

Materiales Alternativos para la Sustitución de Agregados y/o Cemento en la Producción de
Concreto de Ultra Alto Desempeño: Revisión Bibliográfica.

Luis Rafael Fuentes Luna, Lilian Cristina Jaramillo González

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero Civil

Director

Luis Alberto Capacho Silva

Magíster en Informática

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Civil

Bucaramanga

2022

Contenido

	Pág.
Introducción	9
1. Metodología	11
2. Resultados	13
2.1 Materiales de Desecho Naturales	14
2.1.1 Arcilla Marina	14
2.1.1.1 Bio Carbón.	15
2.1.1.2 Nano Cenizas de Cáscara de Arroz	17
2.1.1.3 Piedra Caliza.	21
2.1.1.4 Polvo de Granito Molido.	23
2.1.1.5 Polvo de Piedra de Cantera.	25
2.1.1.6 Residuos de Canteras de Diabasa..	27
2.1.1.7 Residuos de Granito.	27
2.1.1.8 Polvo de Basalto..	28
2.1.1.9 Arena del Desierto.	29
2.1.2 Materiales de Desecho Industriales	30
2.1.2.1 Cenizas Volantes (FA).....	30
2.1.2.2 Desechos de Cerámica.	31
2.1.2.3 Escoria de Acero.	32
2.1.2.4 Escoria de Alto Horno.	34

MATERIALES ALTERNATIVOS SUSTITUCIÓN DE AGREGADOS Y/O CEMENTO	3
2.1.2.5 Polvo de Fibra de Vidrio.....	37
2.1.2.6 Residuos de Vidrio CRT.....	38
2.1.2.7 Residuos de Construcción y Demolición.....	39
2.1.3 Geo Polímeros.....	40
2.1.4 Fibras de Acero Reciclado.....	42
2.1.5 Nano Materiales.....	49
2.1.6 Umbrales Máximos de Sustitución o Adición de Materiales.....	54
3. Conclusiones.....	57
Referencias Bibliográficas.....	59
Apéndices.....	75

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Imagen de una Muestra de Bio Carbón con Poros Llenos de Hidratos.</i>	16
Figura 2. <i>Poros de Bio Carbón no Ocupados con Productos de Hidratación.</i>	17
Figura 3. <i>Resistencia a la Compresión a Diferentes Edades de Curado y Diferentes Porcentajes de Reemplazo</i>	20
Figura 4. <i>Imagen de Microscopio con Presencia de Huecos Vacíos</i>	24
Figura 5. <i>Resistencia a la compresión de UHPC con diferente contenido de polvo de roca (QS100: referencia; QS80, QS60, QS40, QS20 y QS0: grupo experimental).</i>	26
Figura 6. <i>Profundidad de Penetración del Agua en Diferentes Dosis de Cenizas Volantes</i>	31
Figura 7. <i>Efecto de la escoria metálica en la compresión uniaxial</i>	34

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Registro de Umbrales Reportados cuando el Material Sustituto es de Origen Industrial.</i>	55
Tabla 2. <i>Registro de Umbrales Reportados cuando el Material Sustituto es de Origen Natural.</i>	55
Tabla 3. <i>Registro de Umbrales Reportados por Sustitución de Agregados Gruesos.</i>	56
Tabla 4. <i>Registro de Umbrales Reportados por Sustitución de Agregados Finos.</i>	56
Tabla 5. <i>Registro de Umbrales Reportados por Adición de Material Complementario</i>	57

Lista de Apéndices

	Pág.
Apéndice A. <i>Resumen de hallazgos y resultados para materiales de origen natural</i>	75
Apéndice B. <i>Resumen de hallazgos y resultados para materiales de origen Industrial</i>	86

Resumen

Título: Materiales Alternativos para la Sustitución de Agregados y/o Cemento en la Producción de Concreto de Ultra Alto Desempeño: Revisión Bibliográfica.*

Autores: Luis Rafael Fuentes Luna, Lilian Cristina Jaramillo González**

Palabras Claves: Concreto de ultra alto rendimiento (UHPC), Agregados finos y gruesos en UHPC, propiedades mecánicas y reológicas de UHPC, Materiales alternativos utilizados en el UHPC

Descripción

El UHPC por sus siglas en inglés (Ultra-High Performance Concrete) es un tipo de concreto que incorpora materiales no convencionales y alcanza una elevada resistencia a efectos físicos como la compresión, la flexión o el desgaste, siendo de alta durabilidad en estructuras sometidas a condiciones ambientales muy hostiles, alta sismicidad o uso frecuente e intensivo. Este artículo es el producto de una revisión bibliográfica en torno a investigaciones exploratorias y empíricas orientadas a mejorar las propiedades del UHPC, que reportaron avances relacionados con su producción y usos en los últimos 25 años contados hasta 2021. A lo largo de la revisión realizada, se encontró que la resistencia a la compresión es la propiedad mecánica más importante del UHPC y que esta mejora en función de factores como el tiempo, las condiciones químicas y físicas de curado y los niveles de sustitución de compuestos o de adición de materiales. Tanto en la adición de materiales complementarios como en el reemplazo de componentes del UHPC, la mejora en sus propiedades mecánicas incrementa y luego disminuye debido a la proporción de reemplazo o adición, registrando umbrales mínimos y máximos. La sustitución del cemento alcanza umbrales más altos cuando se lleva a cabo con materiales de origen industrial como los residuos de demolición y construcción (50%), escoria de alto horno (30%) y cenizas volantes (20%), pero cuando los sustitutos son materiales de origen natural, los umbrales más altos de reemplazo del cemento corresponden a la piedra caliza (66%), nano cenizas de cascara de arroz (20%) polvos de basalto o granito (15%).

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Luis Alberto Capacho Silva, Magíster en Informática

Abstract

Title: Alternative Materials for the Substitution of Aggregates and/or Cement in the Production of Ultra High Performance Concrete: Bibliographic Review.*

Authors: Luis Rafael Fuentes Luna, Lilian Cristina Jaramillo González**

Keywords: Ultra-High-Performance Concrete (UHPC), Coarse and Fine Aggregates in UHPC, Mechanical and Rheological Properties of UHPC, Alternative Materials Used in UHPC.

UHPC material is named for its acronym in English (Ultra-High-Performance Concrete) is a type of concrete that incorporates unconventional materials and achieves high resistance to physical effects as they are compression, bending, or wear, being highly durable in structures subjected to very hostile environmental conditions, high seismicity, or frequent and intensive use. This article is the product of a bibliographic review around exploratory and empirical research aimed at improving the properties of UHPC, which reported advances related to its production and uses in the last 25 years counted until 2021. Throughout the review, it was found that compressive strength is the most important mechanical property of UHPC and that it improves as a function of factors such as time, chemical and physical curing conditions, and levels of compound substitution or material addition. Both in the acquisition of alternative materials and in the replacement of UHPC components, the improvement in its mechanical properties increases and then decreases due to the proportion of replacement or addition, registering minimum and maximum thresholds. The substitution of cement reaches higher thresholds when it is carried out with materials of industrial origin such as demolition and construction waste (50%), blast furnace slag (30%), and fly ash (20%). Still, when substitutes are materials of natural origin, the highest thresholds for cement replacement correspond to limestone (66%), rice husk nano ash (20%) basalt, or granite powders (15%).

* Degree work

** Faculty of Physicomechanical Engineering, School of Civil Engineering. Director: Luis Alberto Capacho Silva, Master in Computer Science

Introducción

El UHPC por sus siglas en inglés (Ultra-High Performance Concrete) es un tipo de concreto de última generación con el cual es posible construir obras de ingeniería y formas de gran resistencia y menor peso en comparación con el concreto convencional, debido a que el UHPC es un material que posee una muy elevada resistencia a efectos físicos como la compresión, la flexión o el desgaste, cuestión que además redundará en su alta durabilidad.

Para que un concreto sea considerado de ultra alto desempeño, debe poseer una resistencia al esfuerzo físico de tipo compresión superior a la 150 MPa. Sin embargo, tanto el proceso de producción como las etapas posteriores durante la vida útil de las estructuras a base de concreto implican impactos no deseados sobre los recursos ambientales, por el tipo de materia prima cementicia utilizada, la obtención y uso de los agregados, la combinación con aditivos, que mediante reacciones químicas alcanzan estándares de eficiencia del proceso de producción o conformación de la estructura y determinadas propiedades mecánicas requeridas para garantizar su alta durabilidad.

El concreto de ultra alto desempeño fue concebido para superar aspectos característicos de los concretos convencionales, tales como la baja relación entre la resistencia y el peso, poca ductilidad y la inestabilidad en el volumen. En principio fue desarrollado con uso focalizado en estructuras de alta exigencia en términos de resistencia a condiciones ambientales muy hostiles, condiciones de alta sismicidad o en estructuras que estarán sometidas a usos de alta frecuencia e intensidad, como puentes, edificaciones militares o fachadas de grandes edificios cuyo ciclo de vida se pretende muy extenso y por tanto su tasa de desgaste se requiere muy baja.

Debido a la alta exigencia en el desempeño de los concretos avanzados, para su producción se requiere la utilización de materiales denominados no convencionales si se les compara con los tradicionalmente utilizados. Esto implica el uso de super plastificantes, diversos tipos de fibras y agregados especiales finos o gruesos; por ejemplo, granito pulido, mármol, caliza triturada, cenizas volantes, vidrio de desecho, residuales cerámicos, escoria granulada de alto horno, escoria de cobre, entre otros. Cada uno de los componentes no convencionales del UHPC cumple una función en el comportamiento del material tanto en su estado fresco como en su estado endurecido y sobre todo en su desempeño y durabilidad en virtud de la resistencia a eventos mecánicos como la compresión, la flexión y la tracción.

En la fabricación de UHPC se utilizan diversos tipos de fibras orgánicas e inorgánicas, tales como poliméricas, fibras metálicas y fibras de vidrio. Tan variado como el tipo de fibra lo son también sus dimensiones, así como la proporción adicionada por m^3 , puesto que algunas contribuyen principalmente a mejorar la ductilidad, además de la resistencia.

En un concreto de ultra alto desempeño se pueden utilizar aditivos reductores de agua en combinación con granulometrías extremadamente finas para alcanzar una relación agua/cemento que oscila entre 0,18 y 0,22. Para esto se utilizan, junto a áridos muy finos (menos de 1 mm de diámetro) dosificaciones de cemento que se complementan con humo de sílice.

A nivel general se observa que, en la cadena de producción del concreto, se incorporan materiales potencialmente capaces de afectar la salud humana y el medio ambiente, por lo cual su uso debe ser controlado, disminuido o evitado. Por ello la ciencia y la academia consideran como un aspecto crítico en la cadena de valor del concreto, el respeto y la protección del medio ambiente mediante acciones específicas como la sustitución de algunos tipos de materiales por materiales

alternativos con el fin de disminuir el costo ambiental, conservando las propiedades mecánicas del UHPC.

Este documento pretende hacer y exponer una recopilación y documentación de los diversos materiales alternativos utilizados en el UHPC mediante una revisión sistemática de la literatura, integrando el planteamiento de varios autores en torno a la conveniencia de gestionar la cadena de producción y uso de UHPC utilizando materiales y procesos con bajo impacto ambiental en términos de ahorro de energía, uso racional de agua, reciclado de materiales para evitar la intervención de áreas y suelos vírgenes o productivos, sin renunciar a los impactos sociales y económicos positivos como generación de empleo, desarrollo de infraestructura física de alta funcionalidad con ciclos de vida extensos y de bajo costo financiero, como principales factores de sostenibilidad.

1. Metodología

La búsqueda y organización de la información relacionada con el concreto de ultra alto desempeño (UHPC) estuvo enfocada en identificar los principales avances en esta materia así como la tendencia futura del tema, a través de la compilación de datos empíricos, información y resultados más relevantes en un extenso volumen de documentos, para describir el tema de forma sintética, pero explorando distintos escenarios planteados por los autores sobre el desarrollo que ha tenido un material bastante nuevo, como una forma de contribuir a comprender los cambios tecnológicos demandados y provocados por y para el uso del UHPC.

La información analizada referente a la utilización de materiales alternativos para la producción de concreto de ultra alto desempeño (UHPC), se obtuvo en la biblioteca virtual de la

Universidad Industrial de Santander. Está constituida por 127 artículos, que fueron sometidos a una revisión y análisis de su contenido para seleccionar de forma definitiva, únicamente aquellos aportes documentales que contribuyeron al incremento y la creación de conocimiento significativo relacionado con los materiales alternativos para el mejoramiento de las propiedades del concreto de ultra alto desempeño.

Se incluyeron entre los criterios de selección de los trabajos, que su fecha de publicación no sea anterior a 25 años contados desde el año 2021 y que en el alcance y objetivos de investigación contemplen la sustitución parcial o total de los agregados y/o el cemento en el UHPC con propósitos de mejora en sus propiedades físicas, mecánicas y de durabilidad.

La selección de la información se llevó a cabo de acuerdo con la procedencia y forma de obtención del material sustituto, bien si se trata de materiales de primer uso o de materiales reciclados. Un segundo criterio de clasificación utilizado es el tipo de material en dos grandes categorías: orgánicos e inorgánicos. La información que se consideró relevante y necesaria de extraer de los artículos incluye el material, el proceso de fabricación, los métodos y tipos de ensayos con los cuales se determinaron las variaciones en propiedades físico-mecánicas a partir de los cambios en el material, las dosis y/o las secuencias de adición o sustitución de estos, los resultados de dichas pruebas, mediciones y ensayos y las conclusiones.

Todo lo anterior con el fin de identificar los principales materiales alternativos y métodos propuestos para la integración de estos en la elaboración del UHPC, establecer los efectos de sustituir parcial o totalmente los agregados o el cemento sobre sus propiedades físico-mecánicas y la durabilidad, partiendo de los datos obtenidos en estudios en los cuales se sometieron a diversos tipos de pruebas y ensayos, muestras de UHPC con diseños específicos.

2. Resultados

Esta sección presenta los resultados más relevantes obtenidos en la revisión bibliográfica sobre el uso de materiales alternativos para la producción de concreto de ultra alto desempeño (UHPC). En estas investigaciones se han analizado los resultados empíricos en comparación con los estándares formulados para el UHPC.

Una buena parte de las investigaciones tomadas en cuenta en esta revisión bibliográfica estudian de forma detallada los efectos de diversos materiales sobre los estándares del concreto de ultra alto desempeño en cuanto a trabajabilidad, fluidez, requerimientos de agua, densidad de empaque de los materiales cementicios, propiedades reológicas, contracción autógena, propiedades mecánicas como resistencia a la compresión, modulo elástico, fuerza de tensión y fuerza flexible.

De igual forma se analiza los efectos del material utilizado como reemplazo en la durabilidad del producto diseñado, a partir de mediciones, análisis numéricos y pruebas en aspectos tales como permeabilidad al agua, permeabilidad a los cloruros, resistencia a la carbonatación, resistencia a los sulfatos, resistencia las variaciones extremas de temperaturas en velocidad e intensidad y resistencia a la corrosión.

Las principales propiedades del concreto, tanto en su estado fresco como en su estado endurecido, para efectos de su estudio se han clasificado en tres grandes grupos: reológicas, físicas y mecánicas. Las propiedades reológicas hacen referencia a la tasa de deformación, así como al flujo de los materiales en virtud de aquellas variables que inciden en el comportamiento del hormigón en estado fresco tales como el esfuerzo aplicado y el tiempo.

Los resultados obtenidos son en esencia la compilación de los principales avances alcanzados en investigaciones de tipo experimental en las que mediante ensayos de laboratorio se identifican múltiples variables que pueden incidir en el desempeño, el costo y la sostenibilidad del UHPC.

2.1 Materiales de Desecho Naturales

En el concreto de ultra alto rendimiento se busca entre otras características físicas, una porosidad muy baja con el fin de incrementar su durabilidad, pero los materiales utilizados para rellenar los micro y nano huecos, tales como el humo de sílice (SF por sus siglas en inglés) y el polvo de Cuarzo (QP por sus siglas en inglés) generan una gran huella de carbono, así como un costo adicional. Por ello, algunos materiales naturales de desecho han sido considerados, probados y estudiados como sustitutos del relleno.

2.1.1 Arcilla Marina

Importantes investigaciones de tipo experimental han considerado la sustitución parcial del polvo de cuarzo (QP) por arcilla marina en diversas proporciones o porcentajes de reemplazo en peso que van del 10% hasta inclusive un 100%, pero hay coincidencia en que este tipo de material no contribuye de forma significativa a mejorar una propiedad como lo es la resistencia a la compresión.

Según lo informado por (Anjaneya, Du, & Pang, 2020), es posible lograr una resistencia comparable a la de la mezcla de referencia con un 30% de sustitución de relleno de cuarzo, pero en niveles mayores de sustitución la resistencia mecánica disminuye. Por ejemplo, si se reemplaza el 100% de QP por arcilla marina la disminución en la resistencia mecánica es de un 27%. A su vez informa que en los niveles de sustitución de un 30% hasta un 50% el rendimiento mecánico es

comparable con la muestra de control, pero admite que se requieren más estudios para encontrar formas de mejorar la hidratación en el UHPC utilizando arcilla marina calcinada.

En un estudio posterior (Anjaneya, Du, & Pang, 2020) encontraron que al reemplazar QP con arcilla marina de bajo grado se redujo la resistencia a la compresión en un 10% pero que esta caída puede ser compensada con la adición de bio carbón hasta en un 5% en peso. Los estudios citados, no informan sobre la incidencia de la arcilla marina en otros aspectos como la durabilidad y la reología del UHPC.

2..1.1.1 Bio Carbón. El bio carbón es utilizado como agente de curado del UHPC en razón a que tiene una alta capacidad de retención de agua debido a su compleja red porosa (Dixit, Gupta, Pang , & Kua , 2019). En este trabajo los autores estudiaron los efectos del bio carbón sobre la resistencia a la compresión en el UHPC con diferentes tamaños de partícula y niveles de reemplazo de cemento (entre 2% y 8% en peso) encontrando que al 2% en peso, el reemplazo de cemento muestra una resistencia similar a la mezcla de control, y que la adición de bio carbón afectó la tasa de desarrollo de resistencia del UHPC de 1 día a 7 días en comparación con la mezcla de control (5,2%) reducción que fue más prominente a los 28 días (10.67%). De acuerdo con los autores, esta tendencia sugiere que se puede lograr un nivel de resistencia satisfactorio de UHPC usando bio carbón para reemplazar el 2% en peso.

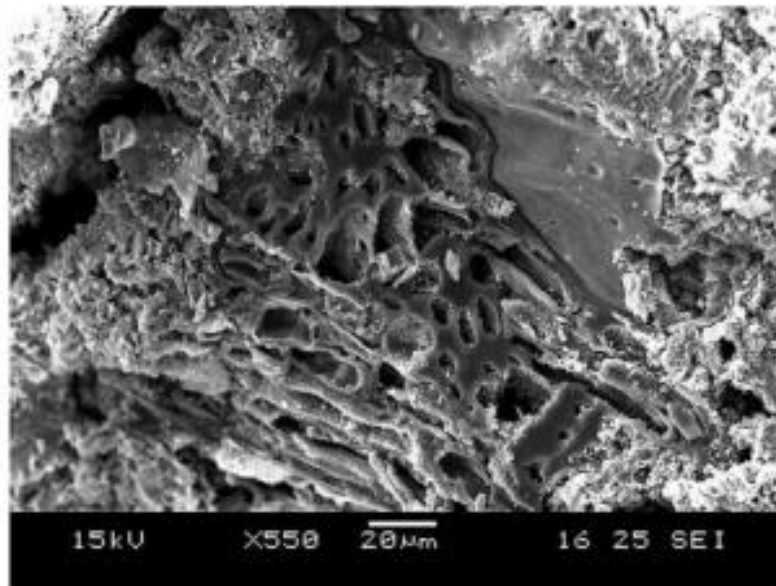
En un estudio experimental (Dixit, Verma, & Pang, 2021) observaron que el uso de bio carbón para reemplazar el QP en UHPC que contenía arcilla marina mejoró el grado de hidratación dio como resultado una resistencia a la compresión comparable y redujo sustancialmente la contracción. Sin embargo, también informó que, en términos de rigidez y tenacidad, la utilización de bio carbón en UHPC es moderadamente negativo.

En los resultados de su trabajo experimental destacaron el hecho de que la reducción de la tenacidad es mayor en la medida en que aumenta el contenido de bio carbón en la mezcla (hasta 21% en una mezcla con reemplazo de 30% en peso) y concluyó que el bio carbón puede reducir la capacidad de absorción de energía del UHPC. En contraprestación, este material sustituto contribuye a reducir la contracción autógena hasta en un 21% a las 72 horas de fraguado.

En otra investigación desarrollada, (Dixit, Gupta, Pang , & Kua , 2019) exploraron el potencial del bio carbón como aditivo mineral para el reemplazo del cemento en UHPC, a partir de su incidencia en el curado y nucleación, encontraron que el bio carbón ayudó al crecimiento de productos de hidratación en UHPC.

Figura 1.

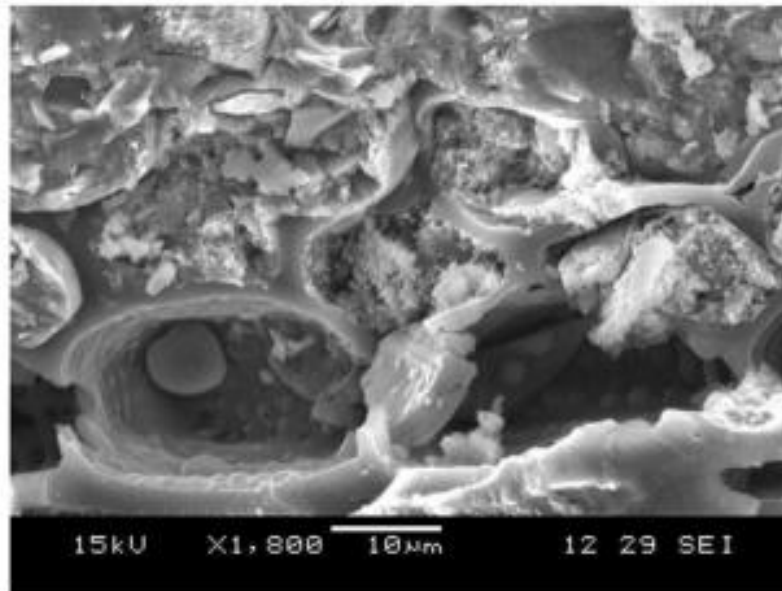
Imagen de una Muestra de Bio Carbón con Poros Llenos de Hidratos.



Nota: (Dixit, Gupta, Pang , & Kua , 2019, pág. 9)

Figura 2.

Poros de Bio Carbón no Ocupado con Productos de Hidratación.



Nota: (Dixit, Gupta, Pang , & Kua , 2019, pág. 12)

2.1.1.2 Nano Cenizas de Cáscara de Arroz. La ceniza de cáscara de arroz (RHA por sus siglas en inglés) es un residuo sólido sobre el cual se han estudiado ampliamente su utilización en el concreto de ultra alto desempeño, por una parte, por su alto contenido de sílice lo cual la hace muy atractiva como material suplementario y por otra, porque es económica.

Para este tipo de material se ha estudiado su incidencia en las propiedades físicas, mecánicas y otras características relevantes de UHPC, entre las que cabe mencionar la resistencia a la compresión, resistencia a la tracción, a la flexión y la durabilidad. (Faried, Sahar, Bassam, & Taher, 2021) añadieron dosis de este material entre 1%, 3% y 5% y realizaron pruebas de resistencia a la compresión a 126 muestras de concreto cuyas medias se registraron a los 7 y 28 días e informaron que la resistencia a la compresión mejoró con un rango de 12%, 10.5%, 8.5% y 5.4% a los 7 días en comparación con 12.3%, 10.58%, 9.4% y 5.6% a los 28 días en comparación con la muestra de control. La resistencia óptima para un tiempo de combustión constante y

diferente de NRHA se obtuvo al 1%, 1%, 3% y 5% para las temperaturas de 900, 700, 500 y 300°C. respectivamente.

(Van Tuan, Ye, Breugel , & Copuroglu, 2011) informaron que según sus estudios experimentales la resistencia a la compresión del UHPC que contiene NRHA puede alcanzar al menos 175 MPa a los 28 días y 185 MPa a los 91 días, mientras que la muestra de control alcanzó valores de 163 MPa y 173 MPa en el mismo rango de tiempo de fraguado.

Entre los diversos hallazgos reportados en los estudios experimentales se destacan de una parte la alta calidad de la ceniza de cáscara de arroz como material cementante, cuestión que está determinada por factores tales como la calidad de la materia prima, el método de incineración, el tiempo y la temperatura de combustión. Por su parte, (Ahsan & Zahid, 2018) afirman que si la ceniza de cáscara de arroz se produce a menos de 700 °C posee químicamente más del 80% de sílice amorfa o no cristalina convirtiéndolo en un material puzolánico potencial. Estudios adelantados por (Safari, Mirzaei, Rooholamini, & Hassani, 2018) señalan que la ceniza de cáscara de arroz (RHA) puede mejorar la viscosidad y la resistencia a la segregación debido a la mayor reactividad y mayor área de superficie, propiedades que mejoran la microestructura y la zona de transición interfacial (ITZ) entre el agregado y la pasta de cemento, incrementando la viscosidad de la mezcla. Por su parte (Thomas, 2018) advierte que la cáscara de arroz debe quemarse a una temperatura controlada de 500-700 ° C para producir la sílice más reactiva para utilizarse como material cementicio complementario, sustituyendo hasta un 10% en peso sin comprometer la trabajabilidad del concreto. Una vez que se ha superado este umbral de reemplazo la cáscara de arroz incrementa la demanda de agua haciéndose necesario incrementar la dosis de superplastificante.

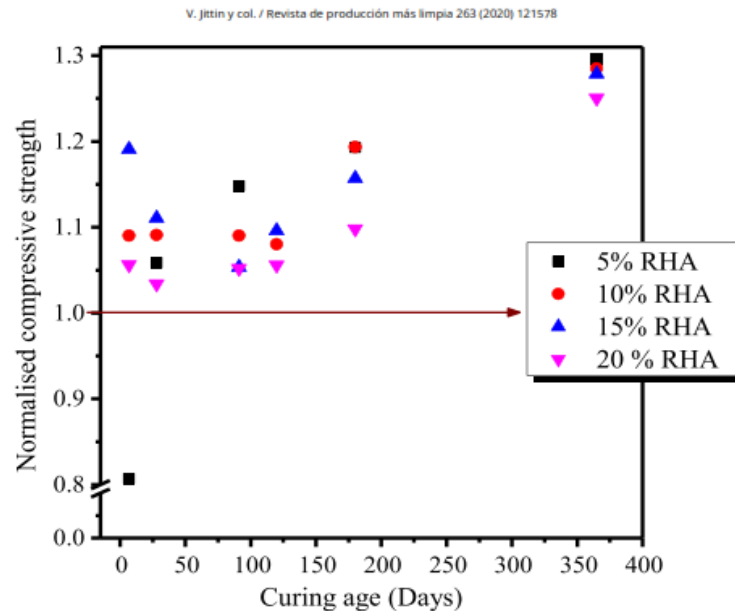
La ceniza de cáscara de arroz es utilizada principalmente para reemplazar parcialmente el humo de sílice (SF) que es un componente agregado a los concretos UHPC para mejorar la reacción puzolánica y la densidad de empaquetamiento de los materiales de relleno. A través de un trabajo experimental, (Vigneshwari, Arunachalam, & Angayarkanni, 2018) encontraron que el UHPC que contiene RHA tenía un desempeño mecánico y de durabilidad satisfactoria tanto en el curado normal como en el curado con vapor alcanzando hasta un 56% en la resistencia a la compresión porque el material de reemplazo mejoró la micro estructura y la reactividad puzolánica, principalmente por la reducción de la porosidad. En el caso de la reacción puzolánica los autores afirman que esta depende principalmente del agua liberada de los poros de RHA al entorno.

Por su parte (Umasabor & Okovido, 2018) afirmaron que el RHA contiene una amplia gama de compuestos dotados de propiedades aglutinantes aptas para la producción de concreto. Este resultado es coincidente con los reportes elaborados por (Van Tuan, Ye, van Breugel, & Copuroglu, 2011) quienes encontraron que las resistencias a la compresión de las muestras modificadas con RHA alcanzaron 175 y 185 MPa a las edades de 28 y 91 días respectivamente en condiciones de curado normales.

En el estudio adelantado por (Jittin, Bahurudeen, & Ajinkya, 2020) se encontró que la resistencia a la compresión del UHPC mezclado con RHA con porcentajes de reemplazo entre 5% y 20% es 1,3 veces la resistencia a la compresión de las muestras de control en la edad posterior de curado (365 días), como lo muestra la figura 3.

Figura 3.

Resistencia a la Compresión a Diferentes Edades de Curado y Diferentes Porcentajes de Reemplazo



Nota: (Jittin, Bahurudeen, & Ajinkya, 2020, pág. 13)

Por su parte (Van Tuan, Ye, van Breugel, & Copuroglu, 2011) destacaron el efecto sinérgico que se alcanza cuando en una mezcla de UHPC se tiene 10% de RHA y 10% de SF originando un resultado satisfactorio en términos de resistencia a la compresión, la cual alcanzó 175 MPa y 185 MPa a los 29 y 91 días mientras que los valores para la muestra de control fueron 163 MPa y 173 MPa en iguales puntos de la línea de tiempo de curado.

La micro estructura de la ceniza de cáscara de arroz está determinada por el proceso de molienda. De acuerdo con el estudio realizado por (Van, Rößler, Bui, & Ludwig, 2013) hay un tiempo de molienda óptimo de RHA para producir la máxima resistencia a la compresión. Debido a la estructura meso porosa, el RHA molido puede absorber una cantidad de fase acuosa para disminuir el contenido de agua efectivo en el concreto. A manera de complemento en el estudio de este material (Ki-Bong, Kwon, & Wang, 2016) propuso un modelo de hidratación para concreto

mezclado con ceniza de cáscara de arroz (RHA) en el que simula la hidratación del cemento y la reacción puzolánica de RHA hallando elementos para afirmar que el grado de hidratación del cemento aumenta aún más en las etapas posteriores. El grado de hidratación del cemento es determinante para la resistencia a la compresión en razón a que esta depende de la relación agua cemento y a la producción de hidróxido de calcio durante el proceso de hidratación.

Otros materiales de origen natural, como el bagazo de la caña de azúcar, han sido utilizados con menos éxito en la preparación de concreto. (Ríos-Parada, Jiménez-Quero, & Valdez-Tamez, 2017) estudiaron la adición de ceniza de bagazo de caña de azúcar sin tratar (UTSCBA por sus siglas en inglés). En cuanto a características de microestructura y concluyeron que su uso reduce la trabajabilidad y el peso volumétrico y su resistencia a la compresión en edades tempranas. Se observa, además, una cinética de hidratación más rápida y una mayor contracción química (Cordeiro & Kurtis, 2017). De acuerdo con lo reportado por (Gar, Suresh, & Bindiganavile, 2017) la resistencia a la compresión del concreto dosificado con SCBA cuando se examinó a temperatura ambiente aumenta hasta una sustitución del cemento del 10%, pero cuando las muestras se sometieron a temperaturas sostenidas de 300°C, 400°C y 500°C, hubo una disminución significativa en la resistencia y esta disminución varió de 20% a 40% respecto de los valores obtenidos a temperatura ambiente.

2.1.1.3 Piedra Caliza. Una de las razones por las cuales se ha estudiado ampliamente el uso de piedra caliza como material cementante complementario es porque el tamaño de su partícula es bastante similar al del cemento y contribuye a mejorar la trabajabilidad del concreto y reduce la demanda de superplastificante, como lo señalaron (Huang, Kazemi-Kamyab, Sun, & Scrivener, 2017).

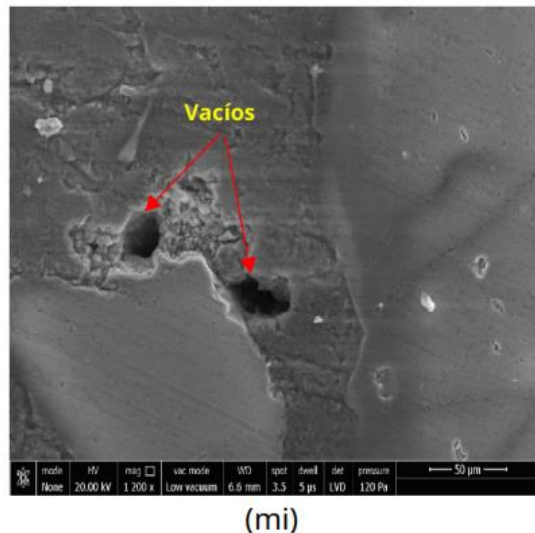
Los autores encontraron que la sustitución del cemento por piedra caliza en el UHPC, mejora sus propiedades mecánicas, el desarrollo micro estructural y la hidratación que puede aumentar hasta en un 39% y hasta en un 54% la resistencia a la compresión con porcentajes de reemplazo de hasta 66%. A partir de las pruebas experimentales realizadas por (Huang, Kazemi-Kamyab, Sun, & Scrivener, 2017) los autores concluyeron que la sustitución del cemento por piedra caliza en UHPC es beneficiosa tanto desde la perspectiva de las propiedades mecánicas como desde la perspectiva de la hidratación y el desarrollo microestructural. Con respecto a la densidad de empaquetamiento de materiales ultrafinos (Randl, Steiner, Ofner, Baumgartner, & Mészöly, 2014) sostienen que este parámetro es más decisivo para las propiedades del UHPC que la reactividad hidráulica de dichos materiales. Por su parte (Shamsad, Ibrahim, & Mohammed, 2014) utilizaron polvo de piedra caliza (LSP por sus siglas en Inglés) en diferentes porcentajes, junto a otros materiales como sustitutos parciales del humo de sílice (SF) en UHPC y encontraron que el nivel óptimo de reemplazo de micro sílice por LSP era del 20% con una resistencia a la compresión de 150 MPa a los 28 días, que es el valor mínimo aceptable. (Dingqiang, y otros, 2020) concluyeron a través de su estudio experimental que el uso de polvo de piedra caliza para reemplazar el cemento y el humo de sílice puede mejorar la compacidad de la matriz y que la naturaleza esférica fina de sus partículas llena de mejor manera las cavidades aumentando el agua libre en la mezcla. (Li, de HJH, Chen, & Yu, 2020) encontraron que el polvo de piedra caliza cumple diversos roles en el UHPC; muestra un efecto de plastificación mineral al reducir la fricción entre partículas mediante una reacción química y disminuye el consumo de súper plastificante, pero además incide positivamente sobre la densidad de empaque y por tanto en el comportamiento en estado fresco, hidratación, propiedades de endurecimiento y sostenibilidad. En

un 50% de reemplazo en volumen logra una resistencia a la compresión de 153 MPa bajando el contenido de cemento a menos de 560 kg / m³.

2.1.1.4 Polvo de Granito Molido. El polvo de granito es un sub producto de la industria de procesamiento de granito, que al no ser dispuesto de forma adecuada se convierte en un producto de desecho industrial. En China, por ejemplo, se producen millones de toneladas de GP y ocupan muchos rellenos sanitarios, pero las partículas finas de GP están en el aire, generando contaminación (Zhang, Ji, él , & él, 2019). Bajo esa premisa (Jain, Gupta , & Chaudhary, 2019) evaluaron de forma experimental las características frescas y mecánicas del concreto autocompactante (SCC por sus siglas en Inglés) en el que se sustituyó el agregado fino por residuos de corte de granito (GCW por sus siglas en Inglés) encontrando que se requiere una dosis más alta de superplastificante y que la incorporación del GWC afecta de forma negativa las características frescas pero las mantiene en un rango satisfactorio excepto cuando el reemplazo del agregado fino por GCW es de un 100%. Sin embargo, informaron que al 20% de reemplazo aumentó la resistencia a la compresión, la resistencia a la flexión y que más allá de ese umbral estas dos propiedades tienden a disminuir manteniéndose dentro de parámetros señalados por la norma ASTM C1856 / C1856M-17 hasta en un rango de reemplazo del 40% en peso. También informaron que el empaquetamiento de las partículas entre el agregado y pasta de cemento es compacto hasta un 40% de reemplazo y que más allá de esa proporción aumentaron los huecos vacíos, como lo muestra la figura 4.

Figura 4.

Imagen de Microscopio con Presencia de Huecos Vacíos



Nota: (Zhang, Ji, él , & él, 2019, pág. 469)

El trabajo experimental adelantado por (Zhang, Ji, él , & él, 2019) estudiaron las propiedades del UHPC que utilizó polvo de granito molido (GGP por sus siglas en inglés) para reemplazar el cemento en diferentes proporciones (de 0 a 25%) e informaron que, a la edad de 28 días, la resistencia a la compresión primero aumenta y luego disminuye, y registró la proporción de reemplazo óptima de 15%. También reportaron que, aunque la sustitución del cemento por GGP no influyó en la morfología y composición química de la hidratación, la estructura de los poros se modificó significativamente. Según los autores, esta modificación se da por los cambios en la relación de reemplazo. Este mismo estudio concluyó que el rendimiento del UHPC preparado con GGP a escala macro está estrechamente relacionado con la estructura de poros a escala micro.

Otros estudios han concluido que las propiedades de durabilidad del concreto que contiene agregados finos de granito, basalto y arena de río tienden a mejorar, permanecer constantes y disminuir, respectivamente, con la incorporación de agregados finos de los desechos de las canteras de mármol, como es trabajo desarrollado por (Munir, Saleem Kazmi, & Wu, 2017)

quienes adelantaron un estudio relacionado, los resultados de la resistencia a la compresión mostraron un aumento de la resistencia para las muestras con un 10% de polvo de mármol residual (WMP por sus siglas en inglés) a los 28 y 56 días. Sin embargo, un mayor contenido de WMP (es decir, 20%, 30% y 40%) mostró una disminución en la resistencia de hasta un 20%.

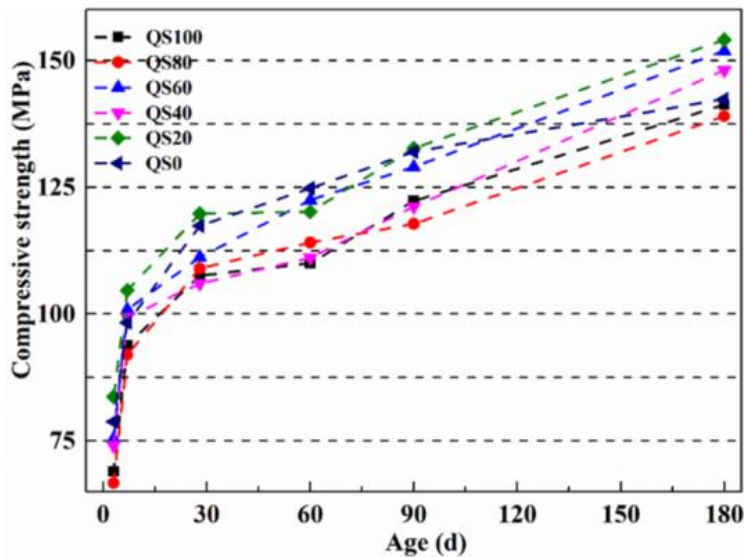
2.1.1.5 Polvo de Piedra de Cantera. La principal materia prima del concreto es la arena de río, pero en algunos países como China tiende a escasear, esa es una de las razones por las cuales (Li, y otros, 2021) (31) estudiaron la viabilidad de reemplazar parcialmente materiales cementicios por polvo de piedra; observaron su efecto sobre propiedades como el tiempo de fraguado, resistencia a la compresión, retracción en seco, estructura de poros y proceso de hidratación. Los autores reportaron que los polvos de piedra como granito y cuarcita prolongan el tiempo de fraguado y mejoran la resistencia a la compresión. Al comparar los tiempos de fraguado con las muestras de referencia el tiempo de fraguado se acorto en la medida que se incrementa el volumen del polvo de piedra utilizado. Las reducciones fueron de 4%, 14.7% y 21% para proporciones de reemplazo de 4%, 6% y 8% en peso.

Cuando se utiliza el polvo de roca reciclado en reemplazo de la arena de cuarzo, la conexión entre los agregados y la pasta de cemento se hace más fuerte en virtud de la mayor rugosidad en la superficie del polvo de roca; esto favorece las propiedades mecánicas, aun cuando puede afectar negativamente su durabilidad. (Yang, y otros, 2020) evaluaron la disminución del contenido de arena de cuarzo en UHPC utilizando polvo de roca reciclada con diferentes proporciones de reemplazo (20%, 40%, 60%, 80% y 100% en peso) considerando sus propiedades, incluida la trabajabilidad, la estabilidad dimensional, la resistencia a la compresión, la durabilidad, la cinética de hidratación y la estructura de los poros. Como resultados relevantes informaron que cuando el 40% de arena de cuarzo se reemplaza por polvo de roca, el UHPC tiene la mayor fluidez. En

relación con la resistencia a la compresión, encontraron que, a los 28 días, la resistencia a la compresión de QS100 (reemplazo del 100%) es de aproximadamente 107,6 MPa y que aumentó 1,3%, 3,5%, 1,5%, 11,8% y 9,5% a los 60, 90, 120, 150 y 180 días, como lo muestra la figura 5.

Figura 5.

Resistencia a la compresión de UHPC con diferente contenido de polvo de roca (QS100: referencia; QS80, QS60, QS40, QS20 y QS0: grupo experimental).



Nota: (Yang, y otros, 2020, pág. 6)

Por otra parte, señalaron que el polvo de roca tiene una superficie más rugosa lo cual hace que la conexión entre los agregados y la pasta de cemento sea más fuerte favoreciendo la resistencia a la compresión y a la tracción.

2.1.1.6 Residuos de Canteras de Diabasa. (de Matos, Sakata, & Gleize, 2020) investigaron la viabilidad de producir pastas de cemento de ultra alto desempeño ecológicas con residuos de canteras de diabasa, granito y basalto como alternativas al cuarzo y la piedra caliza convencional, hallando que el granito y la diabasa aumentaron el límite elástico de las pastas en aproximadamente 1.6 veces en comparación con el cuarzo y la piedra caliza.

Según los autores, se pueden utilizar los polvos de cantera alternativos entre ellos la diabasa, en la producción de materiales a base de concreto de ultra alto rendimiento, pero que en general, la incorporación de los residuos de cantera de diabasa no dio lugar a diferencias significativas en la resistencia. También informaron que a pesar de la existencia de varios trabajos que investigan el uso de residuos de canteras en materiales a base de cemento, existen muy pocos informes sobre el uso de residuos de canteras de diabasa para este propósito.

2.1.1.7 Residuos de Granito. Este apartado hace referencia a los residuos de granito (GW por sus siglas en Inglés) que se generan en la extracción principalmente, sin considerar los que se originan en el procesamiento del material, como lo expresaron (Ostrowski, Stefaniuk, Sadowski, Krzywiński, & Gicala, 2020) quienes describieron un proceso de eliminación de este material, utilizándolo como agregado alternativo para concreto avanzado y analizaron el impacto de la morfología del agregado grueso sobre el comportamiento del concreto en su estado fresco y sobre la deformación y resistencia a la compresión en su estado endurecido. Entre los resultados se destaca que la resistencia a la compresión promedio más alta se obtuvo para el concreto, con una participación del 50% de granos irregulares de agregado grueso; La resistencia a la compresión promedio fue de 66,94 MPa, 78,99 MPa y 87,42 MPa a los 3, 7 y 28 días, respectivamente.

Por su parte (Medina, Sáez del Bosque, Frías, Sánchez de Rojas, & Medina, 2017) evaluaron la viabilidad de diseñar nuevos cementos mixtos en los que el 10% o 20% del clínker se

sustituya por lodos de granito y analizaron su efecto sobre sus propiedades químicas, reológicas, mecánicas y microestructurales e informaron que la inclusión de lodos de granito en el cemento no alteró la relación entre la resistencia a la compresión y el tiempo de curado, pero que indujeron una disminución en la resistencia, que se agravó con el aumento de la tasa de reemplazo: el material de 28 días con un 10% en peso de desechos exhibió un 11.6% menos de resistencia y el cemento con un 20% en peso 23,7% menos de resistencia que la muestra de control.

(Bacarji, Toledo Filho, Koenders, Figueiredo, & Lopes , 2013) investigaron la aplicabilidad de estos residuos como reemplazo del cemento y mediante un análisis numérico se estableció que la sustitución del cemento por materiales de relleno no puzolánicos como residuos de mármol o granito afectará el desarrollo de la microestructura en términos de empaquetamiento y resistencia interna; reducirá la cantidad de material cementoso en la matriz y afectará el desarrollo de las propiedades mecánicas, como la resistencia a la compresión, debido a su naturaleza no reactiva. En este trabajo se realizó el reemplazo de 5%, 10% y 20% del cemento MGR registrando una reducción relativa de la resistencia a la compresión. Según los autores, con un 5% de reemplazo el impacto sobre las propiedades mecánicas y reológicas es menor, pero con el aumento de los porcentajes de reemplazo del 5% al 20% el módulo elástico se reduce de 24.3 GPa a 14.6 GPa, una reducción de aproximadamente el 40%.

2.1.1.8 Polvo de Basalto. El polvo de basalto (BP) se obtiene de la trituración de rocas basálticas y se utiliza principalmente para reemplazar el cemento en el concreto de ultra alta resistencia.

En el trabajo de investigación adelantado por (Li, y otros, 2021) utilizaron tres tipos de BP para reemplazar el cemento en UHPC e indicaron que cuanto más polvo de basalto haya en las pastas UHPC, mayor será la contracción autógena total, pero que también influye en ese mismo

sentido el tamaño del gránulo. Por ejemplo, un 15% de reemplazo de cemento por polvo de basalto la contracción autógena del UHPC aumentó entre el 20% y el 30% en un lapso de 48 horas en el proceso de curado, y con un 45% de reemplazo se registraron incrementos en la contracción autógena entre 30% y 59% en el mismo lapso. Pero además los autores informaron que cuanto más fino es el polvo de basalto, más tiende a aumentar la contracción autógena total y en contraprestación mejora la resistencia a la compresión, que también está determinada por el régimen de curado alcanzando hasta 220 MPa. La resistencia a la compresión más alta (220 MPa) del UHPC diseñado se obtuvo con un 15% de contenido de polvo de basalto.

2.1.1.9 Arena del Desierto. Tomando en cuenta que la arena del desierto está disponible en muchas fuentes en todo el mundo (Kaufmann, 2020) propuso su combinación con un ligante a base de cementos de sulfoaluminato de calcio (CSA) y yeso para obtener UHPC con una trabajabilidad y densidad de empaque adecuadas.

El autor informa que la arena del desierto tiene una distribución de partícula muy fina, porque aproximadamente el 60% de los granos se encuentran entre 0,15 mm y 0,30 mm. En esencia se busca producir una gran cantidad de estringita, que puede unir grandes cantidades de agua de mezcla y para ello se adiciona un alto contenido de yeso. Lo anterior debido a que la formación de estringita es capaz de llenar los vacíos entre las partículas de arena del desierto, pequeñas y de tamaño estrecho, dando lugar a una microestructura muy densa. Es decir, un sistema de poros más pequeños y una porosidad más baja. Sin embargo, los autores informan que la resistencia a la flexión se redujo en comparación con las muestras de referencia, porque aun cuando el volumen de pasta es alto, los granos de arena estaban muy bien incrustados y la estructura es muy densa, no proporciona una unión adecuada para las partículas de tamaños muy pequeños. El estudio concluye que las propiedades de clasificación y empaque de la arena del desierto no son ideales para obtener

UHPC por lo cual es necesaria la aplicación de un ligante base de sulfoaluminato de calcio (CSA) y yeso.

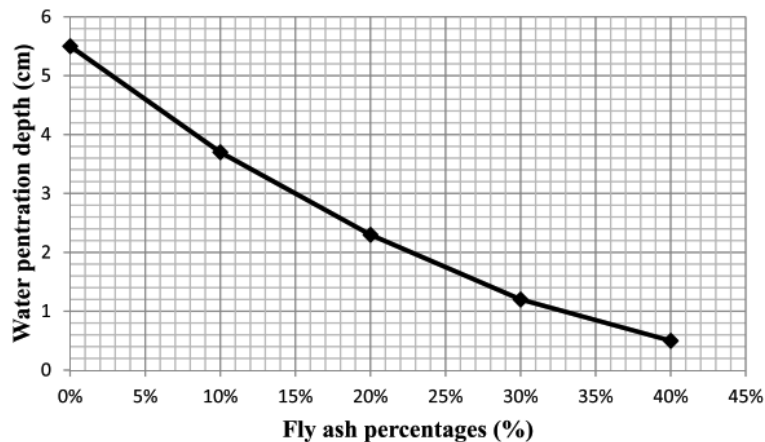
2.1.2 Materiales de Desecho Industriales

2.1.2.1 Cenizas Volantes (FA). Las cenizas volantes (FA por sus siglas en inglés) se utilizan en el concreto para reemplazo parcial del cemento con el fin de mejorar la trabajabilidad en su estado fresco (Jing, Liu, & Yan, 2021), porque su utilización excesiva tiene efectos adversos sobre su resistencia a la compresión. El efecto de las cenizas volantes sobre las propiedades del UHPC fueron estudiadas por (Jing, Liu, & Yan, 2021) a través de mediciones mecánicas, reológicas y micro estructurales en las que se determinó que un contenido relativamente alto de FAC genera una mayor porosidad de huecos y, una menor densidad de la matriz de UHPC. Los autores reportaron que la resistencia a la compresión de la matriz de UHPC disminuyó de 88 a 72 MPa cuando el contenido de FAC varió de 0 a 10% y que la incorporación adicional del contenido de FAC hasta el 40% resultó en la degradación gradual de las propiedades mecánicas; por ello, sugieren utilizar la dosis de 10% -20% en UHPC con FAC para los requisitos de ingeniería específicos de baja viscosidad y alta fluidez.

En una investigación experimental adelantada por (Bahedh & Jaafar, 2018) se analizaron las propiedades mecánicas y la permeabilidad del UHPC con la incorporación de diferentes dosis de cenizas volantes, encontrando que a medida que la dosificación de cenizas volantes aumenta, de 0% hasta 40% la profundidad de penetración del agua se reduce, como se muestra en la figura 5.

Figura 6.

Profundidad de Penetración del Agua en Diferentes Dosis de Cenizas Volantes



Nota: (Bahedh & Jaafar, 2018, pág. 7)

La grafica evidencia que a mayor incorporación de FA se obtuvieron permeabilidades más bajas. La disminución de la permeabilidad ocurre debido a que las adiciones de cenizas volantes ocasionan una reducción en el tamaño de los poros y una menor transferencia de líquido desde su superficie hacia su interior. También reportaron los autores que con la adición de FA es posible lograr una resistencia a la compresión de hasta 122 MPa con una edad de curado superior a 28 días. Esta investigación también reporta como umbral de adición de FA 40% en peso.

2.1.2.2 Desechos de Cerámica. Los desechos cerámicos son considerados residuos industriales no peligrosos (Amin, Tayeh, & Agwa, 2020) y se utilizan para reemplazar parcialmente los agregados naturales en el concreto. Los productos cerámicos están hechos de materiales naturales (arcilla plástica, feldspatos de potasio, piedra caliza, caolín, bentonita y arena de vidrio). Se obtienen por deshidratación a temperaturas entre 700 C y 1100 C. (Amin, Tayeh, & Agwa, 2020).

Entre las fuentes de desechos cerámicos, están los (Mantilla Diaz & Villamizar Pabon) descartes industriales de sanitarios y ciertos tipos de aislantes eléctricos fabricados a base de

cerámica. En relación con los resultados, informaron que la sustitución completa de los agregados gruesos normales por CWA puede afectar la mejora de la resistencia a la compresión en la medida en que se elevan los porcentajes de reemplazo. Esta afirmación es coincidente con los resultados reportados por (Rojas, A. E., 2019), quien informó que la resistencia a la compresión en las muestras de concreto aumentó cuando se le agregó un 10% de residuos de cerámica y disminuyó cuando el porcentaje de sustitución fue de 15% y 20% con respecto a las muestras de referencia.

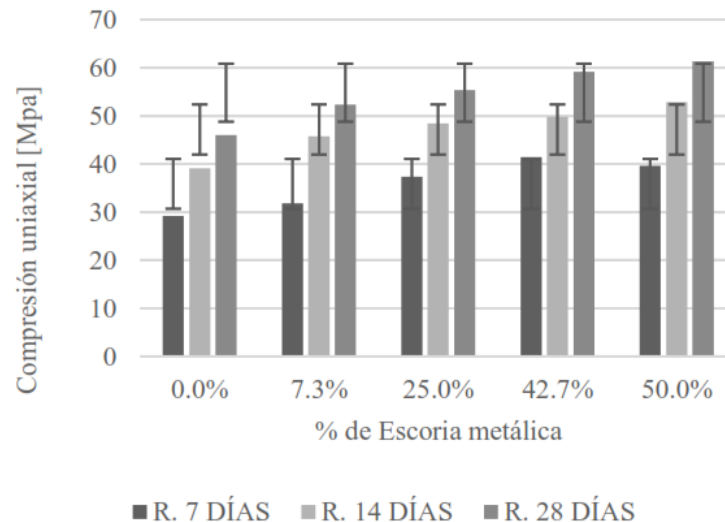
2.1.2.3 Escoria de Acero. La escoria de acero es un producto siderúrgico y sus propiedades cementicias son bajas, sin embargo, diversos estudios se han enfocado en analizar sus efectos en la durabilidad del concreto de ultra alto rendimiento, así como sobre las propiedades mecánicas y físicas de este material. Por ejemplo, (Zhang, Zhao, Liu, & Wang, 2019) informaron que cuando el cemento se reemplaza parcialmente por escoria de acero en mezclas de UHPC, la hidratación a temprana edad se retarda y esto tiende a reducir su resistencia a la compresión, pero reduce la deformación por contracción autógena. El reemplazo parcial del cemento por escoria de acero se realizó en proporciones de 0%, 10%, 20% y 30% y encontraron que un alto contenido de escoria de acero disminuye la resistencia a la compresión especialmente en la edad temprana de curado. Los porcentajes de disminución de la resistencia hallados, en comparación con las muestras de control son 14.7%, 30.6% y 45.5% en porcentajes de reemplazo de 10%, 20% y 30% respectivamente.

En un trabajo experimental realizado por (Liu, Schollbach, Li, & de HJH, 2021) se reveló que la escoria de acero puede ser modificada mediante un pretratamiento con CO_2 y alcanzar resistencia superior a 150 MPa cuando se sustituye entre el 15% al 45% del cemento. El pretratamiento de la escoria de acero modifica sus propiedades físicas y químicas obteniéndose una superficie porosa y rugosa. Pero los autores también indicaron que en proporciones de reemplazo

de un 60% presentan un efecto negativo sobre el desarrollo de la microestructura al aumentar el tamaño del poro. En cambio, con porcentajes de sustitución del cemento, por el orden de 15% hasta 45% CSS, se pueden obtener resistencias a la compresión entre 150 MPa y 162 MPa.

Por su parte (Biskri, Achoura, Chelghoum, & Mouret, 2017) compararon las propiedades mecánicas y los indicadores de durabilidad del UHPC en el que se utilizó escoria de acero como agregado artificial y con una relación de agua aglutinante de 0.27 y concluyeron que no es recomendable utilizar escorias de acero en concreto sin tratamiento de óxidos libres. Los autores reportan bajas en la resistencia a la compresión de 86.8 MPa hasta 74.49 MPa. Esto se debió a que este material presenta baja reactividad hidráulica en virtud de sus compuestos altamente cristalinos.

Un estudio llevado a cabo por (Mantilla Diaz & Villamizar Pabon) analizo el comportamiento de cemento autocompactante en el cual se reemplazó parcialmente la arena por escoria metálica y se varió la relación agua/ cemento. Los niveles de reemplazo de arena por escoria metálica fueron entre 0% y 0,5% con variaciones en la relación agua/ material cementante entre 0,3 y 0,5. Se realizaron pruebas de la resistencia a la compresión uniaxial a los 7, 14 y 28 días de curado. Uno de los hallazgos es que el reemplazo de escoria metálica aumentó la resistencia a la compresión en las 3 edades de curado, como lo muestra la figura 7.

Figura 7.*Efecto de la escoria metálica en la compresión uniaxial*

Nota: (Mantilla Diaz & Villamizar Pabon, pág. 7)

Este estudio reportó que la mezcla de CACEM con $A/C=0.30$ y $\%EM=0.25$ presentó la mayor resistencia a compresión a 14 y 28 días de curado. A 14 días la resistencia fue de 67.3 [MPa] esta mejoró un 57.9% en relación a la mezcla sin EM. A 28 días, se obtuvo una resistencia de 77.4 [MPa] la cual mejoró un 59.4% con respecto a la mezcla sin presencia de EM.

2.1.2.4 Escoria de Alto Horno. La escoria de alto horno (GGBFS por sus siglas en inglés) es un sub producto industrial utilizado con varios propósitos en el UHPC, de una parte, para reducir los costos y de la otra para aumentar la sostenibilidad y mejorar su desempeño a temprana edad debido a sus propiedades hidráulicas (Abdulkareem, Ben Fraj, Bouasker, & Khelidj, 2018).

En este trabajo, los autores informaron que la presencia de partículas de escoria de alto horno hizo que la mezcla fuera más cohesiva y disminuyera la deshidratación, aumentando su fluidez en comparación con las muestras de referencia. Con un contenido de escoria de alto horno de 15% y 30% se obtuvieron mejoras en el flujo de asentamiento de 9% y 16% respectivamente.

Una de las principales conclusiones reportadas es que en un porcentaje de sustitución del 30% del cemento por Escoria de Alto Horno, mejora su densidad de empaquetamiento, aumenta su trabajabilidad, acelera su tiempo de fraguado y promueve la hidratación del cemento, lo que aumenta la resistencia a la compresión del UHPC a una edad temprana.

(Liu, Schollbach, Li, & de HJH, 2021) informaron que la escoria de alto horno (GGBFS) se ha aplicado ampliamente como reemplazo del cemento porque se puede activar fácilmente. En el estudio desarrollado por (Bae & Pyo, 2020) se reportó que una forma de mejorar la trabajabilidad y reducir el costo del material, fue agregando GGBFS y agregados más gruesos a la mezcla de UHPC, lo que dio una resistencia a la compresión de 160 MPa a los 28 días de curado. Según (Yalçinkaya & Yazıcı, 2017) es posible producir UHPC ecológicos, que tienen una resistencia a la compresión de 150 MPa, con reemplazos de 50% GGBFS.

Entre otras ventajas señaladas por los autores como resultado del reemplazo de cemento por GGBFS es destacable la reducción en la demanda de superplastificante de hasta un 37% con un reemplazo de 50% en peso, reducción que se debió a la mayor finura de este material en relación con el cemento, y que tiene como consecuencia positiva reducciones significativas de los tiempos de fraguado inicial y final para la mezcla reemplazada de GGBFS en comparación con la mezcla de control, pero también señalaron como efecto negativo que el reemplazo del 50% de GGBFS pareció aumentar la contracción por secado en un 180% en comparación con la contracción registrada en muestras con reemplazo del 30% de FA.

Otros estudios, entre ellos el trabajo realizado por (Yang, y otros, 2019) o la investigación de (He, Du, & Chen, 2018) en los que se reportó que el uso de escoria de litio (LS por sus siglas en Ingles) degrada la microestructura de UHPC en edades tempranas pero cuando se usa un contenido apropiado mejora la microestructura de UHPC en edades posteriores. En relación con

la resistencia a la compresión, encontraron que la escoria de litio igualmente reduce esta propiedad en edades tempranas de la fase de curado, pero que con una adición de 10% de LS al UHPC, a los 28 días ya supera la resistencia de la muestra de control. Sin embargo, tanto para la muestra que contiene 20% de LS como para la muestra de control, la resistencia a la compresión a los 28 días es superior a 110 MPa, pero inferior a 150 MPa. Cuando el contenido de LS es menor que 5% o bien cuando es al menos 15% su contribución al aumento de la resistencia a la compresión es baja. Por tanto, los autores informaron que un contenido de 10% de LS en UHPC es óptimo.

Otros metales como el plomo y el zinc pueden ser incorporados al concreto de ultra alto desempeño reemplazando el cemento en proporciones de 10%, 20%, 30% y 40% en peso. Los relaves de estos metales son productos de desecho originados en la industria minera, requiriéndose grandes espacios para su almacenamiento y manejo, que debe estar enfocado en prevenir afectaciones ambientales.

En las investigaciones desarrolladas por (Wang, y otros, 2018) fueron reportadas evidencia de que usando relaves de Plomo-Zinc la trabajabilidad, la resistencia a la compresión y la resistencia a la penetración del anión cloro del UHPC disminuyen porque aumenta significativamente el volumen y el tamaño de los poros. Según el estudio, cuando el cemento es reemplazado por relaves de plomo-zinc en un 10%, 20%, 30% y 40%, la resistencia disminuye en 15,4%, 30,8%, 48,8% y 62,9%, respectivamente. Por tanto, se recomienda incluir menos del 30% (en peso) de relaves de plomo y zinc para mantener la resistencia a la compresión de UHPC.

2.1.2.5 Polvo de Fibra de Vidrio. Se ha propuesto de forma experimental (UHPC) mecánicamente más eficiente incorporando polvo de vidrio de pantalla de cristal líquido (LCD) de desecho y modificando la geometría de la fibra de acero. (Yoo & Yoo, 2021) estudiaron la viabilidad de utilizar polvo de vidrio de pantalla de cristal líquido (LCD) de desecho como reemplazo parcial del polvo de sílice que se usa típicamente como relleno en UHPC en conjunto con fibras de acero y tomando en cuenta la geometría de este tipo de fibra, encontraron que el polvo de vidrio para LCD fue eficaz para mejorar la resistencia a la extracción de las fibras de acero y para la resistencia al cizallamiento interfacial. Esto debido a que el LCD proporcionó tanto un efecto de relleno como una reacción puzolánica y logra mejorar la unión entre las fibras de acero y el UHPC.

El uso del polvo de vidrio LCD como reemplazo de la arena de sílice en un 50% aumentó la energía de extracción en 15%-40% y la fuerza de unión promedio en 16%. La unión entre las fibras de acero y el UHPC en las muestras con y sin polvo de vidrio LCD se evaluó mediante pruebas de extracción de una sola fibra y evaluación de micro dureza. La relación de reemplazo óptima (es decir, 50%) se determinó en base a los resultados preliminares de la prueba de extracción: la fuerza de unión promedio de la fibra de acero recta de forma circular en UHPC aumentó al aumentar la relación de reemplazo hasta un 50% (con un intervalo del 25%) y luego disminuyó.

La fuerza de unión más alta de 8,0 MPa se encontró así en la muestra reemplazada al 50%, aproximadamente un 52% más alta que la de la muestra de control sin el polvo de vidrio LCD.

2.1.2.6 Residuos de Vidrio CRT. Varios trabajos de investigación coinciden en que los residuos de vidrio son una alternativa viable para reemplazar la arena de río (RS por sus siglas en inglés) en el concreto de ultra alto desempeño. (Jiao, y otros, 2020) estudiaron y evaluaron los usos efectivos de la arena de vidrio (GS) para reemplazar la arena de cuarzo (QS) en el concreto de ultra alto desempeño (UHPC) en términos de rendimientos de trabajo y las propiedades mecánicas. Informaron que el GS obtenido de vidrio residual es un material altamente rentable, de fácil acceso y estabilidad química; que es de baja absorción y densidad similar ($2,60 \text{ g / cm}^3$) a la arena natural. Así mismo reportaron que la resistencia a la compresión en UHPC mejoró cuando el reemplazo de QS por GS es del 75%. En específico, las resistencias a la compresión 7d, 14d y 28d para las mezclas de UHPC de referencia fueron 78.14 MPa, 93.67MPa y 110.2 MPa, respectivamente.

La utilización de residuos de vidrio obtenido de tubos de rayos catódicos (CRT por sus siglas en Inglés) para sustituir la arena de río para fabricar UHPC ecológico fue considerada como una opción atractiva por (Wei, Zhou, Liu, Zou, & Jian, 2020) quienes informaron que cuando la relación de reemplazo aumentó al 25%, la compresión y la resistencia flexural solo se redujeron en un 3,2% y un 3,3% a los 28 días, respectivamente, en comparación con las del UHPC sin vidrio CRT de desecho. También reportaron que la resistencia correspondiente se redujo en un 8.3% y un 10.7% a los 28 días cuando la proporción de reemplazo del vidrio CRT residual alcanzó el 50%, mostrando un evidente deterioro en las propiedades mecánicas en grados superiores al 10%. El grado de deterioro se agravó cuando la tasa de reemplazo aumentó del 50% al 100%, hasta el 18.3% y el 20.7%, respectivamente. También se observó un grado de deterioro similar en las variaciones de la capacidad de absorción de energía.

2.1.2.7 Residuos de Construcción y Demolición. Diversos trabajos de investigación se han enfocado en agregados reciclados (RA) como los desechos de demolición para ser utilizados en concretos de alto desempeño reservando las propiedades mecánicas y físicas. Un trabajo experimental en el que se utilizaron residuos reciclados de construcción y demolición (residuos C&D) para reemplazar el cemento y el agregado fue adelantado por (Wang , y otros, 2019) evaluando su desempeño en cuanto a comportamiento reológico, trabajabilidad, resistencia a la compresión y contracción autógena, encontrando que el reciclaje de residuos de C&D en el desarrollo de UHPC no altera el tipo de productos de hidratación. En relación con la trabajabilidad, los autores informan que esta disminuye con el aumento de la proporción de reemplazo. Por ejemplo, el flujo de UHPC sin C&D es de 280 mm, pero disminuye a 273mm, 265mm, 255mm y 241mm con proporciones de reemplazo de arena de río de 4%, 7%, 11%, 15% y 19% respectivamente.

La resistencia a la compresión también tiende a disminuir con el incremento de la proporción de reemplazo con C&D en los primeros 7 días de curado. Por ejemplo, la resistencia máxima a la compresión (alrededor de 125 MPa) se obtuvo en UHPC sin residuos de C & D, mientras que al reemplazar el 50% de cemento y el 19% de agregado simultáneamente se obtuvo una resistencia a la compresión de 109 MPa. Los autores también informaron que la contracción autógena temprana se redujo cuando se Incluyeron residuos de C&D para reemplazar el cemento en la producción de UHPC. Específicamente, cuando el 30% y el 50% de cemento fue reemplazado por residuos de C&D, la contracción 7d se redujo en un 18.4% y 48,16% en comparación con la de las mezclas sin residuos de C y D.

2.1.3 Geo Polímeros

De acuerdo con lo señalado por (Liu , y otros, 2021) el geo polímero es un material aglutinante sintetizado por una variedad de materiales ricos en aluminio (Al) y silicio (Si). Este equipo investigador diseño UHPC a base de geo polímeros que alcanzo una resistencia a la compresión entre 100 MPa y 150 MPa. (He, Zhu, Ren, & Jiang, 2020) propusieron la preparación de UHPC adicionando diferentes tipos de fibras entre ellas las de polipropileno, con el fin de evitar el deterioro prematuro de la estructura por cambios drásticos en las temperaturas, y a partir de ello estudiaron los efectos de esas fibras en la resistencia a la flexión a la compresión. Entre los resultados relacionados con el uso de geo polímeros, informaron que las muestras de UHPC reforzado con fibras de PVA y las muestras de UHPC reforzado con fibras de PP absorbieron mucha agua, lo que afectó la hidratación del cemento y por tanto la resistencia a la flexión, con disminuciones de un 33,76% y un 33,18%, respectivamente.

Las fibras de polipropileno (PP) también son utilizadas para mejorar el desempeño del concreto entre otras razones por su durabilidad y su facilidad de manejo. (Shi, Yin, Pham, Tuladhar, & Hao, 2021) evaluaron el rendimiento de las fibras cuando se modificaron los grupos hidrófilos y grupos de silano de injerto de superficie.

El silano es el compuesto más sencillo del silicio que contienen solo los elementos silicio e hidrógeno). Los autores examinaron sus diferentes mecanismos de refuerzo, concluyendo que alcanza una fuerza de unión muy alta con el concreto, debido a que los grupos silano participan en la reacción de hidratación del mismo. Por ejemplo, compararon el rendimiento flexural de muestras de UHPC reforzadas con fibras de PP con grupos silanos injertados con fibras de acero y UHPC simple. Al respecto informaron que los grupos de silano injertados con fibra de PP tuvieron efectos de refuerzo comparables a los de las fibras de acero y mucho mejores que los del UHPC simple.

La absorción de energía de los grupos de silano injertados en UHPC reforzado con fibra de PP fue de 75,8 J, que era sólo un 5% menor que la del UHPC reforzado con fibra de acero (79,5 J). Señalaron además que las densidades de las fibras de PP y las fibras de acero fueron de 0,9 g / cm³ y 7,8 g / cm³, respectivamente, lo que significa las fracciones de volumen de 27 kg / m³ Fibra de PP y 78 kg / m³ las fibras de acero fueron del 3% y el 1%, respectivamente.

Se ha estudiado el efecto individual y combinado de las fibras de polipropileno (PP) y las fibras de acero, así como el tamaño del agregado en el desconchado (una forma de astillamiento o rotura) del UHPC cuando se expone a temperaturas elevadas. (Li, Pimienta, Pinoteau, & Tan, 2019) encontraron que la adición de fibras de polipropileno (PP) evitó completamente el desconchado.

Para estudiar la influencia de las fibras de PP, las fibras de Acero y el tamaño de agregado en propiedades mecánicas de UHPC, se realizaron pruebas de resistencia a la compresión resistencia a la tracción uniaxial en tres muestras, respectivamente. La mezcla de control tenía una resistencia a la compresión de 149.6MPa y una resistencia a la tracción de 8.9MPa. Estos valores se utilizaron como base de comparación para los otros diseños de mezcla. Añadiendo fibras de PP solo se evidencio un efecto marginal sobre la resistencia a la compresión (159,7 MPa frente a 149,6 MPa) y la resistencia a la tracción (8,5 MPa frente a 8,9 MPa).

(Liu, y otros, 2021) diseñaron concreto de ultra alto desempeño a base de geo polímeros (G-UHPC) con una resistencia a la compresión de 100 a 150 MPa y reportaron como hallazgo concluyente que el refuerzo simultaneo con fibras de acero largas al 1% en volumen y fibras de basalto al 1% en volumen mejoró la resistencia a la compresión y la flexión, así como la ductilidad del material en comparación con las fibras de acero largas al 2% en volumen. Reforzado con 2% en volumen de fibras de acero de 15 mm, la resistencia a la compresión del G-UHPC-2 alcanzó

102 MPa. Con el mismo contenido de fibra de acero de 2% en volumen, la disminución de la longitud de la fibra de acero de 15 mm a 10 mm, es decir, G-UHPC-4, mejoró la resistencia a la compresión a 141 MPa.

Bajo la misma longitud de la fibra de acero de 15 mm, mayor dosis de fibra, es decir 2.5% en volumen de contenido de fibra de acero (G-UHPC-5), mejoró la resistencia a la compresión de los materiales, que fue de 151 MPa.

El uso híbrido de fibras de acero al 1% en volumen y fibras de basalto al 1% en volumen (G-UHPC-3) mostró una mejora de la resistencia a la compresión (alcanzando 110 MPa) en comparación con el uso único de fibras de acero al 2% en volumen (G-UHPC-2).

2.1.4 Fibras de Acero Reciclado

La adición de fibras influye positivamente en la ductilidad y la resistencia a la compresión de los materiales de concreto (Liu, y otros, 2021). De acuerdo con la investigación realizada por (Yu, Zhang, Chen, & He, 2020) el aumento de fibra tiene un efecto de fortalecimiento y endurecimiento de la tenacidad a la flexión y la ductilidad que puede mejorar eficazmente sus propiedades mecánicas, principalmente la resistencia a la compresión, que es uno de los parámetros clave para el diseño de estructuras y componentes de hormigón. Cuando la fracción de volumen de la fibra cambia de 0% a 5%, el módulo de elasticidad correspondiente del modelo aumenta en un 13.39%, 12.55%, 11.61%, 10.61%, 9.56% y 8.43% respectivamente. Cuando el contenido de CA cambia de 0% a 50%, el módulo elástico del modelo con 0%, 1%, 2%, 3%, 4% y 5% de fracción de volumen de fibra aumenta en 22.03%, 19.88%, 18.95%, 18,12%, 17,39% y 16,6 9%, respectivamente. Los autores afirman que la fracción de volumen de fibra de acero debe controlarse al 2–3% y el contenido de agregado grueso no debe ser superior al 30% porque la resistencia a la compresión y la resistencia a la flexión aumentan y luego disminuyen.

(Li , Cao , de HJH , & Yu , 2021) investigaron el efecto sinérgico de tres tipos de fibras de acero y los agregados gruesos sobre el comportamiento de impacto del UHPC y encontraron que las fibras medias y largas (30mm y 60mm de longitud, respectivamente) contribuyen de mejor manera en el comportamiento de deformación que las fibras cortas (menos de 30 mm), pero que las fibras de acero rectas cortas de 13 mm muestran un buen refuerzo en la resistencia a la compresión debido a la distribución más homogénea en la matriz. Con la inclusión de 2% en volumen de fibras de acero en la matriz, la resistencia a la compresión se puede mejorar en el rango entre el 10.4% y el 15.7%.

(Yoo, Chun, & Kim, 2020) también evaluaron el uso de fibras de acero desgastadas y en forma de arco como refuerzo del UHPC encontrando que la efectividad de rendimiento de unión fue mayor cuando estaba alineada con la dirección de la carga de extracción que cuando estaba inclinada. Las resistencias de unión promedio y equivalentes de las fibras de acero de tipo arco desgastadas de la matriz UHPC fueron más altas que las de la fibra simple en la misma matriz en general. Las resistencias de unión promedio de las fibras de acero de tipo arco desgastadas, es decir, las series C1 y C2, fueron aproximadamente un 124% y un 149% más altas que las de la fibra simple, respectivamente. Sus resistencias de unión equivalentes también fueron 112% y 113% más altas, en promedio, que los de la fibra simple, respectivamente, en la condición alineada. Como era de esperar, la fibra de tipo arco con una curvatura más alta de 0.10 / mm fue más eficaz para mejorar la resistencia a la extracción de las fibras alineadas que aquella con un valor más bajo de 0.04 / mm.

Sin embargo, (Yoo, Chun, & Kim, 2019) informaron que las fibras de acero rectas con una inclinación de 45° mejoraron significativamente la fuerza de unión dinámica y la energía de extracción, aproximadamente un 29% y un 69% en comparación con las fibras de acero alineadas

cuando se incorporó como agente expansivo (EA) sulfoaluminato de calcio (CSA), alcanzándose reducciones de aproximadamente 34% y 44% en las deformaciones por contracción libre a 28 días de UHPFRC al incluir 5% y 7,5% de

EA por peso de cemento, respectivamente.

En otro trabajo que se evaluó el comportamiento electroquímico de barras de acero incrustadas en UHPC con fibras de acero galvanizado en una solución de NaCl al 3.5% en peso (de Liang, Meng, Teng , & Khayat, 2019) se encontró que la fibras de acero conductoras disminuyen la resistencia al UHPC en más del 40% cuando el contenido de fibra de acero aumenta de 0 a 2% debido a que la corriente prefiere pasar a través de las fibras de acero y luego a los poros. La resistencia de la matriz de UHPC indica la capacidad de UHPC para resistir la penetración de iones de agua, oxígeno y cloruro, que está relacionada con su permeabilidad.

Por su parte, (Shin & Yoo, 2020) utilizaron dos tipos diferentes de fibras de acero para investigar su efecto a través de micro fisuras preformadas sobre el comportamiento de tracción del concreto. Se aplicaron fibras rectas y otras retorcidas en dos niveles de tensión previa de 0.45% y 0.6% encontrando que el uso de la fibra retorcida fue más eficaz para mejorar la deformabilidad del UHPC que la fibra recta, pero ambos proporcionaron capacidades de absorción de energía similares, y que, la capacidad de absorción de energía del UHPFRC se vio significativamente más afectada por la corrosión de la fibra de acero, que por el tipo de fibra utilizado.

Los autores informaron que, si las fibras de acero se corroen moderadamente, su fuerza de unión en la matriz de cemento aumenta, lo que conduce a una mejora en la resistencia a la tracción. Para evaluar la influencia de las micro fisuras en la corrosión de la fibra de acero en UHPC, las muestras de UHPC sin fisuras y con múltiples fisuras se sumergieron en una solución estándar de NaCl al 3.5%. Las grietas iniciales en la matriz se formaron con el esfuerzo de tracción de

aproximadamente 8 MPa para las muestras de fibras rectas y torcidas, y exhibieron una capacidad de carga igualmente mayor más allá del punto de ruptura inicial que es una respuesta de endurecimiento por deformación. La resistencia a la tracción posterior a la fisuración de las muestras SP fue de 16,7 MPa, aproximadamente un 18% más alta que la de las muestras de TP. La curva tensión-deformación se observó en la muestra con fibra de acero recta, mientras que la muestra de fibra retorcida exhibió una curva en forma de zigzag tanto en las zonas de endurecimiento por deformación como en las de ablandamiento.

Después de una inmersión de 4 semanas en la solución estándar de NaCl, la resistencia a la tracción del UHPC reforzado con fibras de acero rectas aumentó sustancialmente en comparación con la de la muestra simple, encontrándose que su resistencia a la tracción era 18.8 MPa, aproximadamente un 13% de aumento sobre la resistencia a la tracción de la muestra simple, causado por el aumento de la rugosidad de la superficie de las fibras de acero moderadamente corroídas. La fracción de volumen de las fibras de acero utilizadas en este estudio fue del 2%

El efecto de las fibras de acero sobre la resistencia dinámica del UHPC fue estudiado por (Su, Li, Wu, Wu, & Li, 2016) y también concluyeron que el refuerzo de microfibras generalmente proporciona una mejor resistencia dinámica en comparación con la fibra retorcida y que el aumento de la longitud de la fibra y la relación de aspecto tiene un impacto positivo en la resistencia dinámica del material.

Los autores observaron que el UHPC reforzado con 2,5% MF15 tiene una fisura más estrecha que el UHPC reforzado con 2,5% MF06 y que el UHPC reforzado con 2,5% TF03 tienen menos grietas que UHPC reforzado con 2,5% TF05. En términos generales, una relación de aspecto de fibra más alta ayuda a resistir la extensión de la grieta. Para las tres muestras de UHPC

reforzadas con microfibras, se observa que cuando la fracción de volumen baja al 0.5%, se pueden ver claras grietas de compresión en ambos extremos de la muestra.

(Zhang, Zhu, Qu, Kumar, & Shao, 2020) diseñaron un dispositivo mejorado para fundir UHPC en capas y alinear las fibras de acero sin comprometer la trabajabilidad del concreto y evaluaron los efectos de las fibras sobre el comportamiento mecánico del material y reportaron entre otros resultados que con 2% en volumen de fibras, se incrementa la resistencia a la flexión y que agregar un 1% en volumen adicional de fibras rectas es significativamente mayor que agregar este mismo volumen de fibras enganchadas. Para ello se incluyen dos tipos de fibras de acero en la producción de UHPC. Uno es fibra de acero enganchada en el extremo con una longitud de 13 mm y un diámetro de 0,2 mm. La otra es fibra de acero recta con una longitud de 8 mm y un diámetro de 0,115 mm. Reportaron que en la medida en que aumenta el contenido de fibra, aumenta la resistencia inicial al agrietamiento (10%) y la resistencia a la flexión final (18.5%) del UHPC en comparación con las muestras de control.

Sin embargo, el porcentaje de aumento en las resistencias es menor que cuando el contenido de fibra es de 50% y consideran que podría atribuirse a la aglomeración de las fibras de acero y el deterioro en la trabajabilidad del UHPC. Por este motivo los autores recomiendan el uso de fibra en ambas formas y un contenido de hasta 3% para obtener mayor resistencia a la tracción y al agrietamiento.

Por su parte (Qi , Wu, Ma, & Wang, 2018) realizaron un estudio utilizando tres tipos diferentes de fibras de acero, incluidas las fibras rectas lisas y las fibras con extremos en forma de gancho con dos geometrías diferentes. La longitud y el diámetro de la fibra lisa recta fueron 13mm de longitud y 0.2 mm de diámetro. Las fibras I de extremo enganchado tenían 13 mm de longitud y 0.2 mm de diámetro, mientras que las fibras II de extremo en gancho tenían 25 mm de longitud

y 0.35 mm de diámetro. El ángulo de inserción de la fibra fue aumentado de 0° a 30° y a 45°. Para todos los tipos de fibras, la fuerza de unión promedio alcanza un valor máximo cuando el ángulo incrustado de la fibra es de 45°. Para las fibras rectas, la fuerza de unión promedio aumenta en 19,2% y 52,9%, respectivamente, mientras que para las fibras de extremo en gancho EH-I y EH-II solo aumentaron 13.6% y 26.1% cuando el ángulo de inserción de la fibra aumenta de 0° a 30° y 10.3% y 16.2% cuando el ángulo de inserción aumenta de 0° a 45°.

En este mismo sentido conceptuaron (Naeimi & Moustafa, 2021) quienes realizaron pruebas experimentales con más de 130 cilindros UHPC con espirales de acero con diferentes proporciones volumétricas de fibras de acero (0%, 2%, 4%) y proporciones de refuerzo transversal (0%, 2%, 4% y 8%). Los autores concluyeron que no hay necesidad de considerar fibras de acero al 4% para diseño de columnas UHPC ya que los beneficios adicionales mecánicos y de confinamiento no valen la pena por el aumento significativo en el costo del material. Así mismo, también reportaron como hallazgo relevante que, cuando las muestras de UHPC están confinadas con altas proporciones de espirales de acero (8%), el efecto de las fibras de acero sobre el comportamiento de compresión es insignificante.

(Huang, Gao , Khayat , & Su, 2021) informaron que la longitud de las fibras influye en varias de las propiedades de concreto de ultra alto desempeño, debido a que la longitud de la fibra tiene una influencia significativa en la resistencia a la extracción y puede proporcionar un área de superficie continua más alta asegurando una mayor adherencia y fricción, pero que la alineación también es un factor relevante.

En este estudio utilizaron fibras de acero rectas con diferentes longitudes de 6mmm, 13mmm y 20 mm en un porcentaje del 2% en volumen, evaluaron la carga de extracción y la energía de las fibras, hallando evidencia de que el uso de fibras de 20 mm de largo puede aumentar

en 75% la resistencia a la flexión y hasta en 245% la tenacidad del material. El estudio realizado por (Hung, Lee, & Chan, 2019) también sostiene que la inclusión de una fracción de volumen del 2% de fibras de acero mejoraron significativamente la rigidez y resistencia de las probetas de UHPC. Por ejemplo, la adición de fibras de acero aumentó la resistencia a la compresión promedio del UHPC de 111MPa a 128MPa.

De igual forma los resultados reportados por (Bae & Pyo, 2020) revelaron que adicionar fibras de acero en proporciones superiores a 1% de fracción en volumen en concreto HPC con agregados finos más gruesos no contribuyeron a mejorar la resistencia a la compresión. En este caso, las fibras se mezclaron con una relación de volumen de 0%, 0.3%, 0.5%, 0.7% y 1%. Los valores de resistencia a la compresión para las muestras de UHPC probadas a los dos días de curado mostraron más de 80 MPa y las resistencias a la compresión de F1.0 y F1.5 a los 28 días de curado son casi las mismas, y aproximadamente 10 MPa más altas que la resistencia a la compresión de los concretos UHPC sin agregados finos más gruesos.

Por otra parte, la resistencia promedio a la primera fisuración y la resistencia máxima a la tracción de UHPC fueron 6.31 y 8.74 MPa para UHPC con 0.5% de contenido de fibra de acero, 9.51 y 15.59 MPa para la serie 1%, y 9.97 y 18,43 MPa para la serie 1,5%.

Otro material con el que la fibra de acero se asocia de forma sinérgica es la arena. Así lo informaron (de Liang, Meng, Teng, & Khayat, 2020) quienes estudiaron la viabilidad de mejorar el curado interno a través de ensayos electroquímicos en muestras de UHPC. La arena liviana saturada (LWS) se utilizó con éxito en UHPC para un curado interno efectivo. Las pequeñas partículas porosas pre saturadas de LWS se pueden dispersar de manera homogénea en la matriz de UHPC y almacenar agua de manera efectiva durante la mezcla y el fraguado, y luego liberar

agua progresivamente durante la hidratación del cemento, lo que ayuda a reducir la contracción y potencial agrietamiento.

De acuerdo con los autores, la relación de reemplazo de volumen de arena liviana por arena de concreto fue 12.5%, 25%, 37.5% y 50% para UHPC designado como LWS-12.5, LWS-25, LWS-37.5 y LWS-50, respectivamente. Basado en el volumen compuesto, las fracciones de volumen de las fibras de acero fueron 0, 0.5%, 1.0%, 1.5%, 2.0% y 3% para UHPC codificado como ST-0 (Ref.: sin LWS ni fibras de acero), ST-0.5, ST-1, ST-1.5, ST-2.0 y ST-3, respectivamente. Se utilizaron fibras de acero rectas con revestimiento de cobre. Las fibras tenían un diámetro de 0,2 mm y una longitud de 13 mm.

En cuanto a la resistencia a la compresión, los autores informaron que aumentó de 130 a 158 MPa cuando el contenido de LWS se incrementó de 0 a 25%, debido a la hidratación del cemento promovida y la porosidad reducida. Sin embargo, cuando el contenido de LWS se incrementó del 25% al 75%, la resistencia a la compresión disminuyó. También concluyeron que para mejorar la resistencia a la compresión del UHPC, se recomienda limitar la relación de reemplazo de arena liviana (LWS) al 25% e informaron que el uso de fibras de acero con un volumen de hasta el 3% no promovió la corrosión de las varillas de acero incrustadas en el UHPC.

2.1.5 Nano Materiales

Los nano materiales actúan en la micro estructura del UHPC principalmente como relleno para hacerlo más denso (Faried, Sahar, Bassam, & Taher, 2021) y son apreciados por sus grandes superficies que pueden aprovecharse para reaccionar con la pasta de cemento. Los nanomateriales de ingeniería existen en tres formas principales, a saber, nano partículas 0D, nano fibra 1D y nano hojas 2D (Chuah, Pan, Sanjayan, Wang, & Duan, 2014). Entre ellos se destaca una nano placa conocida como oxido de grafeno (GO) que al ser incorporada al concreto puede tener efectos muy

positivos sobre la trabajabilidad, la micro estructura y la hidratación del UHPC debido a que posee excelentes propiedades mecánicas y buena dispersabilidad. (Yu & Wu, 2020). El módulo de elasticidad y la resistencia intrínseca de GO se estiman en aproximadamente 300 GPa y 112 GPa, respectivamente.

De acuerdo con el trabajo experimental desarrollado por (Chuah, Pan, Sanjayan, Wang, & Duan, 2014) los nano materiales son potenciadores de la resistencia y la durabilidad de los compuestos cementicios siempre que estén bien dispersos. (Singh, Karade, Bhattacharyya, Yousuf, & Ahalawat, 2013) han encontrado que la nano sílice es el material más utilizado en el concreto para mejorar el rendimiento, debido a su reactividad puzolánica además del efecto de relleno de poros. Las nano plaquetas fibras de carbono (CNF por sus siglas en ingles) y de grafito se han utilizado para obtener refuerzo del concreto a escala micro (Meng & Khayat, 2018). Por ejemplo, la resistencia a la compresión de un compuesto cementicio elaborado con 0.16% CNF aumentó en un 40% en comparación con la del compuesto cementicio simple sin ningún CNF. En cuanto a las propiedades reológicas informaron que la viscosidad plástica disminuyó cuando el contenido de nanomateriales se limitó al 0.05%, lo que puede deberse a la mejora de la densidad de empaque. Sin embargo, la viscosidad del plástico aumentó cuando el contenido de nanomateriales se incrementó de 0.05% y 0.3%.

Para UHPC con CNF, el aumento del contenido de CNF a 0.3% condujo a un aumento del 35% en la viscosidad plástica (de 40 a 56 Pa), en comparación con la de la mezcla de referencia.

En relación con la estructura de poros, los autores destacan la disminución de los poros capilares como el resultado de una mayor generación de productos de hidratación y reportaron una disminución del 35% en la porosidad con el aumento del contenido de CNF de 0% a 3%.

En un trabajo investigativo adelantado por (Chuah, Pan, Sanjayan, Wang, & Duan, 2014) los autores se centraron en analizar la influencia de la geometría de los nano materiales en las propiedades frescas y endurecidas de los compuestos de cemento, incluida la dispersión, trabajabilidad, hidratación, microestructura y propiedades mecánicas, encontrando por ejemplo que se necesita agua libre adicional para humedecer la gran superficie de los nanomateriales lo cual comprometió la trabajabilidad del concreto. En relación con las propiedades mecánicas, los autores informaron que el concreto que contenía 4% en peso de nano sílice registró resistencias a la compresión, tracción y flexión mayores que las muestras de control en un factor de 1.7, 2.2 y 1.6 veces, respectivamente, después de 28 días. Pero, que con una adición del 5% en peso de nano sílice, las propiedades mecánicas comienzan a disminuir en comparación con la dosis óptima del 4% en peso, principalmente debido a los defectos generados por una dispersión inadecuada.

Los resultados presentados por (Chen, Guan Lim, & Yang, 2016) señalan que en el caso de los nano tubos de carbono sintetizados con plasma (p-CNT) estos materiales se pueden dispersar uniformemente en agua a través de ultrasonidos o bien con el uso de tensoactivos, para evitar que tengan efectos adversos sobre la resistencia a la compresión. Por ejemplo, (Jung, Lee, Hong, & Moon, 2020) propusieron un método para dispersar los CNT tanto en una solución acuosa como en una matriz de UHPC, método que fue evaluado mediante análisis de tamaño de partículas.

Los resultados informados indican que los CNT dispersos pueden mejorar las propiedades mecánicas del UHPC, pero cuando se incorpora una cantidad excesiva debilita algunas propiedades porque los CNT aglomerados actúan como poros o grietas y suprimen la hidratación. Por ejemplo, el UHPC de referencia tenía una resistencia a la compresión de 178,6 MPa y su módulo elástico era 49,1 GPa; el espécimen CNT0.5 mostró una mejora del 5.5% en la resistencia a la compresión y aproximadamente un 12.0% de mejora en el módulo elástico. Sin embargo, a

medida que el contenido de CNT se acercó o superó la concentración de incorporación crítica (CIC por sus siglas en inglés), tanto la resistencia a la compresión como el módulo elástico disminuyeron, aunque el módulo elástico permaneció más alto que el de la muestra de referencia. Para la muestra de CNT0.8, la resistencia a la compresión fue de 177.1 MPa, que es similar al de UHPC de referencia, pero el módulo de elasticidad fue 6,4% -7% mayor.

Por su parte, (Dong, Wang, Ashour, Han, & Ou, 2020) analizaron el efecto del grafeno en las nano estructuras y microestructuras del UHPC e investigaron sus propiedades mecánicas, encontrando que el grafeno puede inhibir eficazmente la iniciación y propagación de grietas y dando como resultado que la resistencia a la compresión, la tenacidad a la compresión y el módulo de flexión de tres puntos de UHPC se incrementen en un 43.5%, 95.7% y 39.1%, respectivamente, cuando se añade grafeno con un tamaño lateral $> 50 \mu\text{m}$ y una dosis de 0.5% en peso.

(Yu & Wu, 2020) investigaron sobre el uso de óxido de grafeno (GO) para mejorar las propiedades del UHPC al cual se había incorporado agregado reciclado (AR) fino, encontrando que las propiedades mecánicas, estabilidad de volumen, y las propiedades de durabilidad del UHPC con AR fino fueron comparables o incluso mejores que las del UHPC preparado con arena de río natural. Así mismo, definieron como cantidad óptima de GO 0.06% en peso para preservar o mejorar propiedades mecánicas, propiedades de durabilidad y estructura de poros del UHPC con AR fino.

Bajo estas condiciones de preparación de la mezcla, la contracción autógena de UHPC aumentó continuamente con el aumento del tiempo, y se observó un proceso de rápido aumento antes del día 28. En general, la contracción autógena del UHPC con GO (U2, U4, U6, U8) fue mayor que el de UHPC sin GO (U0) alcanzando un máximo cuando el contenido de GO fue 0.06% en peso. En el día 182, los valores de contracción autógena para UR, U0, U2, U4, U6 y U8 fueron

338,74, 325,70, 333,26, 342,49, 360.03 y 353.73 lm, respectivamente. En comparación con UR, la contracción autógena de U0 al día 182 se redujo en 3.85%, lo que indicó que la contracción autógena de UHPC mejoró cuando la arena natural de río en UHP se reemplazó totalmente con RA fina. En comparación con U0, los valores de contracción autógena de U2, U4, U6 y U8 en el día 182 se incrementaron en un 2,32%, 5,15%, 10,54% y 8,61%, respectivamente.

Para evaluar las propiedades de durabilidad, se observó la resistencia a la difusión de cloruro en UHPC con varios contenidos de GO. Los coeficientes de migración de cloruro de UHPC con GO (U2, U4, U6, U8) fueron significativamente más bajos que los de UHPC sin GO (U0), lo que sugiere que el coeficiente de migración de cloruro de UHPC con RA fina se redujo con la adición de GO.

(Meddah, Praveenkumar, Vijayalakshmi, Manigandan, & Arunachalam, 2020) hallaron evidencia de que las nano partículas de Al_2O_3 tienen un doble efecto como material de relleno; contribuyen al incremento en el volumen de hidratos de silicato de calcio (CSH) y aumenta las propiedades de resistencia y durabilidad. (Isa, Pilakoutas , & Guadagnini , 2021) realizaron un estudio experimental que incluyó el diseño de UHPC a partir de arena convencional, escoria de alto horno granulada molida (GGBS) para reducir el contenido de cemento y fibras de acero para neumáticos recicladas (RTSF) y cordones de acero para neumáticos reciclados (RTSC) en lugar de las fibras de acero fabricadas (MSF) convencionales, reportando entre los resultados que en comparación con las mezclas de RTSC solo, la inclusión de RTSF provoca una ligera reducción en la resistencia a la compresión y el módulo de elasticidad, y una mayor reducción en la resistencia a la flexión, la absorción de energía y la energía de fractura. La mezcla simple logró una resistencia a la compresión promedio de 158 MPa, satisfaciendo así el requisito de resistencia de UHPC. Pero se observó un aumento en la resistencia para las mezclas reforzadas con fibra. Las mezclas que

combinarse una o contienen RTSC muestran el aumento relativo más alto en la fuerza promedio, alrededor del 10%, mientras que las mezclas que contenían RTSF registraron un aumento promedio máximo de solo el 4%. Así mismo, se encontró que un aumento en la dosis de fibra, aumento ligeramente el módulo de elasticidad.

2.1.6 Umbrales Máximos de Sustitución o Adición de Materiales.

A lo largo de la revisión realizada, se encontró que la resistencia a la compresión es la propiedad mecánica más importante del UHPC y que esta mejora en función de factores como el tiempo (edad de la muestra) las condiciones químicas y físicas de curado y por supuesto los niveles de sustitución de compuestos o de adición de materiales. La mejora de esta propiedad puede lograrse mediante diversas estrategias, tales como la sustitución parcial del cemento, la sustitución de agregados gruesos, sustitución de agregados finos o adición de materiales complementarios, que modifican la micro estructura física o la química de curado. En algunos casos, pueden más de ellas.

Por otra parte, se encontró que tanto en la adición de materiales complementarios como en el reemplazo de componentes del UHPC, la mejora en sus propiedades mecánicas incrementa y luego disminuye en virtud de la proporción de reemplazo o adición, registrando umbrales mínimos y máximos. En esta revisión, los resultados y discusión tienen foco en la resistencia a la compresión, los umbrales máximos de reemplazo o adición para obtenerla, el origen de material utilizado y la diversidad de opciones, según la bibliografía consultada.

Tabla 1.*Registro de Umbrales Reportados cuando el Material Sustituto es de Origen Industrial.*

Material sustituto o adicionado	Material sustituido	Nivel óptimo de reemplazo
Residuos de vidrio CRT	Arena de Cuarzo (QS)	75%
Polvo de fibra de vidrio	Polvo de Sílice	50%
Residuos de construcción y demolición	cemento	50%
Escoria de alto horno	Cemento	30%
Cenizas volantes	Cemento	20%
Residuos de construcción y demolición	Agregados gruesos	19%
Desechos de cerámica	Agregados gruesos	10%
Escoria de acero	Cemento	Disminuye en todos los casos

La tabla 1 muestra que la sustitución del cemento alcanza umbrales más altos cuando se lleva a cabo con materiales sustitutos de origen industrial como los residuos de demolición y construcción (hasta 50%), escoria de alto horno (30%) y cenizas volantes (20%).

Tabla 2.*Registro de Umbrales Reportados cuando el Material Sustituto es de Origen Natural.*

Material sustituto o adicionado	Material sustituido	Nivel óptimo de reemplazo
Piedra caliza	Cemento	66%
Residuos de granito	Agregados gruesos	50%
Nano cenizas de cascara de arroz	Cemento	20%
Polvo de basalto	Cemento	15%
Polvo de granito	Cemento	15%
Polvo de piedra de cantera	Cemento	10%
Residuos de granito	Cemento	5%
Bio carbón	Cemento	2%

Cuando los sustitutos son materiales de origen natural, los umbrales más altos de reemplazo del cemento corresponden a la piedra caliza (66%), nano cenizas de cascara de arroz (20%) polvos de basalto o granito (15%). El bio carbón y los lodos de granito registran umbrales de sustitución de cemento bajos (entre 2% y 5%).

Tabla 3.

Registro de Umbrales Reportados por Sustitución de Agregados Gruesos.

Material Adicionado	Material sustituido	Nivel óptimo de Sustitución
Residuos de granito	Agregados gruesos	50%
Residuos de construcción y demolición	Agregados gruesos	19%
Desechos de cerámica	Agregados gruesos	10%

La sustitución de agregados gruesos en UHPC alcanza umbrales que van de 10% a 50% según los reportes de las investigaciones consultadas.

Tabla 4.

Registro de Umbrales Reportados por Sustitución de Agregados Finos.

Material Adicionado	Material sustituido	Nivel óptimo de sustitución
Residuos de vidrio CRT	Arena de Cuarzo (QS)	75%
Polvo de fibra de vidrio	Polvo de Sílice	50%
Arcilla marina	Arena de Cuarzo	30%
Bio carbón	Polvo de Cuarzo	21%
Piedra caliza	Humo de Sílice	20%
Polvo de granito	Agregados finos	20%
Polvo de roca reciclada	Arena de Cuarzo	20%
Residuos de canteras de diabasa	Arena de Cuarzo	No significativa
Arena del desierto	Agregados finos	Disminuye en todos lo casos

Tabla 5.*Registro de Umbrales Reportados por Adición de Material Complementario*

Material Adicionado	Nivel óptimo de Adición
Cenizas volantes	40%
Nano cenizas de cascara de arroz	5%
Nano materiales	4%
Fibra de acero reciclado	2%
Geo polímeros	2%

Las cenizas volantes son el material de adición que registra umbrales más altos con 40% en peso sin afectar la resistencia a la compresión. Las nano cenizas de cascara de arroz alcanzan umbral de adición de hasta 5%, otros nano materiales 4%, las fibras de acero y otras fibras como los geo polímeros tienen umbrales de 2%.

Un resumen de los principales resultados contenidos en los documentos objeto de la presente revisión bibliográfica, se presenta en los anexos 1 y 2 de este documento. La información está organizada según el origen del material, si es de origen natural o industrial; luego por nivel óptimo de sustitución de mayor a menor y como tercer criterio de ordenación el nombre del material sustituto en orden alfabético.

3. Conclusiones

En esta revisión, las conclusiones tienen foco en la resistencia a la compresión, los umbrales máximos de reemplazo o adición para obtenerla, el origen de material utilizado y la diversidad de opciones, según la bibliografía consultada.

Las conclusiones específicas respecto de las variaciones en resistencia a la compresión del UHPC, cuando se hace reemplazo de algunos de sus componentes o cuando se adicionan materiales complementarios son las siguientes:

Los umbrales más altos de reemplazo se registran por la sustitución de Arena de Cuarzo por residuos de vidrio obtenido de tubos de rayos catódicos (CRT), un desecho de origen industrial, donde una proporción de sustitución de hasta 75% es eficiente para mejorar la resistencia mecánica. En cuanto a los desechos de origen natural, el polvo de piedra caliza (LSP) registra umbrales de sustitución de hasta 66% del cemento con igual propósito. La sustitución del cemento por LSP en UHPC mejora las propiedades mecánicas debido a que contribuye positivamente a la hidratación de la mezcla y al desarrollo microestructural al optimizar el empaquetamiento de sus ingredientes granulares.

La adición de materiales como estrategia para mejorar la resistencia a la compresión, alcanza los umbrales más altos cuando se utiliza cenizas volantes (40%) que es un material de origen industrial; 5% cuando se utiliza nano cenizas de cascara de arroz. De acuerdo con las investigaciones consultadas en estas estrategias ofrecen mayores posibilidades los productos de origen industrial que los productos de origen natural. Aun cuando la cascara de arroz es un material de origen natural, obtener las nano cenizas implica someter el material a un proceso de combustión.

Cuando se hace reemplazo de cemento en UHPC los umbrales más altos de sustitución y de mejora en la resistencia a la compresión se obtienen con 66% de Polvo de Piedra caliza, 50% residuos de construcción y demolición; 30% de escoria de alto horno (desecho industrial), 20% con cenizas volantes, 15% con polvos de basalto o granito, 2% de bio carbón. Hay disminución de la resistencia mecánica con cualquier nivel de reemplazo del cemento con lodos de granito o escoria de acero.

Referencias Bibliográficas

- Ashish, D. (2018). Viabilidad del polvo de mármol residual en el hormigón como sustitución parcial de la amalgama de cemento y arena para un crecimiento sostenible. *Revista de ingeniería de la construcción*(15), 236-242.
- Abdulkareem, O., Ben Fraj, A., Bouasker, M., & Khelidj, A. (2018). Diseño de mezclas e investigaciones en edades tempranas de UHPC más sostenible. *Materiales de construcción y edificación*(163), 235-246.
- Ahmad, S., Rasul, M., Adekunle, S. K., Al-Dulaijan, S. U., Maslehuddin, M., & Ali, S. I. (2019). Propiedades mecánicas de las mezclas de UHPC reforzadas con fibra de acero expuestas a temperaturas elevadas: efectos de la duración de la exposición y el contenido de fibra. *Compuestos Parte B*(168), 291-301.
- Ahsan, M. B., & Zahid, H. (2018). Uso suplementario de ceniza de cáscara de arroz (RHA) como material cementoso en la industria del hormigón. *Materiales de construcción y edificación*, 178, 1-9.
- Al-Jabri, K. S., Hisada, M., Al-Saidy, A. H., & Al-Oraimi, S. (2009). Comportamiento del hormigón de alta resistencia elaborado con escoria de cobre como agregado fino. *Materiales de construcción y edificación*, 23, 2132-2140.
- Amin, M., Tayeh, B., & Agwa, I. S. (2020). Efecto del uso de aditivos minerales y desechos cerámicos como agregados gruesos sobre las propiedades del concreto de ultra alto desempeño. *Revista de producción más limpia*(273), 73-123.
- Anjaneya, D., Du, H., & Pang, S. D. (2020). Arcilla marina en hormigón de ultra alto rendimiento para sustitución de cargas. *Materiales de construcción y edificación*, 263(120250), 1-9.

- Arora, A., Almujaiddi, A., Kianmofrad, F., Mobasher, B., & Neithalath, N. (2019). Diseño de materiales de hormigón económico de ultra alto rendimiento (UHPC) y evaluación de sus propiedades. *Compuestos de cemento y hormigón*(104), 103-346.
- Bacarji, E., Toledo Filho, R., Koenders, E., Figueiredo, E., & Lopes, J. (2013). Perspectiva de sostenibilidad de los residuos de mármol y granito como rellenos de hormigón. *Materiales de construcción y edificación*(45), 1-10.
- Bae, Y., & Pyo, S. (2020). Efecto del contenido de fibra de acero en las propiedades estructurales y eléctricas de traviesas de hormigón de ultra alto rendimiento (UHPC). *Estructuras de ingeniería*(222), 111-131.
- Bahedh, M., & Jaafar, M. (2018). Utilización de cenizas volantes en hormigón de ultra alto rendimiento como reemplazo del cemento bajo técnica de autoclave. *Estudios de caso en materiales de construcción*(9), 1-202.
- Biskri, Y., Achoura, D., Chelghoum, N., & Mouret, M. (2017). Características mecánicas y de durabilidad del hormigón de alto rendimiento que contiene escoria de acero y escoria cristalizada como agregados. *Materiales de construcción y edificación*(150), 167-178.
- Chen, Z., Guan Lim, J. L., & Yang, E.-H. (2016). Compuestos a base de cemento de ultra alto rendimiento que incorporan bajas dosis de nanotubos de carbono sintetizados por plasma. *Materiales y Diseño*(108), 479-487.
- Chuah, S., Pan, Z., Sanjayan, J., Wang, C. M., & Duan, W. (2014). Nano cemento reforzado y compuestos de hormigón y una nueva perspectiva desde el óxido de grafeno. *Materiales de construcción y edificación*, 73, 113-124.

- Cordeiro, G. C., & Kurtis, K. E. (2017). Efecto del procesamiento mecánico sobre la puzolanicidad de la ceniza de bagazo de caña de azúcar. *Investigación de cemento y hormigón*(97), 41-49.
- da silva, J. B., Pepe, M., & Dias Toledo Filho , R. (2020). Efecto de las altas temperaturas en el rendimiento mecánico y físico del hormigón agregado reciclado normal y de alta resistencia. *Diario de seguridad contra incendios*(117), 103-222.
- de Liang, F., Meng, W., Teng , L., & Khayat, K. H. (2019). Efecto de las fibras de acero con recubrimientos galvanizados sobre la corrosión de barras de acero incrustadas en UHPC. *Compuestos Parte B*(177), 107-445.
- de Liang, F., Meng, W., Teng, L., & Khayat, K. (2020). Efectos del contenido ligero de arena y fibra de acero sobre el comportamiento frente a la corrosión de las varillas de acero incrustadas en UHPC. *Materiales de construcción y edificación*(238), 117-709.
- de Matos, P., Sakata, R., & Gleize, P. (2020). Pastas de cemento de ultra alto rendimiento ecológicas producidas con residuos de cantera como alternativa fillers. *Revista de producción más limpia*(260), 122-308.
- Ding, M., Yu, R., Feng, Y., Wang, S., Zhou, F., Shui, Z., . . . Luyi , C. (2021). Posibilidad y ventajas de producir un hormigón de ultra alto rendimiento (UHPC) con un contenido de cemento ultra bajo. *Materiales de construcción y edificación*(273), 122-203.
- Dingqiang, F., Rui, R., Zhonghe, S., Chunfeng, W., Jinnan, W., & Qiqi , S. (2020). Un enfoque novedoso para desarrollar un concreto ecológico de ultra alto rendimiento (UHPC) con una mesoestructura de empaquetado de partículas avanzadas. *Materiales de construcción y edificación*(265), 120-339.

- Dixit, A., Gupta, S., Pang, S. D., & Kua, H. W. (2019). Valorización de residuos usando biocarbón para reemplazo de cemento y curado interno en concreto de ultra alto desempeño. *Revista de producción más limpia*(238), 117-876.
- Dixit, A., Verma, A., & Pang, S. D. (2021). Doble utilización de residuos en hormigón de ultra alto rendimiento utilizando biocarbón y arcilla marina. *Compuestos de cemento y hormigón*, 120(104049), 1-12.
- Dong, S., Wang, Y., Ashour, A., Han, B., & Ou, J. (2020). Nano / microestructuras y propiedades mecánicas del hormigón de ultra alto rendimiento que incorpora grafeno con diferentes tamaños laterales. *Compuestos Parte A*(137), 106-111.
- Fariad, S., Sahar, M., Bassam, T., & Taher, T. (2021). El efecto del uso de cenizas de cáscara de arroz nano de diferentes grados de combustión en las propiedades del hormigón de ultra alto rendimiento. *290*(123279), 1-14.
- Gameiro, F., de Brito, J., & Correia da Silva, D. (2014). Rendimiento de durabilidad del hormigón estructural que contiene agregados finos de residuos generados por la industria de extracción de mármol. *residuos generados por la industria de extracción de mármol*(59), 654-662.
- Gar, P., Suresh, N., & Bindiganavile, V. (2017). Ceniza de bagazo de caña de azúcar como aditivo puzolánico en concreto para resistencia a temperaturas elevadas sostenidas. *Materiales de construcción y edificación*(153), 929-936.
- Gupta, L. K., & Vyas, A. K. (2018). Impacto en las propiedades mecánicas del mortero de cemento y arena que contiene polvo de granito residual. *Materiales de construcción y edificación*(191), 155-164.

- Gurusideswar , S., Shukla, A., Jonnalagadda, K. N., & Nanthagopalan, P. (2020). Resistencia a la tracción y falla de la composición del concreto de ultra alto desempeño (UHPC) en una amplia gama de tasas de deformación. *Materiales de construcción y edificación*(258), 119-642.
- He, B., Zhu, X., Ren, Q., & Jiang, Z. (2020). Efectos de las fibras sobre la resistencia a la flexión del hormigón de ultra alto rendimiento sometido a ataque criogénico. *Materiales de construcción y edificación*(265), 120-323.
- He, Z.-h., Du, S.-g., & Chen, D. (2018). Microestructura de hormigón de ultra alto rendimiento que contiene escoria de litio. *Diario de materiales peligrosos*(353), 35-43.
- Hoang, A., FehlingC, E., Lai, B., tailandés, D.-K., & Van Chau, V. (2019). Estudio experimental sobre comportamiento estructural de columnas UHPC y UHPFRC confined con tubo de acero. *Estructuras de ingeniería*(187), 457-477.
- Hola, S., Long, G., Zen, X., Xie, Y., & Shang, T. (2021). Diseño de sistema aglutinante de UHPC ecoeficiente basado en empaque físico y optimización del efecto químico. *Materiales de construcción y edificación*(274), 121-382.
- Huang, H., Gao , X., Khayat , K., & Su, A. (2021). Influencia de la alineación y la longitud de las fibras en las propiedades flexurales del UHPC. *Materiales de construcción y edificación*(290), 122-863.
- Huang, W., Kazemi-Kamyab, H., Sun, W., & Scrivener, K. (2017). Efecto de la sustitución del cemento por piedra caliza sobre la hidratación y el desarrollo microestructural del hormigón de ultra alto rendimiento (UHPC). *Compuestos de cemento y hormigón*(77), 86-101.

- Hung, C.-C., Lee, H.-S., & Chan, S. (2019). Efecto rigidizador en compuestos UHPC reforzados con acero: modelo constitutivo y efectos de las fibras de acero, patrones de carga y tamaño de varillas. *Compuestos Parte B*(158), 269-278.
- Isa, M., Pilakoutas, K., & Guadagnini, M. (2021). Determinación de las características de tracción y diseño de UHPC ecoeficientes. *Estructuras*(32), 2174-2194.
- Jain, A., Gupta, R., & Chaudhary, S. (2019). Rendimiento de hormigón autocompactante que comprende residuos de corte de granito como agregado fino. *Materiales de construcción y edificación*(221), 539-552.
- Jain, A., Gupta, R., & Chaudhary, S. (2020). Desarrollo sostenible del hormigón autocompactante mediante el uso de residuos de granito y cenizas volantes. *Materiales de construcción y edificación*(262), 120-516.
- Jain, K. L., Sancheti, G., & Gupta, L. K. (2020). Rendimiento de durabilidad de residuos de granito y hormigón con polvo de vidrio. *Materiales de construcción y edificación*(252), 75-119.
- Jiao, Y., Zhang, Y., Guo, M., Zhang, L., Ning, H., & Liu, S. (2020). Propiedades mecánicas y de fractura del hormigón de ultra alto rendimiento (UHPC) que contiene arena de vidrio residual como material de reemplazo parcial. *Revista de producción más limpia*(277), 123-501.
- Jing, R., Liu, Y., & Yan, P. (2021). Descubriendo el efecto de las cenosferas de cenizas volantes sobre las propiedades macroscópicas y la microestructura del hormigón de ultra alto rendimiento (UHPC). *Materiales de construcción y edificación*(286), 122-977.
- Jittin, V., Bahurudeen, A., & Ajinkya, S. (2020). Utilización de cenizas de cascarilla de arroz para una producción más limpia de diferentes productos de construcción. *Revista de producción más limpia*(263), 121-578.

- Jung, M., Lee, Y.-s., Hong, S.-G., & Moon, J. (2020). Nanotubos de carbono (CNT) en hormigón de ultra alto rendimiento (UHPC): dispersión, propiedades mecánicas e interferencia electromagnética (EMI) efectividad de blindaje (SE). *Investigación de cemento y hormigón*(131), 106-107.
- Kaufmann, J. (2020). Evaluación de la combinación de arena del desierto y cemento sulfoaluminato de calcio para la producción de hormigón. *Materiales de construcción y edificación*(243), 118-281.
- Ki-Bong, P., Kwon, S.-J., & Wang, X.-Y. (2016). Análisis de los efectos de la ceniza de cascarilla de arroz sobre la hidratación de materiales cementosos. *Materiales de construcción y edificación*(105), 196-205.
- Kim, H., Kang, D., Oh, S., & Joo, C. (2018). Evaluación no destructiva de la dispersión de fibras de acero en UHPC utilizando ondas electromagnéticas THz. *Materiales de construcción y edificación*(172), 293-299.
- Li, P., Cao, Y., de HJH, B., & Yu, Q. (2021). Efecto sinérgico de las fibras de acero y los agregados gruesos sobre las propiedades de impacto del hormigón reforzado con fibras de ultra alto rendimiento. *Compuestos de cemento y hormigón*(115), 103-866.
- Li, H., Huang, F., Cheng, G., Xie, Y., Tan, Y., Li, L., & Yi, Z. (2016). Efecto del polvo de granito sobre algunas propiedades mecánicas y de durabilidad del hormigón de arena fabricado. *Materiales de construcción y edificación*(109), 41-46.
- Li, H., Wang, Z., Sun, R., Huang, F., Yi, Z., Yuan, Z., . . . Yang, Z. (2021). Efecto de diferentes polvos de piedra litológica sobre las propiedades de los materiales cementosos. *Revista de producción más limpia*(289), 125-820.

- Li, P., de HJH, B., Chen, W., & Yu, Q. (2020). Optimización y caracterización de polvo de piedra caliza de alto volumen en hormigón sostenible de ultra alto rendimiento. (242), 112-118.
- Li, Y., Pimienta, P., Pinoteau, N., & Tan, K. (2019). Efectos del tamaño del agregado y la inclusión de polipropileno fibras de acero sobre el y desprendimiento explosivo y la presión de poro en el hormigón de ultra alto rendimiento (UHPC) a temperatura elevada. *Compuestos de cemento y hormigón*(99), 62-71.
- Li, Y., Zeng, X., Zhou, J., Holo, S., Umar, H., Long, G., & Xie, Y. (2021). Desarrollo de un hormigón de ultra alto rendimiento ecológico basado en polvo de basalto residual para el ferrocarril Sichuan-Tibet. *Revista de producción más limpia*(312), 127-775.
- Liu, J., Wu, C., Liu, Z., Li, J., Xu, S., Liu, K., . . . Chen, G. (2021). Investigaciones sobre la respuesta de bolas de cerámica agregadas y acero fibra hormigón reforzado a base de geopolimero de ultra alto rendimiento (G-UHPC) para la penetración de proyectiles. *Estructuras compuestas*(255), 112-983.
- Liu, G., Schollbach, K., Li, P., & de HJH, B. (2021). Valorización de la escoria de acero del convertidor en hormigón ecológico de rendimiento ultra alto mediante pretratamiento ambiental con CO₂. *Materiales de construcción y edificación*(280), 122-580.
- Liu, J., Wu, C., Li, J., Liu, Z., Xu, S., Liu, K., . . . Chen, G. (2021). Resistencia al impacto de proyectiles del hormigón de ultra alto rendimiento a base de geopolimero reforzado con fibra
- Mantilla Diaz, M. F., & Villamizar Pabón, j. a. (2019). comportamiento de mezclas de concreto autocompactante en estado endurecido, bajo reemplazo de agregado fino por escoria metálica. Universidad Industrial de Santander.
- (G-UHPC). *Materiales de construcción y edificación*(290), 123-189.

- Mashaly, A. O., Shalaby, B. N., & Rashwan, M. A. (2018). Comportamiento de mortero y hormigón que incorporan lodos de granito como reemplazo del cemento. (169), 800-818.
- Meddah, M., Praveenkumar, T., Vijayalakshmi, M., Manigandan, S., & Arunachalam, R. (2020). Caracterización mecánica y microestructural de cenizas de cascarilla de arroz y nanopartículas de Al₂O₃ en cemento modificado. *Materiales de construcción y edificación*(255), 119-358.
- Medina, G., Sáez del Bosque, I., Frías, M., Sánchez de Rojas, M., & Medina, C. (2017). Residuos de canteras de granito como futuro eco-efficient material cementoso suplementario (SCM): Scientific y consideraciones técnicas. *Revista de producción más limpia*(148), 467-476.
- Meng, W., & Khayat, K. (2018). Efectos de las nanoplaquetas de grafito y nano fibras de carbono sobre la reología, hidratación, contracción, propiedades mecánicas y micro estructura de UHPC. *Investigación de cemento y hormigón*, 64-71.
- Munir, M. J., Saleem Kazmi, S. M., & Wu, Y.-F. (2017). Eficiencia del polvo de mármol residual en el control de la reacción álcali-sílice del hormigón: un enfoque sostenible. *Materiales de construcción y edificación*(154), 590-599.
- Naeimi, N., & Moustafa, M. A. (2021). Comportamiento compresivo y relaciones estrés-tensión de UHPC confinado y no confinado. *Materiales de construcción y edificación*(272), 121-844.
- Niu, Y., Wei, J., & Jiao, C. (2021). Comportamiento de propagación de grietas del hormigón de ultra alto rendimiento (UHPC) reforzado con fibras de acero híbridas bajo carga flexural. *Materiales de construcción y edificación*(294), 123-510.

- Ostrowski, K., Stefaniuk, D., Sadowski, Ł., Krzywiński, K., & Gicala, M. (2020). Uso potencial de desechos de granito provenientes del procesamiento de rocas para la aplicación como agregado grueso en concreto autocompactante de alto desempeño. (238), 717-794.
- Qi, J., Wu, Z., Ma, Z. J., & Wang, J. (2018). Comportamiento de extracción de fibras de acero rectas y de punta en forma de gancho en matriz UHPC con varios ángulos embebidos. *Materiales de construcción y edificación*(191), 764-774.
- Randl, N., Steiner, T., Ofner, S., Baumgartner, E., & Mészöly, T. (2014). Desarrollo de mezclas de UHPC desde un punto de vista ecológico. *Materiales de construcción y edificación*(67), 373-378.
- Rao, K., Desai, V., & Mohan, D. (2012). Análisis probabilístico de la fractura de hormigón Modo II con agregado fino de piedra de granito triturado en sustitución de arena. (27), 319-330.
- Ríos-Parada, V., Jiménez-Quero, V., & Valdez-Tamez, P. (2017). Caracterización y uso de una ceniza de bagazo de caña de azúcar mexicana sin tratar como material suplementario para la preparación de hormigones ternarios. *Materiales de construcción y edificación*(157), 83-95.
- Rojas, A. E. (2019). Influencia de residuos de cerámica como sustitución porcentual del cemento sobre la resistencia a la compresión del concreto. Trujillo, Peru. Obtenido de <http://hdl.handle.net/11537/21287>
- Sadek, D. M., El-Attar, M. M., & Ali, H. A. (2016). Reutilización de polvos de mármol y granito en hormigón autocompactante para el desarrollo sostenible. (121), 19-32.
- Safari, j., Mirzaei, M., Rooholamini, H., & Hassani, A. (2018). Efecto de la ceniza de cáscara de arroz y la fibra macrosintética sobre las propiedades del hormigón autocompactante. 175, 371-380.

- Shamsad, A., Ibrahim, H., & Mohammed, M. (2014). Desarrollo de mezclas de UHPC utilizando natural y materiales de desecho industriales como reemplazos parciales de humo de sílice y arena. (H. c. Científica, Ed.) *Revista Mundial Científica*, 8.
- Shi, F., Yin, S., Pham, T. M., Tuladhar, R., & Hao, H. (2021). Rendimiento de extracción y flexión de grupos silano y grupos hidrófilos UHPC reforzado con fibra de polipropileno injertado. *Materiales de construcción y edificación*(277), 122-335.
- Shin, W., & Yoo, D.-Y. (2020). Influencia de las fibras de acero corroídas a través de múltiples microfisuras en el comportamiento de tracción del hormigón de ultra alto rendimiento. *Materiales de construcción y edificación*(259), 120-428.
- Singh, L., Karade, S., Bhattacharyya, S., Yousuf, M., & Ahalawat, S. (2013). Papel beneficioso de la nanosílice en materiales a base de cemento: una revisión. *Materiales de construcción y edificación*(47), 1069-1077.
- Singh, S., Khan, S., Khandelwal, R., Chugh, A., & Nagar, R. (2016). Rendimiento de hormigón sostenible que contiene residuos de corte de granito. *Revista de producción más limpia*(119), 86-98.
- Singh, S., Nagar, R., Agrawal, V., Rana, A., & Tiwari, A. (2016). Utilización sostenible de residuos de corte de granito en hormigón de alta resistencia. *Revista de producción más limpia*(116), 223-235.
- Su, Y., Li, J., Wu, C., Wu, P., & Li, Z.-X. (2016). Efectos de las fibras de acero sobre la resistencia dinámica del UHPC. *Materiales de construcción y edificación*(114), 708-718.
- Tayeh, B., Al Saffar, D., & Alyousef, R. (2020). La utilización de áridos reciclados en hormigón de alto rendimiento: una revisión. *Journal of material research and technology*(9), 849-881.

- Thomas, B. S. (2018). Hormigón verde parcialmente compuesto de ceniza de cáscara de arroz como material cementante suplementario - Una revisión completa. *Revisiones de energías renovables y sostenibles*, 82(3913-3923), 1-11.
- Umasabor, R. I., & Okovido, J. O. (2018). Evaluación de la resistencia al fuego del hormigón de ceniza de cáscara de arroz. *Heliyon*(4), 1-35.
- Van Tuan, N., Ye, G., Breugel, K., & Copuroglu, O. (2011). Hidratación y microestructura del hormigón de ultra alto rendimiento que incorpora ceniza de cáscarade arroz. *Investigación de cemento y hormigón*(41), 1104-1111.
- Van Tuan, N., Ye, G., van Breugel, K., & Copuroglu, O. (2011). Hidratación y microestructura del hormigón de ultra alto rendimiento que incorpora ceniza de cáscara de arroz. *Investigación de cemento y hormigón*, 41, 1104-1111.
- Van, V.-T.-A., Rößler, C., Bui, D.-D., & Ludwig, H.-M. (2013). Estructura mesoporosa y reactividad puzolánica de cenizas de cascarilla de arroz en sistema cementoso. *Materiales de construcción y edificación*(43), 208-216.
- Vigneshwari, M., Arunachalam, K., & Angayarkanni, A. (2018). Reemplazo de humo de sílice con ceniza de cáscara de arroz tratada térmicamente en concreto en polvo reactivo. *Revista de producción más limpia*, 188, 264-277.
- Vijayaraghavan, J., Jude, A., & Thivya, J. (2017). El efecto de la escoria de cobre, la escoria de hierro y el agregado de hormigón reciclado sobre las propiedades mecánicas del hormigón. *Política de recursos*(53), 219-225.
- Wang, X., Yu, R., Shui, Z., Qiulei, S., Liu, Z., bao, M., . . . Wu, S. (2019). Tratamiento optimizado de residuos reciclados de construcción y demolición en el desarrollo de hormigón

- sostenible de ultra alto rendimiento. *desarrollo de hormigón sostenible de ultra alto rendimiento*(221), 805-816.
- Wang, X., Yu, R., Shui , Z., Zhao, Z., Qiulei, C., & Yang, B. (2018). Desarrollo de un novedoso producto de construcción más limpio: hormigón de ultra alto rendimiento que incorpora relaves de plomo y zinc. *Revista de producción más limpia*(196), 172-182.
- Wei , J., Xie , Z., Zhang, W., Luo, X., Yang , Y., & Chen , B. (2021). Estudio experimental de columnas UHPC reforzadas con tubos de acero circulares bajo carga axial. *Estructuras de ingeniería*(230), 111-599.
- Wei Huang, W., Kazemi-Kamyab, H., Hadi, W., & Scrivener, K. (2017). Efecto de la sustitución del cemento por piedra caliza sobre la hidratación y el desarrollo microestructural del hormigón de ultra alto rendimiento (UHPC). *Compuestos de cemento y hormigón*(77), 86-101.
- Wei, H., Zhou, A., Liu, T., Zou, D., & Jian, H. (2020). Rendimiento dinámico y medioambiental del hormigón ecológico de rendimiento ultra alto que contiene vidrio de tubo de rayos catódicos de desecho como sustitución de la arena de río. *Recursos, conservación y reciclaje*(162), 105-121.
- Yalçinkaya, Ç., & Yazıcı, H. (2017). Efectos de la temperatura ambiente y la humedad relativa en la contracción temprana de UHPC con aditivos minerales de alto volumen. *Materiales de construcción y edificación*(144), 252-259.
- Yang , R., Yu, R., Shui, Z., Gao, X., Xiao, X., Zhang, X., . . . He, Y. (2019). Diseño con bajo contenido de carbono de un hormigón de ultra alto rendimiento (UHPC) que incorpora escoria de fósforo. *Revista de producción más limpia*(240), 118-157.

- Yang, L., Shi, C., & Wu, Z. (2019). Técnicas de mitigación para la contracción autógena del hormigón de ultra alto rendimiento - Una revisión. *Compuestos Parte B*(178), 10-456.
- Yang, R., Yu, R., Shui, Z., Gao, X., Xiao, X., Dingqiang, V., . . . He, Y. (2020). Análisis de viabilidad del tratamiento del polvo de roca reciclado como material alternativo ecológico en hormigón de ultra alto rendimiento (UHPC). (258), 120-673.
- Yang, R., Yu, R., Shui, Z., Gao, X., Han, J., Lin, G., . . . He, Y. (2020). Hormigón de rendimiento ultra alto respetuoso con el medio ambiente y la economía que incorpora polvos de cantera adecuados. *Revista de producción más limpia*(260), 112-121.
- Yang, R., Yu, R., Shui, Z., Gao, X., Xiao, X., Zhang, X., . . . He, Y. (2019). Diseño con bajo contenido de carbono de un hormigón de ultra alto rendimiento (UHPC) que incorpora escoria de fósforo. *Revista de producción más limpia*(240), 118-157.
- Yoo, D.-Y., & Yoo, I. (2021). Polvo de vidrio para pantallas de cristal líquido como relleno para mejorar la resistencia a la extracción de la fibra de acero en concreto de ultra alto rendimiento. *Revista de ingeniería de la construcción*(33), 101-846.
- Yoo, D.-Y., Chun, B., & Kim, J.-J. (2019). Efecto del agente expansivo a base de sulfoaluminato de calcio sobre el comportamiento de extracción dependiente de la velocidad incrustado de fibras de acero recto en UHPC. *Investigación de cemento y hormigón*(122), 196-211.
- Yoo, D.-Y., Chun, B., & Kim, J.-J. (2020). Rendimiento de adherencia de fibras de acero de tipo arco desgastadas en hormigón de ultra alto rendimiento. *Compuestos de cemento y hormigón*(109), 103-538.
- Yoo, D.-Y., Yu, I., & Zi, G. (2021). Efectos de la geometría de la fibra y el polvo de vidrio de pantalla de cristal líquido residual sobre las propiedades mecánicas del hormigón de ultra alto rendimiento. *Materiales de construcción y edificación*(266), 120-938.

- Yu , L., & Wu, R. (2020). Uso de óxido de grafeno para mejorar las propiedades del hormigón de ultra alto rendimiento con áridos reciclados finos. *Materiales de construcción y edificación*(259), 120-657.
- Yu , R., Spiesz, P., & de HJH, B. (2015). Desarrollo de un Hormigón de Ultra Alto Rendimiento (UHPC) ecológico con usos eficientes de cemento y aditivos minerales. *Compuestos de cemento y hormigón*(55), 383-394.
- Yu, J., Zhang, B., Chen, W., & He, J. (2020). Investigación numérica experimental y de múltiples escalas de concreto reforzado con fibra de rendimiento ultra alto (UHPFRC) con diferente contenido de agregado grueso y fracción de volumen de fibra . *Materiales de construcción y edificación*(260), 120-444.
- Zhang, D., Zhang , Y., Dasari , A., Hai Tan , K., & Weng , Y. (2021). Efecto de la distribución espacial de las fibras de polímero en la prevención del desconchado de UHPC a altas temperaturas. *Investigación de cemento y hormigón*(140), 106-281.
- Zhang, H., Ji, T., él , B., & él, L. (2019). Rendimiento de hormigón de ultra alto rendimiento (UHPC) con cemento parcialmente reemplazado por polvo de granito molido (GGP) en diferentes condiciones de curado. *Materiales de construcción y edificación*(213), 469-482.
- Zhang, X., Zhao, S., Liu, Z., & Wang, F. (2019). Utilización de escoria de acero en hormigón de ultra alto rendimiento con mayor respeto por el medio ambiente. *Materiales de construcción y edificación*(214), 28-36.
- Zhang, Y., Zhu, Y., Qu, S., Kumar, A., & Shao, X. (2020). Mejora de la resistencia a la flexión y tracción del UHPC de fundición en capas con fibras de acero alineadas. *Materiales de construcción y edificación*(251), 118-193.

Zongyun Mo, Z., Wang, R., & Gao, X. (2020). Hidratación y propiedades mecánicas de la matriz UHPC que contiene piedra caliza y diferentes niveles de metacaolín. *Materiales de construcción y edificación*(256), 119-454

Apéndices

Apéndice A. Resumen de hallazgos y resultados para materiales de origen natural

Origen del material	Material Adicionado	Material sustituido	Nivel óptimo de sustitución	Materiales Utilizados	Tratamiento	Referencia bibliográfica	Resultados y conclusiones
Natural	Residuos de canteras de diabasa	Arena de Quarzo	No significativa	cemento portland, humo de sílice, polvo de cuarzo, Se utilizó un superplastificante (SP) TecFlow 8000 (GCP) y la misma relación agua/ligante	No fue sometido a procesamientos químicos, ni a agregados	Se trituró el material	Se pueden utilizar los polvos de cantera alternativos entre ellos la diabasa, en la producción de materiales a base de concreto de ultra alto rendimiento, pero que en general, la incorporación de los residuos de cantera de diabasa no dio lugar a diferencias significativas en la resistencia.

Origen del material	Material Adicionado	Material sustituido	Nivel óptimo de sustitución	Materiales Utilizados	Tratamiento	Referencia bibliográfica	Resultados y conclusiones
Natural	Piedra caliza	Cemento	66%	Un cemento resistente a los sulfatos CEM I 52.5N, Betocarb HP-OG, polvo de piedra caliza, arena de cuarzo, humo de sílice, agua.	No se realizó proceso químico para alteración del material.	Huang, Kazemi-Kamyab, Sun, & Scrivener, 2017	La sustitución del cemento por piedra caliza en el UHPC, mejora sus propiedades mecánicas, el desarrollo micro estructural y la hidratación que puede aumentar hasta en un 54% la resistencia a la compresión
Natural	Residuos de granito	Agregados gruesos	50%	Relación agua ligante .28, polvo de sílice, cemento, agregado fino,	se corta en bloques cuboides y, posteriormente, se tritura y con una trituradora de mandíbulas para su fragmentación.	Ostrowski, Stefaniuk, Sadowski, Krzywiński, & Gicala, 2020	La resistencia a la compresión promedio más alta se obtuvo para el concreto, con una participación del 50% de granos irregulares de agregado grueso.

Origen del material	Material Adicionado	Material sustituido	Nivel óptimo de sustitución	Materiales Utilizados	Tratamiento	Referencia bibliográfica	Resultados y conclusiones
Natural	Arcilla marina	Arena de Quarzo	30%	Cemento CEM-I 52.5 N, humo de sílice. superplastificante basado en poli carboxilato (SP), también se utilizó polvo cuarzo.	Se secó en un horno a 105 ° C durante 48 h seguido de trituración a 500 RPM utilizando un molino de bolas	Anjaneya, Du, & Pang, 2020	Este tipo de material no contribuye de forma significativa a mejorar la resistencia a la compresión y se requieren más estudios para encontrar formas de mejorarla. La caída en la resistencia a la compresión por el uso de arcilla marina como sustituto en UHPC puede ser compensada con el uso de Bio carbón.
Natural	Bio carbón	Polvo de Quarzo	21%	Cemento CEM-I 52.5 N, humo de sílice.	se preparó a partir de los residuos de	Dixit, Verma, & Pang, 2021	La adición de bio carbón afectó la tasa de desarrollo de resistencia del UHPC de

Origen del material	Material Adicionado	Material sustituido	Nivel óptimo de sustitución	Materiales Utilizados	Tratamiento	Referencia bibliográfica	Resultados y conclusiones
				superplastificante basado en poli carboxilato (SP), también se uso bio carbón y arcilla marina	madera de aserrín, sometándose a pirólisis a 500°C y con cuidado para que los gases no vuelvan a los poros		1 día a 7 días en comparación con la mezcla de control (5,2%) reducción que fue más prominente a los 28 días (10.67%).
Natural	Polvo de granito	Agregados finos	20%	residuos de granito, agregado fino, cemento, agua, dosis de super plastificante	No fue sometido a procesamientos químicos, ni a agregados	Jain, Gupta , & Chaudhary, 2019	La incorporación del GWC incrementa la demanda de superplastificante y afecta de forma negativa las características frescas, pero las mantiene en un rango satisfactorio excepto cuando el reemplazo del

Origen del material	Material Adicionado	Material sustituido	Nivel óptimo de sustitución	Materiales Utilizados	Tratamiento	Referencia bibliográfica	Resultados y conclusiones
							agregado fino por GCW es de un 100%.
Natural	Polvo de roca reciclada	Arena de Quarzo	20%	Cemento I, Humo de sílice, cenizas se aplican como materiales cementantes, arena de cuarzo y polvo de roca, superplastificante	No fue sometido a procesamientos químicos, ni a agregados	Yang, y otros, 2020	El polvo de roca reciclado en reemplazo de la arena de Quarzo, mejora la conexión entre los agregados y la pasta de cemento, haciéndose más fuerte debido a la mayor rugosidad en la superficie del polvo de roca; esto favorece las propiedades mecánicas.
Natural	Nano cenizas de cascara de arroz	Cemento	20%	UHPC, ceniza cascara de arroz	Quema controlada de RHA en el rango de 700 - 800 C	Jittin, Bahurudeen, & Ajinkya, 2020	La calidad de la ceniza de cáscara de arroz como material cementante, está determinada por factores

Origen del material	Material Adicionado	Material sustituido	Nivel óptimo de sustitución	Materiales Utilizados	Tratamiento	Referencia bibliográfica	Resultados y conclusiones
					mejora su reactividad.		tales como la calidad de la materia prima, el método de incineración, el tiempo y la temperatura de combustión.
Natural	Piedra caliza	Humo de Sílice	20%	Cemento I, agregado (arena de dunas), superplastificante, microsíllica.	No fue sometido a procesamientos químicos, ni a agregados	Shamsad, Ibrahim, & Mohammed, 2014	El uso de polvo de piedra caliza para reemplazar el cemento y el humo de sílice puede mejorar la compacidad de la matriz y que la naturaleza esférica fina de sus partículas llena de mejor manera las cavidades aumentando el agua libre en la mezcla
Natural	Polvo de granito	Cemento	15%	cemento portland, polvo de granito	Se procesó en el laboratorio antes	Zhang, Ji, él , & él, 2019	Aun cuando la sustitución del cemento por GGP no

Origen del material	Material Adicionado	Material sustituido	Nivel óptimo de sustitución	Materiales Utilizados	Tratamiento	Referencia bibliográfica	Resultados y conclusiones
				Los otros materiales para preparar UHPC incluyen humo de sílice (SF), polvo de cuarzo (QP), arena de cuarzo (QS), fibras de acero, superplastificante y agua.	de la colada del hormigón, luego se muele.		influyó en la morfología y composición química de la hidratación, la estructura de los poros se modificó significativamente.
Natural	Polvo de basalto	Cemento	15%	El 30% del peso de cemento fue reemplazado por polvo de piedra en el material cementoso mezclado, cemento,	el proceso de molienda, la especificación más grande del área de superficie del polvo de piedra en esta	Li, y otros, 2021	Cuanto más fino es el polvo de basalto, más tiende a aumentar la contracción autógena total y en contraprestación mejora la resistencia a la compresión. Esta propiedad

Origen del material	Material Adicionado	Material sustituido	Nivel óptimo de sustitución	Materiales Utilizados	Tratamiento	Referencia bibliográfica	Resultados y conclusiones
				agua, superplastificantes, polvo de cuarzo y humo de sílice.	investigación se establece en 700 ± 30 m ² /kg.		también está determinada por el régimen de curado.
Natural	Polvo de piedra de cantera	Cemento	10%	El cemento fue reemplazado por polvo de piedra, cemento, agua, superplastificantes, polvo de cuarzo y humo de sílice.		Li, y otros, 2021	Los polvos de piedra como granito y Cuarcita prolongan el tiempo de fraguado y mejoran la resistencia a la compresión
Natural	Residuos de granito	Cemento	5%	Cemento, áridos finos, agregados gruesos, agua, superplastificantes	Estos residuos son sometidos a molienda luego de estar secos.	Bacarji, Toledo Filho, Koenders, Figueiredo, & Lopes , 2013	La sustitución del cemento por materiales de relleno no puzolánicos como residuos de mármol o granito afectará el desarrollo de la microestructura en

Origen del material	Material Adicionado	Material sustituido	Nivel óptimo de sustitución	Materiales Utilizados	Tratamiento	Referencia bibliográfica	Resultados y conclusiones
							términos de empaquetamiento y resistencia interna; reducirá la cantidad de material cementicio en la matriz y afectará el desarrollo de las propiedades mecánicas, como la resistencia a la compresión, debido a su naturaleza no reactiva.
Natural	Bio carbón	Cemento	2%	Cemento portland, humo de sílice, polvo de cuarzo, y arena de sílice y super plastificante reductor de agua.	Se preparó mediante pirólisis de aserrín de madera mezclada, producido como subproducto industrial.	Dixit, Gupta, Pang , & Kua , 2019	En términos de rigidez y tenacidad, la utilización de bio carbón en UHPC es moderadamente negativo, debido a que el bio carbón contribuye a la producción de productos de

Origen del material	Material Adicionado	Material sustituido	Nivel óptimo de sustitución	Materiales Utilizados	Tratamiento	Referencia bibliográfica	Resultados y conclusiones
					Las condiciones de preparación, incluida la temperatura, la velocidad de calentamiento y el tiempo de residencia.		hidratación, pero puede reducir la capacidad de absorción de energía del UHPC.
Natural	Arena del desierto	Agregados finos	Disminuye en todos los casos	Cemento, polvo de cuarzo, yeso, arena ¼ mm, grava 4/8 mm agua, superplastificante reductor de agua.	Se combino la arena del desierto con mezclas de CSA / cemento de yeso, usando arena artificial	Kaufmann, 2020	Las propiedades de clasificación y empaque de la arena del desierto no son ideales para obtener UHPC por lo cual es necesaria la aplicación de un ligante base de sulfoaluminato de calcio (CSA) y yeso.

Origen del material	Material Adicionado	Material sustituido	Nivel óptimo de sustitución	Materiales Utilizados	Tratamiento	Referencia bibliográfica	Resultados y conclusiones
					del desierto que imita las propiedades principales características de arena tomada.		
Natural	Lodos de granito	Clinker	Disminuye en todos los casos	Cemento, arena de 0,08 mm, polvo de cuarzo, superplastificante, agua.	se recogieron en montones de escombros y fueron llevados a un laboratorio a secado y caracterización.	Medina, Sáez del Bosque, Frías, Sánchez de Rojas, & Medina, 2017	La inclusión de lodos de granito en el cemento no alteró la relación entre la resistencia a la compresión y el tiempo de curado, pero que indujeron una disminución en la resistencia, que se agravó con el aumento de la tasa de reemplazo.

Apéndice B. *Resumen de hallazgos y resultados para materiales de origen Industrial*

Origen del material	Material Adicionado	Material sustituido	Nivel óptimo de sustitución	Materiales Utilizados	Tratamiento	Referencia bibliográfica	Conclusiones
Industrial	Residuos de vidrio CRT	Arena de Cuarzo (QS)	75%	Cemento SF (Humo de sílice) Agua QS (Arena de Cuarzo) GS (Arena de vidrio) RS (Arena de río) QP (Polvo de Cuarzo) Fibra de acero HRWRA	Desechos de vidrio sometidos a procesos físicos de trituración y pulverización.	Jiao, y otros, 2020	La resistencia a la compresión en UHPC mejoró cuando el reemplazo de QS por GS es del 75%.

Origen del material	Material Adicionado	Material sustituido	Nivel óptimo de sustitución	Materiales Utilizados	Tratamiento	Referencia bibliográfica	Conclusiones
Industrial	Residuos de construcción y demolición	cemento	50%	Cemento Cenizas volantes Humo de sílice Arena de río Súper-plastificante Agua C&D (Residuos de construcción y demolición)	Se realizan 3 procesos de trituración donde se limpian y criban los desechos.	Wang, y otros, 2019	La resistencia a la compresión también tiende a disminuir con el incremento de la proporción de reemplazo con C&D en los primeros 7 días de curado.
Industrial	Polvo de fibra de vidrio	Polvo de Sílice	50%	Cemento portland tipo 1 Humo de sílice Harina de sílice Arena LCD (Polvo de vidrio) Arena de sílice	Se obtiene como desecho y no se realiza ningún tratamiento	Yoo & Yoo, 2021	La relación de reemplazo óptima (es decir, 50%) se determinó en base a los resultados preliminares de la prueba de extracción: la

Origen del material	Material Adicionado	Material sustituido	Nivel óptimo de sustitución	Materiales Utilizados	Tratamiento	Referencia bibliográfica	Conclusiones
				Super-platificante			fuerza de unión promedio de la fibra de acero recta de forma circular en UHPC aumentó al aumentar la relación de reemplazo hasta un 50% (con un intervalo del 25%) y luego disminuyó.
Industrial	Cenizas volantes	Adición de material	40%	OPC de cemento Portland ordinario humo de sílice condensada (CSF)	Se realizan procesos de recolección, purificación,	Jing, Liu, & Yan, 2021	Un contenido relativamente alto de FAC genera una mayor

Origen del material	Material Adicionado	Material sustituido	Nivel óptimo de sustitución	Materiales Utilizados	Tratamiento	Referencia bibliográfica	Conclusiones
				Cenosfera de cenizas volantes (FAC)	filtración y se someten a una extracción por fuerza centrífuga		porosidad de huecos y una menor densidad de la matriz de UHPC.
				Arena de río (arena de cuarzo) con un tamaño de partícula que varía entre 0,063 a 2 mm como agregados finos.			
Industrial	Escoria de alto horno	Cemento	30%	Cemento Escoria de alto horno Humo de sílice Cuarzo triturado	Para activar la escoria de alto horno se utilizó KOH.	Abdulkareem, Ben Fraj, Bouasker, & Khelidj, 2018	La presencia de partículas de escoria de alto horno hizo que la mezcla fuera más

Origen del material	Material Adicionado	Material sustituido	Nivel óptimo de sustitución	Materiales Utilizados	Tratamiento	Referencia bibliográfica	Conclusiones
				<p>Súper-plastificante KOH (Hidróxido de potasio) Agua</p>	<p>(Hidróxido de potasio)</p>		<p>cohesiva y disminuyera la deshidratación, mejorando su densidad de empaquetamiento, acelerando el fraguado y la hidratación del cemento, lo que aumenta la resistencia a la compresión del UHPC a una edad temprana.</p>

Origen del material	Material Adicionado	Material sustituido	Nivel óptimo de sustitución	Materiales Utilizados	Tratamiento	Referencia bibliográfica	Conclusiones
Industrial	Cenizas volantes	Cemento	20%	Cemento Humo de sílice Cenosferas de cenizas volantes Súper-plastificante Arena de cuarzo Agua	Se realizan procesos de recolección, purificación, filtración y se someten a una extracción por fuerza centrífuga.	Jing, Liu, & Yan, 2021	La disminución de la permeabilidad ocurre debido a que las adiciones de cenizas volantes ocasionan una reducción en el tamaño de los poros y una menor transferencia de líquido desde su superficie hacia su interior.

Origen del material	Material Adicionado	Material sustituido	Nivel óptimo de sustitución	Materiales Utilizados	Tratamiento	Referencia bibliográfica	Conclusiones
Industrial	Residuos de construcción y demolición	Agregados gruesos	19%	Cemento Cenizas volantes Humo de sílice Arena de río Súper-plastificante Agua C&D (Residuos de construcción y demolición)	Los desechos de C&D se utilizan para reemplazar el cemento y la arena de río de forma sincrónica y se utiliza un superplastificante a base de éter poli carboxílico.	Wang, y otros, 2019	La resistencia máxima a la compresión (alrededor de 125 MPa) se obtuvo en UHPC sin residuos de C & D, mientras que al reemplazar el 50% de cemento y el 19% de agregado simultáneamente se obtuvo una resistencia a la compresión de 109 Mpa

Origen del material	Material Adicionado	Material sustituido	Nivel óptimo de sustitución	Materiales Utilizados	Tratamiento	Referencia bibliográfica	Conclusiones
Industrial	Desechos de cerámica	Agregados gruesos	10%	Cemento, arena de 0,08 mm, polvo de cuarzo, súper-plastificante, agua. Residuos de cerámica	Se introdujeron en el concreto resinas que utilizaban MK o SF como reemplazo del cemento en proporciones de 10% y 20%.	Rojas, A. E., 2019	La resistencia a la compresión en las muestras de concreto aumentó cuando se le agregó un 10% de residuos de cerámica y disminuyó cuando el porcentaje de sustitución fue de 15% y 20% con respecto a las muestras de referencia.

Origen del material	Material Adicionado	Material sustituido	Nivel óptimo de sustitución	Materiales Utilizados	Tratamiento	Referencia bibliográfica	Conclusiones
Industrial	Nano materiales	Adición de material	4%	Grafeno Nano partículas de sílice Cemento Agua Súper-plastificantes Fibras de acero	Se debe generar una dispersión uniforme utilizando varios tipos de métodos mecánicos, que incluyen ultrasonidos, molienda de bolas, mezclado por cizallamiento, calandrado, agitación y extrusión.	Chuah, Pan, Sanjayan, Wang, & Duan, 2014	El concreto que contenía 4% en peso de nano sílice registró resistencias a la compresión mayores que las muestras de control en un factor de 1.7 veces, después de 28 días. Pero, que con una adición del 5% en peso de nano sílice, las propiedades mecánicas comienzan a

Origen del material	Material Adicionado	Material sustituido	Nivel óptimo de sustitución	Materiales Utilizados	Tratamiento	Referencia bibliográfica	Conclusiones
							disminuir en comparación con la dosis óptima del 4%.
Industrial	Geo polímeros	Adición de material	2%	Escoria de alto horno molida Las cenizas volantes Humo de sílice Hidróxido de sodio Silicato de sodio Arena fina Arena media Arena gruesa Súper-plastificantes Agua	El uso combinado de hidróxido de sodio (NaOH) forma escamas con una pureza del 98% y silicato de sodio (Na ₂ SiO ₃) se preparó la solución como activador alcalino.	Liu, y otros, 2021	El uso híbrido de fibras de acero al 1% en volumen y fibras de basalto al 1% en volumen (G-UHPC-3) mostró una mejora de la resistencia a la compresión (alcanzando 110 MPa) en comparación con

Origen del material	Material Adicionado	Material sustituido	Nivel óptimo de sustitución	Materiales Utilizados	Tratamiento	Referencia bibliográfica	Conclusiones
				Cemento	Entonces		el uso único de
				Fibras de acero	un_2SiO_3		fibras de acero al
				Fibras de basalto	solución tiene un		2% en volumen
					SiO_2 a		(G-UHPC-2).
					Na_2 Relación de		
					O de 2,0 y 65%		
					de contenido de		
					agua por peso		
					total.		
Industrial	Fibra de acero reciclado	Adición de material	2%	Cemento	No se realizó	Yu, Zhang,	El aumento de
				Polvo de cuarzo	proceso químico	Chen, & He,	fibra fortalece de
				Humo de sílice	para alteración	2020	la tenacidad a la
				Arena de cuarzo-1	del material.		flexión y la
				Arena de cuarzo-2			ductilidad que
				Basalto triturado			puede mejorar la
				Fibras de acero			resistencia a la
				Súper-plastificante			compresión, que

Origen del material	Material Adicionado	Material sustituido	Nivel óptimo de sustitución	Materiales Utilizados	Tratamiento	Referencia bibliográfica	Conclusiones
				Agua			es uno de los parámetros clave para el diseño de estructuras y componentes de concreto.
Industrial	Fibra de acero reciclado	Adición de material	2%	Agua Cemento tipo 1 Portland Humo de Sílice Arena de sílice Harina de sílice Súper-plastificante Fibra de acero: Tipo S (Recta) y Tipo T (Retorcida)	No se realizó proceso químico para alteración del material.	Shin & Yoo, 2020	El uso de la fibra retorcida fue más eficaz para mejorar la deformabilidad del UHPC que la fibra recta, pero ambos proporcionaron capacidades de absorción de

Origen del material	Material Adicionado	Material sustituido	Nivel óptimo de sustitución	Materiales Utilizados	Tratamiento	Referencia bibliográfica	Conclusiones
							energía similares, y que, la capacidad de absorción de energía del UHPFRC se vio significativamente más afectada por la corrosión de la fibra de acero, que por el tipo de fibra utilizado.
Industrial	Fibra de acero reciclado	Adición de material	2%	Cemento tipo 1 Portland Agua Arena de sílice Polvo de sílice	Se diseña un dispositivo mejorado para la fundición UHPC para alinear las	Zhang, Zhu, Qu, Kumar, & Shao, 2020	Se evaluaron los efectos de las fibras sobre el comportamiento mecánico del

Origen del material	Material Adicionado	Material sustituido	Nivel óptimo de sustitución	Materiales Utilizados	Tratamiento	Referencia bibliográfica	Conclusiones
				Humo de sílice	fibras de acero.		material y se
				Cenizas volantes			observó que con
				Súper-plastificante			2% en volumen
				Fibra de acero			de fibras, se
				recta			incrementa la
				Fibra de acero			resistencia a la
				enganchada			flexión y que
							agregar un 1% en
							volumen
							adicional de fibras
							rectas es
							significativamente
							mayor que
							agregar este miso
							volumen de fibras
							enganchadas.

Origen del material	Material Adicionado	Material sustituido	Nivel óptimo de sustitución	Materiales Utilizados	Tratamiento	Referencia bibliográfica	Conclusiones
Industrial	Fibra de acero reciclado	Adición de material	2%	Cemento tipo 1 Portland Humo de sílice Arena de sílice Polvo de cuarzo Agua Súper-plastificante Fibra de acero	No se realizó proceso químico para alteración del material.	Hung, Lee, & Chan, 2019	La inclusión de una fracción de volumen del 2% de fibras de acero mejoraron significativamente la rigidez y resistencia de UHPC.