materiales convencionales. Esta mezcla de concreto obtuvo una resistencia a compresión de 165 MPa a los 28 días y, con curado especial (90°C), de 236 MPa a los 7 días. (François de Larrard & Thierry Sedran, 1993).

En la Figura 4-3 se presenta el resumen de la línea de tiempo de los concretos de tipo UHPC, en donde se evidencia los grandes hitos que han ocurrido para que en la actualidad podamos conocer y aprovechar las ventajas de este material.

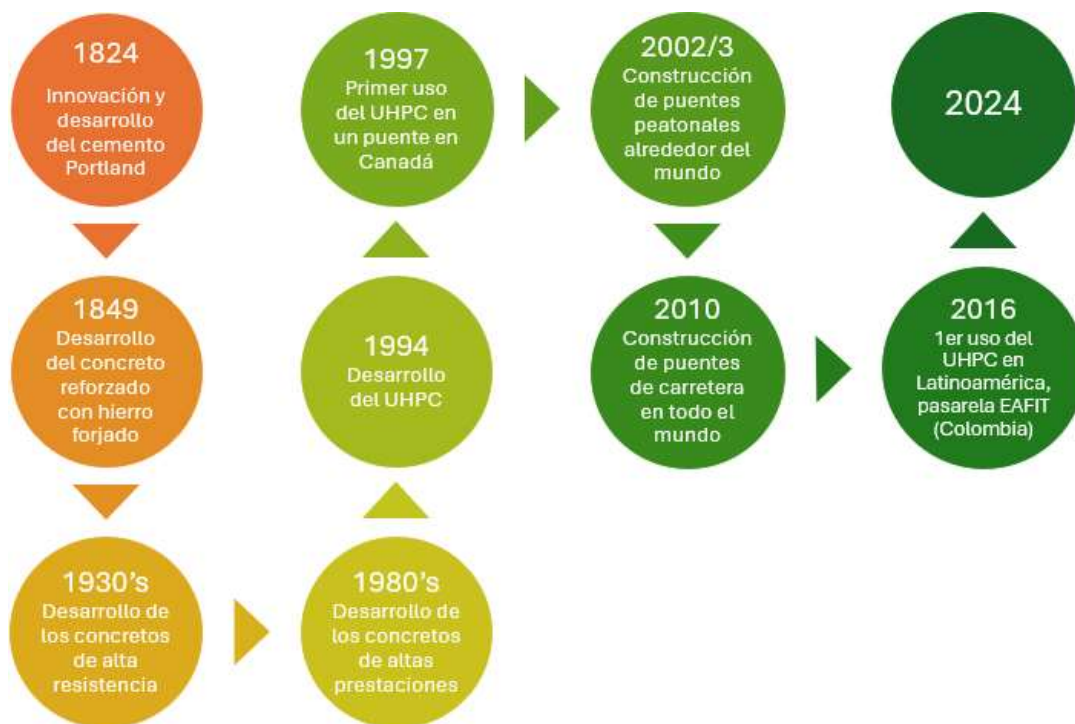


Figura 4-3 Línea de tiempo de la creación del UHPC, adaptado (Amran et al., 2022)

A partir de 1933 y hasta la actualidad, se ha continuado investigando este material, que aún después de 30 años se considera novedoso y no tan reconocido. Dado que el desarrollo del UHPC sigue en progreso, aún no es posible definirlo de forma global. A continuación, se amplía su definición con base en la documentación técnica encontrada.

4.2 DEFINICIONES DE LOS CONCRETOS DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES

El concreto de ultra altas prestaciones (UHPC) puede ser definido como un material cementicio innovador desarrollado en los últimos 30 años, significando así un avance importante para la tecnología del concreto. Este material destaca porque sus propiedades mecánicas son elevadas comparadas con las del concreto convencional, especialmente su resistencia a la compresión que puede alcanzar los 150 MPa, e incluso superar dicha resistencia. Por su diseño de empaquetamiento de partículas posee una matriz cementante densa, lo que da como resultado su baja porosidad e impermeabilidad, por lo que su durabilidad es superior. Se caracteriza por tener un comportamiento con endurecimiento por deformación, por lo que sus propiedades a tracción y su módulo de elasticidad son superiores. (Ahmad et al., 2016; Amanjean & Vida, 2015; Amran et al., 2022; El-Helou et al., 2022a; Ullah et al., 2022; Wang et al., 2019).

De acuerdo con el documento 'ACI 239R-18' del American Concrete Institute, los concretos de ultra altas prestaciones son un tipo de material cementicio con una gran resistencia a la compresión, ductilidad a la tracción y durabilidad, con respecto a los concretos convencionales (ACI Committee 239, 2018a). Para la Association française de Normalisation los Bétons Fibrés à Ultra hautes performances (BFUP) o en inglés UHPC, son concretos con una alta resistencia a la compresión, y alta resistencia a la tracción después de la fisuración, que le provee un comportamiento dúctil antes las acciones de tracción, su alta ductilidad permite el diseño y fabricación de elementos sin utilizar refuerzo. Según la normativa suiza SIA (Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein) 2052 – 2016, para que un concreto sea clasificado de ultras altas prestaciones debe superar una resistencia a compresión de 120 MPa y una resistencia a la tracción de 7 MPa, la cual será soportada por las fibras adicionales (Swiss Society of Engineers and Architects (SIA), 2015).

Los concretos de ultra altas prestaciones pueden presentar la adición de fibras, por lo que en algunos documentos este material será denominado UHPFRC, por sus siglas en inglés 'Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete'. Como ya se

mencionó, dado que el UHPC es un material que en la actualidad es objeto de estudio, aún no existe una definición global de este material, por lo que en algunos documentos se hace la distinción entre el UHPC y el UHPFRC, mientras que en otros, se asume que la adición de fibras es menester en los concretos de ultra altas prestaciones para el desarrollo de sus propiedades mecánicas especiales. En la Tabla 4.1 se resume los requisitos de resistencia mínima que la normativa ASTM indica para los concretos tipo ultra altas prestaciones (Akhnoukh & Buckhalter, 2021).

Tabla 4.1 Propiedades del UHPC según ASTM (Akhnoukh & Buckhalter, 2021)

Propiedad	Valor	Normativa
Resistencia nominal a la compresión	> 150 MPa	ASTM C39/C39M
Resistencia a la flexión	> 20 MPa	ASTM C78/C78 M - 18
Resistencia a tracción de la primera fisura	> 4 MPa	ASTM C1018 – 97
Coefficiente de fluencia	0.2	ASTM C512/512 M – 15
Coefficiente de dilatación lineal	1.20E-05	ASTM C531 – 18
Módulo de elasticidad	45 GPa	ASTM C469/C469 M - 14
Extensión de flujo	55 a 75 cm	ASTM C1611 M - 18

Bajo este contexto, es posible resumir que el concreto de ultra altas prestaciones es un tipo de concreto que se caracteriza por su alta resistencia a la compresión, su notable resistencia a la tracción que le provee al material una falla dúctil ante la tensión, de esta manera es un material que se caracteriza por tener grandes propiedades de durabilidad y resistencia ante las acciones del fuego, todo esto es gracias a la alta densidad que presentan las mezclas, logrando el efecto de “empaquetamiento de partículas”.

Las propiedades mecánicas y la durabilidad del UHPC que resultan ser superiores en comparación con el concreto convencional, se deben a la baja relación agua/cemento y a su alto contenido de aglomerante (cemento y adiciones), lo que genera la reducción de la porosidad, como producto de su matriz (Amran et al., 2022; El-Helou et al., 2022a; Wang et al., 2019).

El UHPC requiere de una baja relación agua/cemento, esta relación varía según el diseño de mezcla, pero por lo general puede oscilar entre 0.15 y 0.25. Durante el proceso de mezcla, todas las partículas de cemento no logran reaccionar, puesto que la baja relación a/c no permite que todas las partículas se hidraten con el agua, estas partículas que no son hidratadas en su totalidad se comportan como un agregado fino, aportando al empaquetamiento de partículas (Eide & Hisdal, 2012a).

De acuerdo con su definición, los diseños de mezcla de los concretos de ultra altas prestaciones reforzado con fibras (UHPFRC) por sus siglas en inglés, Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete, cuentan con las propiedades de 3 tipos diferentes de mezclas especiales de concreto. En primer lugar, las propiedades de fluidez y extensión del concreto autocompactante (SCC) por sus siglas en inglés 'Self Consolidating Concrete'; en segundo lugar está la resistencia superior y el rendimiento a largo plazo del concreto de altas prestaciones (HPC), por sus siglas en inglés 'High Performance Concrete'; y por último, presenta las propiedades de mayor ductilidad y resistencia después de la fisuración del concreto reforzado con fibras 'FRC', por sus siglas en inglés 'Fibre Reinforced Concrete', que se presenta a la industria de la construcción como UHPFRC (Akhnoukh & Buckhalter, 2021), en la Figura 4-4 se ilustra lo aquí expresado.

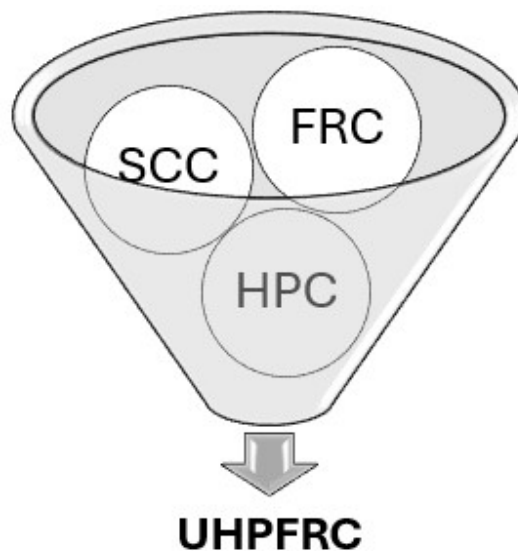


Figura 4-4 Tipos diferentes de concretos especiales, adaptado (Akhnoukh & Buckhalter, 2021).

A continuación, se presenta una tabla resumen de los concretos especiales con algunas de sus características mecánicas principales:

Tabla 4.2 Propiedades de diferentes concretos especiales (Marvila et al., 2021).

Concreto	Abrev.	Resistencia a la compresión (MPa)	Relación agua – cemento (a/c)	Trabajabilidad (mm)	Consumo de cemento (kg/m ³)
Convencional	CC	20 – 50	0.45 – 0.65	NA	260 – 380
Alta resistencia	HSC	55 – 100	NA	NA	400 – 700
Altas prestaciones	HPC	55 – 100	< 0.40	455 – 810 (Flujo de asentamiento)	400 – 700
Ultra alta prestaciones	UHPC	>100 > 120 > 150	0.20 – 0.30	> 260 (Tabla de flujo)	800 – 1000

**NA: No aplica*

5 COMPONENTES Y DOSIFICACIONES DE LOS CONCRETOS DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES

Dado que los concretos de ultra altas prestaciones se consideran como un material novedoso, existe un amplio número de posibilidades de diseño de mezcla y estas dependerán en gran parte del método de diseño a elegir, los componentes y proporciones de la mezcla y del objetivo principal que se busque para el diseño de mezcla.

Si bien los concretos de ultra altas prestaciones pueden contar con múltiples variables en sus componentes, su formulación general consiste en una mezcla con alto contenido de aglutinante en donde se incluye: cemento tipo Portland, materiales cementantes suplementarios como el humo de sílice y la arena de cuarzo, fibras que por lo general son de acero y superplastificantes (Akhnoukh & Buckhalter, 2021), (Faysal et al., 2022), (C. Shi et al., 2015).

A continuación, se trata a detalle los componentes principales de los concretos de ultra altas prestaciones, en donde se incluyen tipos, dosificaciones y cómo afectan las propiedades de las mezclas de diseño.

5.1 CEMENTO PORTLAND

El cemento tipo Portland es un producto elaborado a partir de materias primas que son abundantes, tales como la piedra caliza y la arcilla. Se debe mezclar las proporciones con gran precisión junto con algunas adiciones para dar a lugar al Clinker. El cual lleva el nombre de 'Portland' ya que al fraguarse se obtenía un color muy parecido a las rocas Portland, la cual es una caliza extraída en la costa del canal de Portland, situada en Dorset al sur de Inglaterra (Sanjuán Barbudo & Chinchón Yepes, 2004).

El proceso de fabricación del cemento consiste en 6 principales pasos: 1) Extracción de las materias primas (caliza y arcilla), 2) Trituración de la caliza y arcilla para el adecuado procesamiento, 3) Mezcla de la caliza y arcilla trituradas en las proporciones adecuadas, 4) Calcinación de la caliza y arcilla en hornos que logran temperaturas entre 1450 y 1550 °C, de aquí se genera el Clinker, 5) Molienda del Clinker junto con yeso para convertirlo en un polvo fino conocido como cemento Portland y 6) Almacenamiento y embalaje para su posterior venta (Holcim, 2014; Oficemen, 2016).

El tipo de cemento a elegir dependerá de las condiciones ambientales a las que pueda estar expuesta la estructura y a la aplicación que tendrá, en el concreto convencional los tipos de cemento comúnmente usados van del tipo I al V (Du et al., 2021). Para el concreto de tipo UHPC el cemento tipo III es el más comúnmente usado, debido a que proporciona un rápido fraguado y desarrollo de la resistencia temprana (Akhnoukh & Buckhalter, 2021), a nivel general el uso de cementos con bajo contenido de adiciones resultarían óptimos, sin embargo estos son poco comercializados y costosos, razón por la cual algunos investigadores (Marvila et al., 2021) sugieren el uso del cemento portland tipo I por su alto contenido de Clinker que normalmente es superior al 90% o 95%, por su elevada finura y porque al ser el cemento de uso común, el precio es más asequible con respecto a los demás tipos de cemento, lo anterior es importante para lograr reducir el costo final de la mezcla ya que generalmente el contenido de cemento requerido para la producción de UHPC incrementa el costo de su producción.

La mayoría de los investigadores han utilizado los cementos Portland tipo I y tipo III debido al bajo contenido en aluminato tricálcico (C_3A), que de acuerdo con algunos estudios se ha demostrado que los cementos con contenidos por debajo del 8% de C_3A presentan mejores prestaciones mecánicas (Hurtado, 2020). Por otra parte, se ha estudiado el uso de cemento tipo III, puesto que posee partículas más finas que los cementos tipo I y II.

En la siguiente tabla se indican las composiciones químicas de los 2 tipos de cemento Portland mayormente usados en los estudios:

Tabla 5.1 Composición química cemento Portland tipo I y III (Ahmad et al., 2020; P. Li et al., 2023).

Abreviación	Compuesto químico	Portland Tipo I	Portland Tipo III
CaO	Óxido de calcio	64.51	64.50
SiO ₂	Óxido de silicio	20.36	19.72
Al ₂ O ₃	Óxido de aluminio	3.96	5.10
Fe ₂ O ₃	Óxido de hierro	2.82	2.76
MgO	Óxido de magnesio	2.26	2.30
SO ₃	Óxido de azufre	2.61	3.25
K ₂ O	Óxido de potasio	1.22	-
TiO ₂	Dióxido de titanio	0.50	-
Na ₂ O	Óxido de sodio	0.10	0.33
BaO	Óxido de bario	0.379	-
SrO	Óxido de estroncio	0.226	-

Comúnmente las dosificaciones de cemento en las mezclas de concreto de ultra altas prestaciones se presentan con rangos que van desde 610 – hasta 1080 kg/m³ (Tayeh et al., 2013). Sin embargo, diversos estudios se han enfocado en la disminución de las dosificaciones del cemento en las mezclas de UHPC (Ahmad et al., 2016; Arora, Aguayo, Kianmofrad, Yao, & Neithalath, 2018; Choi et al., 2023; Meng et al., 2017; Soliman & Tagnit-Hamou, 2017b; Wang et al., 2019), con el fin de contribuir a la disminución de la huella de carbono y de optimizar los costos finales de las mismas. En relación con las adiciones más comunes para la incorporación a mezclas de concreto UHPC/UHPFRC, estas se presentan en la siguiente sección.

5.2 MATERIALES CEMENTANTES SUPLEMENTARIOS

De acuerdo con la definición del ASTM, los materiales cementantes suplementarios (MCS), también conocidos como 'SCM' por sus siglas en inglés 'Supplementary Cementitious Materials', son materiales inorgánicos finamente divididos que, cuando se utilizan en conjunto con el cemento tipo Portland, contribuyen a las propiedades del concreto endurecido a través de la actividad hidráulica, puzolánica o ambas. Estos materiales típicamente incluyen ceniza volante, humo de sílice, escoria y puzolanas naturales tales como la arcilla calcinada, la pizarra calcinada o la metacaolinita (EUCO, 2019; Fhwa, 2016; Moreno, 2017). Por su parte la normativa británica (BS EN 206, 2000), define las adiciones como materiales muy finos utilizados en concreto, con el fin de mejorar ciertas propiedades o alcanzar propiedades especiales. En la Figura 5-1 se muestra el diagrama ternario de los materiales cementantes, el cual es una herramienta utilizada para comprender las fases minerales presentes en diferentes mezclas de concreto, representando las proporciones de óxido de calcio (CaO), óxido de aluminio (Al₂O₃) y óxido de silicio (SiO₂). Al trazar la composición de una mezcla de cemento en el diagrama ternario de materiales cementantes, se puede predecir las fases dominantes que se formarán durante la hidratación (la reacción química con el agua). Este conocimiento es crucial para adaptar materiales cementantes con las propiedades deseadas como resistencia y tiempo de fraguado (Mao et al., 2006)

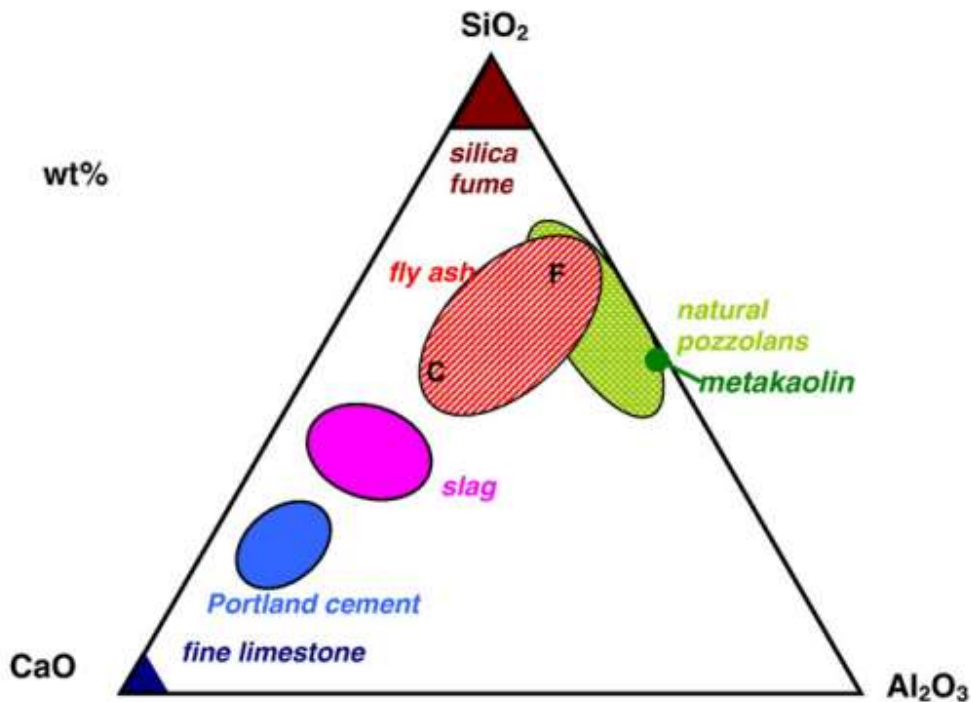


Figura 5-1 Diagrama ternario de los materiales cementantes (Lothenbach et al., 2011).

En general, se denomina material cementante a aquel que es capaz por sí solo o en combinación con otros materiales, de formar productos de hidratación como hidratos de silicato de calcio, hidratos de aluminosilicatos o también hidratos de aluminosilicatos de calcio. El uso del término suplementario hace referencia a la función de suplemento o complemento que poseen estos materiales en relación con el cemento, ya que pueden potenciar las propiedades de este o en determinados casos, suplir algunas deficiencias de este para cumplir con las especificaciones de algún proyecto. Se conoce como material hidráulico a aquel que presenta una alta tasa de disolución al entrar en contacto con el agua, generando silicato de calcio hidratado y portlandita o hidróxido de calcio; un ejemplo de este tipo de material es el cemento Pórtland o simplemente cemento. Por otro lado, se encuentran los materiales puzolánicos, que son aquellos que presentan una baja tasa de disolución en relación con un material hidráulico y que en algunos casos requieren de un activador que facilite el inicio de la reacción (Lothenbach et al., 2011; Moreno, 2017).

La necesidad de estudiar el comportamiento de las mezclas de concreto de ultra altas prestaciones con el uso de materiales cementantes suplementarios (MCS)

nace de la desventaja ambiental que presentan estos materiales, por poseer una importante dosificación de cemento (entre 610 – 1080 kg/m³), como es bien conocido la industria cementera emite durante la producción de cemento alrededor del 8 -9% de las emisiones globales de CO₂ a la atmosfera (Park et al., 2021).

Las proporciones de cemento en las mezclas de UHPC pueden ser optimizadas, puesto que se reporta que únicamente las partículas que son hidratadas se encuentran en un rango del 52 – 61%, cuando la relación agua – cemento está en el orden de 0.15 a 0.25 (ACI Committee 239, 2018b) y a estas partículas de cemento que no son hidratadas se les atribuye que el UHPC pueda no ser considerado como un material eco-amigable (Korpa et al., 2009; S. Li et al., 2020; Park et al., 2021). Es por esto por lo que el aprovechamiento de otros materiales ha tomado especial importancia en las investigaciones de los nuevos concretos, en donde se ha podido evidenciar que el uso de materiales cementantes suplementarios no solo contribuye a la disminución de la huella de carbono, sino que también puede mejorar las prestaciones mecánicas de las mezclas de concreto. Los materiales cementantes suplementarios más populares son: cenizas volantes, polvo de piedra caliza, metacaolín y escoria, las cuales son conocidas como FA, LP, MK y SL, respectivamente, por sus siglas en inglés ‘Fly Ash’, ‘Limestone Powder’, ‘Metakaolin’ y ‘Slag’.

De acuerdo con las conclusiones de la investigación realizada por Park et al. (2021) se evidencia que las emisiones de CO₂ por causa de la fabricación de concretos de tipo UHPC pueden disminuir, cuando se incluye a la mezcla materiales cementicios suplementarios (MCS), en la Figura 5-2 se evidencia que es posible obtener mezclas de UHPC con un buen desempeño mecánico, en donde la resistencia a compresión a los 28 días puede alcanzar los 150 MPa, de esta manera se logra emisiones de CO₂ bajas con respecto a las mezclas de UHPC que no incluyen dentro de sus formulaciones los MCS.

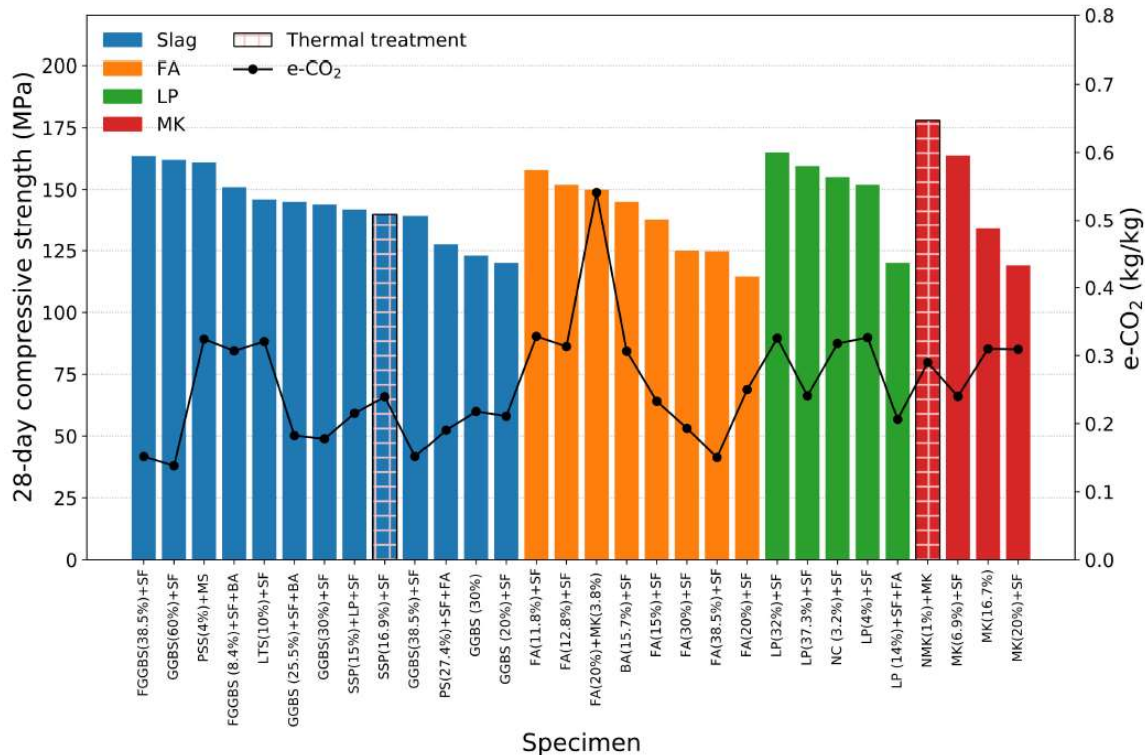


Figura 5-2 Resistencia a la compresión a 28 días de diferentes mezclas de UHPC considerando el reemplazo parcial de cemento por MCS (Park et al., 2021).

5.2.1 METAKAOLÍN

El Metakaolin (MK) es un material cementante suplementario, SCM por sus siglas en inglés ‘Supplementary Cementitious Material’, se define como un aluminosilicato activado térmicamente, el cual se produce al calcinar caolín a temperaturas alrededor de 500 °C – 600 °C, temperatura a la cual se produce una transformación de su estructura cristalina. Sus aplicaciones se han centrado en el aprovechamiento de su composición química y reactividad para usarlo como una puzolana artificial en la producción de morteros y concretos por su importante aporte al incremento de resistencia mecánica, reducción de permeabilidad y durabilidad. En general el MK reacciona con el hidróxido de calcio libre [Ca(OH)₂] del proceso de hidratación del cemento para formar C₂S secundario, el cual posteriormente forma el gel de silicato de calcio hidratado o gel de tobermorita, y el silicoaluminato bicálcico hidratado (gehlenita), que contribuyen con el mejoramiento de las propiedades mecánicas de las mezclas (Restrepo et al., 2006).

En un estudio realizado por M. Abdellatief et al. (2023) se encontró que, si bien la trabajabilidad disminuyó en las mezclas con adición de MK, las resistencias a compresión y flexión fueron las más altas a la edad de curado de 90 días, logrando un incremento de hasta el 5.4% en comparación con la muestra de control. Por su parte A. Tafraoui et al. (2009) encontró que la presencia de MK en el UHPC contribuía al incremento de capacidad de flexión hasta un 2.6% con respecto a la muestra de control. Se concluye que el metacaolín puede contribuir a elaborar concretos UHPC con bajas emisiones de carbono al reemplazar parcialmente el cemento, logrando un equilibrio entre el rendimiento y el impacto ambiental.

5.2.2 CENIZAS VOLANTES

Las cenizas volantes (CV), también conocidas como FA por sus siglas en inglés ‘Fly Ash’, son el residuo finamente particulado resultante de la combustión del carbón, ya sea en trozos o en polvo. Las CV pueden poseer diferencias en su composición química, mineralogía y granulometría, dependiendo de algunas variables, dentro de las cuales se destacan: tipo de carbón, proceso de quema, temperatura, tiempo de residencia del carbón, configuración de fuegos, tipo y geometría de la caldera en donde se lleva a cabo el proceso de combustión (Bautista-Ruiz et al., 2017).

Un estudio realizado en Colombia (Abellán et al., 2020) en donde buscaron encontrar un diseño de mezcla de UHPC con uso de cenizas volantes provenientes de una termoeléctrica local llamada ‘Termotasajero’, utilizaron un algoritmo de optimización multiobjetivo, con un diseño compuesto central con 3 variables: 1) Cemento, 2) Relación agua – cemento y 3) Superplastificante de alto rendimiento. Aunque se determinó que el carbono no calcinado presente en las cenizas volantes locales pudo causar un efecto negativo en la resistencia a compresión de las mezclas, fue posible obtener un concreto de ultra altas prestaciones rentable y eco-amigable, logrando un diseño de mezcla óptimo utilizando cenizas volantes locales con alto contenido de carbono no calcinado que alcanza una resistencia a la compresión de 150 MPa a los 28 días.

En el mismo sentido, el uso de las cenizas volantes en mezclas de UHPC también se han estudiado para observar cómo afectan el comportamiento de la retracción autógena del concreto, que se define como el cambio volumétrico que se presenta en los elementos de concreto una vez se ha iniciado el proceso de fraguado, que da como resultado a la aparición de microfisuras (Santiago & Guayasamin, 2016). E. Ghafari et al. (2016) estudiaron el comportamiento de la retracción autógena en

mezclas UHPC, dentro de las cuales se utilizó cenizas volantes, tras los ensayos fue posible determinar que existe una correlación lineal entre la retracción y la porosidad de las mezclas, adicional, se observó que, aunque las cenizas volantes dieron a lugar a una ligera disminución de las propiedades mecánicas, se podía obtener una retracción autógena mucho menor.

La trabajabilidad de la mezcla se vio beneficiada en un estudio realizado por Arora, Aguayo, Kianmofrad, Yao, Mobasher, et al. (2018), donde definieron los principios básicos para lograr un mayor rendimiento en el diseño de un concreto de ultra altas prestaciones, también se observó que las mezclas con contenido de FA requerían de una menor cantidad de agua, lo que se atribuye a la forma esférica que poseen las cenizas volantes. Con la incorporación de cenizas volantes, lograron desarrollar una mezcla capaz de alcanzar los 153 MPa a compresión a los 28 días.

5.2.3 ESCORIAS

Las escorias de alto horno, conocidas como 'Slag' en inglés, son materiales comúnmente utilizados como adición activa para la elaboración de diferentes cementos comerciales. Estos cementos presentan propiedades y características sensiblemente mejores que los cementos convencionales, tales como menor calor de hidratación, alta resistencia a sales y sulfatos, y una apreciable reducción a la reacción álcali-agregado. La escoria de alto horno es el resultado de la combinación de las impurezas del mineral de hierro (ganga) y de las cenizas de azufre del coque con la cal y la magnesia, la combinación de óxidos ácidos y óxidos básicos tienen lugar por fusión a alta temperatura (1600 °C). La variación de la composición química de las escorias depende del proceso siderúrgico aplicado y del tipo de acero refundido. El mineral más significativo de las escorias cristalizadas es la melilita (disolución sólida de gelenita, C_2AS y akermanita C_2MS_2), (Puertas, 1993).

En un estudio realizado por X. Zhang et al. (2019) en donde revisaron el comportamiento de mezclas de UHPC con dosificaciones de 0% para la muestra de control, y un reemplazo de la proporción de cemento con 10% 20% y 30% por escoria de acero, se buscó mantener para todas las mezclas una relación agua – cemento del orden de 0.18, e igual adición de cenizas volantes y humo de sílice. Se halló que la deformación por contracción acumulada se reduce de 836,2 mm/m en la muestra de control a 773,6 mm/m, 726,0 mm/m y 683,9 mm/m para los concretos con contenidos de escoria de acero del 10%, 20% y 30%, respectivamente. La cantidad de partículas no hidratadas aumenta en proporción directa al contenido de

escoria de acero y la presencia de estas micropartículas restringe la contracción de la pasta circundante y su efecto se potencia con un mayor contenido de esta. En la Figura 5-3 se observa una reducción en la resistencia a la compresión de las mezclas con adición de escoria a temprana edad, lo que se atribuye al comportamiento de hidratación del cemento producto del reemplazo parcial por escoria. Este efecto de reducción de la resistencia se contrarresta en edades más avanzadas del concreto, logrando que la disminución en la resistencia alcance valores de 4.3%, 1.6% y 5.8%.

Las escorias de cobre fueron estudiadas por P.S. Ambily et al. (2015), quienes encontraron que es posible producir cementos de UHPC con resistencias de hasta 162 MPa con el uso de escorias de cobre, si bien hubo una reducción de la resistencia entre el 15% - 25% con respecto a la muestra de control, fue posible evidenciar que estas escorias que son desechadas en las industrias podrían tener una mejor disposición final, favoreciendo al UHPC dada la disponibilidad y bajos costos.

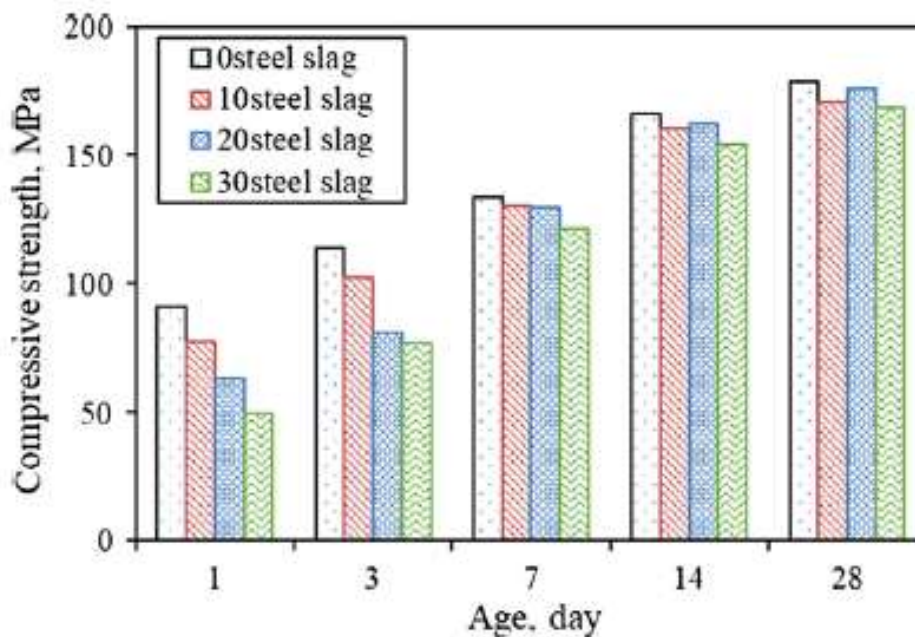


Figura 5-3 Desarrollo de la resistencia a la compresión en UHPC con escoria de acero (Zhang et al., 2019).

El uso de escorias de litio fue estudiado por Z.-h. He et al. (2018), para la realización de los ensayos usaron mezclas con combinaciones de humo de sílice y escoria (en proporciones del 5, 10 y 15% de reemplazo del material cementante), para esto mantuvieron constantes las proporciones de cemento, arena de cuarzo y agua. De acuerdo con la Figura 5-4, el espécimen que contenía 10% de escoria de litio superó la resistencia a compresión de la muestra de control.

El incremento en la resistencia a compresión que se observó en las pruebas, se atribuye a que el tamaño de partícula de la escoria de litio se sitúa entre los tamaños de las partículas del cemento y la del humo de sílice, por lo que al dosificarlas correctamente pueden conformar un estado de empaquetamiento más denso, de esta manera se genera el incremento a la resistencia a la compresión.

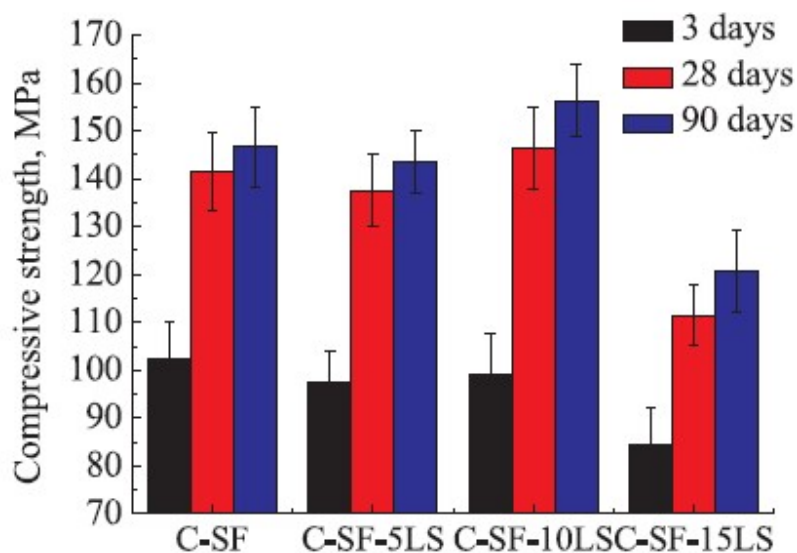


Figura 5-4 Efecto de la escoria de litio en la resistencia a compresión del UHPC (He et al., 2018).

5.2.4 POLVO DE PIEDRA CALIZA

La caliza la roca de origen sedimentario más abundante, representa alrededor del 10% del volumen total de todas las rocas sedimentarias, está compuesta fundamentalmente del mineral calcita (CaCO_3) que se forma por medios inorgánicos o como resultado de procesos bioquímicos. Su utilidad práctica cobra relevancia en los materiales de construcción. Los principales derivados de las calizas son la cal, el carbonato de calcio y el cemento.

Basados en los resultados que obtuvieron en su estudio P. P. Li et al. (2020), resumieron los efectos de la adición de polvo de caliza o LP por sus siglas en inglés 'Limestone Powder' en las mezclas del UHPC en 3 aspectos principales: 1) Comportamiento de la mezcla en estado fresco, 2) Cinética de hidratación y 3) Propiedades en estado endurecido. Basados en un estudio que realizaron en donde ensayaron 5 mezclas de concreto con adiciones de 0%, 20%, 40%, 60% y 80% como reemplazo del cemento y del microsílíce, determinaron que la adición de LP contribuye a mejorar la fluidez, toda vez que reduce la fricción entre partículas dada la limitada interacción química. También se observó que el grado de hidratación puzolánica secundaria es más intensa, lo que aumenta el potencial del desarrollo de resistencia en edades posteriores. Finalmente concluyen que un contenido adecuado de polvo de piedra caliza contribuye a unas estructuras de poros más densas, mayores resistencias y contracciones totales libres comparables. Mientras que una adición excesiva superior al 60% del cemento y microsílíce debilita considerablemente tanto la estructura de los poros como la resistencia. El contenido límite de polvo de piedra caliza en algunas normas lo limitan a un 25%-35% del volumen, para ser conservador en la estructura del UHPC, por su parte en las conclusiones de su investigación, la Dirección General de Desarrollo Minero (2009) sugieren una adición del 50% como el contenido óptimo, dado que este volumen de incorporación puede reducir hasta en un 47% las emisiones de CO₂.

En su investigación, Wang et al. (2019) estudiaron el comportamiento mecánico de 5 mezclas de UHPC y una mezcla testigo, en los cuales variaban las dosificaciones de cemento, con variaciones desde 300 a 800 kg/m³, junto con las dosificaciones de polvo de caliza, con proporciones que variaban desde 0 hasta 500 kg/m³. Las proporciones del superplastificante, humo de sílice y arena de río con una granulometría comprendida entre 0.075 y 1.25 mm, se mantuvieron igual en las 6 mezclas. Tras los ensayos a compresión se logró evidenciar que la mezcla con un reemplazo del 50% de cemento de la mezcla por polvo de caliza resultaba óptimo, logrando mejores propiedades mecánicas que las demás mezclas. El fenómeno que observaron se lo atribuyeron a que el polvo de caliza posee un menor tamaño de partícula, contribuyendo a que la adición pueda rellenar los espacios entre las partículas de mayor tamaño (cemento y arena), lo que resulta beneficioso para obtener una estructura de UHPC densamente empaquetada. La reducción de resistencia que se observa en las mezclas en donde la sustitución del cemento por polvo de caliza es mayor al 50% se atribuye a que la densidad de empaquetamiento disminuye con proporciones superiores al 50%, demostrando así la estrecha

relación existente entre el empaquetamiento de partículas y las propiedades mecánicas a compresión del UHPC.

5.3 SUPERPLASTIFICANTES,

Los superplastificantes conocidos como 'SZ' por sus siglas en inglés 'Superplasticizers', son dispersantes poliméricos que se utilizan en los materiales cementantes para reducir el límite elástico con un contenido constante de sólidos o para aumentar el contenido de sólidos con un límite elástico constante (Flatt & Schober, 2012). Los superplastificante son muy usados en la fabricación de concreto contribuyendo a la reducción del impacto ambiental. Se les atribuye el efecto de generar un concreto más duradero traducido a una vida útil prolongada, lo anterior se da debido a que la mezcla de concreto requiere menor cantidad de agua, por lo que presentará una menor porosidad y en particular una menor permeabilidad. En el mismo sentido, los superplastificantes pueden contribuir a que las mezclas requieran menor cantidad de cemento, manteniendo una relación agua – cemento constante, lo que permite utilizar cementos con mayor sustitución del Clinker o utilizar menores dosificaciones de cemento en las mezclas (Hermida et al., 2014).

Los superplastificantes fueron introducidos al mercado en la década de 1930 y desde entonces se han generado diversas generaciones de estos productos, en donde la constante evolución ha permitido mejorar las prestaciones. La generación más reciente es la de los Policarboxilatos que fueron introducidos en la década de 1980 (Flatt & Schober, 2012).

La incorporación de los aditivos plastificantes y superplastificantes en las mezclas de concreto buscan 3 objetivos: 1) Reducir el contenido del agua de la mezcla de concreto sin afectar su trabajabilidad, de manera que se obtiene mejoras significativas de la resistencia y durabilidad. 2) Incrementar la consistencia sin necesidad de aumentar el contenido de agua en la mezcla, de esta manera se logra obtener mezclas de concreto muy fluidas y 3) Optimizar el contenido de cemento mediante la reducción de la relación agua/cemento, sin afectar la fluidez y mantener la resistencia mecánica de la mezcla (Bragulat, 2021). En la Figura 5-5 se observa la clasificación de los superplastificantes según la norma española UNE-EN-934-2 'Aditivos para hormigones, morteros y pastas', esta clasificación se realiza en función de la reducción de agua.

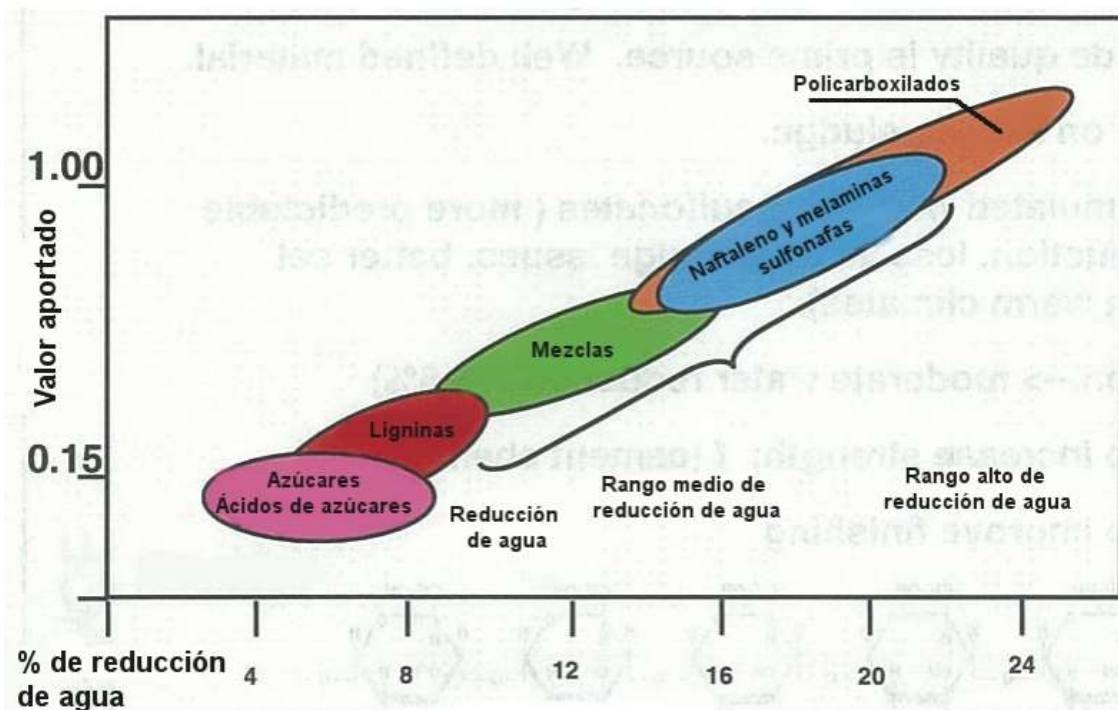


Figura 5-5 Clasificación de los superplastificantes, según normativa europea EN 934.2 (Bragulat, 2021).

Li et al. (2016) estudiaron el comportamiento de mezclas de concreto UHPC en estado fresco, para lo cual evaluaron los tiempos de fraguado inicial y final utilizando el ensayo de aguja Vicat en 4 pastas de UHPC que contenían diferentes tipos de superplastificantes (SP), los cuales se diferencian entre sí por su composición y sus propiedades dispersantes y retardantes, en la investigación son denominados SP1, SP2, SP3 y SP4. Los superplastificantes que utilizaron fueron de tipo 'éteres policarboxílicos' (PCE), desarrollados en la década de 1980 que logran reducir hasta un 40% la cantidad de agua requerida.

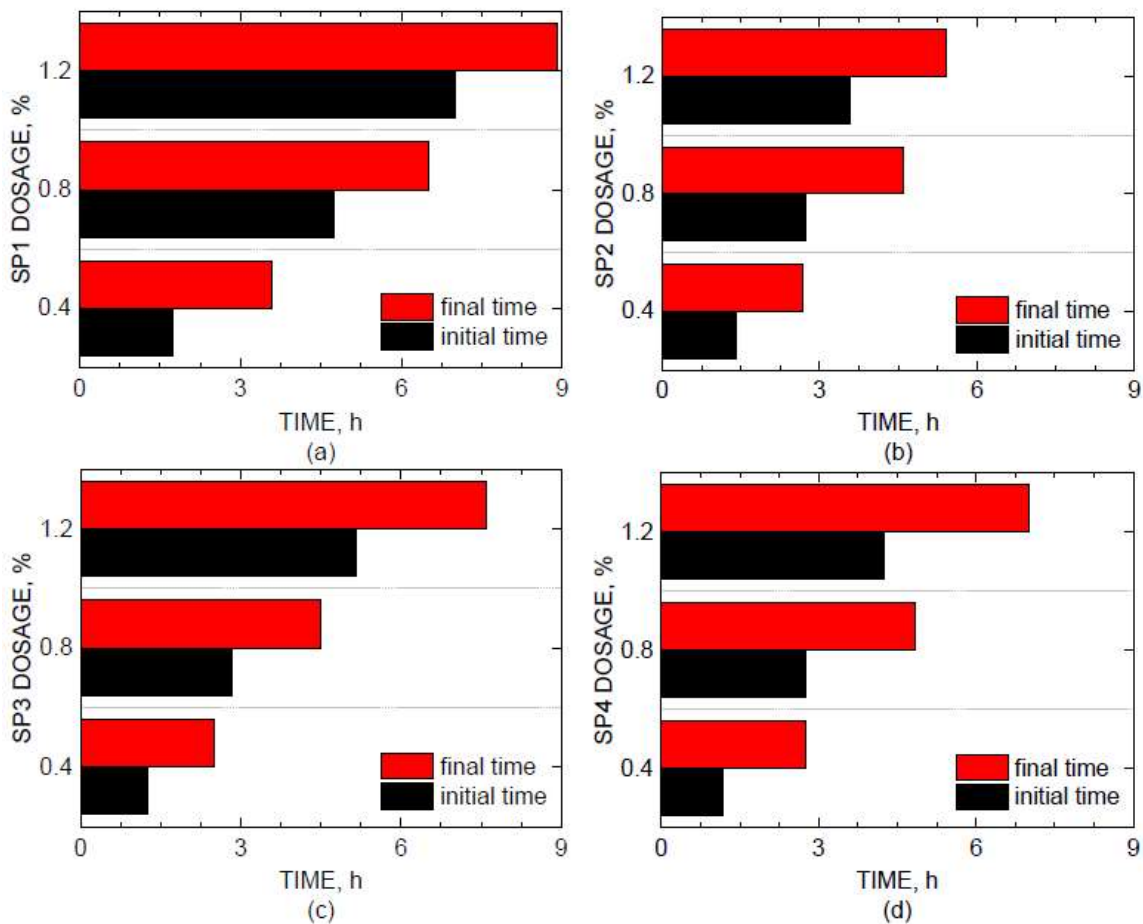


Figura 5-6 Tiempos de fraguado de las pastas (P. P. Li et al., 2016).

En la Figura 5-6 se observa que las diferencias de tiempo de SP1 se mantienen en un nivel estable (aproximadamente 75-175 min). SP2 muestra un patrón similar en las dosificaciones de 0,8% y 1,2%, sin embargo, es más corto que el de SP1 en la dosificación de 0,4%. La diferencia de tiempo de SP3 muestra casi la misma tendencia creciente con el aumento de la dosis de SP a SP4, con unos 20 min antes que la de SP4.

Las mezclas de concreto pierden su trabajabilidad con el tiempo, lo que se conoce como 'pérdida de asentamiento', la cual se da por procesos físicos y químicos, pero principalmente se atribuye a la coagulación física de las partículas. En la Figura 5-7 se presenta la vida de asentamiento del UHPC a las 2 horas, en donde se evidencia que las mezclas SP1 y SP2 tienen un tiempo de asentamiento más corto, atribuido

a la baja capacidad de adsorción y a una cobertura superficial no completada, lo que conlleva al rápido fraguado del concreto. El UHPC con SP3 tiene un tiempo de asentamiento perfecto en todo el tiempo del ensayo y el SP4 logró mantener un buen comportamiento en los primeros 40 minutos, sin embargo, pasado este tiempo, mostró una fuerte disminución.

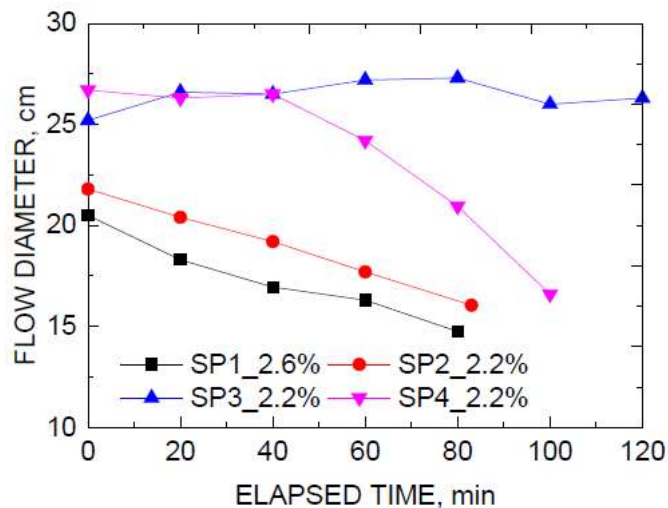


Figura 5-7 Tiempos de fraguado de las pastas (P. P. Li et al., 2016).

El concreto es un material perecedero en estado plástico, y su 'vida útil' depende del tiempo de fraguado del cemento empleado y de la plasticidad con la que haya sido fabricado. En general, los UHPC con SP1 y SP2 tienen una corta etapa de asentamiento, demostrando que tienen una relación de disminución lineal entre el flujo y el tiempo transcurrido. El UHPC con SP3 sólo puede mantener una vida útil dentro de los 40 minutos. Finalmente, el UHPC con SP4 presenta la mejor vida útil, casi sin ninguna pérdida de flujo de asentamiento en 2h.

P.P. Li et al (2017) en su investigación midieron el potencial zeta de las suspensiones de polvo lo que indica el potencial de la adsorción del superplastificante, el fraguado, la cinética de hidratación, las contracciones tempranas, el flujo de dispersión y la demanda de agua de las pastas, la vida útil del concreto y el desarrollo de la resistencia temprana del UHPC. Los resultados indican que deben seleccionarse cuidadosamente los tipos y dosis apropiados de SP tipo éteres policarboxílicos (PCE) para el diseño de UHPC. Los autores lograron determinar que la capacidad de dispersión del SP tipo PCE depende en gran medida de su estructura química y de la capacidad de adsorción en las partículas. La fluidez

de la pasta aumenta continuamente desde la dosis crítica hasta la dosis de saturación y permanece constante tras obtener una cobertura completa de la superficie de las partículas por encima de la dosis de saturación. En el mismo sentido concluyeron que la capacidad de retención de fluidos viene determinada principalmente por los PCE adsorbidos y no aumentará tras las dosis de saturación de SP debido a la cobertura completa de partículas, pero el contenido de agua desempeña un papel muy sensible en la capacidad de retención de fluidos de los UHPC.

5.4 FIBRAS

El uso de fibras en las mezclas de UHPC en algunos textos se le da el nombre de 'Concreto de ultra altas prestaciones reforzado con fibras' o UHPFRC por sus siglas en inglés 'Ultra-High-Performance Fibre-Reinforced Concrete'. Los concretos de ultra altas prestaciones puede ser muy frágiles, razón por la cual se añaden las fibras, para poder incrementar la ductilidad del material, principalmente en los esfuerzos a tracción y flexión, a compresión se notan ligeras mejoras. La adición de fibras se ha convertido en un tema de gran interés para los investigadores, debido a que se ha observado que mejora las características mecánicas de los UHPC (Hannawi et al., 2015). A partir de los experimentos, se sabe que existe un límite superior para la cantidad de fibras largas que pueden añadirse al concreto sin afectar excesivamente la trabajabilidad. Sin embargo, dependiendo del tipo de concreto y de la aplicación, el contenido de fibra puede variar significativamente (Eide & Hisdal, 2012b).

Estas fibras pueden distinguirse por sus diferentes propiedades físicas o químicas, como la naturaleza de la fibra (acero, mineral o sintética), su geometría (macrofibra frente a microfibra), como su relación de aspecto L/ϕ y sus propiedades mecánicas, etc. (Hannawi et al., 2015). Basados en un análisis estadístico Yang J. et al. (2022) encontraron que para el 2022 alrededor del 73.5% de artículos publicados estudiaban el comportamiento del UHPFRC con adición de fibras de acero, mientras que otros artículos tomaban las mezclas de UHPFRC con adición de fibras como muestras de control. Los efectos de la adición de fibras en las mezclas pueden verse sometidos a ciertas variables, dentro de las cuales se encuentran el volumen, orientación y distribución, forma y características mecánicas de las fibras.

Un estudio realizado por Hannawi K. et al (2015) en donde buscaron estudiar el comportamiento de diferentes mezclas de UHPFRC con adiciones del 1% de

volumen de fibras de diferentes materiales, para este fin utilizaron fibras de acero, wollastonita, basalto, PVA, sintética barchip y polipropileno – polietileno. Los resultados encontrados indicaron que las fibras sintéticas al ser un material poroso presentaban una zona interfacial fibra/matriz porosa, en comparación con las fibras de acero y minerales. La adición de fibras demostró un ligero incremento en la capacidad mecánica a compresión de los especímenes, a excepción de la fibra de acero en donde la capacidad fue mucho mayor, atribuido a la rigidez propia de la fibra.

En las imágenes SEM mostradas en la Figura 5-8, se evidencia que las mezclas con fibra de acero y fibra mineral (Wollastonita y Basalto) evidencian una zona interfacial fibra/matriz más compacta, en comparación con la fibra sintética (PVA, PP-PE y Barchip), lo anterior se atribuye a que las fibras sintéticas restringen la entrada del agua necesaria para la hidratación del cemento en la estructura de las probetas de mortero durante el periodo de curado, mientras que por otro lado la fibra de acero y la fibra mineral tienen una superficie que es más hidrófila, y por lo tanto, la pasta de cemento alrededor de esta fibra puede hidratarse adecuadamente y llenar una buena parte del espacio entre la fibra y la matriz.

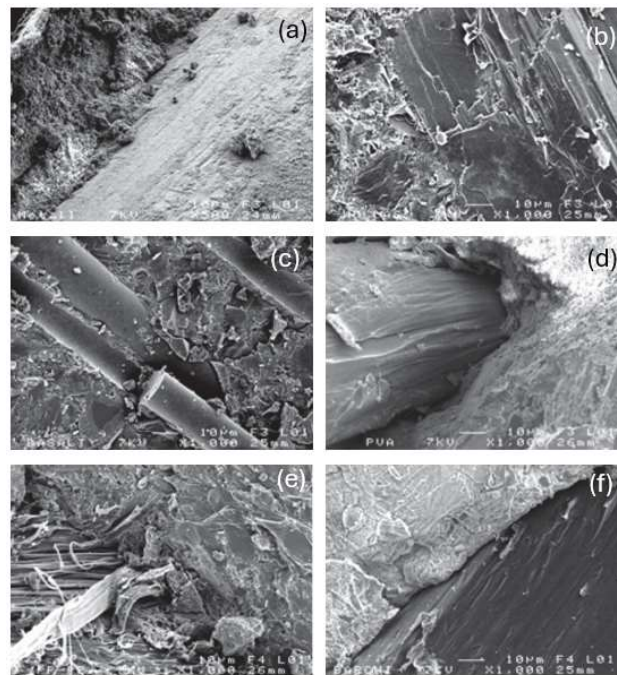


Figura 5-8 Observación de la unión fibra-matriz en microscopio electrónico de barrido (Hannawi et al., 2015).

Un estudio reológico realizado por L. Teng, et al. (2020) en donde buscaban mejorar las capacidades a flexión de los concretos, usando volúmenes de fibra de acero del 1%, 2% y 3% (usar volúmenes superiores era contraproducente según los autores para la mezcla, puesto que se incrementaba el volumen de aire atrapado y se disminuían las propiedades mecánicas). Los resultados evidenciaron que la resistencia a la compresión a los 28 días del UHPFRC aumentó con el incremento del volumen de fibra, atribuyéndose al aumento del módulo elástico. El incremento en el comportamiento a flexión del UHPFRC se atribuye a la mejora evidenciada en la distribución de las fibras, en términos de la dispersión y orientación de estas. El efecto de las propiedades reológicas del mortero UHPFRC sobre la distribución de fibras es más significativo con el aumento del volumen de fibras. Para UHPFRC con 1%, 2% y 3% de fibras de acero, las propiedades reológicas óptimas del mortero de suspensión condujeron a un aumento del 40%, 50% y 65% en el coeficiente de distribución de fibras, respectivamente.

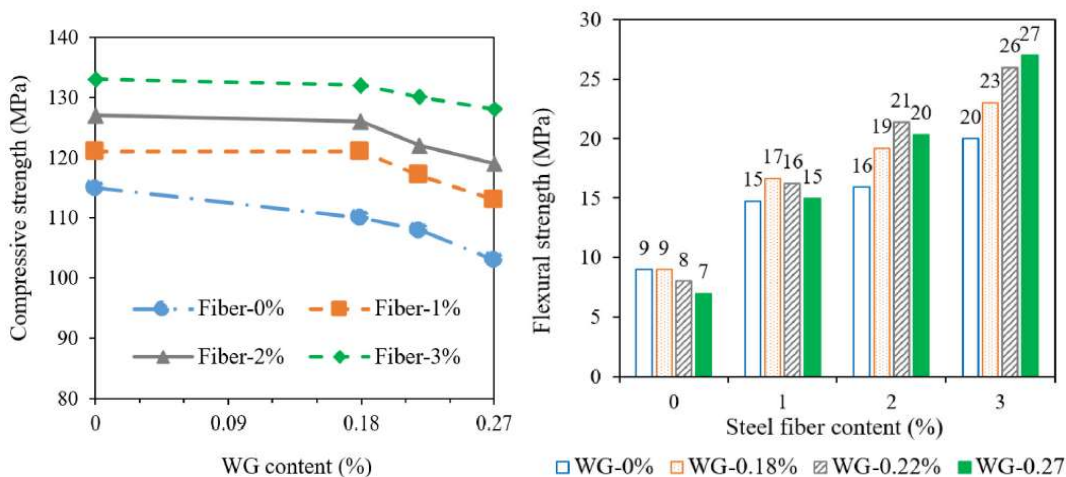


Figura 5-9 Resistencia a la compresión y a la flexión a los 28 días de las mezclas de UHPC investigadas hechas con diferentes volúmenes de fibra y contenidos de exopolisacárido (biopolímeros) (Teng et al., 2020).

Se ha demostrado que el tamaño y diámetro de las fibras presenta gran relevancia en el comportamiento de las mezclas de concreto, D. Scott et al. (2015) lograron determinar mediante un programa experimental en el cual se incluía ensayos para evaluar las propiedades estáticas y dinámicas de las mezclas con 4 tipos de fibras diferentes, ZP 305 fibra de acero de la marca Dramix, SF tipo V de la marca Nycon, OL 6/.16 y OL 10/.20 de la marca Dramix, todas hechas de acero. Concluyeron que

el tamaño y la forma de las fibras tienen un impacto insignificante en la resistencia a la compresión, el módulo elástico y la relación de Poisson. Este resultado era de esperar, ya que las propiedades de compresión están más fuertemente correlacionadas con las propiedades de la matriz que con las del refuerzo de fibra, que se proporciona para mejorar las propiedades a la tracción.

No solo el diámetro y tamaño de las fibras tiene incidencia en el comportamiento de las mezclas de UHPC, sino que también la forma de las fibras de acero. X. Yang et al. (2021) en su estudio utilizaron 6 tipos de fibras, en donde variaban la forma (recta, onda, rect con gancho al final y onda con gancho al final), longitud (de 8 mm a 40 mm) y diámetro (de 0.2 mm y 5 mm). Finalmente concluyeron que la resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión del UHPFRC aumentaron gradualmente con el aumento de la fracción de volumen de fibra de acero de tipo ondulado y de tipo gancho terminal.

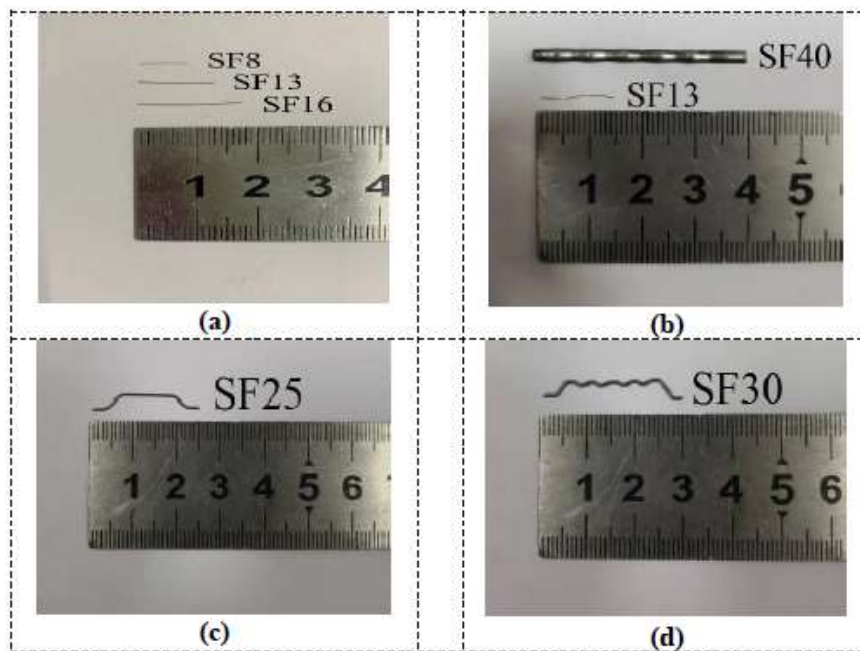


Figura 5-10 Tipos de fibra de acero (Yan et al., 2021)

La colocación del concreto demuestra tener una amplia relación con el comportamiento post-fisuración del UHPFRC. Lo anterior se da ya que cualquier flujo durante la colocación del concreto tiende a alinear las fibras en dirección de dicho flujo, debido al comportamiento natural de las fibras en la fase húmeda – viscosa del concreto antes de iniciar con la etapa de fraguado. Las fibras que se

encuentran cercanas a las paredes del encofrado naturalmente se alinean paralelas al encofrado. Esto solo ocurre cuando la distancia al encofrado es menor o igual a la longitud de las fibras. Por tanto, cuanto más se aproxime el espesor de la estructura a la dimensión de las fibras, mayor será el efecto sobre la resistencia efectiva a la tracción de las partes. En algunas ocasiones se ha observado un comportamiento de orientación gravitacional. Para tener en cuenta la consecuencia de estos efectos, algunos documentos sugieren el uso de factores para la correcta interpretación de los resultados obtenidos en los ensayos de laboratorio (Groupe de travail BFUP, 2013).

5.5 AGREGADOS

El uso de los agregados en el concreto tiene como objetivo reducir los costos en la producción de la mezcla, controlar los cambios volumétricos y aportar a la resistencia final del material, en los concretos convencionales tiene una participación entre el 65% y el 70%, mientras que en los concretos de tipo UHPC tienen una participación entre el 20% - 40% (Chen et al., 2019).

La forma y textura superficial de las partículas individuales de cualquier tipo de agregado tienen una influencia importante en la manejabilidad del concreto en su estado fresco y en otras características físicas de su estado sólido. Aunque la forma y textura de los agregados gruesos también influye en dicha relación, se afecta en mayor medida la resistencia a través de la relación adherencia agregado/pasta de cemento (Silva, 2019).

Tal como se indicó en los diseños de mezcla, para desarrollar de manera óptima las propiedades mecánicas del concreto, las mezclas deben contar con una buena granulometría de los agregados pétreos, siguiendo el método de empaquetamiento de partículas. Esto es fundamental para lograr un esqueleto pétreo lo más densamente empacado posible. (Chan Yam et al., 2003).

Una investigación desarrollada por P. P. Li et al. (2018) en donde investigaron la influencia de los agregados en las mezclas de UHPC, para lo cual modificaron la mezcla de referencia sustituyendo la arena de río por áridos de granito y basalto con un tamaño máximo de partícula de 16 mm, en las mismas fracciones. La investigación se centró en la consistencia de la mezcla de concreto, la resistencia a compresión, la resistencia a flexión y la absorción del agua en el concreto endurecido. Los resultados obtenidos indican que las mezclas con adición de

agregados de basalto presentan las mejores propiedades mecánicas, alcanzando a la compresión una resistencia de 150 MPa y a la flexión de 14 MPa, así como una mejor trabajabilidad y menor absorción del agua.

Por su parte, El-Mir et al. (2022) estudiaron el comportamiento de mezclas de concreto de tipo UHPC con adiciones de arena de río (0.03 mm – 4.0 mm) y arena de cuarzo (1.0 mm- 5.0 mm), con el objetivo de disminuir el costo de fabricación de UHPC, mediante el reemplazo de las partículas de cemento no hidratadas por ligantes (humo de sílice y metacaolín). Las mezclas de UHPC con arena de cuarzo dieron respuestas de resistencia significativamente superiores, en comparación con las mezclas de arena de río con contenido similar de ligante, lo anterior, se aprecia en la Figura 5-11.

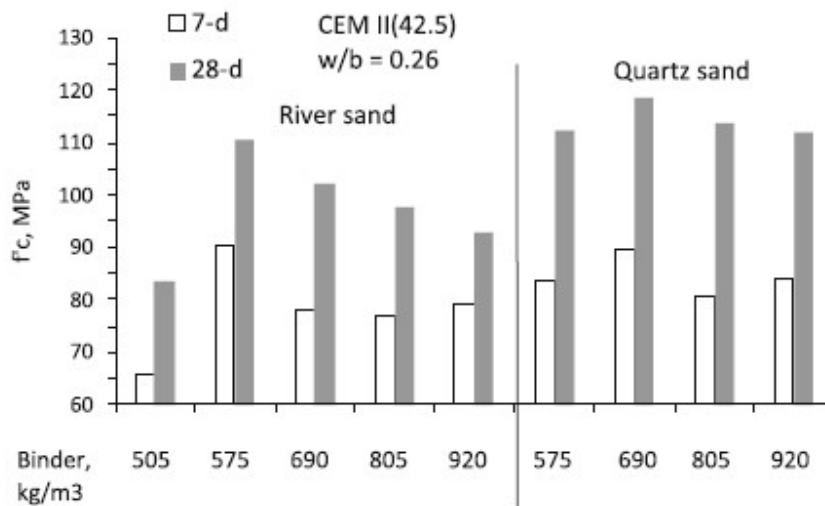


Figura 5-11 Efecto del contenido de ligante en la resistencia a compresión para diferentes tipos de arena (El-Mir et al., 2022).

En un estudio desarrollado por Meng & Khayat (2017) en donde tenían como objetivo mejorar las propiedades mecánicas y reducir la retracción autógena del concreto UHPC mediante la sustitución de la arena de río por arena ligera presaturada (LWS). Para esto ensayaron diferentes mezclas con sustituciones entre el 0% y el 75% del volumen de arena de río por una cantidad equivalente de arena LWS. Los resultados demostraron que el uso de LWS desacelera y reduce de manera eficaz la caída de humedad relativa interna y la contracción autógena del UHPC. Los análisis de microscopía que realizaron revelaron que la porosidad

disminuyó y las propiedades de la interfaz entre la arena y la matriz de cemento mejoraron con una sustitución de hasta el 25%.

La densidad de empaquetamiento de los agregados puede ser una de las propiedades más importantes en las características mecánicas de los UHPC, ya que en un estudio desarrollado por Soliman & Tagnit-Hamou (2017a) en donde buscaban reemplazar la arena de cuarzo por polvo de vidrio, se demostró que este reemplazo ocasiona una importante disminución en la capacidad a compresión del concreto, reduciendo la capacidad de 204 MPa a 182 MPa, lo que representa una pérdida de aproximadamente el 12%. Esta pérdida es atribuida a la baja densidad de empaquetamiento del material de reemplazo utilizado.

Otras investigaciones se han centrado en la sustitución de agregados finos por cenizas de carbón y nano-silicato cálcico hidratado (C-S-H), con el fin de que el UHPC pueda ser más eficiente desde el punto de vista energético y respetuoso con el medio ambiente, por medio del uso de componentes que consuman menos energía y con residuos industriales. Concluyeron que el uso de C-S-H como sustituto contribuye al incremento en un 33% de los concretos convencionales, mientras que en las mezclas de UHPC se logró alcanzar una resistencia a la compresión de 120 MPa (Ban et al., 2023).

6 DISEÑOS DE MEZCLA DE LOS CONCRETOS DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES

Como ya se mencionó, el concreto de ultra altas prestaciones (UHPC) se puede considerar un material relativamente novedoso, su primer uso en estructuras registrado fue hace 25 años, en la construcción de un puente peatonal ubicado en Quebec - Canadá (Akhnoukh & Buckhalter, 2021), desde allí sus bondades comenzaron a ser más conocidas, tomando especial fuerza su aplicación en puentes. Al ser un material relativamente novedoso, se han desarrollado múltiples trabajos en torno a la creación de la "fórmula" para la elaboración de este tipo de concreto. Sin embargo, sus enfoques son variados. Entre los más comunes se destaca la búsqueda de las mejores capacidades a compresión, tracción y flexión; diseños de mezcla que logren economizar el precio del m³ del concreto; mezclas de concreto con el menor impacto a la huella de carbono; y concretos con mayor durabilidad. Esto resulta en diseños de mezcla con notables diferencias en su comportamiento, así como en sus componentes y dosificaciones.

Diversas investigaciones se han realizado en torno al hallazgo del diseño de mezcla preciso para que el concreto presente las mejores propiedades mecánicas y de trabajabilidad, las metodologías más populares para dichas investigaciones pueden dividirse en 4 grandes grupos: 1) Método de empaquetamiento, 2) Método basado en las propiedades reológicas de la pasta del concreto, 3) Método estadístico de diseño de mezcla y 4) Método de diseño basado en redes neuronales artificiales (Zhou et al., 2021a).

6.1 MÉTODO DE EMPAQUETAMIENTO

La clave para el desarrollo de la alta resistencia a la compresión de los concretos de ultra altas prestaciones se basa en el empaquetamiento de partículas (Du et al., 2021) (Zhou et al., 2021b), el principal objetivo de esta metodología se centra en disminuir en lo máximo posible los vacíos existentes entre los componentes de la mezcla, de esta manera los vacíos que se crean entre las partículas de mayor tamaño son rellenados por las partículas de tamaño medio, y a su vez, los vacíos generados entre las partículas de tamaño medio son rellenados por las partículas de menor tamaño, de esta manera se logra obtener una mezcla altamente densa que mediante la reducción de porosidad logran proveer una matriz más resistente. Para lograr una adecuada optimización de partículas, se requiere que la mezcla cuente con partículas muy finas, se estiman tamaños máximos de partículas de

agregados gruesos entre 20 mm a 30 mm y el uso de arena como agregados finos (Ullah et al., 2022), de esta manera se incrementa la capacidad a compresión, dado que los vacíos generados entre los agregados más gruesos son rellenados por las partículas finas, evitando que el agua ingrese a esos espacios, lo que contribuye a que el agua se distribuya de manera homogénea en toda la mezcla mejorando así la trabajabilidad (Soliman & Tagnit-Hamou, 2017b).

6.1.1 MODELOS DE EMPAQUETAMIENTO EN ESTADO SECO

El método de empaquetamiento se basa en la búsqueda de un diseño de mezcla que logre obtener la mayor densidad a través de la acomodación de sus partículas, para lo que se tiene en cuenta la estructura de la matriz cementante y los efectos de la interacción, este método de diseño presenta principalmente 2 modelos que se subdividen en 2 grupos: 1) Modelos discretos y 2) Modelos continuos.

6.1.1.1 Modelos discretos

El modelo discreto asume que el volumen de cada partícula puede comprimirse totalmente según el tamaño específico de la partícula (Zhou et al., 2021a). Uno de los pioneros en el desarrollo matemático de las leyes del empaquetamiento fue Furnas, quien basado en algunas investigaciones sin éxito desarrolladas por Feret, Fuller, Abrams, Graf y Talbot, buscó crear ecuaciones que le permitieran generar mezclas de concreto y mortero con altas densidades. Su idea básica era que al introducir partículas pequeñas (casi de tamaño infinito) dentro de los espacios que se generan entre las partículas grandes, se podría llenar los vacíos sin modificar el volumen, tal como se aprecia en la Figura 6-1, en la práctica observó que el volumen sí se modificaba ligeramente (Furnas, 1931).

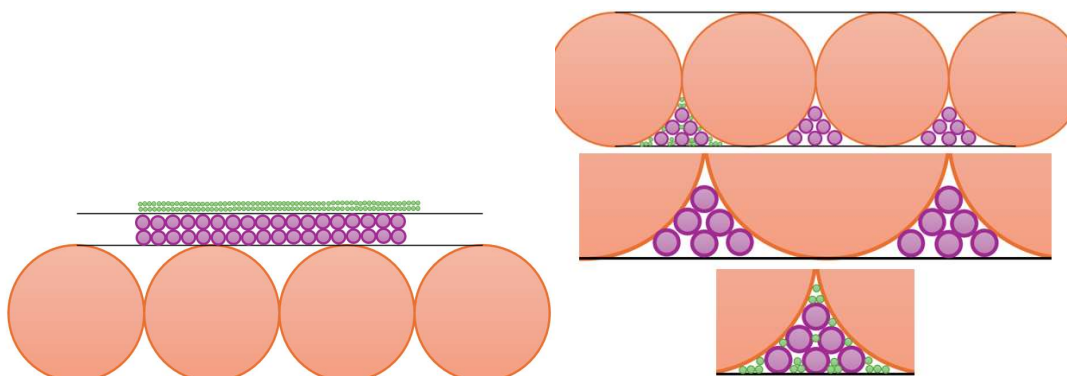


Figura 6-1 Primicia base de la investigación de Furnas. Elaboración propia.

Para su investigación inició con la suposición de que existe una capa de agregados gruesos, sobre esa y de manera independiente se apoya una capa de agregados medios y por último hay una capa de agregados finos. Si se lograra introducir los agregados medios dentro de los vacíos que se generan en la capa de los agregados gruesos, y a su vez se introducen los agregados finos en los vacíos que se generan en los agregados medios, se tendría un menor volumen y por ende una mayor densidad, basado en la anterior teoría, Furnas (1931) desarrolló ecuaciones en las que intervenía dos factores: 1) El porcentaje de vacíos que depende de la forma de las partículas y 2) La relación de tamaños entre los componentes de la mezcla.

Años más adelante Towers (1968), y Goff et al. (1968) realizaron algunas investigaciones en donde buscaban explicar la función de la porosidad en mezclas binarias, para esto consideraron un coeficiente con el fin de tener en cuenta para la porosidad el efecto muro, el cual se produce en la etapa de mezclado debido a la diferencia de tamaños de partículas entre los agregados gruesos y el cemento, ocasionando que se forme una 'pared' en las zonas adyacentes a los agregados. Tuvieron en cuenta 3 importantes consideraciones: 1) Los agregados tienen forma esférica, 2) Los agregados presentan un único tamaño y 3) Los agregados se dividen en finos y gruesos, convirtiendo el modelo de binario a ternario.

Basados en investigaciones previas Goltermann, Johansen y Palbol (1997) desarrollaron un modelo al que denominaron 'Modelo de Toufar modificado', en donde no se estaba inicialmente de acuerdo con las 3 suposiciones del modelo de Toufar, por lo que subsanaron los 2 primeros supuestos introduciendo al modelo un diámetro característico para los agregados y utilizaron los grados medidos de empaquetamiento propios de los agregados.

Para la medición del grado de empaquetamiento de los agregados utilizaron una mesa de caída, en donde los agregados estaban dentro de un envase cilíndrico, se dejaban caer los envases a determinada altura y por un determinado número de ciclos, de esta manera se determinaba la densidad aparente de los agregados. Una vez calculados los grados de empaquetamiento de los agregados de manera experimental, se comparaban los resultados con los obtenidos teóricamente, encontrando una correlación del 97%, considerando así los modelos 'Toufar' y 'Toufar modificado' como precisos.

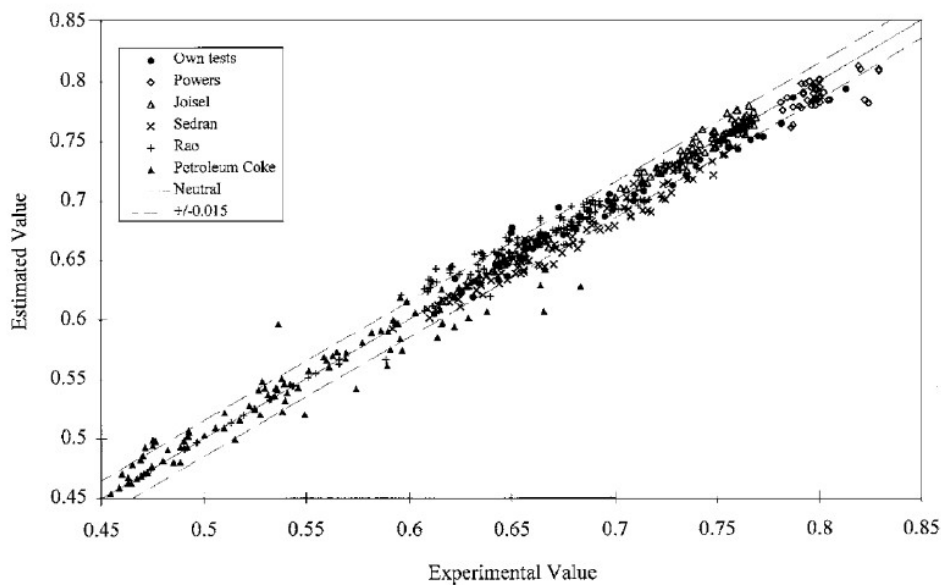


Figura 6-2 Empaquetamiento experimental y estimado. (Goltermann et al., 1997)

Finalmente se logró determinar que el modelo de Toufar daba una buena estimación del grado de empaquetamiento para combinaciones de dos o tres grupos de agregados. Y con el modelo de Toufar modificado se retira la limitación en donde se requerían partículas esféricas y de un único tamaño (Goltermann et al., 1997).

Investigaciones más recientes (Shah et al., 2020) en donde se compara el modelo de Toufar modificado contra la norma técnica de India 'Indian Standard 383 – Coarse and Fine Aggregate for Concrete', se encontró que usando el modelo modificado se podría optimizar aún más la densidad de empaquetamiento de los agregados, logrando aplicar con éxito las combinaciones de agregados y logrando reducir los vacíos que se conforman entre estos, de esta manera se mejora la durabilidad del concreto y se prevé a la mezcla de concreto mejores prestaciones.

A continuación, en la Tabla 6.1 se presenta el resumen de los modelos más estudiados para el método de empaquetamiento de partículas.

Tabla 6.1 Resumen de modelos discretos de empaquetamiento de partículas
(Zhou et al., 2021c)

Año	Modelo	Efecto en el empaquetamiento		Principales características		
		Binario	Ternario	Efecto muro	Efecto de aflojamiento	Descripción
1929	Modelo Furnas	X				Se asumía que las partículas eran independientes
1967	Modelo Aim y Goff	X		X		Se propone un coeficiente para el efecto muro
1969	Modelo Power	X		X	X	Consideraba los efectos muro y de aflojamiento
1977	Modelo Toufar		X	X		Sistema ternario dividido en múltiples sistemas binarios
1986	Linear packing density model			X	X	Densidad de empaquetamiento derivada cuando las partículas están distribuidas de forma continua
1994	Solid suspension model			X	X	Densidad de empaquetamiento virtual propuesta y ampliamente utilizada

6.1.1.2 Modelos continuos

Los modelos continuos tienen como primicia que la distribución granulométrica es continua, es decir que los tamaños de las partículas varían de tamaño de manera gradual, logrando obtener una amplia gama de tamaños de partículas en la muestra lo que evita los grandes saltos o brechas en su distribución.

En 1907 Fuller y Thomson (1907) propusieron una curva granulométrica denominada 'curva de Fuller' en donde consideraron que todos los tamaños posibles de partículas estaban dentro del sistema. Su investigación tuvo como objetivo principal encontrar una curva que permitiese obtener buenos resultados en mezclas de concreto con mayor trabajabilidad, considerando la consistencia de la mezcla y el tipo de agregado a utilizar. El coeficiente K_j el cual corresponde a la proporción óptima de los agregados a utilizar fueron calculados mediante la resolución de ecuaciones asistidas por computador, una vez se determinaron estas proporciones para diversos tipos de agregados se estimó una curva minimizando la suma cuadrática de las desviaciones. De esta manera lograron determinar la curva granulométrica 'ideal'. Finalmente, mediante la granulometría de la mezcla lograron obtener un método para determinar la resistencia del concreto con un coeficiente de correlación del 0.95.

La ecuación Rosin-Rammler es una de las que mejor describe la distribución de los agregados pétreos, fue desarrollada en 1933 por Aarne Vesilind y actualmente es utilizada en diferentes campos de la ingeniería química y la geología. Tiene 2 primicias base: 1) Las partículas de cemento son esféricas y el tamaño de partículas no afecta al grado de hidratación y 2) La densidad de empaquetamiento de partículas que tienen el mismo tamaño, es independiente del tamaño de las partículas. La ecuación se resume a:

$$P(D) = 1 - e^{-\left(\frac{D}{D_{63}}\right)^n} \quad (I)$$

Dónde:

- $P(D)$ es el porcentaje acumulado de partículas más pequeñas que el diámetro D
- D es el diámetro de la partícula
- D_{63} , es el diámetro correspondiente al 63.2% de paso
- n , es el parámetro de la distribución

En la Figura 6-3 se ilustra el proceso iterativo para la obtención máxima de densidad de empaquetamiento, este método es iterativo y aprovecha la diversidad del tamaño de las partículas, también cumple esencialmente el requisito de tamaño de partícula continuo y minimiza gradualmente el tamaño de los vacíos en las iteraciones.

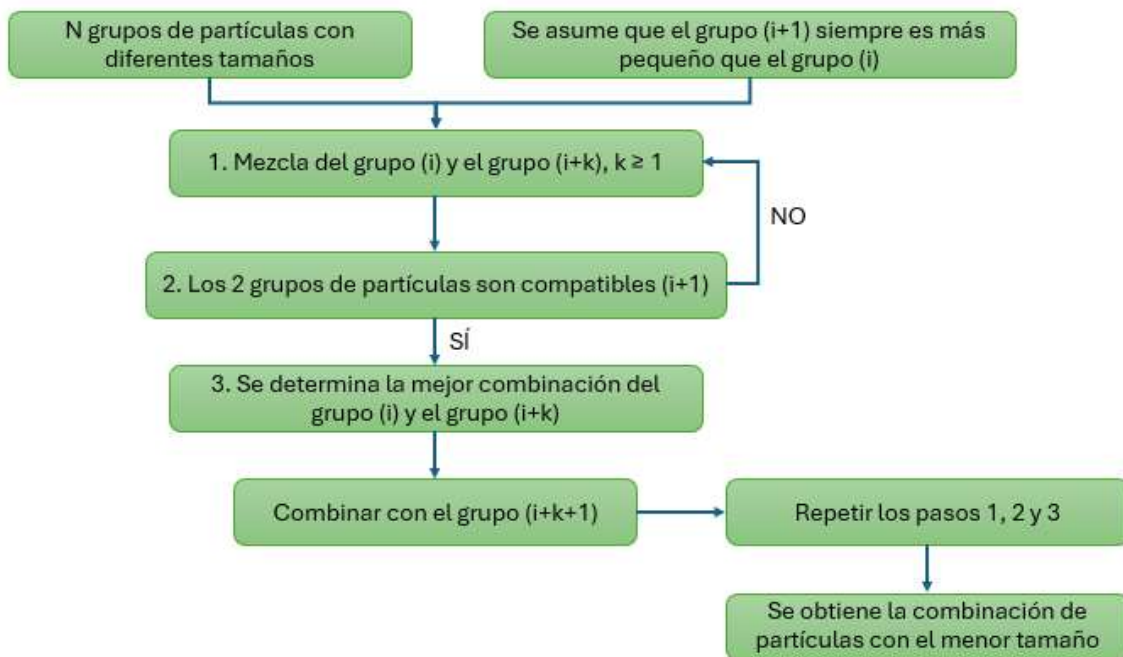


Figura 6-3 Método de diseño de mezcla iterativo basado en la densidad de empaquetamiento de partículas (Zhou et al., 2021c).

6.1.2 MODELOS DE EMPAQUETAMIENTO COMPACTOS QUE CONSIDERAN EL ESTADO HÚMEDO DE LAS PARTÍCULAS

La densidad de empaquetamiento húmedo de partículas hace referencia a la sumatoria de la masa de partículas y agua que se encuentran dentro de los vacíos por unidad de volumen, cuando la mezcla se encuentra en estado húmedo. La densidad de empaquetamiento en estado húmedo depende directamente de las siguientes variables: características de las partículas, grado de dispersión y aglomeración de las partículas. El uso de adiciones como el humo de sílice favorece al incremento de la densidad de empaquetamiento húmeda, esto debido al efecto que se genera en los vacíos de la matriz, los cuales son rellenados por las pequeñas partículas logrando liberar el agua que está encapsulada, contribuyendo así al

incremento de la densidad de la mezcla (Hermann et al., 2016; Kurda, 2023; Mahmood & Kockal, 2022).

De otro lado, algunas investigaciones han concluido que el uso de superplastificantes puede contribuir con el incremento de la densidad de empaquetamiento, esto se debe al efecto de dispersión que genera el superplastificante sobre las partículas (Chandra & Björnström, 2002), (Liu et al., 2017), (Yamada et al., 2000).

6.2 MÉTODO BASADO EN LAS PROPIEDADES REOLÓGICAS DE LA MEZCLA

Existen diferentes tipos de reómetros para determinar las propiedades reológicas de los materiales cementantes. Normalmente los equipos se basan en la aplicación de fuerzas o pares, y se mide la respuesta en función de la velocidad rotacional o lineal en términos de deformación o flujo, luego estos valores se convierten a valores de esfuerzo de cortante y deformación cortante (Khayat et al., 2019).

El diseño de mezcla UHPC basado en las propiedades reológicas se basa en la relación existente entre los componentes y las propiedades reológicas de la pasta, para así poder determinar la mejor composición y proporciones de la mezcla del UHPC con el objetivo de mejorar el rendimiento del material (Zhou et al., 2021c). Se ha estudiado que la forma y el tamaño de las partículas tiene gran relevancia en el comportamiento reológico de las mezclas, esto se da debido a que partículas con mayor forma angular y superficie rugosa presentan un aumento de los puntos de contacto entre partículas, lo que favorece al incremento de resistencia a la fricción entre partículas y por ende al aumento del límite elástico y viscosidad (Hu & Wang, 2011).

El comportamiento reológico de las pastas de cemento fue evaluado por Yahia & Khayat (2003), en donde los resultados hallados indicaron que no existe una relación lineal entre la variación de la viscosidad de la pasta de cemento con respecto a la velocidad de cizallamiento aplicada, razón por la cual no es adecuado aplicar modelos lineales como el de Bingham que es comúnmente utilizado para pastas de cemento convencionales. La mejor alternativa es el uso de modelos no lineales, como los modelos de Bingham modificado y Herschel – Bulkley. La diferencia en el comportamiento de flujo (lineal y no lineal) se atribuye a la diferencia en los rangos de velocidad de cizallamiento a los que se somete el material, esta diferencia en el comportamiento de flujo con la velocidad de cizallamiento aplicada

indica que es importante conocer los rangos de velocidad de cizallamiento que se esperan durante el procesamiento de un material en particular para estimar con precisión las propiedades reológicas y predecir el comportamiento del flujo mediante el uso de modelos numéricos. Con el fin de reducir estos posibles errores Khayat et al. (2019) proponen las siguientes recomendaciones: 1) El cizallamiento previo se aplica a la velocidad de cizallamiento más alta, 2) Las propiedades reológicas se miden inmediatamente después del cizallamiento previo para evitar acumulación de partículas o pérdida de la trabajabilidad y 3) La velocidad de rotación se reduce paulatinamente.

Las propiedades reológicas también se pueden ver afectadas por algunos otros parámetros, tales como: 1) La densidad de empaquetamiento de partículas la cual afecta a los puntos de contacto entre las partículas y el volumen de agua libre de la mezcla, 2) La superficie de los materiales que puede afectar la absorción de agua y al contenido libre de agua, 3) Los aditivos químicos que modifican la reología en la interacción del agua, 4) La absorción o liberación del agua durante la hidratación del cemento asociada a algunos materiales que pueden presentar cambio de comportamiento con el tiempo y 5) La temperatura de la mezcla (Khayat et al., 2019).

El uso de ensayos reológicos ha sido ampliamente utilizado para estudiar el comportamiento de las mezclas de UHPFRC, de esta manera se logran determinar correlaciones mediante modelos no lineales entre el comportamiento reológico de las mezclas con los componentes y dosificaciones. Teng et al. (2020) en su investigación seleccionaron 4 mezclas con dosificaciones de superplastificantes y relaciones a/c diferentes, para ajustar las propiedades reológicas de las mezclas y controlar la distribución de fibras de acero (0%, 1%, 2% y 3%), las cuales tenían una longitud de 13 mm y un diámetro de 0.20 mm, el esfuerzo de fluencia y módulo de elasticidad era de 190 MPa y 203 GPa, respectivamente. Se observó una pobre dispersión de las fibras en el caso de una baja relación a/c y un alto contenido de fibras. Además, el efecto del superplastificante sobre la dispersión de las fibras de acero fue más significativo con una relación a/c más alta. La mejor estabilidad se produjo cuando el contenido de fibra era del 3%, lo que puede deberse al entrelazamiento mecánico de las fibras. La distribución óptima de las fibras de acero se produce cuando las propiedades reológicas de la pasta son moderadas. También se puede demostrar que para UHPFRC con mayor contenido de fibra, la distribución óptima de las fibras requiere una mayor viscosidad de la pasta. Las gráficas (a) y (b) en la Figura 6-4, muestran la dispersión de las fibras y la orientación de las

mezclas de UHPFRC con los ensayos de viscosidad y tiempo de flujo en mini embudo V, en general se observa que para las mezclas de UHPFRC con mayores volúmenes de fibras, se requiere de una mayor viscosidad óptima para asegurar la distribución uniforme y buena orientación de las fibras. La viscosidad plástica del mortero de UHPFRC mejora la distribución de las fibras, pero este efecto deja de ser significativo cuando se supera el valor óptimo. Finalmente, concluyen que para los morteros con adición de fibras del 1%, 2% y 3% el efecto de las propiedades reológicas óptimas del mortero condujo a un aumento del 40%, 50% y 65% en el coeficiente de distribución de fibras, respectivamente.

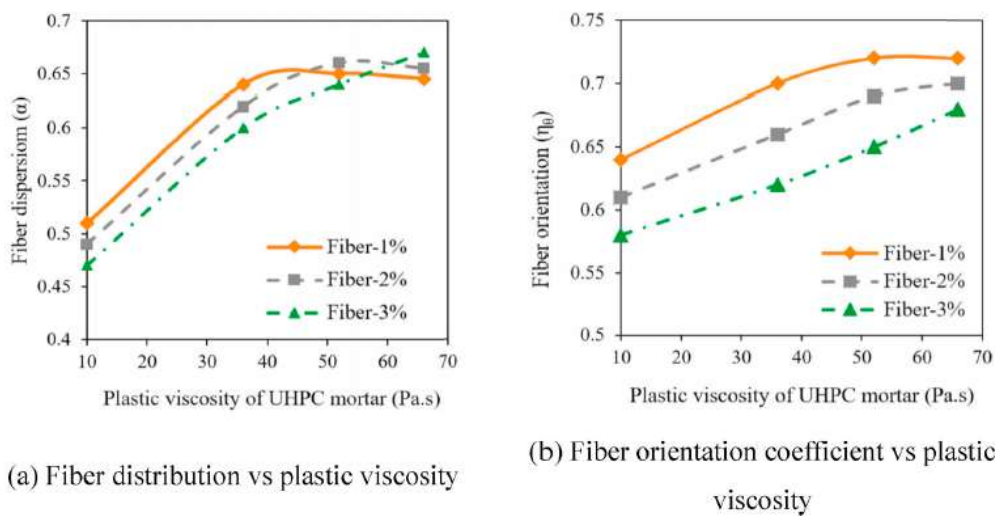


Figura 6-4 Cambios en la dispersión de fibras y coeficientes de orientación de UHPFRC con viscosidad plástica a diversos contenidos de fibra (Teng et al., 2020).

6.3 MÉTODO DE DISEÑO ESTADÍSTICO DE MEZCLAS

Los modelos realizados a través de análisis estadísticos se utilizan para generar unas variables de decisión y datos objetivos en la proporción de la mezcla del UHPC (Barrett, 2009), el método estadístico es un método eficaz de diseño experimental en donde se busca variar las proporciones de la mezcla para así evidenciar mediante ensayos en el laboratorio cómo estas variables afectan al rendimiento de la mezcla. Los diseños por el método estadístico suelen incluir como variables los siguientes parámetros: 1) Relación agua cemento, 2) Proporciones del cemento, 3) Uso de aditivos y 4) Proporciones y dimensiones de agregados. Mediante los ensayos y análisis de resultados se busca obtener un modelo estadístico que refleje

de manera apropiada la relación matemática existente entre las proporciones de los componentes del UHPC y el comportamiento de la mezcla en estado húmedo y endurecido (Eriksson et al., 1998).

Los resultados obtenidos en los ensayos se analizan generalmente mediante la Metodología de Superficies de Respuesta (RSM), el cual es un conjunto de técnicas matemáticas utilizadas en el tratamiento de problemas en los que una respuesta de interés está influida por varios factores de carácter cuantitativo. Se busca realizar experimentos que proporcionen valores razonables de la variable de respuesta, para así poder determinar el modelo matemático que mejor se ajusta a los datos que fueron obtenidos (Gil, 2019).

$$n = f(X_1, X_2, \dots, X_k) \quad (II)$$

La variable de respuesta se expresa como:

$$Y = n + \varepsilon = f(X_1, X_2, \dots, X_k) + \varepsilon \quad (III)$$

El análisis de superficie de respuesta incluye principalmente 3 pasos: 1) Diseño experimental y recogida de datos, 2) Establecimiento de un modelo numérico para verificar la exactitud de la superficie de respuesta y 3) Ajuste de la proporción de cada componente para obtener los valores de respuesta esperados. La finalidad última de la RSM es determinar las condiciones óptimas de funcionamiento y las superficies que cumplen las especificaciones de funcionamiento.

Investigadores como Mosaberpanah & Eren (2017) utilizaron la metodología RSM para optimizar el rendimiento del UHPFRC bajo condiciones normales de curado y luego buscaron analizar la precisión del modelo. Las variables que definieron fueron la relación agua – cemento, las proporciones de humo de sílice y cemento, así como el contenido de fibras y el superplastificante. El modelo que utilizaron consistió en un modelo lineal, el procedimiento que realizaron se resume en la Figura 6-5. Si bien el método logró establecer una buena relación entre el comportamiento del UHPFRC y el diseño de mezcla, los resultados se ven afectados por los parámetros y variables (relación agua – cemento, las proporciones de humo de sílice y cemento, contenido de fibras y superplastificante).

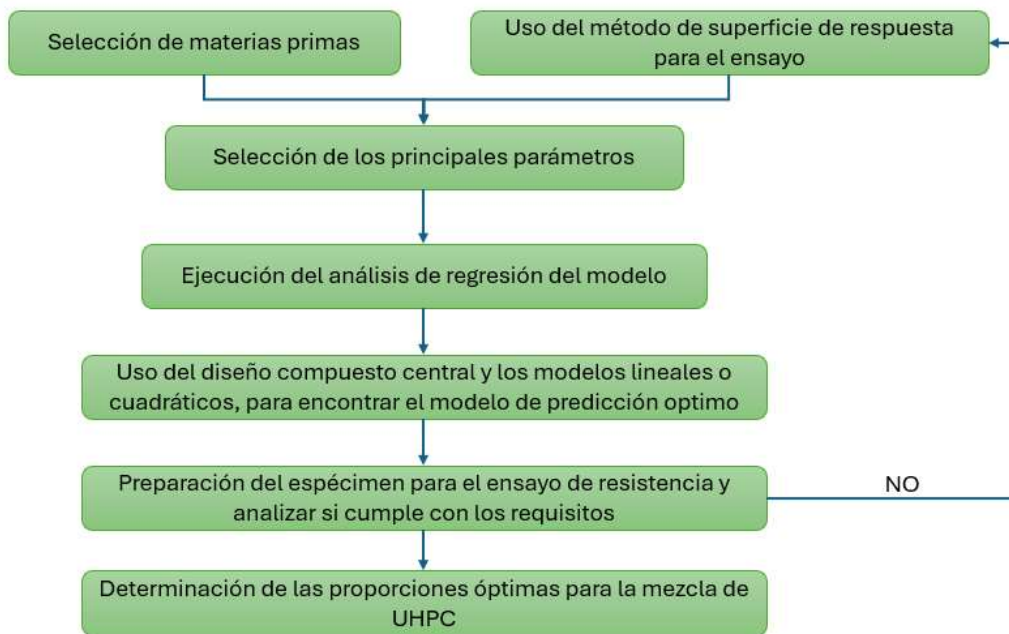


Figura 6-5 Pasos de metodología de diseño basada en Superficies de Respuesta (Zhou et al., 2021c).

El método de análisis estadístico también puede utilizarse en la selección de aglutinantes como el cemento, humo de sílice y cuarzo. Ghafari et al. (2015) demostraron la relación existente entre los diferentes componentes de la mezcla y las propiedades del UHPC utilizando la metodología RSM. Mediante este método pudieron comparar y seleccionar el contenido adecuado de cada componente, logrando demostrar que el cemento tiene un papel predominante en la resistencia mecánica del UHPC y que el aumento de contenido de cuarzo podría mejorar la fluidez de la pasta. El modelo que definieron reflejó la relación entre las variables de los componentes y la resistencia del UHPC, ayudando así a predecir el rendimiento del UHPC, en la Figura 6-6(a) se muestra la resistencia nominal a compresión obtenida en función de las cantidades de cemento, humo de sílice y cuarzo, en donde se observa que se alcanzó una resistencia de hasta 182 MPa, y en la Figura 6-6(b) se evidencia el asentamiento obtenido en función de los mismos 3 parámetros, en donde se evidencia que las proporciones de cemento y humo de sílice presentan características similares.

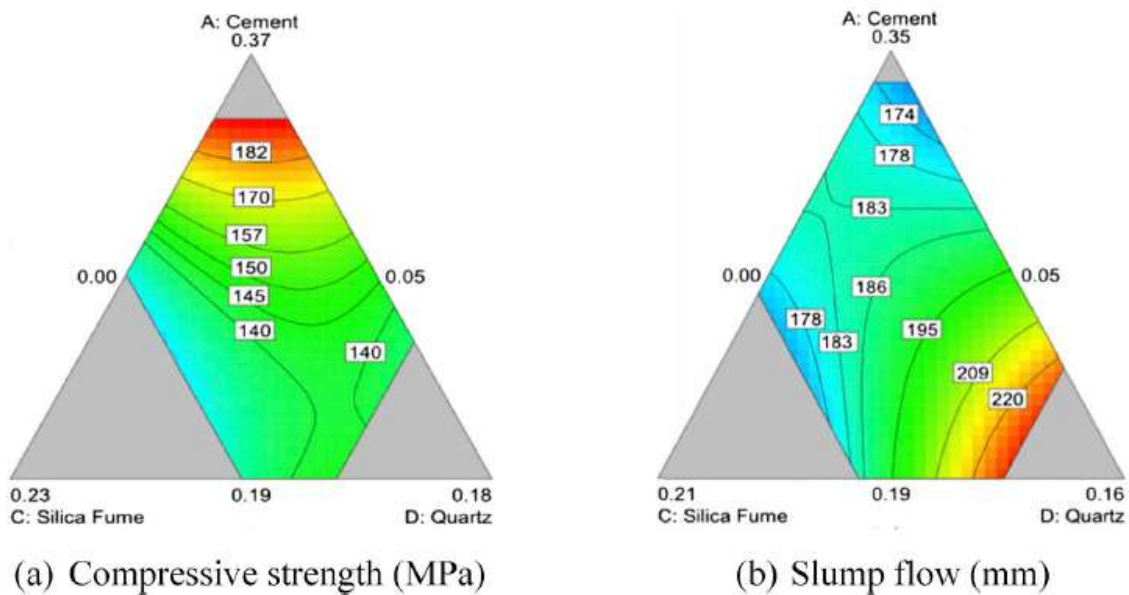


Figura 6-6 Gráficos de contorno de la resistencia a la compresión y del asentamiento del UHPC con diferentes tipos y contenidos de materiales cementantes (Ghafari et al., 2015).

6.4 DISEÑO DE MEZCLA CON EL MÉTODO DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES

La Redes Neuronales Artificiales (RNA), también conocidos como ‘ANN’ por sus siglas en inglés Artificial Neural Networks en la última década han tomado gran importancia como una herramienta en la minería de datos. Esta metodología tiene por objetivo modelar de manera efectiva y eficiente problemas grandes y complejos. La base general de las RNA son los datos, siendo estos capaces de encontrar patrones o relaciones por medio de algoritmos de aprendizaje basados en los datos existentes (Izaurieta & Saavedra, 2018; Salas, 2007). Los valores de entrada se conectan con los de salida mediante una o varias capas, tal como sucede en el cerebro humano. La resolución de problemas de las redes neuronales se basa en 5 principios: 1) Aprendizaje adaptativo, 2) Autoorganización, 3) Tolerancia a fallos, 4) Operación en tiempo real y 5) Fácil inserción en la tecnología existente.

Los modelos de RNA han sido aplicados en el proceso de diseño de mezcla en concreto UHPC con el fin de encontrar la cantidad determinada de cada componente buscando garantizar unas determinadas propiedades. Es así como los nodos de la capa de entrada son las variables de decisión de la mezcla del UHPC,

y la capa de salida es el objetivo. La precisión del modelo se puede garantizar mediante la reducción de la diferencia de los ensayos y los valores de entrada del modelo (DeRousseau et al., 2018).

Qu et al. (2018) desarrollaron un modelo con el cual buscaban evaluar los efectos de las fibras de acero en las propiedades mecánicas de los concretos UHPFRC, para el cual recopilamos datos experimentales de 162 grupos que fueron sometidos a compresión y 102 que fueron sometidos a flexión. Dado que las probetas poseían diferentes secciones, utilizaron ecuaciones para correlacionar la información y homogeneizar las dimensiones. El 80% de estos datos fueron utilizados para entrenar al modelo en la toma de decisiones y el 20% restante para evaluar al modelo, los datos fueron seleccionados de manera aleatoria para eliminar el efecto de la selección de resultados de la inteligencia artificial. Los parámetros que se consideraron como datos de entrada fueron la relación agua – cemento, el diámetro, longitud, relación de dimensiones y el volumen de fibras de acero; y los parámetros considerados como datos de salida fueron la resistencia a compresión y a flexión.

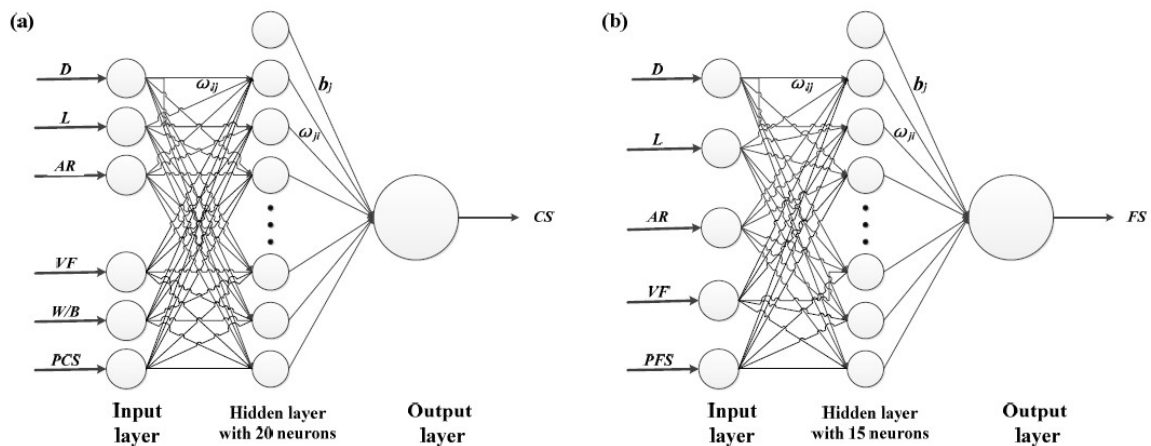


Figura 6-7 Estructura de los modelos RNA, (a) Modelo RNA de resistencia a la compresión, (b) Modelo RNA de resistencia a la flexión (Qu et al., 2018).

De acuerdo con los resultados obtenidos se logró demostrar que el modelo predijo de manera precisa los valores objetivos, por lo que el modelo RNA aprendió con éxito la relación no lineal entre las variables de entrada y de salida, mostrando potencial para la estimación de los efectos de las fibras en el concreto UHPFRC en su comportamiento mecánico, específicamente las resistencias a compresión y flexión. Los resultados obtenidos del modelo RNA de resistencia a la flexión fueron comparados con tres modelos analíticos propuestos en otros estudios. La

comparación indicó que los modelos analíticos propuestos por otros autores pueden variar de 0,8429 a 1,1458 en valores medios, mientras que los valores predichos a partir del modelo RNA en el estudio realizado por Qu et al. (2018) coinciden con los valores experimentales.

Por su parte, Abellán (2021) para su investigación usó 210 datos de ensayos que fueron complementados con 717 resultados extraídos de otros estudios en donde se tenía información sobre el empaquetamiento virtual y/o el tamaño medio de partícula de los componentes. Además, en todos los casos el procedimiento debía ser sin curado térmico y sin mezcla al vacío. Para conservar la uniformidad de los datos, se utilizaron ecuaciones de equivalencia para que todos los valores extraídos tuviesen las mismas dimensiones de las probetas.

Antes de introducir los datos se realizó un ‘barrido’ estadístico, con el fin de eliminar aquellos valores atípicos o con distribuciones inusuales, de esta manera se logra reducir los errores del modelo resultante.

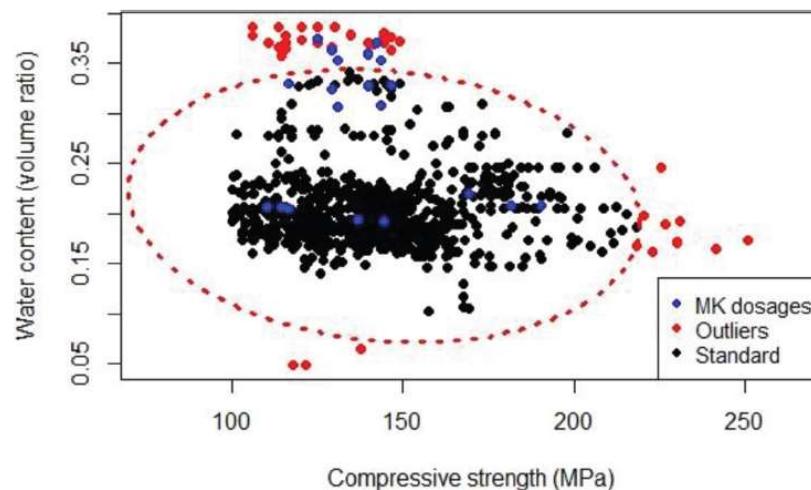


Figura 6-8 Diagrama de caja bivariado para las variables de resistencia a la compresión y contenido de agua (Abellán, 2021).

Los valores que están fuera del ovalo en la Figura 6-8 corresponden a los datos que teóricamente deberían ser eliminados por no tener concordancia, sin embargo, el autor hace énfasis en que este barrido de datos se debe realizar con criterio, puesto que eliminar los puntos de propiedades de concretos adicionados con metakaolín que están por fuera del perímetro sería un error, ya que las mezclas con MK suele requerir de mayor agua para poder prever la manejabilidad requerida a la mezcla.

Los resultados obtenidos demostraron que el modelo fue capaz de predecir la resistencia a compresión de los nuevos datos, independientemente de la combinación de materiales cementantes suplementarios y del tamaño máximo de agregado. Estos modelos resultan de gran importancia durante las fases experimentales de los estudios, dado que contribuye al ahorro de costos y tiempo de desarrollo en la búsqueda de mezclas de UHPC con determinadas propiedades.

En resumen, todos los modelos presentan ventajas y es decisión del investigador elegir la metodología que mejor se adapte a los objetivos y bases del estudio a realizar. El método de empaquetamiento de partículas es el método más utilizado en la actualidad, sin embargo, en la mayoría de los modelos no se tiene en cuenta el efecto del estado húmedo de la mezcla, generando diferencias entre los resultados esperados y los hallados- El método de diseño basado en la reología demanda de la consideración de los efectos de varios componentes del UHPC, requiriendo de muchas pruebas para ajustar las proporciones de mezcla. El método de análisis estadístico puede reducir la cantidad de ensayos, sin embargo, la precisión se ve afectada por las variables independientes y por el modelo seleccionado. El modelo de redes neuronales artificiales está limitado a las variables seleccionadas y al aprendizaje de este (Zhou et al., 2021c).

7 PRODUCCIÓN DE LOS CONCRETOS DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES

La producción de los concretos de ultra altas prestaciones (UHPC) suelen requerir un mayor aporte de energía en comparación con la producción de los concretos convencionales, por lo que el tiempo de mezcla suele tener un incremento. Este mayor aporte de energía, junto con la reducción o eliminación de los agregados gruesos y el bajo contenido de agua, requiere que el proceso de producción de UHPC tenga algunas modificaciones, con el fin de evitar que la mezcla se sobrecaliente durante el mezclado. Estos problemas pueden ser resueltos mediante alternativas sencillas, tales como utilizar una mezcladora de gran capacidad o reduciendo la temperatura de los componentes, por ejemplo, se puede sustituir el volumen de agua de manera parcial o total por hielo. Estos pequeños cambios han permitido que sea posible elaborar estos concretos en mezcladoras convencionales como las de tipo tambor, pan e incluso camiones de premezclado (Graybeal, 2011).

Se estima que el mezclado de concretos UHPC oscilan entre 7 y 18 minutos, que resulta ser más tiempo de lo que requiere la mezcla de los concretos convencionales (Mazanec et al., 2010). El tiempo de mezclado podría reducirse mediante algunos cambios en las mezclas, tales como optimizar la distribución granulométrica, sustituyendo parcialmente el cemento por arena de cuarzo o por humo de sílice.

La colocación de concretos reforzados con fibras requiere consideraciones especiales en términos de operaciones de colocación. Los UHPFRC tienden a mostrar comportamientos reológicos similares a los concretos autocompactantes convencionales, por lo que posiblemente necesiten una preparación adicional del encofrado, pero también permiten reducir los esfuerzos durante la etapa de colocación. No se recomienda la vibración interna de los UHPFRC debido al refuerzo de fibras, pero puede utilizarse una vibración externa limitada del encofrado como medio para facilitar la liberación del aire atrapado (Graybeal, 2011).

El curado del UHPC comienza desde su etapa de producción, como consecuencia de su muy bajo contenido de agua, la superficie inmediata se seca muy rápidamente y con frecuencia empieza a formarse una densa y resistente capa a la que se le denomina "piel de elefante" de sólo unas décimas de milímetro de grosor, que se produce al poco tiempo de vertido del UHPC. Este efecto impide la desaireación del concreto y la nivelación de la superficie. Este efecto puede evitarse si las superficies de concreto expuestas se cubren con láminas de plástico inmediatamente después del vaciado, se rocía un agente de curado eficaz sobre toda la superficie o se aplica

agua en forma de fina niebla para formar una película sobre la superficie (Graybeal, 2011).

En la actualidad, los componentes fabricados con UHPC se producen principalmente en plantas de prefabricación. Por regla general, se tratan térmicamente a unos 80-90 °C, tras lo cual ya no se produce hidratación. Las altas temperaturas hacen que el humo de sílice reaccione con el hidróxido de calcio del cemento, y se producen fases adicionales de formación de resistencia (Bumanis et al., 2015). Por tanto, las resistencias a la compresión y a la flexión son mayores y la microestructura más densa que en el caso del curado con agua o con láminas. Además, después del tratamiento térmico no se produce ninguna contracción más y los elementos prefabricados son dimensionalmente exactos y están libres de esfuerzos de contracción. Por lo general, las piezas, o probetas, se dejan en el molde durante 24 h y se cubren con una lámina antes de calentarlas durante 48 h. Un calentamiento más prolongado no tiene ningún efecto. Durante el tratamiento térmico, el concreto debe cubrirse herméticamente y protegerse así contra la desecación completa. Tras el tratamiento térmico, es importante dejar enfriar lentamente las piezas, por ejemplo, almacenándolas cubiertas con láminas (también aislamiento térmico en caso de bajas temperaturas), para evitar microfisuras (Fehling et al., 2014).

8 PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS CONCRETOS DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES

Los concretos de ultra altas prestaciones (UHPC) se diferencian de los concretos convencionales por sus grandes capacidades mecánicas, de acuerdo con el ACI 239 'Ultra-High-Performance Concrete: An Emerging Technology Report' para que un concreto se defina como UHPC deberá tener una resistencia a la compresión superior a 150 MPa (ACI Committee 239, 2018a), a su vez especifican que deberán tener requisitos especificados de durabilidad, ductilidad a la tracción y tenacidad. La Tabla 8.1 muestra la comparación entre los concretos convencionales y los de ultra altas prestaciones.

Tabla 8.1 Comparación entre el concreto convencional y el UHPC. Adaptado de (ACI Committee 239, 2018a)

Característica del material	Concreto convencional	UHPC	Incremento porcentual
Esfuerzo a compresión	20 - 40 MPa	150 - 250 MPa	566.7%
Esfuerzo a tracción	1 - 3 MPa	6 - 12 MPa	350.0%
Módulo de elasticidad	25 - 30 GPa	40 - 50 GPa	63.6%

Como ya se vio, el UHPC no tiene una formulación de mezcla única y, por lo tanto, las propiedades mecánicas del UHPC varían de acuerdo con los diseños de mezcla. Sin embargo, a nivel general se espera que este material provea unas prestaciones mecánicas notablemente superiores con respecto a los concretos convencionales.

8.1 ESFUERZO A COMPRESIÓN

Una de las principales y más importantes prestaciones mecánicas del UHPC es la capacidad a compresión, dado que se considera como un requisito para que pueda ser clasificado como un concreto de ultra altas prestaciones. En comparación con los concretos convencionales, el UHPC presenta resistencias a compresión entre 5 y 6 veces superiores, así como alta rigidez, entre 1.5 a 2 veces mayor. Los UHPC muestran un comportamiento de esfuerzo – deformación relativamente lineal antes del pico del esfuerzo máximo a compresión (f'_c) y demuestra una leve capacidad de reserva después del pico. Estas características son generalmente un subproducto de la matriz densamente empaquetada y de alta resistencia del UHPFRC, que está reforzada con fibras discontinuas de alta resistencia las cuales puentean las microfisuras que se forman durante la carga de compresión (El-Helou et al., 2022b).

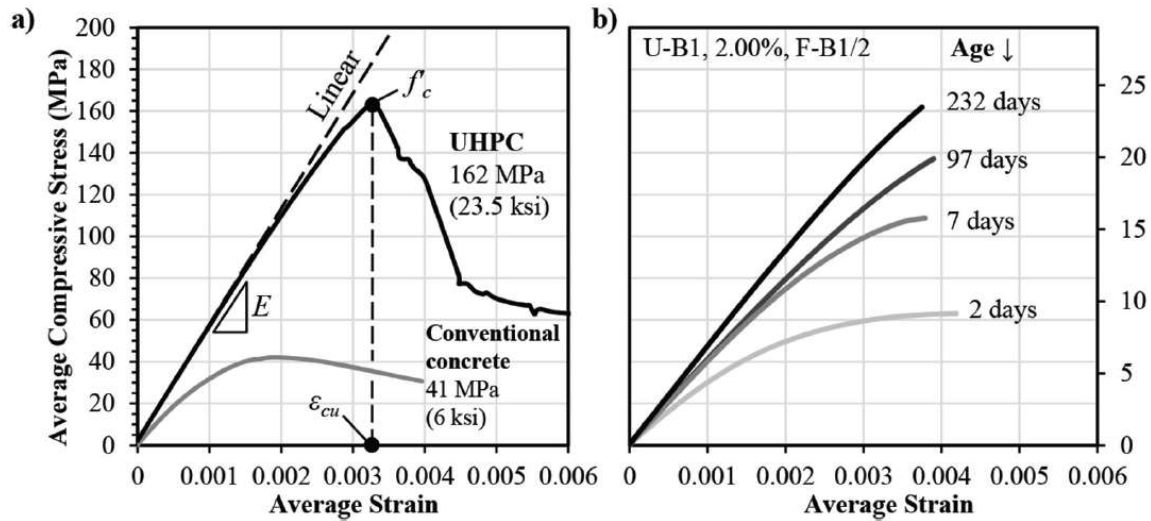


Figura 8-1 (a) Comportamiento a compresión del UHPC y del concreto convencional; (b) Comportamiento a compresión prepico del UHPC a diferentes edades (El-Helou et al., 2022b).

La respuesta esfuerzo-deformación del UHPC en compresión se caracteriza por un tramo inicial linealmente elástico ascendente con una pendiente correspondiente al módulo de elasticidad, E . El tramo ascendente comienza a disminuir la pendiente más allá de aproximadamente $0,5f'_c$, probablemente debido a la formación de microfisuras internas, como ocurre con los materiales cementantes sometidos a cargas de compresión uniaxial. Cuanto mayor es la resistencia a la compresión, más lineal tiende a ser la curva de esfuerzo-deformación antes de alcanzar el esfuerzo máximo (f'_c). La deformación a compresión en el punto de máximo esfuerzo, ϵ_{cu} , suele estar entre 0,003 y 0,005 para la mayoría de las mezclas de UHPFRC, y tiene cierta dependencia de f'_c . Los concretos UHPFRC tienen cierta capacidad de reserva de resistencia a la compresión posterior al pico debido al confinamiento inherente proporcionado por el alto volumen del refuerzo de microfibras (Bağcırsad et al., 2017).

En la Figura 8-2 se muestra el modelo constitutivo de la curva esfuerzo – deformación propuesta por los autores El-Helou et al. (2022b). El modelo incluye 2 tramos: 1) Un tramo lineal – elástico ascendente y 2) Un tramo perfectamente plástico, así como 4 parámetros de entrada. El tramo inicial está definido únicamente por el módulo de elasticidad (E), el cual se puede estimar mediante expresiones empíricas o mediante ensayos en laboratorio. La transición entre el tramo elástico y el plástico se produce cuando se alcanza una resistencia a la

compresión reducida, la cual se define como el producto entre la resistencia a la compresión (f_c), que puede ser determinado o especificado experimentalmente y un factor de reducción, α . La deformación en este punto de transición, ε_{cp} , se determina utilizando la ley de Hooke y la resistencia a compresión reducida, αf_c . La rama plástica del modelo termina en la deformación última de diseño a compresión, denotada por ε_{cu} . En este caso, se propone que ε_{cu} corresponda a la deformación en el esfuerzo de compresión máximo.

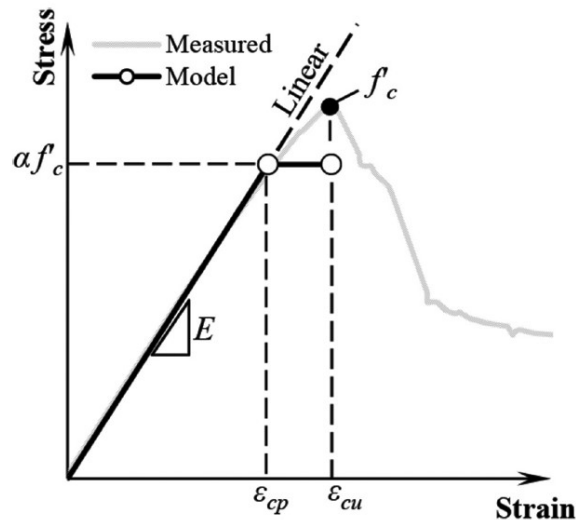


Figura 8-2 Modelo de esfuerzo – deformación a compresión propuesto para el diseño de UHPC (El-Helou et al., 2022b).

8.2 MÓDULO DE ELASTICIDAD

El módulo de elasticidad es definido por el comité ACI 116 en su documento ‘Cement and Concrete Terminology’ (ACI 116, 2018) como la relación existente entre el esfuerzo normal y la deformación correspondiente para esfuerzos de tracción o compresión por debajo del límite de proporcionalidad del material; también se le denomina módulo de Young o módulo de elasticidad de Young; se representa mediante el símbolo ‘E’.

Mediante el análisis de los resultados obtenidos en el ensayo del módulo elástico de 492 probetas que fueron fabricadas con 10 combinaciones de dosificaciones UHPFRC y productos con fibra en función de la resistencia a compresión determinada en laboratorio, R. Helau et al. (2022b) investigaron la aplicabilidad de las relaciones existentes entre el módulo de elasticidad (E) y resistencia a la

compresión (f'_c) para el UHPC. Los resultados hallados en los ensayos fueron contrastados con los obtenidos mediante las relaciones indicadas en las normativas del American Concrete Institute (ACI) 318, (Ecuación (19.2.2.1.b)) y la norma AASHTO LRFD (Ecuación (C5.4.2.4-1)), para concretos de peso normal. Tal como se muestra en la Figura 8-3, la ecuación del ACI, $E = 4700\sqrt{f'_c}$ (MPa), la cual fue adaptada por la normativa colombiana NSR-10, sobrestima el módulo elástico del UHPC para la mayoría de los puntos de datos obtenidos en el estudio. La ecuación AASHTO LRFD, por otro lado, resultó en un buen ajuste de la relación global entre E y f'_c . Esta ecuación se propone en el estudio para su uso con materiales UHPC dada la buena aproximación del módulo de elasticidad dentro del rango práctico de valores de resistencia a la compresión comunes del UHPC (entre 127 y 200 MPa).

$$E = 9100f'_c{}^{0.33} \text{ (MPa)} \quad \text{(IV)}$$

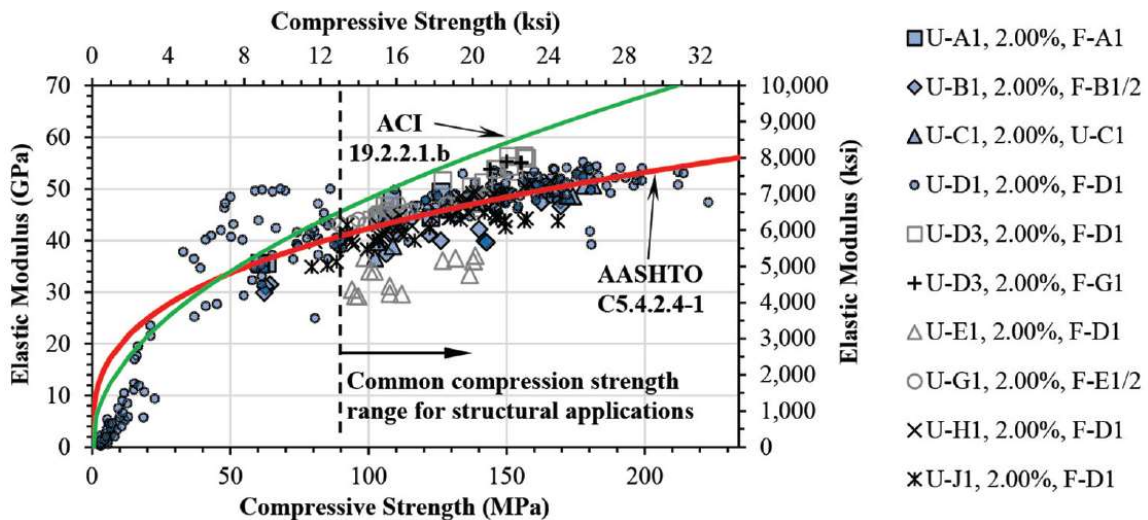


Figura 8-3 Relación entre la resistencia a la compresión y el módulo elástico (El-Helou et al., 2022b).

Debe tenerse en cuenta que las ecuaciones del módulo elástico para concretos convencionales tanto en ACI 318 como en AASHTO LRFD incluyen un factor de corrección de la densidad. La ecuación propuesta para el UHPC es independiente de la densidad, dado que la variación de densidad de los materiales UHPC es mucho menor que la de los concretos convencionales, para los UHPC oscila entre 2300 y 2800 kg/m³, mientras que la del concreto convencional se estima entre 1400 y 2563 kg/m³.

8.3 ESFUERZO A TRACCIÓN

La resistencia a tracción del concreto se refiere a la capacidad del material para resistir fuerzas que tienden a alargarlo o separarlo. Aunque el concreto es muy resistente a la compresión, es relativamente débil en tracción. Esta debilidad se debe a su naturaleza frágil y a la tendencia a desarrollar grietas cuando se somete a esfuerzos de tracción significativos (Neville, 2016). Se estima que la resistencia a tracción del concreto equivale al 10 o 15% de la resistencia a compresión (Palmieri et al., 2017).

La respuesta a la tracción de los materiales de la clase UHPC es un rasgo destacable del comportamiento mecánico del material y se caracteriza por una capacidad de deformación significativa, una resistencia sostenida tras la fisuración y múltiples fisuras discretas finas y muy próximas entre sí (El-Helou et al., 2022b).

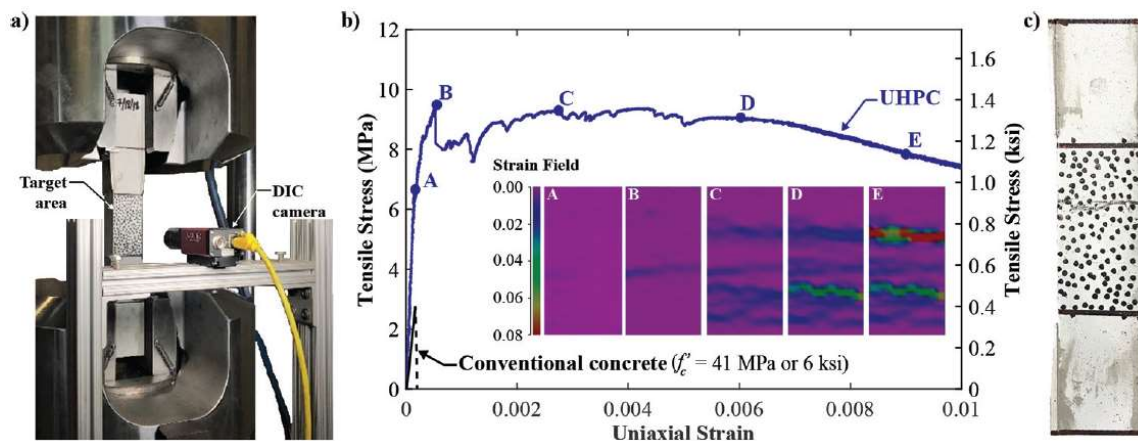


Figura 8-4 (a) Configuración del ensayo de tracción mediante la técnica DIC (Correlación de imágenes digitales); (b) Respuesta de esfuerzo-deformación a tracción y campo de deformación del UHPC en comparación con el concreto convencional; y (c) Patrón de fisuras al final del ensayo de tracción del UHPC (El-Helou et al., 2022b)

En la Figura 8-4(b) se evidencia un comportamiento inicialmente elástico con una pendiente correspondiente al módulo de elasticidad (E). Al inicio de la fisuración (punto A), comienza a producirse una pérdida gradual de rigidez hasta que se alcanza la resistencia efectiva a la fisuración, $f_{t,cr}$, en el punto B, donde se desarrolla una fisura discreta en toda el área de la sección transversal de la probeta. A medida que el material excede su límite de fisuración, las fibras compensan la pérdida de resistencia a la tracción de la matriz, dando lugar a la formación de nuevas fisuras

finas sin pérdida significativa de capacidad (punto C). Este comportamiento caracteriza a los materiales UHPFRC, la cual no se observa en el concreto convencional, en el que la aparición de una grieta va seguida de una disminución de la capacidad de carga. La fase de agrietamiento múltiple (endurecimiento por deformación) continúa hasta que se agota la capacidad de las fibras para mantener las cargas aplicadas, y las fibras comienzan a desprenderse de la matriz cementosa en el punto D. La deformación en la localización de la grieta se define como la capacidad de deformación última del material, $\epsilon_{t,loc}$, después de la cual la deformación se acumula en una sola grieta y la resistencia a la tracción comienza a disminuir continuamente. La respuesta después de la localización de la grieta, como en el punto E, se describe más adecuadamente como una función de la apertura de la grieta en lugar de la deformación. En la imagen c se muestra la fotografía de la probeta en donde se evidencia la localización de una grieta ancha, mientras que las otras grietas se han cerrado al descargarse elásticamente las fibras que puentean esas grietas (El-Helou et al., 2022b).

Resulta importante precisar que la respuesta específica a la tracción de la clase de materiales UHPFRC no es única y depende de una serie de parámetros cambiantes, como la formulación de la matriz, la cantidad, el tipo, la geometría y la orientación de las fibras, así como la edad del concreto

Durante la revisión de las distintas mezclas de UHPFRC, los investigadores identificaron 2 tipos de comportamientos: 1) Aquellos materiales que exhiben una meseta de esfuerzo donde el esfuerzo posterior a la fisuración permanece aproximadamente igual a la resistencia efectiva a la fisuración, $f_{t,cr}$, hasta que se produce la localización de la deformación. Este tipo de respuesta puede idealizarse mediante un modelo elástico-plástico de esfuerzo-deformación, como se muestra Figura 8-5(b). El segundo comportamiento característico corresponde a materiales en los que la tensión posterior a la fisuración aumenta continuamente hasta un valor último que se produce en la deformación de localización de la fisura, $\epsilon_{t,loc}$. Este comportamiento puede idealizarse mediante el modelo bilineal esfuerzo-deformación que se muestra en la Figura 8-5(c). En ambos casos, los modelos de diseño de esfuerzo-deformación característica imitan el comportamiento general de la respuesta a la tracción y aplican un factor de reducción, (γ), sobre la resistencia a la tracción. La capacidad de post-localización del material, es decir, la rama descendente de la respuesta donde la deformación es mayor que la deformación de localización de la grieta, $\epsilon_{t,loc}$, no se tiene en cuenta en los modelos de diseño porque

la respuesta es una función de la apertura de la grieta (y), por lo tanto, no puede utilizarse en un enfoque de diseño basado en la deformación.

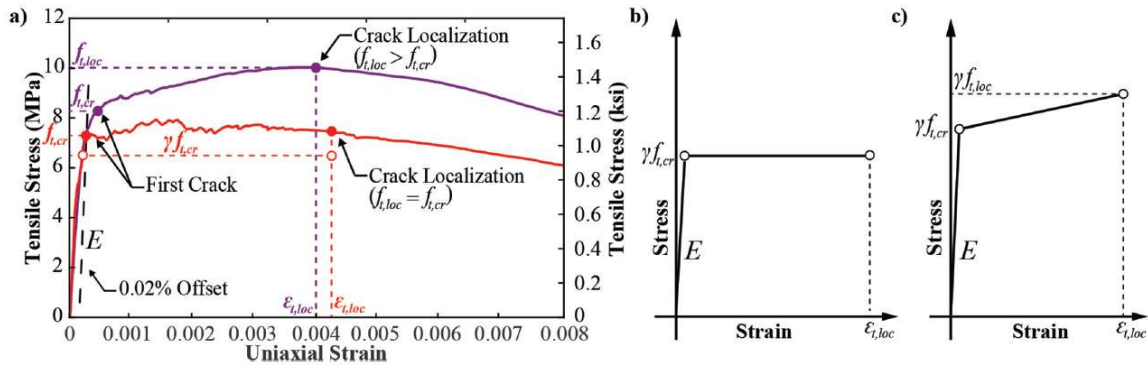


Figura 8-5 (a) Ejemplos de tendencias de esfuerzo-deformación de tracción características de materiales de clase UHPC; y modelos de tensión-deformación de tracción idealizados para: (b) endurecimiento por deformación con meseta de esfuerzo; y (c) endurecimiento por deformación con aumento continuo del esfuerzo posterior a la fisuración.

8.4 DURABILIDAD

El concreto de ultra altas prestaciones (UHPC) posee una durabilidad superior que los concretos de altas prestaciones (HPC) y que los concretos convencionales (CC), de acuerdo con una investigación realizada por Li Junquan et. al (2020), en donde desarrollaron una revisión documental de la durabilidad del UHPFRC en términos de permeabilidad al agua y a los iones cloruro, corrosión del acero de refuerzo, carbonatación, resistencia a procesos de hielo – deshielo, resistencia a los ataques químicos, reacción sílice – álcali y resistencia al fuego, para efectos de la investigación tuvieron en cuenta factores que podrían influir en la durabilidad, tales como la relación agua/cemento, el curado, volumen de adición de fibras de acero, tamaño de las probetas y la edad de los ensayos.

En un estudio realizado por Li y Huang (202) en donde determinaron que el coeficiente de absorción de agua del UHPC con una relación agua/cemento de 0.40 fue de 0.04 a los 14 días, pero este coeficiente disminuyó a 0.0025 cuando la relación agua/cemento fue de 0.17, con lo cual se evidencia que el diseño de mezcla de los concretos UHPC genera cambios en las propiedades del material. En este mismo estudio pudieron observar que el tiempo de curado también genera implicaciones en los coeficientes de absorción, puesto que para la relación agua/cemento de 0.17 se obtuvo un coeficiente de 0.0005 a los 98 días, siendo este

valor aproximadamente un 30% del coeficiente de absorción reportado en la mezcla de control de concreto convencional.

De acuerdo con las conclusiones del estudio desarrollado por Long et al. (2005), la carbonatación rara vez se presenta en concretos de tipos UHPC, las muestras sometidas a 56 y 90 días ante procesos de carbonatación no mostraron ningún indicio de su presencia. La profundidad de carbonatación del UHPC tras 6 meses de exposición fue de 0.5 mm y se incrementó a 1.5 – 2.0 mm tras un año de exposición a una atmósfera de CO₂ al 1%. Las vigas a pequeña escala de UHPC colocadas en una cámara de carbonatación sometida a un flujo de 5%-100% de CO₂ durante 2 años no mostraron signos de carbonatación, después de 3 años de exposición, la profundidad era de sólo 1.5-1.7 mm, lo que resulta ser 2.5 a 4.5 veces menor que las del HPC y el CC.

La superior resistencia a la congelación-descongelación del UHPC proviene de su matriz altamente impermeable con porosidad capilar reducida, que de acuerdo con estudios realizados el UHPC no demuestra deterioros tras 600 ciclos de congelación – descongelación, mientras que los del concreto convencional están del orden de 100 – 250 según su diseño de mezcla (Piérard et al., 2013).

9 HUELLA DE CARBONO DE LOS CONCRETOS DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES

El acuerdo de París es un tratado internacional adoptado en diciembre del 2015 durante la veintiunava conferencia de las Partes (COP21) de la convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. Este acuerdo cuenta con 4 principales objetivos: 1) Mantener el aumento de la temperatura global por debajo de los 2 grados Celsius, 2) Reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, 3) Fomentar la financiación climática y 4) Fomentar la cooperación y la transparencia (United Nations Climate Change, 2021). Y es sobre este segundo objetivo que el sector concreto busca hacer énfasis y enfocar sus esfuerzos.

La palabra carbono es representada mediante la palabra 'CO₂', la cual es la abreviatura de 'Dióxido de carbono' el cual es un gas que actúa como un gas de efecto invernadero, es decir, que atrapa el calor en la atmósfera terrestre y contribuye al calentamiento global y al cambio climático cuando se acumula en la atmósfera en concentraciones muy elevadas. La construcción es uno de los mayores consumidores de materias primas. El sector cementero es responsable de alrededor del 5% de las emisiones de CO₂, principal gas productor del efecto invernadero y cambio climático. El cemento es el material de construcción más empleado en el mundo: cada año, la industria del concreto emplea 1.6 billones de toneladas de cemento. Cada tonelada de cemento en su fabricación emite 1 tonelada de CO₂ a la atmósfera (Growing Buildings, 2019).

Los esfuerzos de la industria del concreto se han enfocado en torno a la reducción de las emisiones de CO₂ durante la etapa de producción del cemento Portland, específicamente en la combustión de combustibles fósiles al transformar la piedra caliza en Clinker (calcinación), que es molido y mezclado con yeso para crear el cemento que conocemos. Es conocido que la calcinación produce la mayor parte de las emisiones de carbono en este proceso y que el Clinker es el componente base del cemento (Schokker, 2022). Carbono neutro hace referencia al efecto nulo de CO₂ en la atmósfera, para lograr esto las emisiones de CO₂ liberadas deben ser equilibradas por una cantidad igual de CO₂ eliminado de la atmósfera a través de sumideros de carbono (que incluyen los bosques, los océanos y el suelo, los cuales absorben el CO₂), captura y almacenamiento de carbonos (CCS), o compensaciones. El concreto también tiene la capacidad de absorber emisiones, pero no lo suficientemente rápido o en cantidades suficientes para poder equilibrar las emisiones de su producción.

La industria del cemento ha reducido en su proceso de fabricación la huella de carbono a través de la reducción en el uso de combustibles fósiles, modernización de plantas, y muchos otros cambios, sin embargo, se encuentra latente las iniciativas para la búsqueda de alternativas que puedan ser adoptadas. Una de las invitaciones realizada por NEU, el cual es un centro de excelencia para concreto de carbono neutro del ACI, es la de analizar el ciclo de vida de las emisiones de carbono del producto final, es decir, una estructura que tenga una prolongada vida útil podrá soportar eventos extremos, así como incluso duplicar la edad de servicio, que a la larga podría tener efectos positivos en las emisiones de carbono (Schokker, 2022). El concreto de ultra altas prestaciones al ser un material que promete extender la vida útil de las estructuras, puede ser parte de la solución a las emisiones de carbono que se buscan reducir en la industria del concreto. Una muestra de ello es el edificio Leopoldo construido en Sao Pablo, el cual fue ganador del premio a la construcción en el año 2021, se caracteriza por haber sido construido en concretos de ultra altas prestaciones, lo que contribuyó en la disminución de materiales al haber logrado reducir las secciones de los elementos estructurales (Schokker, 2022).

La investigación de diseños de mezcla de concretos de ultra altas prestaciones con enfoques en la reducción de la huella de carbono podría ser una alternativa a los propósitos y objetivos que se han propuesto en la industria concretera. Un estudio llevado a cabo por Y. Shi et al. (2019), determinó que es posible lograr un uso eficaz del cemento en el diseño del UHPC, mediante la incorporación de materiales cementantes suplementarios como las cenizas volantes, nano-SiO₂ y el humo de sílice, en donde el volumen total de cemento utilizado puede ser reducido a solo entre un 20% y 25%. En el mismo sentido fue posible determinar que el curado a vapor podría ser una gran alternativa para reducir las emisiones de CO₂, si bien este curado incrementa la emisión final de CO₂ en la producción de UHPC, el índice final de emisiones se ve reducido. En este estudio, se logró producir con éxito un UHPC con baja emisión de carbono, cuyo índice de emisión de CO₂ incorporado no supera los 4 kg/MPa·m³. Este UHPC utiliza solo alrededor de 200 kg/m³ de cemento y libera una emisión de carbono mucho menor que la de los UHPC convencionales.

10 DESARROLLO NORMATIVO DE LOS CONCRETOS DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES

Como se ha podido observar, los concretos de ultra altas prestaciones (UHPC) es un material sumamente innovador el cual demuestra gran potencial en la construcción. Desde finales de los años noventa, cuando surgieron las primeras aplicaciones del UHPC, se ha tenido la evidente necesidad de la creación de normativas o estándares que ayuden a los entes de control responsables de garantizar la idoneidad de las estructuras diseñadas con este material, con el fin de que puedan ser familiarizados con estas nuevas aplicaciones y garantizar la producción o construcción segura y efectiva de los elementos estructurales (Hi-con, 2020).

Una de las primeras 'normativas' acerca del diseño con UHPC fue realizada por 'VSL Australia' en el año 2000, y se centró específicamente en el diseño de vigas pretensadas (Rebentrost & Wight, 2009).

Algunos otros países se han unido al desarrollo de normativas que puedan guiar a los diseñadores, revisores y constructores sobre las practicas correctas para la implementación de este novedoso material, dentro de esos países se encuentran: Estados Unidos, España, Francia, Alemania, Canadá, China, Japón y Suiza (Hi-con, 2020).

Conforme avanza el tiempo se van desarrollando más normativas y guías de diseño, esto debido a que el UHPC aún se encuentra en estudio y a que cada país indica o desarrolla la normativa de acuerdo con sus conceptos e investigaciones realizadas, teniendo presente los objetivos de desarrollo individuales de cada país y los materiales locales disponibles. Sin embargo, esto podría ser contraproducente para la acogida de este nuevo material, puesto que, al tener tantas fuentes de información, resulta complejo para el profesional a cuál de estas normativas debería de alinearse. El autor de 'Do we really need another guideline for UHPC?' (Hi-con, 2020), expresa su descontento acerca de que existan tantas guías de diseño del UHPC y asegura que la mejor forma de incorporar el uso de este nuevo material sería uniendo las normativas existentes y que están por salir en un único documento, lo que contribuiría al trabajo transfronterizo.

A continuación, se presentan los aspectos más relevantes indicados en 3 normativas internacionales de los concretos de Ultra altas prestaciones.

10.1 ESTADOS UNIDOS

El documento 'ACI 239: Ultra High Performance Concrete An Emerging Technology Report' (ACI Committee 239, 2018b), por medio del cual el American Concrete Institute (ACI) fomenta el desarrollo y el uso adecuado de tecnologías nuevas y emergentes. En este documento se presenta información y recomendaciones que están basadas en los datos de ensayos disponibles, informes técnicos, experiencias con aplicaciones recopiladas en campo y opiniones de los miembros del comité. Teniendo la claridad que el profesional que utilice este documento debe comprender las limitaciones y ejercer con criterio la aplicación adecuada de este material emergente.

En este informe definen al concreto de ultra altas prestaciones (UHPC) como una clase de materiales cementosos avanzados con mayores propiedades mecánicas, ductilidad a la tracción y durabilidad en comparación con el concreto convencional o incluso con el concreto de alta resistencia. Este documento lo limitan a los concretos con una resistencia mínima de 150 MPa con requisitos específicos de durabilidad, ductilidad a la tracción y tenacidad, que generalmente deben incluir fibras para alcanzar los requisitos especificados. El UHPFRC presenta típicamente características elástico-plásticas o de endurecimiento por deformación bajo tensión uniaxial y tiene una permeabilidad muy baja debido a su estructura porosa densa y discontinua.

10.1.1 GENERALIDADES DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS

Al igual como sucede con el concreto convencional y el concreto de altas prestaciones (HPC), el UHPC como ya se ha mencionado, no tiene un diseño de mezcla único, y por tanto las propiedades mecánicas varían. En el mismo sentido, las condiciones de curado y la edad del ensayo afectan a las propiedades mecánicas. En comparación con el concreto convencional, el UHPC tiene una mayor resistencia y un mayor módulo elástico. El comportamiento de la curva esfuerzo – deformación que presenta el UHPC a compresión es más lineal que el del concreto convencional, hasta alcanzar su esfuerzo máximo, y en el cual la pérdida de resistencia ocasionada por causa de la fractura denota un comportamiento frágil. En la Figura 10-1 se presenta el comportamiento de 3 tipos de concreto, concreto de ultra-altas prestaciones (UHPC), concreto reforzado con fibras (FRC) y concreto convencional (CC), en donde se evidencia que las propiedades a tracción del UHPC puede ser incluso 4 veces más que el FRC y CC.

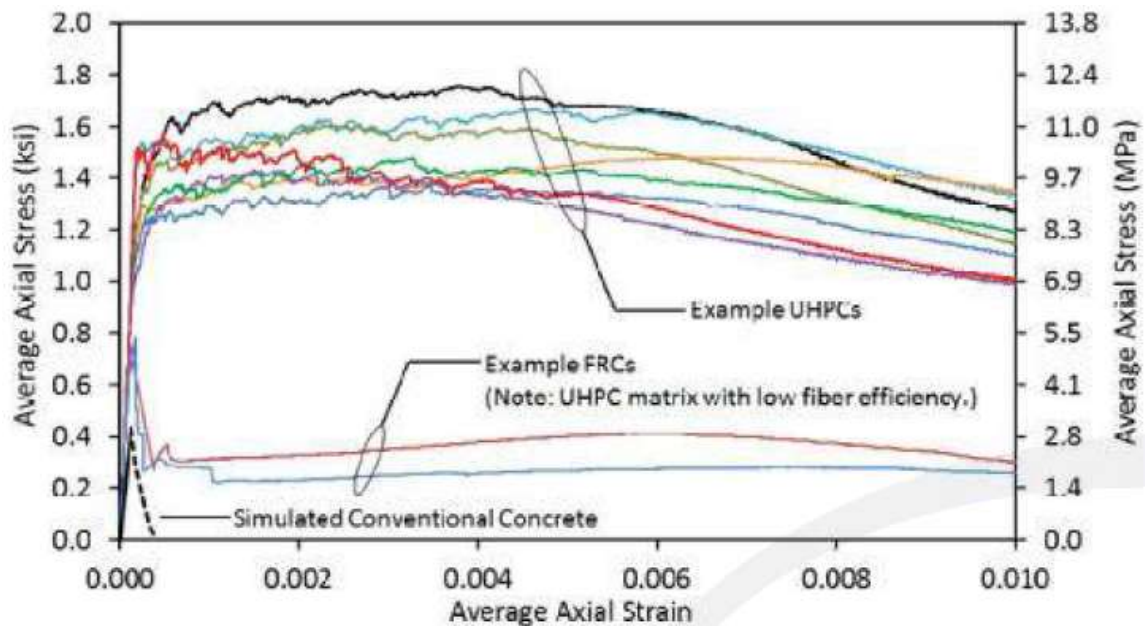


Figura 10-1 Ejemplos de comportamiento a tracción del concreto convencional, FRC y UHPC (ACI Committee 239, 2018b).

El comportamiento de los UHPFRC reforzados con fibra, demuestran un comportamiento de endurecimiento por deformación ante los esfuerzos de tensión. Se puede observar que los UHPFRC tienen una resistencia a la tracción y una capacidad de tracción sostenida significativamente mayores que los FRC y que el concreto convencional. Mientras que la resistencia a la tracción del concreto convencional no suele tenerse en cuenta en los cálculos de diseño estructural, el comportamiento a la tracción del UHPFRC sí suele incluirse. El comportamiento a la tracción del UHPFRC tras la fisuración puede ser de endurecimiento por deformación (es decir, la resistencia sigue aumentando tras alcanzar la tensión de fisuración) o de reblandecimiento por deformación (es decir, la resistencia disminuye tras alcanzar la tensión de fisuración). Una vez alcanzada la mayor resistencia a la tracción, se produce la localización de la grieta.

El comportamiento a tracción del UHPFRC puede ser dividido en 2 etapas, la primera en donde se muestra un comportamiento elástico – lineal hasta la primera resistencia a la fisuración (punto de esfuerzo máximo), y la segunda es una etapa de endurecimiento por deformación, que se caracteriza por la formación de múltiples grietas finas ó microfisuración.

10.1.2 GENERALIDADES DEL DISEÑO ESTRUCTURAL DE ELEMENTOS CON UHPC

Las avanzadas propiedades mecánicas y de durabilidad del UHPC permiten configuraciones estructurales que antes no eran posibles mediante el uso de materiales como el concreto convencional. El aprovechamiento eficiente de estas propiedades requiere el uso de principios de diseño estructural que van más allá de las metodologías convencionales.

A corto plazo, se espera que el uso del UHPC se centre en aplicaciones que utilicen eficientemente las propiedades avanzadas con respecto tanto a la resistencia como a la durabilidad. La alta capacidad de disipación de energía del UHPC también puede utilizarse para el diseño eficiente de elementos sometidos a cargas de tipo sísmico o de impacto. Las oportunidades para el despliegue de estructuras de UHPC se limitarán principalmente a aplicaciones en las que los propietarios deseen soluciones innovadoras y estén dispuestos a confiar en los conocimientos de ingeniería combinados con los resultados de la investigación hasta que se publiquen las especificaciones de diseño.

La desviación potencial más significativa de la práctica convencional de diseño del concreto está relacionada con la respuesta a tracción del UHPC. Si los elementos estructurales se detallan adecuadamente, esta capacidad de tracción puede contribuir en una proporción significativa a la resistencia global del elemento a las cargas aplicadas, a la vez que ofrece las proporciones de elementos esbeltos comúnmente asociadas con los componentes de UHPC.

Una forma conveniente de considerar directamente la respuesta esfuerzo-deformación del UHPC en tracción y compresión, es utilizar un proceso de diseño basado en la deformación, en este los límites mecánicos del concreto pueden definirse tanto en términos de resistencia como de deformación. Para un enfoque de diseño analítico, se determinan las respuestas a tracción y compresión del UHPC; se aplican los factores de seguridad apropiados a las respuestas del UHPC; y se obtiene una relación simplificada y conservadora de esfuerzo-deformación.

En la Figura 10-2 se presentan ejemplos de respuestas de diseño a tracción que incluyen un comportamiento de debilitamiento por deformación, un comportamiento de endurecimiento por deformación, un comportamiento elástico-plástico y una respuesta rígido-plástica a la resistencia a la rotura por tracción a través de un valor de deformación límite.

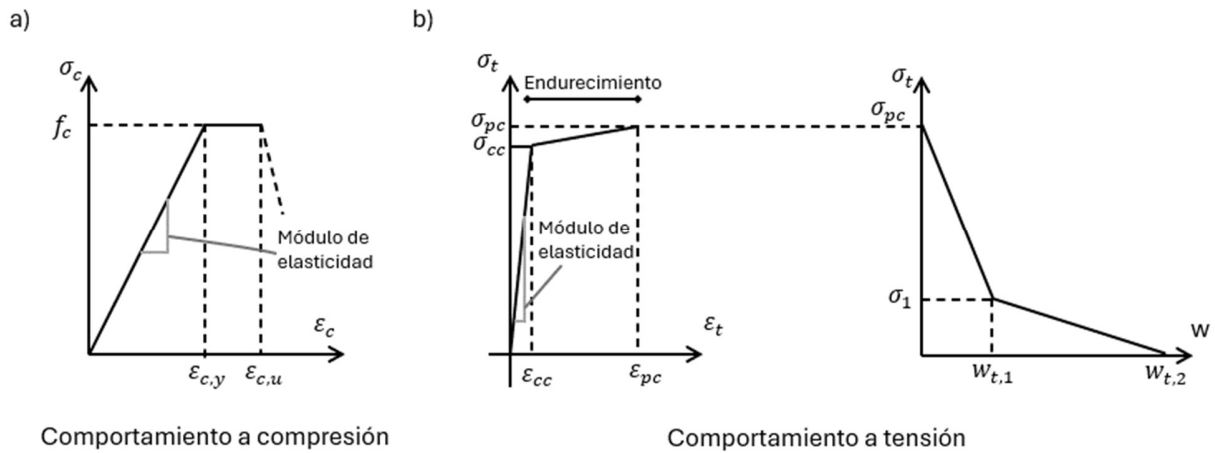


Figura 10-2 Ejemplo de relaciones constitutivas para el UHPC en el estado límite último, a) compresión; y(b) Endurecimiento por deformación en tensión. Adaptado. (ACI Committee 239, 2018b).

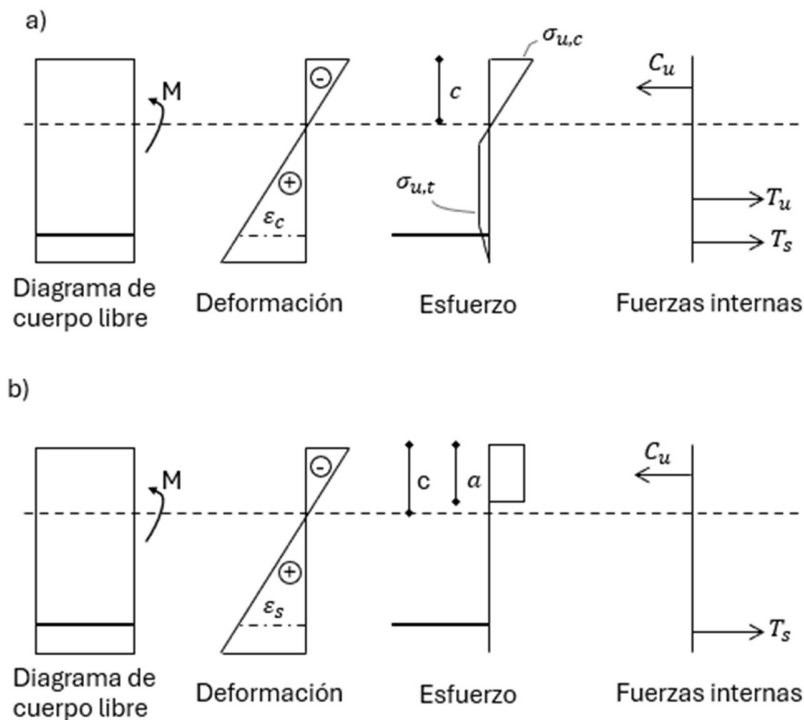


Figura 10-3 Relaciones constitutivas de flexión, a) UHPC y b) Concreto convencional. Adaptado. (ACI Committee 239, 2018b).

Las secciones de las vigas de las relaciones constitutivas presentadas en la Figura 10-3 satisfacen la hipótesis bien conocida de que las secciones planas permanecen planas. A modo de comparación, se muestran las relaciones de cálculo típicas del UHPC y del concreto convencional. Las diferencias se producen tanto en la zona de compresión en donde ya no se usaría el bloque de compresión equivalente de Whitney, y en la zona de la tracción de los materiales, en donde se cuenta con un aporte del concreto a la resistencia de las tracciones.

10.2 FRANCIA

La normativa francesa 'Bétons fibrés à ultra-hautes performances' (Groupe de travail BFUP, 2013), está considerada como una guía de referencia para el uso de este nuevo material en aplicaciones estructurales. Definen al UHPFRC como un material con una matriz cementicia densa y con resistencia característica a la compresión de más de 150 MPa y un máximo de 250 MPa.

10.2.1 GENERALIDADES DEL COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN

En la normativa indican que a compresión el UHPC presenta un comportamiento elástico en un rango amplio de deformación. Luego de haber alcanzado un punto máximo, f_{cm} en el esfuerzo promedio. Como sucede en el comportamiento de todos los concretos, luego del pico, la deformación no es uniforme y la disminución en el esfuerzo se hace presente. La disminución en el esfuerzo puede variar de acuerdo con el volumen de fibras que se haya adicionado en la mezcla, la normativa recomienda el uso del 2% para disminuir la fragilidad en los elementos estructurales.

Para la caracterización del comportamiento a compresión en el laboratorio del material, sugieren el uso de probetas de $\varnothing 11 \times 22$ cm, en caso de que se utilicen otras dimensiones, sugieren el uso de factores de correlación para la correcta caracterización del material.

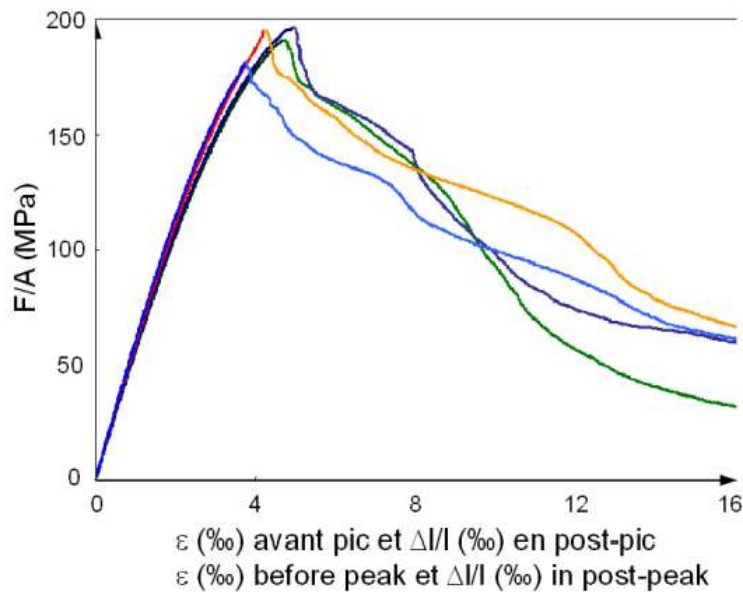


Figura 10-4 Modelo experimental del esfuerzo a compresión (Groupe de travail BFUP, 2013).

10.2.2 GENERALIDADES DEL COMPORTAMIENTO A TENSIÓN

Similar a como sucede con los concretos convencionales, los concretos de ultra altas prestaciones presentan un comportamiento elástico – lineal a la tracción hasta alcanzar el valor límite de f_{ct} , siendo el módulo de Young (o módulo de elasticidad) el mismo tanto a tracción como a compresión. Sin embargo, contrario al caso de los concretos convencionales, la tensión no se anula al alcanzar este valor límite. Esto se debe a que las fibras toman el relevo de la matriz cementicia después de que se produzcan las grietas. La resistencia a la tracción que es asumida por las fibras se traduce convencionalmente en un esfuerzo σ_f , que es igual al cociente de la fuerza y el área superficial de la probeta. A medida que las fisuras incrementan su espesor, las fibras se arrancan gradualmente, lo que disminuye el esfuerzo de tensión. En general se observa que, debido a la calidad del acero utilizado para las fibras, estas fallan por falta de adherencia y no porque se fracturen.

La cantidad de fibras, su longitud y la relación longitud/diámetro dan lugar a diferentes tipos de leyes constitutivas en tensión. Por ejemplo, el endurecimiento por deformación puede ocurrir cuando la resistencia después de la fisuración es mayor que la resistencia de la matriz. O bien, puede ocurrir un ablandamiento cuando la resistencia después de la fisuración permanece menor que la resistencia

de la matriz. El modelo constitutivo del UHPC se caracteriza por 2 etapas: 1) Etapa elástica lineal limitada por un valor de esfuerzo $f_{ct,el}$, y 2) Una etapa post-fisuración generalmente caracterizada por una ley esfuerzo – espesor fisura (σ - w) o ley de esfuerzo – deformación (σ - ϵ).

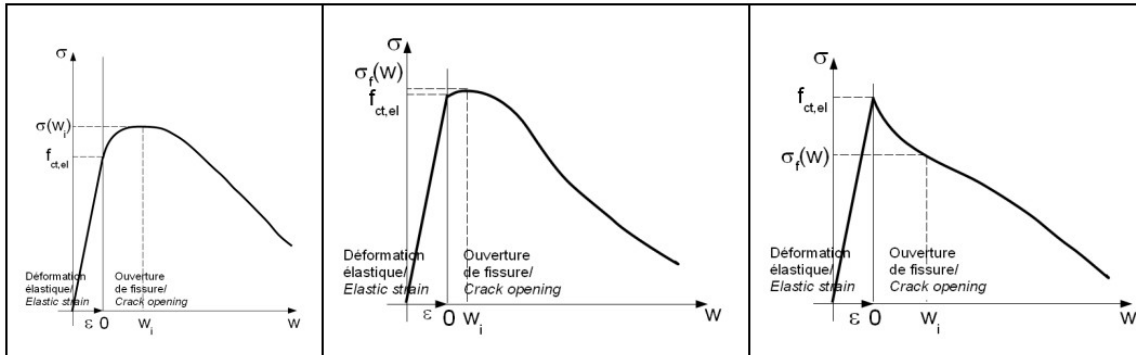


Figura 10-5 Modelos constitutivos a tensión a) Material con endurecimiento por deformación, b) Material con bajo endurecimiento por deformación y c) Material con ablandamiento por deformación (Groupe de travail BFUP, 2013).

Tal como se indicó en la sección 5.4 del documento, la colocación del concreto influye en la ubicación de las fibras, lo que modifica el comportamiento a tensión del UHPFRC (Groupe de travail BFUP, 2013). Razón por la cual se debe tener en cuenta el efecto de dichos factores para la correcta interpretación de los resultados obtenidos.

Para poder determinar el impacto de la orientación de la fibra, se utiliza un conjunto de factores ‘K’ los cuales se determinan mediante los ensayos de idoneidad, realizados en condiciones representativas de la estructura real. Los diferentes valores del factor K se determinan considerando la resistencia a la tracción del material en las direcciones principales de tensión en la estructura, como se aprecia en la siguiente figura:

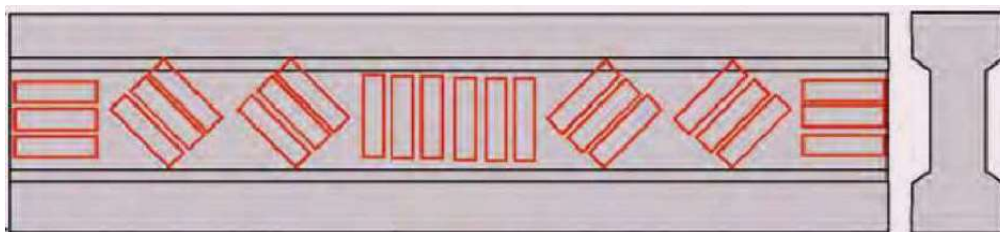


Figura 10-6 Ejemplo de probetas extraídas para determinar el factor K en diferentes direcciones (Groupe de travail BFUP, 2013).

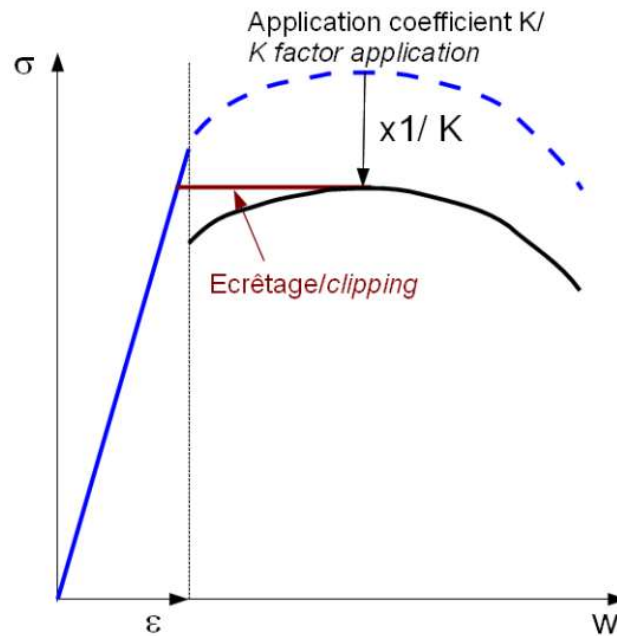


Figura 10-7 Ejemplo de aplicación del factor K (Groupe de travail BFUP, 2013).

Finalmente definen el comportamiento del material y es clasificado en 4 diferentes tipos: 1) Concreto con ablandamiento por deformación, 2) Concreto con bajo endurecimiento por deformación y 3) Concreto con alto endurecimiento por deformación.

Además de caracterizar la dirección de las fibras y el comportamiento que tendrá el material luego de haber alcanzado el punto máximo de esfuerzo, se deberá clasificar el elemento de acuerdo con su geometría en 2 grupos: 1) Grueso y 2) Delgado.

- **Elementos Gruesos:** Son aquellos cuyo espesor (e) es mayor que tres veces la longitud de la fibra individual (l_f). Esto se expresa como: $e > 3 l_f$.
- **Elementos Delgados:** Son aquellos cuyo espesor (e) es igual o menor a tres veces la longitud de la fibra individual (l_f). Esto se expresa como: $e \leq 3 l_f$.

Una vez se han estimado los parámetros de geometría y el tipo de comportamiento, se seguirán los modelos constitutivos que dependerán de la clasificación previamente asignada.

- Elementos clasificados como gruesos:

En los elementos que clasifican como gruesos se deberá determinar en primer lugar la resistencia de la matriz, para posterior realizar la curva esfuerzo – fisuración ($\sigma-w$). El modelo presentará un comportamiento de ablandecimiento por deformación. Las ecuaciones se evidencian en el anexo 3 de la norma ‘Bétons fibrés à ultra-hautes performances’ (Groupe de travail BFUP, 2013).

- Elementos clasificados como delgados:

Su modelo constitutivo tendrá un comportamiento de endurecimiento por deformación, con grietas muy próximas entre sí. La norma recomienda que las propiedades mecánicas sean determinadas mediante un ensayo de flexión de 4 puntos. Las ecuaciones se evidencian en el anexo 3 de la norma ‘Bétons fibrés à ultra-hautes performances’ (Groupe de travail BFUP, 2013).

10.3 CHINA

Esta especificación se formuló con el objetivo de normalizar el diseño y la construcción de estructuras de concreto de ultra altas prestaciones, con el fin de hacerlas más científicas, avanzadas y razonables, para obtener mejores beneficios económicos y sociales. Esta especificación se aplica al diseño, construcción y aceptación de estructuras de concreto armado de ultra altas prestaciones y de concreto pretensado de ultra altas prestaciones para proyectos de edificación, carreteras y puentes urbanos. Por lo tanto, en lo que respecta a la categoría del proyecto, esta especificación es aplicable al diseño estructural, la construcción y la evaluación de la calidad de los proyectos de puentes y edificios, y puede utilizarse para otros tipos de proyectos siempre que el índice de fiabilidad objetivo no sea superior al de los proyectos de puentes.

En la normativa China denominada ‘Technical Specification for Ultra-High Performance Concrete Structures’(Asociación de Normalización de la Construcción de Ingeniería de China, 2020), se define al UHPC como compuestos cementicios reforzados con fibras, que se producen a partir de cemento, aditivos minerales y otros materiales activos en polvo, así como agregados finos, aditivos, fibras de acero microfinas de alta resistencia o fibras sintéticas u orgánicas y agua. Se caracterizan por una impermeabilidad y unas propiedades mecánicas ultra elevadas.

El concreto de ultra altas prestaciones presenta generalmente un ablandamiento a la tracción cuando se añaden fibras de acero en una proporción inferior al 1,5% en volumen, mientras que presenta el esfuerzo a la tracción deseado cuando se añaden fibras de acero en una proporción superior al 1,5% en volumen.

Cuando la adición en volumen de fibras de acero es inferior al 1,0%, por lo general los cilindros prismáticos de UHPC bajo la acción de carga de fatiga por compresión uniaxial, presentan daños por rotura sin pronóstico evidente, mientras que cuando la dosificación en volumen de la fibra de acero es superior al 1,0% se trata de un daño por cizallamiento con cierto pronóstico (Asociación de Normalización de la Construcción de Ingeniería de China, 2020).

Cuando el volumen de fibra de acero es superior al 4,0% resulta difícil mezclar el concreto UHPC, lo que dificulta su construcción, por lo que en la normativa China 'Technical Specification for Ultra-High Performance Concrete Structures' (Asociación de Normalización de la Construcción de Ingeniería de China, 2020) no permite mezclas de UHPC con un volumen de fibra de acero superior al 4,0%. Se ha demostrado que la adición volumétrica óptima de fibras de acero en el concreto UHPC es del 2% al 3%. Por lo tanto, esta especificación indica que la adición volumétrica adecuada de fibras de acero es del 1,5% al 4,0% y establece que esta especificación sólo es aplicable a estructuras de concreto UHPC que cumplan con la cuantía volumétrica indicada para las fibras y una clase resistente comprendida entre 120 y 200 MPa.

10.3.1 GENERALIDADES DEL COMPORTAMIENTO A COMPRESIÓN

Para caracterizar el concreto UHPFRC, el valor de la resistencia a compresión se determina mediante ensayos a compresión sobre especímenes cúbicos con dimensiones de 10 cm a los 28 días de edad. Esta resistencia obtenida se reduce por un factor de 0.88 (tomado de la norma base para el diseño de estructuras en concreto), y por 2 factores $\alpha_1 = 0.80$ que corresponde a la relación entre las secciones de las probetas de ensayo (que fue determinado a partir del ensayo de 127 probetas) y α_2 , que para los concretos con porcentaje de adición de fibras superior a 1.5%, se podrá tomar un valor igual que 1. En la ecuación (V) se aprecia la estimación de la resistencia a compresión con la aplicación de los factores de reducción anteriormente indicados.

$$f_{ck} = 0.7f_{cuk} \quad (V)$$

En la Figura 10-8 se muestra la relación esfuerzo – deformación del concreto tipo UHPC sometido a compresión uniaxial, de acuerdo con la normativa China. En el cual se pueden observar 3 etapas, la primera un comportamiento elástico, en donde las deformaciones son proporcionales a los esfuerzos, una vez alcanzada la deformación ϵ_c se observa también el comportamiento elástico del material, pero con una ligera disminución en la pendiente de la curva, hasta alcanzar el esfuerzo máximo f_c , en donde el material presenta un comportamiento plástico, con incrementos en las deformaciones sin aumento de los esfuerzos.

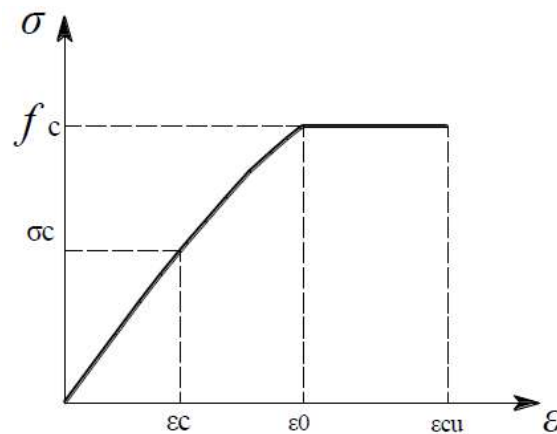


Figura 10-8 Modelo esfuerzo – deformación a compresión uniaxial de concreto UHPC (Asociación de Normalización de la Construcción de Ingeniería de China, 2020)

10.3.2 GENERALIDADES DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO A TENSIÓN

El comportamiento a tensión del concreto UHPFRC, varía según el diseño de mezcla y especialmente por el volumen de fibras adicionadas, causando dificultades en la estandarización de la resistencia a tensión del concreto. Es por esta razón que la normativa China ‘Technical Specification for Ultra-High Performance Concrete Structures’, recomienda el uso de ensayos a tracción directa para la correcta caracterización de las propiedades mecánicas del concreto ante los esfuerzos de tensión. En caso de que los ensayos no puedan ser realizados, se han desarrollado ecuaciones basadas en investigaciones, las cuales correlacionan la resistencia a compresión de los cubos fallados en laboratorio con la resistencia a la fisuración inicial por tracción, las cuales se aprecian en las ecuaciones (VI) y (VII).

$$f_{tk} = f_{t0,k}(1 + \alpha_{f\lambda}) \quad (VI)$$

$$\lambda f = \rho f * \frac{l_f}{d_f} \quad (\text{VII})$$

Dónde:

- α_f : Coeficiente de influencia de las fibras de acero en la resistencia a la tracción, puede tomarse como 0,15. Valor recomendado a partir del resultado de 121 probetas de concreto ensayadas.
- λ_f : Parámetro característico del contenido en fibras de acero
- ρ_f : Tasa volumétrica de fibras de acero
- l_f : Longitud de la fibra de acero
- d_f : Diámetro de la fibra de acero.

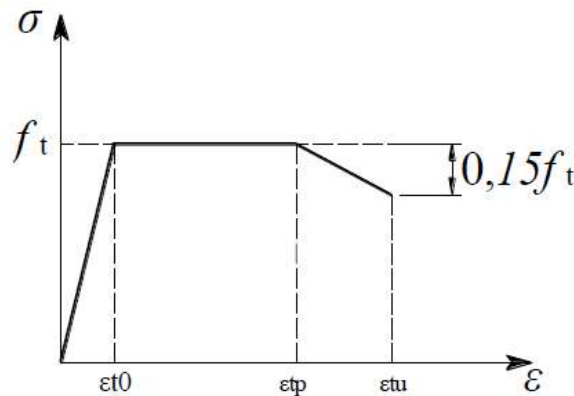


Figura 10-9 Comportamiento del UHPFRC a tensión (Asociación de Normalización de la Construcción de Ingeniería de China, 2020).

Se logra evidenciar que las 3 normativas mencionadas anteriormente, tienen en cuenta la resistencia que es capaz de proveer el concreto de tipo UHPC a la tensión, sin embargo, se presentan algunas diferencias en los modelos constitutivos utilizados para simular el comportamiento del material ante la tensión. En el ACI 239 se muestran ejemplos de respuestas de diseño a la tensión que incluye un comportamiento elasto-plástico y un comportamiento de endurecimiento por deformación y de ablandecimiento por deformación, sin embargo, hasta la fecha de la revisión documental no indican ecuaciones para la estimación del modelo constitutivo. Por su parte en la norma francesa se reconocen 3 modelos constitutivos para considerar el aporte a tensión, según el comportamiento del material, así: endurecimiento por deformación, bajo endurecimiento por deformación y ablandecimiento por deformación, finalmente indican 3 modelos constitutivos para cada uno de los comportamientos, haciendo la salvedad que las leyes constitutivas

se pueden obtener de manera más precisa mediante ensayos de flexión o de tracción directa. Por otro lado, la normativa de China indica un único modelo constitutivo, el cual presenta 3 fases: comportamiento elastoplástico, comportamiento plástico y estricción.

El comportamiento a compresión en las 3 normas es descrito con modelos constitutivos similares, en donde se presenta un comportamiento elasto-plástico hasta alcanzar el punto máximo de esfuerzo (f_c) y un comportamiento de estricción, con incremento de la deformación y disminución del esfuerzo.

11 USOS Y APLICACIONES DE LOS CONCRETOS DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES

Tal como se ha indicado, los concretos de Ultra Altas Prestaciones (UHPC) cuentan con especiales propiedades mecánicas que han sido de gran interés en la construcción de estructuras complejas o que han requerido características especiales de durabilidad. Por sus amplias propiedades y capacidades, el UHPC cuenta con una amplia demanda en el mercado de materiales constructivos, en países como: Australia, Austria, Canadá, China, Francia, Alemania, Italia, Japón, Nueva Zelanda, Corea del sur y Estados Unidos (Azmeem & Shafiq, 2018). El uso de UHPC en construcciones se destaca especialmente en el campo de los puentes, sin embargo, su uso se ha expandido a diferentes ramas estructurales, dentro de las cuales se destaca: Fachadas o elementos arquitectónicos, elementos ornamentales y esculturas, elementos prefabricados, elementos sismorresistentes para estructuras e infraestructura, así como reparación – reforzamiento de estructuras existentes (Akhnoukh & Buckhalter, 2021).

El uso de materiales con amplias bondades como lo es el UHPC trae consigo excelentes beneficios, dentro de los cuales se destacan: incremento de la vida útil de las estructuras, elementos esbeltos que contribuyen a la estética de las estructuras, elementos no estructurales y/o ornamentaciones sin acero de refuerzo estructural, economización de materiales y contribuciones eco-amigables.

11.1 PUENTES

Las avanzadas propiedades mecánicas y la durabilidad del UHPC permiten reconsiderar los métodos de diseño convencionales para muchos componentes habituales de los puentes. Se han llevado a cabo numerosas investigaciones sobre los diseños óptimos con elementos de UHPC, que han dado como resultado el desarrollo y la construcción de puentes de UHPC en todo el mundo (Azmeem & Shafiq, 2018).

11.1.1 PUENTE SHERBROOKE EN QUEBEC, CANADÁ

El primer puente en UHPC fue construido en 1997 en la ciudad de Quebec, Canadá (Federal Highway Administration, 2013). El cual es un puente de uso peatonal y con paso para bicicletas. El concepto estructural consiste en una celosía espacial con un cordón superior de UHPC que sirve de superficie de rodadura, dos cordones inferiores de UHPC y diagonales de celosía inclinadas en dos direcciones. Cada

diagonal está formada por UHPC con resistencia de 200 MPa confinado en tubos de acero inoxidable de 152 mm de diámetro. El puente se construyó a partir de seis dovelas prefabricadas con dos medios vanos ensamblados antes de su montaje sobre el río, para crear un vano de 60 m de longitud.



Figura 11-1 Primer puente en UHPC construido en el mundo, Quebec – Canadá
(Federal Highway Administration, 2013).

11.1.2 PUENTE MARS HILL EN EL CONDADO DE WAPELLO

El primer puente de carretera construido en Norteamérica fue el de Mars Hill en el año 2006, en el condado de Wapello, en el estado de Iowa. Este puente de un solo vano consta de tres vigas prefabricadas de concreto pretensado con resistencia de 159 MPa (Federal Highway Administration, 2013) de 33,5 m de longitud y 1,14 m de ancho, rematadas con un tablero de concreto fundido in situ. Cada viga contenía cuarenta y siete torones de pretensado de baja relajación y 15,2 mm de diámetro, no fue necesario incluir armadura de cortante (Xue et al., 2020).



Figura 11-2 Primer puente en UHPC construido en Estados Unidos, Iowa – USA
(Federal Highway Administration, 2013).

11.1.3 PUENTE BOURG-LÈS-EN VALENCE – FRANCIA

El primer puente tipo ‘carretera’ en UHPC fue construido en una ciudad ubicada al sureste de Francia en el año 2001. Este puente consta de dos vanos continuos con una conexión de UHPC (in situ) entre vanos. La sección transversal consta de cinco vigas pretensadas empalmadas que se asemejan a una doble T con la adición de alas inferiores similares a una sección en forma de π . Las longitudes de las vigas son de 20,5 y 22,5 m y el concreto tiene una capacidad a compresión de 180 MPa. El único refuerzo no pretensado se proporciona donde los componentes se unen longitudinal o transversalmente y en los lugares de las uniones. Se utilizó UHPC en las juntas longitudinales entre vigas (Federal Highway Administration, 2013).



Figura 11-3 Primer puente tipo carretera en Valence - Francia (Toutlemonde et al., 2013).

11.1.4 PUENTE SAKATA-MIRAI EN JAPÓN

El puente de la rampa C de la autopista Horikoshi fue el primer puente de autopista de Japón en el que se utilizó UHPC. El puente de vigas mixtas está formado por cuatro vigas en forma de I de UHPC pretensado y un tablero de concreto convencional. El uso de UHPC en las vigas permitió reducir el número de vigas de 11 a 4. El peso de cada viga era inferior al que habría tenido con concreto convencional, lo que permitió utilizar una grúa más pequeña. El peso total del puente se redujo en un 30% (Federal Highway Administration, 2013).



Figura 11-4 Puente Sakata Mirai – Japón (Tanaka et al., 2009)

11.2 EDIFICACIONES Y ESTRUCTURAS

En la última década, el UHPC también ha cobrado interés en el campo de los componentes de construcción, como parasoles, revestimientos y componentes de cubiertas. El UHPC ha sido elegido por su capacidad para producir estructuras esbeltas, ligeras, duraderas y estéticas.

11.2.1 FUNDACIÓN LOUIS VUITTON EN FRANCIA

Entre los últimos edificios que han adoptado la tecnología UHPC se encuentra la Fundación Louis Vuitton 'Fondation d'entreprise Louis Vuitton pour la création' en París, el cual fue terminado en 2014 y se caracteriza por su gran complejidad geométrica. El revestimiento se crea a partir de paneles prefabricados de UHPC, con cada uno de ellos diseñado de forma única a través de moldes de llenado al vacío (Azmeem & Shafiq, 2018).



Figura 11-5 Fundación Louis Vuitton – Francia (Azmee & Shafiq, 2018).

Otro gran ejemplo es el Museo de Civilizaciones de Europa y de Mediterráneo (MUCEM), situado en la zona portuaria de Marsella en Francia. Es el primer edificio del mundo que hace un uso tan extensivo del UHPC. Como se ha mencionado anteriormente, el UHPC también se puede utilizar en cubiertas y marquesinas, como se ve en la estación de LRT de Shawnessy en Canadá. Existen otros ejemplos de aplicaciones similares, como las cáscaras curvas delgadas prefabricadas en la planta de tratamiento de aguas residuales construida en Francia; la cubierta del estadio Jean Bouin de París, la cubierta del museo olímpico de Lausana (Suiza), el revestimiento del Museo Nacional de Qatar; y la fachada de la Terminal 1 del aeropuerto de Rabat (Marruecos).

11.2.2 EDIFICIO LEOPOLDO EN SAO PAULO – BRASIL

El edificio Leopoldo se encuentra ubicado en la ciudad de Sao Paulo en Brasil, fue ganador del primer lugar en la Categoría de Edificios de Gran Altura en el Programa de Premios a la Excelencia en Construcción de Concreto ACI 2021. El uso de concreto de altas prestaciones en este proyecto permitió construir columnas con una sección transversal reducida, disminuyendo el consumo total de materiales (Schokker, 2022).



Figura 11-6 Edificio Leopoldo en Sao Paulo – Brasil (Schokker, 2022)

Para la construcción del edificio Leopoldo se utilizó concreto con esfuerzo a la compresión de 125 MPa a los 28 días de edad (Christ et al., 2022).

11.2.3 WORLD TRADE CENTER EN BALLERUP, DINAMARCA

El edificio World Trade Center se ubica en Ballerup, Dinamarca. Se espera que su inauguración sea en septiembre del año 2024, el cual contará con numerosos espacios tales como oficinas, centro de conferencias y apartamentos (Wtc ballerup, 2023). El UHPC hace parte en la construcción de estas instalaciones, dentro de las cuales se destacan las losas para los 406 balcones de los 15 pisos, que de acuerdo con información de la empresa 'Hi-con' (2022), tendrán apenas un espesor de 4.5 cm. Los balcones tienen una profundidad de 1.5 m a 2.0 m, con un área total de 2803 m². La construcción de estos balcones con UHPC representarían las propiedades del UHPC en términos de resistencia y esbeltez.



Figura 11-7 Edificio World Trade Center – Dinamarca (Hi-con, 2022).

11.2.4 TORRES EÓLICAS

Una tesis de maestría de la universidad de Iowa desarrollada por Lewin (2010), en donde tenía por objetivo diseñar estructuras de 80 m de altura que servirían de soporte en la instalación de turbinas. Para esto, analizó los costos de construcción de 3 tipos de estructuras: torres en concreto convencional, torres en UHPC y torres en celosía de UHPC. El análisis se realizó mediante la modelación de las 3 estructuras y la estimación de costos para la construcción. Lewin logró determinar que replicar los diseños de las estructuras actuales con materiales más avanzados no es la solución más eficiente, por lo que desarrolló un nuevo ‘tipo’ de estructura en celosía con el uso de UHPC. Tras el análisis realizado, logró determinar que la torre UHPC en celosía utilizó sólo el 31,9% del material necesario para la torre de concreto de resistencia normal. Esto reduciría en gran medida los costes de transporte asociados al traslado de este material al lugar del proyecto, en comparación con la torre de concreto de resistencia normal. La capacidad a fatiga de la torre concebida es muy elevada, con un mínimo de $5,63 \times 10^{13}$ ciclos de carga admisibles. También se concluye que hay una mayor idoneidad para su uso con

múltiples turbinas a lo largo del ciclo de vida de la torre, gracias a su excelente resistencia a la fatiga, lo que aumenta el valor de la torre en comparación con las actuales torres de acero.

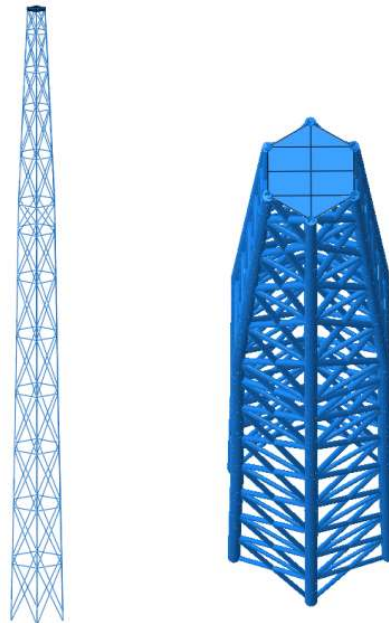


Figura 11-8 Render torres eólicas en UHPC (Lewin, 2010).

11.3 ELEMENTOS NO ESTRUCTURALES

El uso del UHPC se ha vuelto popular en la construcción de fachadas y elementos arquitectónicos de algunas icónicas estructuras, puesto que dentro de las bondades del UHPC se cuenta con la simplificación al poder eliminar el acero de refuerzo en algunas aplicaciones, así como la fluidez del material que hace que se asemeje a un concreto autocompactante. Al tener una matriz altamente densa y con una estructura de poros mínimamente desconectada, hace que el material tenga una baja permeabilidad, lo que impide la entrada de materiales que puedan ser nocivos para logrando así una mayor durabilidad en las estructuras. Debido a su alta capacidad a la flexión con un espesor mínimo, el UHPFRC reforzado con fibras es ideal para paneles de fachada/techo/, revestimiento en tanques/piscinas, mobiliarios urbanos, sistemas de celosía, así como otros elementos arquitectónicos como balcones, escaleras, etc. (Arch Daily, 2021).

11.4 REFORZAMIENTOS ESTRUCTURALES

La intervención o rehabilitación estructural, ya sea el reforzamiento sísmico o la reparación de edificaciones o estructuras en general, es un componente esencial para la mitigación de los efectos de los sismos, o para intervenir las estructuras por otras razones, como cambio de uso, modificación del sistema estructural, daños por corrosión o ataque químico, incendio, impacto, entre otras. Un aspecto importante y crítico en la intervención, es la conexión entre nuevos y antiguos elementos por medio de fijaciones, refuerzo activo o pasivo, adhesivos (Palomino, 2016).

La primera aplicación de un recubrimiento de UHPC fue en un puente sobre el río La Morge en Suiza. El tablero y los bordillos del puente, gravemente dañados, se sustituyeron por UHPC. No se observaron grietas en el bordillo prefabricado de UHPC después de 1 año de su aplicación. El éxito de estos materiales en aplicaciones de reparación y rehabilitación allanó el camino para utilizar una tecnología similar en puentes deteriorados. El UHPC tiene potencial para ser utilizado en condiciones especiales debido a sus excelentes propiedades de alta resistencia a la flexión y densa microestructura. Se ha informado de que el UHPC se utilizó para placas de recubrimiento de las zanjas de cables a lo largo de las vías férreas de alta velocidad en China, para las que el ministerio de China ha definido como mínimo un esfuerzo a compresión de 130 MPa, esfuerzo a flexión de 18 MPa, módulo de elasticidad superior a 48 GPa y resistencia a ciclos de hielo – deshielo mínimo de 500 ciclos (Gu et al., 2013), con el fin de contar con las propiedades mecánicas requeridas para garantizar la durabilidad de dichos elementos. También se ha reportado para el reacondicionamiento de las paredes de contención de reactores nucleares en Francia (Corvez & Masson, 2013), debido a que estas deben obedecer a rígidos criterios de hermeticidad, garantizando la seguridad de la población circundante en caso de accidentes (Azmeem & Shafiq, 2018).

En una investigación desarrollada por Zhu et. al (2020) en donde realizaron una comparación entre los modelos numéricos encontrados de literatura técnica revisada contra datos recolectados de pruebas experimentales ejecutadas en diversas investigaciones en donde reforzaron vigas y losas, tal como se aprecia en la Figura 11-9, los cuales fueron sometidos a ensayos de flexión. Una vez analizados los resultados obtenidos lograron determinar que el UHPC podría utilizarse para incrementar la capacidad a flexión hasta un 400%, en donde el mayor incremento de la resistencia a flexión de los elementos se evidenció en las vigas que fueron reforzadas con UHPC por el lado de las tracciones, como se aprecia en la imagen (b) de la Figura 11-9. El reforzamiento con UHPC modifica el modo de

falla de las vigas, teniendo mayor predominancia el desprendimiento de las barras de refuerzo de la capa de UHPC. Zhu et. al sugieren que el espesor óptimo del UHPFRC y el contenido de fibras de acero podrían ser de 50 mm y 3%, respectivamente. Finalmente concluyen que los resultados obtenidos de la modelación por elementos finitos concuerdan bien con las observaciones experimentales, con variaciones que oscilan entre 0,94 y 1,50 para el momento de fisuración y entre 0,83 y 1,31 para el momento último.

El excelente rendimiento del UHPC es responsable de su gran potencial en diversas aplicaciones, sin embargo, aún quedan muchas por descubrir para utilizar su mayor resistencia, durabilidad y capacidad de flexión. El UHPC proporciona soluciones económicas e innovadoras en áreas donde el concreto convencional tiene dificultades.

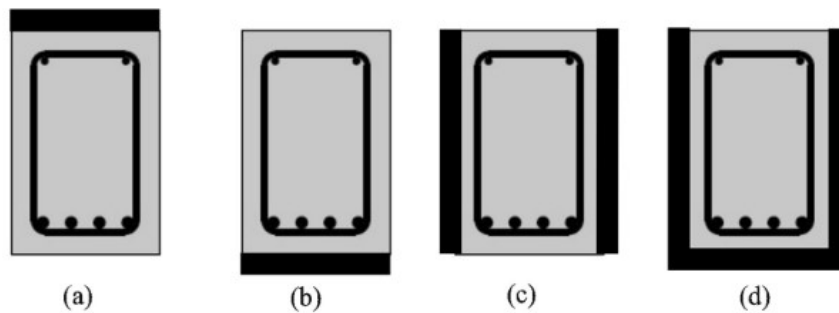


Figura 11-9 Configuraciones de reforzamiento de vigas con UHPC (Zhu et al., 2020).

11.5 APLICACIONES EN COLOMBIA

El concreto de ultra altas prestaciones comenzó a ser comercializado bajo el nombre de 'concreto avanzado' por la empresa Argos en el año 2017. La investigación y desarrollo de este material inició en el año 2014, con la intención de dar respuesta a la necesidad existente en el mercado de contar con un material que previera un mejor desempeño en las obras en términos de durabilidad, comportamiento estructural y exigencias arquitectónicas (Grupo Argos, 2019a).

El comportamiento de este 'concreto avanzado' presenta una composición que permite lograr una alta compacidad y ductilidad, así como sus amplias propiedades mecánicas, de acuerdo con la ficha técnica, el concreto avanzado presenta las siguientes especificaciones técnicas:

Tabla 11.1 Especificaciones técnicas concreto avanzado – Argos (Grupo Argos, 2019b).

Especificación	Valor	Observaciones
Fluidez	200 mm a 260 mm	Evaluado de forma estática bajo la metodología NTC 5784.
Resistencia mínima a la compresión a los 28 días	150 MPa (Premezclado)	Evaluado siguiendo la metodología NTC 673 (ASTM C 39).
Resistencia mínima a la flexión a los 28 días	18 MPa	Evaluado siguiendo la metodología ASTM C 947.
Resistencia mínima a la tracción a los 28 días	5 MPa	Evaluado con la metodología recomendada HPFRCC-JSCE.
Módulo de elasticidad	Mayor a 38 GPa	Evaluado siguiendo la metodología NTC 4025 (ASTM C 469).
Permeabilidad al agua	Baja: Profundidad de penetración < 30 mm	Evaluado siguiendo la metodología NTC 4483.
Resistencia a la penetración de ión cloruro	Menor a 1000 Coulombs	Evaluado siguiendo la metodología ASTM C 1202.

11.5.1 PASARELA UNIVERSIDAD EAFIT

La primera aplicación de los concretos UHPC en Latinoamérica se registra para el año 2016 – 2017 en la ciudad de Medellín, Colombia. La cual consistió en una pasarela peatonal con doble curvatura (vertical y horizontal), 110 m y una luz principal de 43 m, soportado por 5 apoyos (4 columnas y una viga cabezal). El proceso constructivo utilizado es conocido como puente dovelado con postensionamiento no adherido. El puente fue armado con 29 piezas prefabricadas individuales llamadas dovelas y que posteriormente fue hilado con cables de acero que se tensionaron con ayuda de gatos hidráulicos para conformar el sistema estructural. Cada dovela tiene unas dimensiones aproximadas de 3,60 m x 3,10 m x 2,00 m y pesa alrededor de 10 toneladas. Estos elementos fueron fabricados con un concreto de ultra alto desempeño, para cada elemento prefabricado tipo dovela se emplearon 3,7 m³ de concreto avanzado y 120 sacos para las llaves de cortante o juntas, con un consumo total de 110 m³ de este tipo de concreto.

La sección del puente está conformada por una viga cajón principal de la cual se desprende un voladizo que junto con las prelasas configura la pasarela por la que transitan las personas. La geometría asimétrica de estas secciones genera esfuerzos que no podrían ser soportadas por un concreto convencional. De ahí la elección del material (Grupo Argos, 2019a).



Figura 11-10 Puente peatonal, Universidad EAFIT (Grupo Argos, 2019a).

11.5.2 PUENTE UNIVERSIDAD NACIONAL MANIZALES

El puente peatonal de la Universidad Nacional de Colombia de la sede Manizales fue construido en el año 2018, teniendo como objetivo comunicar el edificio P con la biblioteca. Este puente posee un tablero de 26 m de longitud, compuesto por 14 elementos prefabricados de UHPC conectados con un postensado no adherente, su diseño arquitectónico busca simular el esqueleto de un pez.

El sistema estructural consiste en una viga principal conformada por 14 dovelas, cada una con un peso aproximado de 3 toneladas, la resistencia del concreto es de 150 MPa, y debido a la ligereza de los elementos, estos pudieron ser montados con grúas de baja capacidad. La decisión de utilizar UHPC se debió a su rápida construcción, mínimas afectaciones por agentes contaminantes, proyecciones de mayor vida útil y menores costos por mantenimiento (Cespedes, 2021)



Figura 11-11 Puente peatonal UNAL Manizales (Cespedes, 2021)

11.5.3 FACHADA UHPC TORRE ANTEJARDÍN

La torre empresarial Antejardín es un edificio que cuenta con 11 pisos, 6 destinados a oficinas, 4 para parqueaderos y una cubierta, en total tiene un área de 17172 m² de construcción y se ubica en la zona financiera del poblado en Medellín. Para este proyecto la empresa cimbrados realizó la producción de 2432 m² de cerramiento exterior, los cuales están compuestos por 2100 paneles de fachada de UHPC que fueron especificados desde la etapa inicial del proyecto (Cimbrados, 2020).

El concreto utilizado en este proyecto es producto de la empresa Argos, el cual se denomina 'concreto avanzado'. El espesor de las placas es de 2 cm, esto se logró gracias a las amplias propiedades del UHPC (Grupo Argos, 2021).



Figura 11-12 Fachada en UHPC Edificio Antejardín (Cimbrados, 2020).

Las propiedades mecánicas del Concreto Avanzado, entre las que se destaca una alta resistencia a compresión y tracción, permiten lograr elementos con espesores muy pequeños, lo que se traduce en bajo peso y fácil instalación. Los paneles de fachada de UHPC se pueden conectar directamente a la estructura, mientras que para el caso de los concretos convencionales, estos requieren de un bastidor metálico que sirva de soporte al panel, ocasionando que el peso por m^2 incremente de 50 kg/m^2 a 120 kg/m^2 (Grupo Argos, 2021) generando incrementos en la masa de la fachada y conllevando a mayores esfuerzos en los elementos estructurales e incremento de fuerzas sísmicas.

11.5.4 FACHADA AEROPUERTO INTERNACIONAL SIMÓN BOLÍVAR

El aeropuerto internacional Simón Bolívar se ubica en la ciudad de Santa Marta, su fachada consta de paneles prefabricados de concreto UHPC, estos paneles tienen 5 cm de espesor y dimensiones de 6.0 m x 2.0 m.

En total la fachada tiene un área de 812 m^2 que se compone por 106 paneles, de esta manera se logra un aspecto intrincado y estéticamente elegante. Dada la ubicación del aeropuerto, la fachada se verá expuesta a un ambiente corrosivo que podría implicar daños, por lo que la elección del UHPC se consideró una excelente alternativa debido a la baja permeabilidad que posee (MC, 2016).



Figura 11-13 Fachada aeropuerto internacional Simón Bolívar (Acosta, 2017).

12 INVESTIGACIONES DESARROLLADAS EN COLOMBIA

Tal como se mencionó anteriormente, el concreto de tipo UHPC se comercializa bajo el nombre de 'concretos avanzados' por la empresa ARGOS desde el año 2017. Sin embargo, algunos investigadores en alianza con algunas universidades y empresas concreteras han venido estudiando la viabilidad y aplicabilidad de este material de manera local. A continuación, se indican algunas de las investigaciones desarrolladas en Colombia.

12.1 INFLUENCIA DEL PROCESO DE FABRICACIÓN SOBRE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS CONCRETOS UHPC

Una de las primeras investigaciones realizadas en Colombia fue desarrollada por López & Osorio (2015), en la que se tenía por objetivo determinar la influencia de algunos tipos de curado y fabricación en el desarrollo de la resistencia a compresión, flexión y módulo elástico de dos mezclas de UHPC. La primera mezcla requiere de aplicación de vibrado en su colocación, mientras que el diseño de mezcla de la segunda le provee características de ser autocompactante. Las mezclas fueron analizadas en condiciones de curado controladas en laboratorio con y sin tratamiento térmico, y también curado en ambiente bajo cubierta con y sin tratamiento térmico.

Los autores concluyen que el concreto autocompactante presenta mejores propiedades a que el concreto que requiere de vibrado, toda vez que el autocompactante presenta una mejor distribución de partículas y menos cantidad de vacíos. También determinaron que el tratamiento térmico contribuye al desarrollo de la resistencia temprana, sin embargo concretos sin tratamiento térmico podrían desarrollar esas mismas características a los 90 días.

12.2 PLACAS DE CONCRETO UHPC COMO SOLUCIÓN PARA PISOS EN ESTACIONES DE TRANSMILENIO

EN la investigación desarrollada por Reyes y Camargo (2016), tenía como objetivo buscar una alternativa para las losas de piso internas en las estaciones del sistema de transporte masivo de Bogotá, Transmilenio. Se reporta que en las estaciones se ha utilizado dos tipos de losas, las primeras láminas de alfajor que presentaban grandes deflexiones y generaban vibraciones con la circulación de las personas, generando incomodidad, y al momento del desarrollo de la tesis, se habían

remodelados las láminas de alfajor por losas de concreto reforzado con fibras de vidrio, sin embargo se reportaba una alta fisuración de estas losas. Debido a lo anterior, los investigadores tenían por objetivo estudiar el uso de UHPC en las losas como alternativa viable debido a su duración y disminución de costos de mantenimiento.

Los investigadores lograron determinar que el diseño de placas con UHPC cumplía con las consideraciones técnicas y parámetros requeridos por el Instituto de Desarrollo Urbano (IDU). De acuerdo con el análisis de precios, se determina que las placas de UHPC se encuentran dentro de los rangos de precio de las soluciones que se utilizaban en Transmilenio, dando así viabilidad técnica y económica a esta solución.

12.3 INFLUENCIA DEL EXPONENTE DE FULLER, LA RELACIÓN AGUA CONGLOMERANTE Y EL CONTENIDO EN POLICARBOXILATO EN LAS PROPIEDADES DE CONCRETOS DE MUY ALTAS PRESTACIONES

Los modelos de empaquetamiento, como vimos anteriormente, han sido adoptados por los investigadores para determinar la distribución de tamaño de partícula (PSD) de los componentes de las mezclas de UHPC. La curvatura PSD se rige por un parámetro 'q', que corresponde al exponente de Fuller, con el cual se determina la proporción de contenido de pasta de cemento / agregados necesaria para lograr una densidad óptima y contribuir al desarrollo de la resistencia del concreto. Sin embargo, este no es único parámetro que influye en el desarrollo de la resistencia, sino que también se involucra la relación agua/cemento y los superplastificantes. En la investigación desarrollada por Abellán et al. (2018) se tiene por objetivo desarrollar un diseño factorial fraccionado que permita correlacionar las variables y reducir el número requerido de ensayos.

Los resultados hallados demuestran que un valor del exponente de Fuller 'q' de aproximadamente 0.275, con una relación a/c de 0.16 y un contenido de superplastificante del 1.8% del volumen, resulta óptimo para el desarrollo de la resistencia máxima en el diseño de UHPC.

12.4 PROPIEDADES MECÁNICAS Y DE DURABILIDAD DE CONCRETOS DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES (UHPC), CON DIFERENTES MATERIALES CEMENTANTES SUPLEMENTARIOS

En una investigación de tesis desarrollada en la Escuela Colombiana de Ingeniería, se tenía por objetivo lograr un material que fuese sostenible y que presentara costos reducidos en su fabricación, para lo que se estudia 2 mezclas de concreto con sustitución parcial de cemento y humo de sílice, por polvo de vidrio reciclado y carbonato de calcio. Las mezclas fueron evaluadas a compresión, módulo elástico, así como también su durabilidad.

Los resultados de la investigación (Jaramillo et al., 2020) demuestran que con un reemplazo del 27% de cemento y 63% de humo de sílice por polvo de vidrio y carbonato de calcio, se logra igualar las propiedades mecánicas con respecto a la muestra de control.

En términos generales concluyen que el carbonato de calcio y el polvo de vidrio como reemplazo parcial de cemento y humo de sílice, mejora o iguala las propiedades mecánicas y de durabilidad de concretos UHPC, con respecto a una dosificación de control. Adicional, las mezclas con reemplazos presentan menor costo que la mezcla de control, lo anterior se atribuye al precio del cemento y humo de sílice.

12.5 CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPEÑO CON CENIZA VOLANTE LOCAL CON ALTO CONTENIDO DE INQUEMADOS

En esta investigación, se tenía por objetivo desarrollar mezclas de concreto de UHPC con cenizas locales en Colombia, mediante una optimización numérica, basada en el diseño de experimentos (DoE) y criterios de optimización multiobjetivo.

Para la mezcla se utilizaron materiales localmente disponibles, dentro de ellos cemento tipo HE con desarrollo de resistencia a edades tempranas, humo de sílice y arena y cenizas volantes provenientes de la termoeléctrica Termotasajero.

Los resultados de las mezclas evaluadas en la investigación (Abellán et al., 2021) indican que debido al alto contenido de carbono no calcinado presente en las cenizas volantes locales, se dificulta una mayor sustitución del cemento. No obstante, fue posible lograr el desarrollo de una mezcla con una resistencia de 150 MPa, con incorporación de cenizas locales.

12.6 COMPORTAMIENTO A LA FATIGA DE CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPEÑO REFORZADO CON FIBRA COMO UNA ALTERNATIVA EN LA REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS FLEXIBLES

Los autores de esta investigación Torres et al. (2022) buscaban estudiar el comportamiento a la fatiga del concreto UHPFRC para su uso como sobrecarpeta en una rehabilitación típica de un pavimento flexible. Los ensayos en laboratorio incluyeron la caracterización mecánica a compresión y flexión en cuatro puntos. Las probetas fueron sometidas a una carga sinusoidal de amplitud constante con una frecuencia de aplicación de carga de 10 Hz.

Para el desarrollo de la investigación se estudió el comportamiento de los elementos fabricados con un único diseño de mezcla de UHPFRC con adición del 6.5% del peso total de la mezcla, también se incluyó materiales cementantes como cemento Portland, carbonato de calcio y humo de sílice, agua, arena de río y superplastificante.

Los resultados de los ensayos de flexión realizados en este estudio muestran que el UHPFRC reforzado con fibras de acero es un material resistente con una amplia región elástica, por lo que se considera que este material es adecuado para su uso como capa de concreto sobre un pavimento existente. Los resultados de los ensayos de fatiga realizados en este estudio mostraron que la rigidez del UHPFRC se reduce en un 25% bajo una carga dinámica debido a la interacción matriz-fibra, la cual proporciona mayor resistencia a la deformación que los concretos convencionales. Esta propiedad mejora el comportamiento de una estructura de pavimento rehabilitada.

12.7 ESTUDIO DE LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DE CONCRETOS TIPO UHPC Y UHPFRC CON ALTO VOLUMEN DE VIDRIO RECICLADO

En una tesis de maestría de la Universidad del Norte desarrollada por Redondo (2022), se buscaba estudiar la incorporación de polvo de vidrio como material cementante suplementario y agregado fino, y reducción de la cantidad de cemento requerido en la mezcla. Una vez optimizada la mezcla de UHPC con vidrio, se estudió la incorporación de fibras de polipropileno/polietileno, de acero y recicladas, en dosificaciones de 1%, 2% y 3%.

Si bien, las partículas de vidrio reciclado afectan negativamente a la resistencia a la compresión debido a su porcentaje de partículas en forma de aguja y a su absorción

casi nula, lo que produce problemas de adherencia pasta agregado en el ITZ. Este efecto negativo aumenta a medida que aumenta la cantidad de vidrio reciclado en la mezcla, con el proceso de optimización se logró obtener una mezcla de UHPC con una dosificación de vidrio reciclado que representó el 52% de su masa total y cumplió con los requisitos de resistencia a compresión de la ASTM de 120 MPa. Los resultados obtenidos de las probetas de UHPFRC reforzadas con 1%, 2% y 3% de fibras metálicas presentaron un comportamiento a flexión sobresaliente, al igual que las probetas reforzadas con 2% y 3% de fibras comerciales poliméricas de polipropileno/polietileno.

Las probetas con refuerzos del 1%, 2% y 3% con fibras metálicas y del 2% y 3% con fibras poliméricas, presentaron endurecimiento por deflexión, mientras que aquellos especímenes reforzados con fibras recicladas tuvieron un comportamiento de reblandecimiento por deflexión. La causa del mejor comportamiento de las fibras comerciales frente a las recicladas podría estar explicada por la mejora adherencia de las primeras, que cuentan con rugosidad superficial, frente a las recicladas, que son lisas.

A nivel general, se evidencia que las investigaciones en Colombia se han enfocado principalmente en el estudio de diseños de mezclas con materiales locales y algunos casos de aplicación. Los resultados demuestran comportamientos de los diseños de mezcla favorables y posibles aplicaciones.

A pesar de que las investigaciones en Colombia se vengán desarrollando desde hace 10 años, la divulgación de este material no se ha podido dar a gran escala. A continuación, se indican los principales retos identificados para la aplicación del UHPC en Colombia y futuras investigaciones que se pueden desarrollar con el fin de dar a conocer este material entre el gremio de diseñadores estructurales y constructores, contribuyendo así al impulso de la búsqueda de nuevas alternativas que provee el concreto.

13 FUTUROS RETOS DE LOS CONCRETOS DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES

Tal como fue posible evidenciar en los anteriores capítulos, las prestaciones mecánicas de los concretos de ultra altas prestaciones lo convierten en un material versátil con amplias aplicaciones en el campo de las estructuras. La resistencia a compresión del UHPC lo convierte en un material ideal para el uso en estructuras con grandes solicitaciones a compresión, estructuras de gran envergadura tales como puentes. La ductilidad a tracción permite que el esfuerzo a la tracción se pueda tener en cuenta para el aporte a la resistencia a flexión. La durabilidad de los UHPC lo convierte en un material ideal para estructuras sometidas a exposiciones severas o entornos exteriores.

Quizás uno de los problemas del UHPC está en torno al costo de este, por lo que las investigaciones deberán enfocarse a la optimización de este material, con el fin de poder decrecer el precio. Por ejemplo, la posibilidad de omitir el refuerzo a cortante y la disminución de la cuantía de acero requerido en una viga puede suponer un ahorro tanto de materiales como de mano de obra que debe considerarse junto con el aumento de los costes de material (Federal Highway Administration, 2013). Una de las principales ventajas del UHPC es su durabilidad a largo plazo. Como se ha indicado anteriormente, las características de durabilidad medidas superan con creces las del concreto convencional. Estas características deberían dar lugar a estructuras con una vida útil más larga en comparación con las estructuras construidas en concreto convencional, y por lo tanto podrían disminuir potencialmente los costes del ciclo de vida. No se han identificado estudios para este informe que demuestren que este es el caso. Se necesitan estudios que ilustren las ventajas económicas de la utilización del UHPC en las estructuras que se han construido en Colombia, esto con el fin de promover la utilización de este novedoso material. Se necesitan más proyectos de demostración, y los resultados deben ser difundidos a través de diversos medios de divulgación para que esta información pueda llegar a los diseñadores, constructores y fabricantes de elementos prefabricados.

La adopción del UHPC en Colombia requiere del desarrollo de normas de diseño basadas en las especificaciones existentes en países con mayor experiencia en este material. La falta de información técnica podría generar incertidumbres o desconocimiento total del UHPC, lo que obstaculizaría su implementación en la infraestructura colombiana. La creación de estas normas es crucial para la correcta estandarización del UHPC, contribuyendo a la ampliación del mercado y

garantizando la calidad de este tipo de concreto. Una especificación técnica colombiana permitiría divulgar las ventajas del UHPC entre los profesionales civiles del ámbito estructural, impulsando su adopción en proyectos de infraestructura.

En la actualidad son pocas las empresas en Colombia que fabrican UHPC, dentro de una investigación de mercados se logró encontrar que tan solo 1 concretera fabrica este material con resistencias superiores a los 120 MPa.

También es necesario investigar el uso y la dependencia del refuerzo de fibra en elementos estructurales de concreto, así como el comportamiento estructural y las propiedades de ductilidad en zonas de amenaza sísmica alta o en estructuras con un grupo de importancia IV. Otras investigaciones podrían enfocarse en cómo el tipo de fibra, la geometría, el volumen, la dispersión y la orientación pueden afectar al rendimiento estructural del elemento de concreto. Es necesario investigar el uso de fibras de acero de producción nacional y/o el uso de fibras que no sean de acero sin dejar de producir un material de clase UHPFRC que ofrezca las características adecuadas.

La falta de experiencia en el sector de la construcción de este novedoso material podría ocasionar la lenta implementación del UHPC en las construcciones en Colombia, teniendo en cuenta que la mano de obra no suele ser calificada en la ejecución de los proyectos. Las mezclas de UHPFRC con incorporación de fibras podrían requerir de técnicas de colocación específicas dada la trabajabilidad de las mezclas, surgiendo la necesidad de una normativa que garantice la idoneidad del material.

14 CONCLUSIONES

En este trabajo, se ha llevado a cabo una exhaustiva revisión del estado del arte del UHPC, destacando sus propiedades mecánicas, durabilidad, microestructura, diseño de mezcla, normatividad vigente y potenciales aplicaciones. Los resultados de la investigación señalan que el UHPC presenta varias ventajas significativas sobre el concreto convencional, tales como una mayor resistencia a la compresión, flexión y tracción, mayor durabilidad frente al agrietamiento, ataque químico y abrasión, así como una microestructura más densa y homogénea. Estas características hacen del UHPC un material ideal para una amplia gama de aplicaciones, como estructuras de puentes, edificios de gran altura, pavimentos y elementos prefabricados.

Se logró evidenciar la influencia del diseño de mezcla en las propiedades mecánicas del material, y cómo pueden variar las dosificaciones dependiendo del objetivo final del diseño de mezcla. Hasta el momento, no existe un método de diseño global; sin embargo, diversas investigaciones se han enfocado en esto, ofreciendo así amplias posibilidades para futuras creaciones.

A pesar de sus numerosas ventajas, el UHPC presenta algunos desafíos que deben ser abordados antes de su adopción generalizada en Colombia. Estos desafíos incluyen el elevado costo del material, la complejidad del proceso de mezclado y curado, y la falta de normativas que avalen el uso de este material, así como la poca experiencia en la construcción con UHPC. Se requiere de más investigación para optimizar la composición del UHPC con materiales locales, desarrollar diseños de mezcla eficientes y con técnicas que puedan ser replicadas.

En el mismo sentido, se evidenció que en Colombia aún no hay una normativa de diseño que defina los parámetros para la elaboración de las mezclas y para el diseño estructural de elementos en UHPC. Por lo tanto, es necesario enfocar las futuras investigaciones en Colombia en establecer estas directrices específicas de diseño y construcción para este material con los requisitos técnicos y materiales locales disponibles, así como en las técnicas constructivas usuales en la infraestructura, con el fin de asegurar la idoneidad del UHPC.

Se han resumido los usos y aplicaciones del UHPC, resaltando que en Colombia aún no se ha construido una estructura de gran envergadura con este material. En algunas investigaciones colombianas ya se ha logrado desarrollar con materiales locales un concreto de tipo UHPC, con características y propiedades avanzadas, sin embargo, no existen investigaciones que propicien el posible uso de este

concreto. Por lo que un área potencial de investigación podría ser la comparación del diseño estructural, basados únicamente en el análisis estructural de modelos matemáticos de una estructura colombiana que haya sido construida en concreto convencional, con el diseño estructural de la misma estructura pero diseñada con UHPC, dado a que como se mencionó anteriormente no existe en Colombia una guía de diseño, se podría adoptar una guía de otros país para el diseño estructural, esta comparación podría enfocarse en costos y bondades de los 2 materiales. De esta manera, se podrían identificar las ventajas de implementar este material en Colombia, con el propósito de fomentar su uso.

En conclusión, el UHPC es un material de construcción innovador con un enorme potencial para revolucionar la industria de la construcción, y podría encontrar un mercado importante en Colombia. Sus propiedades mecánicas excepcionales y durabilidad lo hacen ideal para una amplia variedad de aplicaciones exigentes. Sin embargo, se requieren esfuerzos adicionales en investigación y desarrollo para abordar los desafíos identificados en este documento.

15 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aarne Vesilind, P. (1980). THE ROSIN-RAMMLER PARTICLE SIZE DISTRIBUTION. In *Resource Recovery and Conservation* (Vol. 5).
- Abdellatif, M., AL-Tam, S. M., Elemam, W. E., Alanazi, H., Elgendy, G. M., & Tahwia, A. M. (2023). Development of ultra-high-performance concrete with low environmental impact integrated with metakaolin and industrial wastes. *Case Studies in Construction Materials*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01724>
- Abellán, J. (2021). Artificial neural network model for strength prediction of ultra-high-performance concrete. *ACI Materials Journal*, 118(4), 3–14. <https://doi.org/10.14359/51732710>
- Abellan, J., Torres, N., & Fernández, J. (2018). Influencia del Exponente de Fuller, la Relación Agua Conglomerante y el contenido en Policarboxilato en las Propiedades de Concretos de muy Altas Prestaciones. *Convención Científica de Ingeniería y Arquitectura*, 1–16. <https://www.researchgate.net/publication/332393532>
- Abellán, J., Torres, N., Fernández, J., & Núñez, A. (2021). Ultra-high-performance concrete with local high unburned carbon fly ash. *DYNA (Colombia)*, 88(216), 38–47. <https://doi.org/10.15446/dyna.v88n216.89234>
- Abellán, J., Torres, N., Fernández, J., & Núñez, A. (2020). Ultra-high-performance concrete with local high unburned carbon fly ash. *DYNA*, 88(216), 38–47.
- ACI 116. (2018). *Terminología del cemento y el hormigón*.
- ACI Committee 239. (2018a). *Ultra-high-performance concrete : an emerging technology report (ACI 239R-18)*.
- ACI Committee 239. (2018b). *Ultra-high-performance concrete : an emerging technology report (ACI 239R-18)*.
- Acosta, J. (2017). Inauguración del nuevo aeropuerto de Santa Marta. *Portafolio.Co*.
- Ahmad, S., Hakeem, I., & Maslehuddin, M. (2016). Development of an optimum mixture of ultra-high performance concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 20(9), 1106–1126. <https://doi.org/10.1080/19648189.2015.1090925>
- Ahmad, S., Lawan, A., & Al-Osta, M. (2020). Effect of sugar dosage on setting time, microstructure and strength of Type I and Type V Portland cements. *Case Studies in Construction Materials*, 13. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00364>
- Akhnoukh, A. K., & Buckhalter, C. (2021). Ultra-high-performance concrete: Constituents, mechanical properties, applications and current challenges. *Case Studies in Construction Materials*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00559>
- Amanjean, E. N., & Vida, T. (2015). Low cost Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) with flash metakaolin. *Key Engineering Materials*, 629–630, 55–63. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.629-630.55>

- Ambily, P. S., Umarani, C., Ravisankar, K., Prem, P. R., Bharatkumar, B. H., & Iyer, N. R. (2015). Studies on ultra high performance concrete incorporating copper slag as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 77, 233–240. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.092>
- Amran, M., Huang, S. S., Onaizi, A. M., Makul, N., Abdelgader, H. S., & Ozbakkaloglu, T. (2022). Recent trends in ultra-high performance concrete (UHPC): Current status, challenges, and future prospects. In *Construction and Building Materials* (Vol. 352). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129029>
- Arch Daily. (2021). *Facades - Ultra High Performance Concrete (UHPC) from Hofmann Facades Group*. Arch Daily.
- Arora, A., Aguayo, M., Kianmofrad, F., Yao, Y., Mobasher, B., & Neithalath, N. (2018). First Principles-Based Design of Economical Ultra-High Performance Concrete. *Sixth International Conference on Durability of Concrete Structures*, 877–889.
- Arora, A., Aguayo, M., Kianmofrad, F., Yao, Y., & Neithalath, N. (2018). First Principles-Based Design of Economical Ultra-High Performance Concrete. *Sixth International Conference on Durability of Concrete Structures*, 877–889.
- Asociación de Normalización de la Construcción de Ingeniería de China. (2020). *超高性能混凝土结构技术规程*.
- Azmeel, N. M., & Shafiq, N. (2018). Ultra-high performance concrete: From fundamental to applications. *Case Studies in Construction Materials*, 9. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2018.e00197>
- Bache, H. H. (1989). *Introduction to Compact Reinforced Composite*.
- Ban, C. C., Kang, S. Y., Siddique, R., & Tangchirapat, W. (2023). Properties of ultra-high performance concrete and conventional concrete with coal bottom ash as aggregate replacement and nanoadditives: A review. In *Reviews on Advanced Materials Science* (Vol. 62, Issue 1). Walter de Gruyter GmbH. <https://doi.org/10.1515/rams-2022-0323>
- Baqersad, M., Sayyafi, E. A., & Mortazavi Bak, H. (2017). *Civil Engineering Journal State of the Art: Mechanical Properties of Ultra-High Performance Concrete* (Vol. 3, Issue 3). www.CivileJournal.org
- Barrett, P. (2009). A Review of "Statistical Models: Theory and Practice": D. A. Freedman. New York: Cambridge University Press, 2005, 424 pages, \$34.95. *Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal*, 16(2), 391–395. <https://doi.org/10.1080/10705510902751390>
- Bautista-Ruiz, W. A., Díaz-Lagos, M., & Martínez-Ovalle, S. A. (2017). Caracterización de las cenizas volantes de una planta termoeléctrica para su posible uso como aditivo en la fabricación de cemento. *Revista de Investigación, Desarrollo e Innovación*, 8(1), 135–146. <https://doi.org/10.19053/20278306.v8.n1.2017.7374>
- Ben Aim, R., & Le Goff, P. (1968). Effet de Paroi dans les Empilements Desordonnes de Spheres et Application a la Porosité de Mélanges Binaires. *Powder Technology*, 1, 281–290.
- Bennet, D. (2018). *MDF and DSF-The New Ultra High Strength Concretes*.

- Bragulat, I. (2021). Aditivos superplastificantes y reductores de agua. *Tecnología Avanzada Del Hormigón*.
- Brune, P., Perucchio, R., Ingrassia, A. R., & Jackson, M. D. (2010). The toughness of imperial roman concrete. *Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures*, 38–45.
- Bumanis, G., Toropovs, N., Dembovska, L., Bajare, D., & Korjakins, A. (2015). The effect of heat treatment on the properties of ultra high strength concrete. *Environment Technology Resources*, 1(209), 22–27.
- Céspedes, A. (2021). *Aplicación de Concretos de Ultra Altas Prestaciones (UHPRFC) a la construcción de Puentes*.
- Chan Yam, J. L., Carcaño, R. S., & Moreno, E. I. (2003). Influencia de los agregados pétreos en las características del concreto. *Ingeniería*, 7(2), 39–46.
- Chandra, S., & Björnström, J. (2002). Influence of cement and superplasticizers type and dosage on the fluidity of cement mortars-Part I. *Cement and Concrete Research*, 32, 1605–1611.
- Chen, Y., Matakah, F., Balachandra, A., & Soroushian, P. (2019). Ultra-High-Performance Concrete: Development of On-Site Fresh Mix Rheology Test Methods. *Journal of Advanced Research in Applied Mechanics Journal Homepage*, 55, 1–11. www.akademiabaru.com/aram.html
- Choi, D., Hong, K., Ochirbud, M., Meiramov, D., & Sukontaskuul, P. (2023). Mechanical Properties of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) and Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPRFC) with Recycled Sand. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 17(1). <https://doi.org/10.1186/s40069-023-00631-2>
- Christ, R., Tutikian, B., & Helene, P. (2022). *Concreto de Ultra Alto Desempenho*. <https://www.unisinos.br/>
- Cimbrados. (2020). *Fachada UHPC Torre Antejardín*. Cimbrados.
- Corvez, D., & Masson, B. (2013). UHPRFC Solutions for the retrofit of nuclear reactor containment walls. *Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete*, 147–156.
- Davidovits, J. (1987). Geopolymeric Reactions in Archaeological Cements and in Modern Blended Cements. In *Concrete International* (Vol. 1).
- DeRousseau, M. A., Kasprzyk, J. R., & Srubar, W. V. (2018). Computational design optimization of concrete mixtures: A review. In *Cement and Concrete Research* (Vol. 109, pp. 42–53). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.04.007>
- Dirección General de Desarrollo Minero. (2009). *Perfil de Mercado de la Caliza*.
- Du, J., Meng, W., Khayat, K. H., Bao, Y., Guo, P., Lyu, Z., Abu-obeidah, A., Nassif, H., & Wang, H. (2021). New development of ultra-high-performance concrete (UHPC). In *Composites Part B: Engineering* (Vol. 224). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109220>
- Eide, M. B., & Hisdal, J.-M. (2012a). *SINTEF Building and Infrastructure*. www.coinweb.no
- Eide, M. B., & Hisdal, J.-M. (2012b). *Ultra High Performance Fibre Reinforced Concrete (UHPRFC) – State of the art*. www.coinweb.no

- El-Helou, R. G., Haber, Z. B., & Graybeal, B. A. (2022a). Mechanical Behavior and Design Properties of Ultra-High-Performance Concrete. *ACI Materials Journal*, *119*(1), 181–194. <https://doi.org/10.14359/51734194>
- El-Helou, R. G., Haber, Z. B., & Graybeal, B. A. (2022b). Mechanical Behavior and Design Properties of Ultra-High-Performance Concrete. *ACI Materials Journal*, *119*(1), 181–194. <https://doi.org/10.14359/51734194>
- El-Mir, A., Nehme, S. G., & Assaad, J. J. (2022). Effect of Binder Content and Sand Type on Mechanical Characteristics of Ultra-High Performance Concrete. *Arabian Journal for Science and Engineering*, *47*(10). <https://doi.org/10.1007/s13369-022-06733-5>
- Eriksson, L., Johansson, E., & Wikstrom, C. (1998). Mixture design-design generation, PLS analysis, and model usage. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, *43*, 1–24.
- EUCO. (2019). *Supplementary Cementitious Materials*. www.silicafume.org.
- Faysal, A., Ali, G., Hiwa, H., & Shwan, R. (2022). *Mix Design and Structural Applications of Ultra-High Performance Concrete (UHPC)*.
- Federal Highway Administration. (2013). *Ultra-High Performance Concrete: A State-of-the-Art Report for the Bridge Community*.
- Fehling, E., Schmidt, M., Walraven, J., Leutbecher, T., & Fröhlich, S. (2014). *Ultra-high performance concrete UHPC : fundamentals, design, examples*. Ernst & Sohn.
- Fhwa. (2016). *Best Practices for Concrete Pavements / Supplementary Cementitious Materials Tech brief*.
- Flatt, R., & Schober, I. (2012). Superplasticizers and the rheology of concrete. In *Understanding the Rheology of Concrete* (pp. 144–208). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857095282.2.144>
- François de Larrard, & Thierry Sedran. (1993). Optimization of the Ultra High Performance Concrete by the use of a packing model. In *Cement and Concrete Research* (Vol. 24, Issue 6).
- Fuller, W., & Thompson, S. (1907). The Laws of Proportioning Concrete. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, *59*(2).
- Furnas, C. C. (1931). Grading Aggregates I-Mathematical Relations for Beds of Broken Solids of Maximum Density'. *Industrial and Engineering Chemistry*, *23*(9), 1052–1058.
- Gannon, K. (2016). *ARCHITECTURAL ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE*. TAKTL. <http://go.hw.net/AR516Course5>
- Ghafari, E., Costa, H., & Júlio, E. (2015). Statistical mixture design approach for eco-efficient UHPC. *Cement and Concrete Composites*, *55*, 17–25. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.07.016>
- Ghafari, E., Ghahari, S. A., Costa, H., Júlio, E., Portugal, A., & Durães, L. (2016). Effect of supplementary cementitious materials on autogenous shrinkage of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, *127*, 43–48. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.123>
- Gil, C. (2019). *Método de las Superficies de Respuesta*.

- Goltermann, P., Johansen, V., & Palbøl, L. (1997). Packing of Aggregates: An Alternative Tool to Determine the Optimal Aggregate Mix. *ACI Materials Journal*, 94(5), 435–442.
- Graybeal, B. (2011). *Ultra-High Performance Concrete*. www.fhwa.dot.gov/research
- Groupe de travail BFUP. (2013). *Bétons fibrés à ultra-hautes performances*.
- Growing Buildings. (2019). *Construcción y emisiones CO2 a la atmósfera*. Growing Buildings.
- Grupo Argos. (2019a). *El concreto de ultra alto desempeño de ARGOS recibe patente*. UHPC ARGOS.
- Grupo Argos. (2019b). *VENTAJAS ESTRUCTURALES*. www.argos.co
- Grupo Argos. (2021). *Sistemas modulares en concreto avanzado para fachadas*. ArgosCol.
- Gu, C., Zhao, S., Sun, W., & Wang, Q. (2013). Production of Precast UHPFRC Pavement cover plates in High-Speed railway construction. *Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete*, 463–470.
- Hannawi, K., Bian, H., Prince-Agbodjan, W., & Raghavan, B. (2015). Effect of different types of fibers on the microstructure and the mechanical behavior of Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concretes. *Composites Part B: Engineering*, 86, 214–220. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.09.059>
- He, Z. hai, Du, S. gui, & Chen, D. (2018). Microstructure of ultra high performance concrete containing lithium slag. *Journal of Hazardous Materials*, 353, 35–43. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.03.063>
- Hermida, G., Moranville, M., & Flatt, R. J. (2014). The Role of Paste Volume on Performance of Concrete. *Advances in Concrete Technology and Sustainability Issues*, 201–214.
- Hernnan, A., Langaro, E. A., Silva, S. H., Lopes, D., & Klein, N. S. (2016). Particle packing of cement and silica fume in pastes using an analytical model. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 9(1), 48–65. <https://doi.org/10.1590/s1983-41952016000100004>
- Hi-con. (2020). *Do we really need another guideline for UHPC?* Hi-Con ApS.
- Hi-con. (2022). *World Trade Tower will have extremely sleek UHPC balconies*. Hi-Con.
- Holcim. (2014). *Qué es el cemento: Definición y concepto*.
- Hu, J., & Wang, K. (2011). Effect of coarse aggregate characteristics on concrete rheology. *Construction and Building Materials*, 25(3), 1196–1204. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.035>
- Hurtado, D. (2020). *Modificación del Comportamiento Reológico del Concreto UHPC como Alternativa de Diseño y Construcción para Pavimentos*.
- Izaurieta, F., & Saavedra, C. (2018). *Redes Neuronales Artificiales*.
- Jaramillo, D., Torres, N., & Abellán, J. (2020). *Propiedades Mecánicas y de Durabilidad de Concretos de Ultra Altas Prestaciones (UHPC), con Diferentes Materiales Cementantes Suplementarios*.
- Khayat, K. H., Meng, W., Vallurupalli, K., & Teng, L. (2019). Rheological properties of ultra-high-performance concrete — An overview. In *Cement and Concrete Research* (Vol. 124). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105828>

- Korpa, A., Kowald, T., & Trettin, R. (2009). Phase development in normal and ultra high performance cementitious systems by quantitative X-ray analysis and thermoanalytical methods. *Cement and Concrete Research*, 39(2), 69–76. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2008.11.003>
- Kurda, R. (2023). Effect of Silica Fume on Engineering Performance and Life Cycle Impact of Jute-Fibre-Reinforced Concrete. *Sustainability (Switzerland)*, 15(11). <https://doi.org/10.3390/su15118465>
- Laboratory Dylan Scott, S. A., Long, W. R., Moser, R. D., Green, B. H., O, J. L., & Williams, B. A. (2015). *ERDC/GSL TR-15-22 "Impact of Steel Fiber Size and Shape on the Mechanical Properties of Ultra-High Performance Concrete."* www.erd.usace.army.mil.
- Lewin, T. J. (2010). *An investigation of design alternatives for 328-ft (100-m) tall wind turbine towers.*
- Li, J., Wu, Z., Shi, C., Yuan, Q., & Zhang, Z. (2020). Durability of ultra-high performance concrete – A review. In *Construction and Building Materials* (Vol. 255). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119296>
- Li, P. P., Brouwers, H. J. H., Chen, W., & Yu, Q. (2020). Optimization and characterization of high-volume limestone powder in sustainable ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 242. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118112>
- Li, P. P., Yu, Q., Brouwers, H. J. H., & Yu, R. (2016). Fresh behaviour of ultra-high performance concrete (UHPC) : an investigation of the effect of superplasticizers and steel fibres. *Proceedings of the 9th International Concrete Conference*, 635–644. www.tue.nl/taverne
- Li, P. P., Yu, Q. L., & Brouwers, H. J. H. (2017). Effect of PCE-type superplasticizer on early-age behaviour of ultra-high performance concrete (UHPC). *Construction and Building Materials*, 153, 740–750. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.145>
- Li, P. P., Yu, Q. L., & Brouwers, H. J. H. (2018). Effect of coarse basalt aggregates on the properties of Ultra-high Performance Concrete (UHPC). *Construction and Building Materials*, 170, 649–659. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.109>
- Li, P., Wang, X., & Cao, H. (2023). Empirical Compression Model of Ultra-High-Performance Concrete Considering the Effect of Cement Hydration on Particle Packing Characteristics. *Materials*, 16(13). <https://doi.org/10.3390/ma16134585>
- Li, S., Cheng, S., Mo, L., & Deng, M. (2020). Effects of steel slag powder and expansive agent on the properties of ultra-high performance concrete (UHPC): Based on a case study. *Materials*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/ma13030683>
- Liu, J., Wang, K., Zhang, Q., Han, F., Sha, J., & Liu, J. (2017). Influence of superplasticizer dosage on the viscosity of cement paste with low water-binder ratio. *Construction and Building Materials*, 149, 359–366. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.145>
- Long, G., Xie, Y., & Jiang, Z. (2005). Properties and micro/microstructure of reactive powder concrete. *Journal of The Chinese Ceramic Society*, 33(4), 456–461.

- López, A., & Osorio, D. (2015). *Influencia del Proceso de Fabricación sobre las Propiedades Mecánicas de los Concretos de Ultra Alto Desempeño (UHPC)*.
- Lothenbach, B., Scrivener, K., & Hooton, R. D. (2011). Supplementary cementitious materials. In *Cement and Concrete Research* (Vol. 41, Issue 12, pp. 1244–1256). <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.12.001>
- Mahmood, R. A., & Kockal, N. U. (2022). Effects of Silica Fume and Micro Silica on the Properties of Mortars Containing Waste PVC Plastic Fibers. *Microplastics*, 1(4), 587–609. <https://doi.org/10.3390/microplastics1040041>
- Malinoski, R., & Garfinkel, Y. (1991). Prehistory of Concrete. *Concrete International*, 13(3), 62–68.
- Mallinowski, R., & Garfinkel, Y. (1991). Prehistory of Concrete. *Concrete International*, 13(3), 62–68.
- Mao, H., Hillert, M., Selleby, M., & Sundman, B. (2006). Thermodynamic assessment of the CaO-Al₂O₃-SiO₂ system. *Journal of the American Ceramic Society*, 89(1), 298–308. <https://doi.org/10.1111/j.1551-2916.2005.00698.x>
- Marvila, M. T., De Azevedo, A. R. G., De Matos, P. R., Monteiro, S. N., & Vieira, C. M. F. (2021). Materials for production of high and ultra-high performance concrete: Review and perspective of possible novel materials. *Materials*, 14(15). <https://doi.org/10.3390/ma14154304>
- Mather, K. (1965). High Strength, High Density Concrete. *Journal of the American Concrete Institute*, 951–962.
- Mazanec, O., Lowke, D., & Schiel, P. (2010). Mixing of high performance concrete: Effect of concrete composition and mixing intensity on mixing time. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 43(3), 357–365. <https://doi.org/10.1617/s11527-009-9494-y>
- MC. (2016). *Obra de aditivos para fachadas de GRC aeropuerto de Santa Marta*. MC Be Sure, Build Sure.
- Mehta, P. K. (1989). Pozzolanic and Cementitious By-Products in Concrete-Another Look. *Proceedings of Third CANMENT/ACI Int. Conf*, 1–43.
- Meng, W., & Khayat, K. (2017). Effects of saturated lightweight sand content on key characteristics of ultra-high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 101, 46–54. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.018>
- Meng, W., Valipour, M., & Khayat, K. H. (2017). Optimization and performance of cost-effective ultra-high performance concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 50(1). <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0896-3>
- Mishra, O., & Singh, S. P. (2019). An overview of microstructural and material properties of ultra-high-performance concrete. In *Journal of Sustainable Cement-Based Materials* (Vol. 8, Issue 2, pp. 97–143). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/21650373.2018.1564398>
- Moreno, J. D. (2017). *Materiales cementantes suplementarios y sus efectos en el concreto*. 360enconcreto.
- Mosaberpanah, M. A., & Eren, O. (2017). Statistical models for mechanical properties of UHPC using response surface methodology. *Computers and Concrete*, 19(6), 667–675. <https://doi.org/10.12989/cac.2017.19.6.667>

- Nancy, M. (2005). ¿Qué es el estado del arte? *Ciencia y Tecnología*, 5, 73–75.
- Neville, A. (2016). *Properties of concrete* (Vol. 5th).
- Oficemen. (2016). *El proceso de producción del cemento*.
- Palmieri, A., Guzmán, A., & Cantillo, V. (2017). Evaluación de esfuerzos tangenciales y radiales en cilindros de concreto de paredes gruesas sometidos a presión interna. *Ingeniería y Desarrollo*, 1–11.
- Palomino, Y. (2016). *Incremento y optimización económica de la resistencia a flexión en vigas mediante tres sistemas de refuerzo*.
- Park, S., Wu, S., Liu, Z., & Pyo, S. (2021). The role of supplementary cementitious materials (Scms) in ultra high performance concrete (uhpc): A review. In *Materials* (Vol. 14, Issue 6). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ma14061472>
- Perry, V. H., & America, N. (2020). *What Really is Ultra-High Performance Concrete?-Towards a Global Definition*. <https://www.researchgate.net/publication/340441896>
- Piérard, J., Dooms, B., & Cauberg, N. (2013). Durability evaluation of different types of UHPC. *Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete*, 275–284.
- Puertas, F. (1993). Escorias de alto horno: composición y comportamiento hidráulico. *Materiales de Construcción*, 43(229), 37–48. <http://materconstrucc.revistas.csic.es>
- Qu, D., Cai, X., & Chang, W. (2018). Evaluating the effects of steel fibers on mechanical properties of ultra-high performance concrete using artificial neural networks. *Applied Sciences (Switzerland)*, 8(7). <https://doi.org/10.3390/app8071120>
- Rebentrost, M., & Wight, G. (2009). UHPC Perspective from a Specialist Construction Company. *Association Française de Génie Civil*.
- Redondo, D. (2022). *Estudio de las Propiedades Mecánicas de Concretos tipo UHPC y UHPFRC con Alto volumen de vidrio Reciclado*.
- Restrepo, J., Jaime Baena, O., & Iván Tobón, J. (2006). EFFECTS OF THE ADDITION OF METAKAOLIN IN PORTLAND CEMENT. *Año*, 73, 131–141.
- Reyes, M., & Camargo, J. (2016). *Placas de Concreto de Ultra Alto Desempeño (UHPC) como solución para pisos en Estaciones de Transmilenio*.
- Roy, D. M., Gouda, G. R., & Bobrowsky, A. (1972). *Very high strength cement pastes prepared by hot pressing and other high pressure techniques* (Vol. 2). Pergamon Press, Inc.
- Roy, D. M., Scheetz, B. E., & Silsbee, M. R. (1993). Processing of Optimized Cements and Concretes Via Particle Packing. *Mrs Bulletin*, 45–49.
- Salas, R. (2007). *Redes Neuronales Artificiales*.
- Sanjuán Barbudo, M. A., & Chinchón Yepes, Servando. (2004). *Introducción a la fabricación y normalización del cemento Portland*. Universidad d'Alacant.

- Santiago, A., & Guayasamin, V. (2016). Influence of autogenous shrinkage on mass transport properties of concrete. In *MASKANA* (Vol. 7, Issue 1).
- Schokker, A. (2022). Concreto carbono neutro. *Revista Concreto Latinoamérica*, 33–35.
- Shah, S., Sharma, R., Paswan, S., Bhandari, A., Arukala, S. R., & Pancharathi, R. K. (2020). Prioritizing the Aggregate Source Based on Particle Packing Density Using Modified Toufar Model and MCDM Methods. In *Lecture Notes in Civil Engineering* (Vol. 68, pp. 171–182). Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-15-3361-7_13
- Shi, C., Wu, Z., Xiao, J., Wang, D., Huang, Z., & Fang, Z. (2015). A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. In *Construction and Building Materials* (Vol. 101, pp. 741–751). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088>
- Shi, Y., Long, G., Ma, C., Xie, Y., & He, J. (2019). Design and preparation of ultra-high performance concrete with low environmental impact. *Journal of Cleaner Production*, 214, 633–643. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.318>
- Silva, O. J. (2019). *Tipos de agregados y su influencia en las mezclas de concreto*. 360enconcreto.
- Soliman, N. A., & Tagnit-Hamou, A. (2017a). Using glass sand as an alternative for quartz sand in UHPC. *Construction and Building Materials*, 145, 243–252. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.187>
- Soliman, N. A., & Tagnit-Hamou, A. (2017b). Using particle packing and statistical approach to optimize eco-efficient ultra-high-performance concrete. *ACI Materials Journal*, 114(6), 847–858. <https://doi.org/10.14359/51701001>
- Swiss Society of Engineers and Architects (SIA). (2015). *prSIA 2052: “UHPC: Material, Design and Construction (Béton fibré ultra-performant [BFUP]: Matériaux, dimensionnement et exécution)*.
- Tafraoui, A., Escadeillas, G., Lebailli, S., & Vidal, T. (2009). Metakaolin in the formulation of UHPC. *Construction and Building Materials*, 23(2), 669–674. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.018>
- Tanaka, Y., Mawaka, K., Kameyama, Y., Ohtake, A., Musha, H., & Watanabe, N. (2009). Innovation and application of UFC bridges in Japan. *UHPRFC*, 1–17.
- Tayeh, B. A., Abu Bakar, B. H., Megat Johari, M. A., & Voo, Y. L. (2013). Utilization of ultra-high performance fibre concrete (UHPRFC) for rehabilitation a review. *Procedia Engineering*, 54, 525–538. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2013.03.048>
- Teng, L., Meng, W., & Khayat, K. H. (2020). Rheology control of ultra-high-performance concrete made with different fiber contents. *Cement and Concrete Research*, 138. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106222>
- Torres, G., Romano, J., Vacca, H., Alvarado, Y., & Reyes, F. (2022). Fatigue behavior of ultrahigh-performance fiber-reinforced concrete as an alternative for flexible pavement rehabilitation. *Ingeniería y Universidad*, 26. <https://doi.org/10.11144/Javeriana.iued26.fbuh>

- Toutlemonde, F., Hajar, Z., Simon, A., & Ramanich, S. (2013). Long-term material performance checked on world's oldest UHPFRC road bridges at Bourg-Lès-Valence. *Int. Symposium on Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete*, 265–274. <https://www.researchgate.net/publication/278817136>
- Towers. (1968). *The properties of fresh concrete - Towers*.
- Ullah, R., Qiang, Y., Ahmad, J., Vatin, N. I., & El-Shorbagy, M. A. (2022). Ultra-High-Performance Concrete (UHPC): A State-of-the-Art Review. *Materials*, 15(12). <https://doi.org/10.3390/ma15124131>
- United Nations Climate Change. (2021). *El Acuerdo de París*. UNCC.
- Walker, S., & Bloem, D. L. (1960). Effects of Aggregate Size on Properties of Concrete. *Journal of the American Concrete Institute*, 32, 283–298.
- Wang, X., Yu, R., Song, Q., Shui, Z., Liu, Z., Wu, S., & Hou, D. (2019). Optimized design of ultra-high performance concrete (UHPC) with a high wet packing density. *Cement and Concrete Research*, 126. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105921>
- Wtc ballerup. (2023). *WTC Ballerup højhuset har fået sin første lejer*. WTC Ballerup.
- Xue, J., Briseghella, B., Huang, F., Nuti, C., Tabatabai, H., & Chen, B. (2020). Review of ultra-high performance concrete and its application in bridge engineering. In *Construction and Building Materials* (Vol. 260). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119844>
- Yahia, A., & Khayat, K. H. (2003). Applicability of rheological models to high-performance grouts containing supplementary cementitious materials and viscosity enhancing admixture. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 36(6), 402–412. <https://doi.org/10.1007/bf02481066>
- Yamada, K., Takahashi, T., Hanehara, S., & Matsuhisa, M. (2000). Effects of the chemical structure on the properties of polycarboxylate-type superplasticizer. In *Cement and Concrete Research* (Vol. 30).
- Yan, X., Gao, Y., Luo, Y., Bi, Y., & Xie, Y. (2021). Effect of different steel fiber types on mechanical properties of ultra-high performance concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1167(1), 012001. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1167/1/012001>
- Yang, J., Chen, B., Su, J., Xu, G., Zhang, D., & Zhou, J. (2022). Effects of fibers on the mechanical properties of UHPC: A review. In *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)* (Vol. 9, Issue 3, pp. 363–387). Chang'an University. <https://doi.org/10.1016/j.jtte.2022.05.001>
- Yudenfreund, M., Odler, I., & Brunauer, S. (1972). Hardened Portland Cement Pastes of Low Porosity I. Materials and Experimental Methods. *Cement and Concrete Research*, 2, 313–330.
- Zhang, X., Zhao, S., Liu, Z., & Wang, F. (2019). Utilization of steel slag in ultra-high performance concrete with enhanced eco-friendliness. *Construction and Building Materials*, 214, 28–36. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.106>
- Zhou, M., Wu, Z., Ouyang, X., Hu, X., & Shi, C. (2021a). Mixture design methods for ultra-high-performance concrete - a review. *Cement and Concrete Composites*, 124. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104242>

- Zhou, M., Wu, Z., Ouyang, X., Hu, X., & Shi, C. (2021b). Mixture design methods for ultra-high-performance concrete - a review. *Cement and Concrete Composites*, 124. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104242>
- Zhou, M., Wu, Z., Ouyang, X., Hu, X., & Shi, C. (2021c). Mixture design methods for ultra-high-performance concrete - a review. *Cement and Concrete Composites*, 124. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104242>
- Zhu, Y., Zhang, Y., Hussein, H. H., & Chen, G. (2020). Flexural strengthening of reinforced concrete beams or slabs using ultra-high performance concrete (UHPC): A state of the art review. In *Engineering Structures* (Vol. 205). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110035>