

DOSIFICACIONES, PROPIEDADES MECÁNICAS Y PREMISAS DE DISEÑO DE LOS CONCRETOS DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES (UHPC)

Diana Marcela Suárez Lineros

Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito (Bogotá, Colombia)

Ingeniera civil, Universidad Piloto de Colombia. Estudiante de la maestría en Ingeniería civil con énfasis en estructuras, Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, Bogotá D.C., Colombia. Agosto del 2024
E-mail: diana.suarez-l@mail.escuelaing.edu.co

RESUMEN

El concreto de ultra altas prestaciones (UHPC) representa un avance significativo en materiales y estructuras debido a su alta resistencia a compresión (superior a 150 MPa), ductilidad a la tracción, elevado módulo de elasticidad y durabilidad superior. Esta investigación examina la información bibliográfica disponible sobre UHPC, destacando sus propiedades mecánicas y los enfoques de diseño de mezcla que permiten alcanzar dichas propiedades, revisando sus componentes y su influencia en las mezclas, así como la definición de modelos constitutivos indicados en guías de diseño internacionales.

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

ABSTRACT

Ultra-high performance concrete (UHPC) represents a significant advance in materials and structures due to its high compressive strength (greater than 150 MPa), tensile ductility, high modulus of elasticity, and superior durability. This research examines the available literature on UHPC, highlighting its mechanical properties and the mix design approaches to achieve these properties. It reviews its components and their influence on mixes, as well as the definition of constitutive models indicated in international design guidelines.

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

1. INTRODUCCIÓN

La industria del concreto está en constante evolución, buscando mejorar los concretos tradicionales para lograr un rendimiento superior. En este contexto, los concretos de ultra altas prestaciones (UHPC) y los concretos de ultra altas prestaciones reforzados con fibra (UHPRFC) han surgido como materiales revolucionarios que redefinen los límites de las capacidades mecánicas del concreto convencional (Mishra & Singh, 2019), (El-Helou et al., 2022a) Estos materiales destacan por su alta resistencia, durabilidad y ductilidad, abriendo nuevas

posibilidades en proyectos arquitectónicos y estructurales (Gannon, 2016).

El UHPC/UHPRFC se elabora mediante una cuidadosa selección de sus componentes, proporciones precisas y avanzadas técnicas de mezclado. Su microestructura densa y homogénea le otorga una resistencia extraordinaria a factores ambientales como la humedad, abrasión y exposición a ambientes agresivos (Akhnoukh & Buckhalter, 2021).

Para asegurar la fiabilidad de las estructuras construidas con UHPC/UHPRFC, se han establecido guías que abarcan la composición del

material, procedimientos de mezcla, métodos de curado y requisitos de rendimiento estructural. Sin embargo, en Colombia aún no existen especificaciones técnicas para su dosificación, elaboración y aplicación correcta.

A medida que la construcción evoluciona, el UHPC/UHPFRC sigue destacándose en los avances transformadores, remodelando el panorama de las infraestructuras modernas y el diseño arquitectónico. Esta investigación tiene como objetivo proporcionar un conocimiento amplio del UHPC/UHPFRC, abarcando sus consideraciones y premisas de diseño estructural, diseños de mezcla, dosificaciones y propiedades mecánicas, contribuyendo así al conocimiento sobre este revolucionario material de construcción.

En los siguientes capítulos se tratarán temas como las bases del UHPC/UHPFRC, conceptos básicos, diseños de mezcla, propiedades mecánicas y modelos constitutivos.

2. ¿QUÉ SON LOS CONCRETOS DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES?

El concreto de ultra altas prestaciones (UHPC) es un material cementicio innovador desarrollado en los últimos 30 años, destacándose por sus propiedades mecánicas superiores en comparación con el concreto convencional, especialmente su alta resistencia a la compresión, que puede alcanzar o superar los 150 MPa. Su diseño de empaquetamiento de partículas resulta en una matriz cementante densa, baja porosidad e impermeabilidad, lo que mejora su durabilidad. Además, presenta un comportamiento con endurecimiento por deformación, lo que le otorga mejores propiedades a tracción y un mayor módulo de elasticidad

Según el American Concrete Institute (ACI), el UHPC se caracteriza por su alta resistencia a la

compresión, ductilidad a la tracción y durabilidad (ACI Committee 239, 2018). La Association française de Normalisation define el UHPC como un concreto con alta resistencia a la compresión y a la tracción después de la fisuración, permitiendo diseñar elementos sin refuerzo debido a su ductilidad. La normativa suiza SIA 2052 – 2016 establece que un UHPC debe superar una resistencia a compresión de 120 MPa y una resistencia a la tracción de 7 MPa, soportada por fibras adicionadas (Swiss Society of Engineers and Architects (SIA), 2015).

El UHPC puede incluir fibras, denominándose entonces UHPFRC (Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete). Sin embargo, aún no existe una definición global de este material, y algunas fuentes hacen distinción entre UHPC y UHPFRC, mientras que otras consideran la adición de fibras esencial para sus propiedades mecánicas especiales. La normativa ASTM resume los requisitos de resistencia mínima para concretos de ultra altas prestaciones (Akhnoukh & Buckhalter, 2021).

3. COMPONENTES Y DOSIFICACIONES DE LOS CONCRETOS DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES

Dado que los concretos de ultra altas prestaciones (UHPC) son un material novedoso, existen numerosas posibilidades de diseño de mezcla. Estas dependen del método de diseño elegido, los componentes y proporciones de la mezcla, y el objetivo principal del diseño. Aunque los UHPC pueden tener múltiples variables en sus componentes, su formulación general incluye un alto contenido de aglutinante, compuesto por cemento tipo Portland, materiales cementantes suplementarios como el humo de sílice y la arena de cuarzo, fibras (generalmente de acero), y superplastificantes (Akhnoukh & Buckhalter, 2021), (Faysal et al., 2022), (Shi et al., 2015).

A continuación, se detallan los componentes principales de los UHPC, incluyendo tipos, dosificaciones y cómo afectan las propiedades de las mezclas de diseño.

3.1. Cemento Portland

El cemento tipo Portland se fabrica a partir de materias primas abundantes como la piedra caliza y la arcilla. Estas se mezclan con precisión y se calcinan a altas temperaturas (1450-1550 °C) para producir Clinker, el cual se muele con yeso para obtener el cemento Portland. Su nombre se debe al color similar a las rocas Portland de Dorset, Inglaterra. La producción del cemento implica seis pasos: extracción de materias primas, trituración, mezcla, calcinación, molienda y almacenamiento/embalaje. La elección del tipo de cemento depende de las condiciones ambientales y la aplicación. Para concreto UHPC, el tipo III es común por su rápido fraguado, aunque el tipo I es preferido por su alto contenido de Clinker y menor costo. Los cementos tipo I y III son valorados por su bajo contenido de aluminato tricálcico (C3A), lo cual mejora las prestaciones mecánicas.

Las dosificaciones de cemento en las mezclas de concreto de ultra altas prestaciones (UHPC) suelen variar entre 610 y 1080 kg/m³, sin embargo tan solo se hidrata un 52% - 61%, por lo que el cemento no hidratado cumple el rol de agregados finos, lo que incrementa el costo y la huella de carbono. No obstante, diversos estudios han investigado la reducción de estas dosificaciones (Ahmad et al., 2016; Arora, Aguayo, Kianmofrad, Yao, & Neithalath, 2018; Choi et al., 2023; Meng et al., 2017; Soliman & Tagnit-Hamou, 2017; Wang et al., 2019) para disminuir la huella de carbono y optimizar los costos. La siguiente sección presenta las adiciones más comunes para las mezclas de UHPC/UHPFRC.

3.2. Materiales cementantes suplementarios

Los Materiales Cementantes Suplementarios (MCS), también conocidos como SCM (Supplementary Cementitious Materials) según ASTM, son materiales inorgánicos finamente divididos que, junto con el cemento tipo Portland, mejoran las propiedades del concreto endurecido. Estos incluyen ceniza volante, humo de sílice, escoria y puzolanas naturales. La normativa británica (BS EN 206, 2000) define las adiciones como materiales finos que mejoran o confieren propiedades especiales al concreto.

El uso de MCS no solo reduce las emisiones de CO₂, sino que también mejora las propiedades mecánicas del concreto. Los MCS más comunes son cenizas volantes, polvo de piedra caliza, Metakaolín y escoria. Según Park et al. (2021), las mezclas de UHPC con MCS pueden alcanzar una resistencia a compresión de 150 MPa a los 28 días, reduciendo significativamente las emisiones de CO₂.

3.2.1. Metakaolín

El Metakaolín (MK) es un material cementante suplementario (SCM) producido al calcinar caolín a 500-600 °C, transformando su estructura cristalina. Es utilizado como puzolana artificial en morteros y concretos debido a su capacidad para mejorar la resistencia mecánica, reducir la permeabilidad y aumentar la durabilidad. El MK reacciona con el hidróxido de calcio del cemento, formando geles que mejoran las propiedades mecánicas del concreto.

Un estudio de M. Abdellatief et al. (2023) mostró que, aunque la trabajabilidad disminuye con MK, la resistencia a compresión y flexión a los 90 días aumentó hasta un 5.4%. A. Tafraoui et al. (2009) encontró que MK aumentó la capacidad de flexión del UHPC en un 2.6%. El Metakaolín puede contribuir a concretos UHPC con bajas emisiones de carbono.

3.2.2. Cenizas volantes

Las cenizas volantes (FA, por sus siglas en inglés 'Fly Ash') son residuos finamente particulados de la combustión del carbón, cuya composición varía según el tipo de carbón, el proceso de quema y la configuración de la caldera. En un estudio colombiano (Abellán et al., 2020), se utilizó un algoritmo de optimización para diseñar mezclas de UHPC con cenizas volantes de la termoeléctrica Termotasajero. Aunque el carbono no calcinado de las cenizas redujo la resistencia a compresión, se logró un concreto rentable y eco-amigable con una resistencia de 150 MPa a los 28 días.

El uso de cenizas volantes también afecta la retracción autógena del concreto, reduciendo las microfisuras, aunque con una ligera disminución de las propiedades mecánicas (Ghafari et al., 2016). Además, Arora et al. (2018) encontraron que las cenizas volantes mejoran la trabajabilidad y reducen la necesidad de agua en las mezclas, logrando concretos de UHPC con una resistencia a compresión de 153 MPa a los 28 días.

3.2.3. Escorias de alto horno

Las escorias de alto horno, o "Slag", son adiciones activas usadas en cementos comerciales que mejoran propiedades como menor calor de hidratación, alta resistencia a sales y sulfatos, y reducen la reacción álcali-agregado. Estas escorias resultan de la combinación de impurezas del mineral de hierro y cenizas de azufre con cal y magnesia, fusionadas a 1600 °C. Su composición química varía según el proceso siderúrgico.

En un estudio de X. Zhang et al. (2019), se evaluaron mezclas de UHPC con reemplazos de 0%, 10%, 20% y 30% de cemento por escoria de acero, manteniendo una relación agua-cemento de 0.18. Se observó que la contracción acumulada disminuyó a medida que aumentaba el contenido de escoria. Aunque inicialmente la

resistencia a compresión se redujo, se recuperó en etapas más avanzadas del concreto.

P.S. Ambily et al. (2015) estudiaron escorias de cobre en cementos UHPC, logrando resistencias de hasta 162 MPa, aunque con una reducción del 15%-25% respecto a la muestra de control. Z.-h. He et al. (2018) investigaron escorias de litio, encontrando que una mezcla con 10% de escoria de litio superó la resistencia a compresión de la muestra de control. El tamaño de partícula de la escoria de litio, intermedio entre el cemento y el humo de sílice, permite un empaquetamiento más denso y mejora la resistencia a compresión.

3.2.4. Polvo de piedra caliza

La caliza es la roca sedimentaria más abundante, compuesta principalmente de calcita (CaCO_3). Es esencial en la construcción, derivando productos como la cal, el carbonato de calcio y el cemento.

Li et al. (2020) estudiaron el efecto del polvo de caliza (LP) en UHPC, encontrando que mejora la fluidez de la mezcla fresca, intensifica la hidratación secundaria y contribuye a estructuras de poros más densas y mayores resistencias, siempre que la adición no supere el 60%. Recomiendan un contenido de LP del 25%-35%, con una sugerencia óptima del 50% para reducir emisiones de CO_2 .

Wang et al. (2019) también evaluaron mezclas de UHPC con diferentes dosificaciones de cemento y LP. Encontraron que reemplazar el 50% del cemento con LP optimiza las propiedades mecánicas, debido al menor tamaño de partícula del LP que rellena los espacios entre las partículas más grandes, creando una estructura más densa. Sin embargo, reemplazos superiores al 50% disminuyen la densidad de empaquetamiento y la resistencia a compresión.

3.2.5. Superplastificantes

Los superplastificantes, o 'SZ' (Superplasticizers), son dispersantes poliméricos que se añaden a los materiales cementantes para reducir el límite elástico manteniendo un contenido constante de sólidos, o para aumentar el contenido de sólidos con un límite elástico constante. Estos aditivos se utilizan en la fabricación de concreto para reducir el impacto ambiental al requerir menos agua en la mezcla, lo que resulta en menor porosidad y permeabilidad, así como la posibilidad de usar menos cemento (Flatt & Schober, 2012). Introducidos en la década de 1930, han evolucionado a lo largo de las generaciones, con los Policarboxilatos siendo la generación más reciente desde la década de 1980.

Investigaciones sobre mezclas de concreto UHPC han evaluado los tiempos de fraguado y la pérdida de asentamiento con diferentes tipos de superplastificantes, encontrando que los tipos basados en éteres policarboxílicos (PCE) reducen significativamente la cantidad de agua requerida. La capacidad de dispersión de estos superplastificantes depende de su estructura química y capacidad de adsorción en las partículas, afectando la fluidez y la vida útil del concreto.

3.2.6. Fibras

Las adición de fibras a mezclas de UHPC, da como resultado un material denominado 'UHPRFC' que en español significa Concreto de Ultra Altas Prestaciones Reforzado con Fibras. Las fibras se usan para mejorar la ductilidad del concreto, especialmente en tracción y flexión. Estas fibras, que pueden ser de acero, mineral o sintética, varían en su impacto según su tipo, tamaño y propiedades. Las investigaciones han mostrado que la adición de fibras puede mejorar las características mecánicas del UHPRFC, pero existe un límite para la cantidad de fibras que se puede añadir sin afectar la trabajabilidad, por lo

general se recomiendan dosificaciones entre 1% - 4%. (Hannawi et al., 2015)

Los estudios indican que las fibras de acero tienden a ofrecer mejores resultados en términos de capacidad mecánica, en comparación con las fibras sintéticas y minerales. La orientación y distribución de las fibras durante la mezcla influyen significativamente en las propiedades finales del concreto. La resistencia a la compresión y la flexión también se ven afectadas por la forma, tamaño y volumen de las fibras, con fibras de acero tipo ondulado y con gancho terminal mostrando mejoras notables (Yan et al., 2021).

Además, la colocación del concreto puede afectar la orientación de las fibras, impactando la resistencia a la tracción de la mezcla. Los estudios sugieren que las fibras se alinean en la dirección del flujo del concreto, lo que debe tenerse en cuenta al interpretar los resultados de las pruebas de laboratorio (Groupe de travail BFUP, 2013).

3.2.7. Agregados

El uso de agregados en el concreto tiene como objetivo reducir costos, controlar cambios volumétricos y mejorar la resistencia final del material. En concretos convencionales, los agregados representan entre el 65% y el 70% de la mezcla, mientras que en los concretos UHPC (Ultra-High-Performance Concrete) esta proporción es de entre el 20% y el 40% (Chen et al., 2019).

La forma y textura de los agregados afectan la manejabilidad del concreto fresco y sus características físicas en estado sólido. Para optimizar las propiedades mecánicas del concreto, es crucial tener una buena granulometría de los agregados, logrando una densidad de empaquetamiento adecuada (Silva, 2019).

Investigaciones han demostrado que diferentes tipos de agregados influyen en las propiedades del UHPC. Por ejemplo P. P. Li et al. (2018) indica que los agregados de basalto mejoran la resistencia a compresión y flexión, además de la trabajabilidad y menor absorción de agua. La sustitución de arena de río por arena de cuarzo también ha mostrado mejoras significativas en la resistencia a compresión.

El uso de arena ligera presaturada (LWS) en lugar de arena de río ha reducido la retracción autógena y mejorado las propiedades de la interfaz entre la arena y la matriz de cemento. Sin embargo, reemplazar arena de cuarzo por polvo de vidrio ha disminuido la capacidad de compresión, lo cual se atribuye a la baja densidad de empaquetamiento del polvo de vidrio, (Meng & Khayat, 2017).

Otras investigaciones han explorado la sustitución de agregados finos por cenizas de carbón y nano-silicato cálcico hidratado (C-S-H) para mejorar la eficiencia energética y sostenibilidad del UHPC. El uso de C-S-H ha incrementado la resistencia a la compresión de los concretos convencionales y los UHPC, alcanzando una resistencia de 120 MPa (Ban et al., 2023).

4. PRESTACIONES MECÁNICAS Y MODELOS CONSTITUTIVOS DE LOS CONCRETOS UHPC

Los concretos de ultra altas prestaciones (UHPC) se destacan de los concretos convencionales por sus excepcionales capacidades mecánicas. Según el informe "Ultra-High-Performance Concrete: An Emerging Technology Report" del ACI 239, para que un concreto se clasifique como UHPC debe tener una resistencia a la compresión superior a 150 MPa, además de cumplir con requisitos específicos de durabilidad, ductilidad a la tracción y tenacidad.

A continuación, se presenta una comparación entre el concreto convencional y el UHPC basada en las características del material:

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

4.1. Esfuerzo a compresión

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

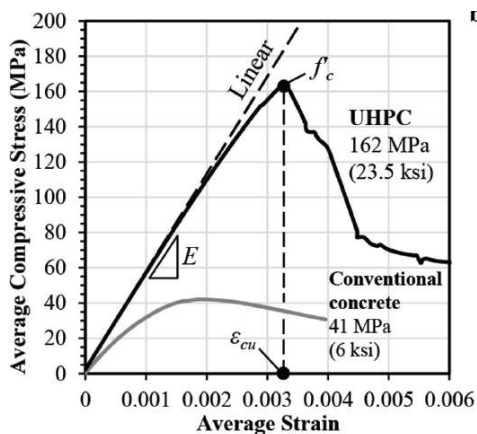


Ilustración 1. Comportamiento del UHPC a compresión, (El-Helou et al., 2022b)

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

4.2. Módulo de elasticidad

El módulo de elasticidad, definido por el comité ACI 116 como la relación entre esfuerzo normal y deformación para esfuerzos bajo el límite de proporcionalidad, también conocido como módulo de Young y representado por ' E ', se estudió en 492 probetas fabricadas con diferentes dosificaciones de UHPC. R. Helau et al. (2022b) analizaron la relación entre el módulo de elasticidad (E) y la resistencia a compresión (f'_c) del UHPC, comparando los resultados con las

ecuaciones del ACI 318 y AASHTO LRFD para concreto normal. La ecuación del ACI, adaptada por la normativa colombiana NSR-10, sobrestima el módulo elástico del UHPC, mientras que la ecuación de AASHTO LRFD ajusta bien la relación entre E y f'_c para UHPC con resistencia a compresión entre 127 y 200 MPa.

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

La ecuación propuesta para UHPC, no incluye corrección de densidad, dado que la variación de densidad en UHPC es menor que en concreto convencional.

4.3. Esfuerzo a tracción

La resistencia a tracción del concreto es la capacidad de resistir fuerzas que tienden a alargar o separar el material. Aunque el concreto es muy resistente a compresión, es débil en tracción debido a su naturaleza frágil y tendencia a agrietarse (Neville, 2016). Esta resistencia a tracción es aproximadamente el 10-15% de la resistencia a compresión (Palmieri et al., 2017).

En los materiales UHPC, la respuesta a tracción es destacable por su capacidad de deformación significativa, resistencia mantenida tras fisuración y múltiples fisuras finas y cercanas (El-Helou et al., 2022b). La Ilustración 2 muestra que, al inicio, hay un comportamiento linealmente elástico, seguido de una pérdida gradual de rigidez hasta alcanzar la resistencia efectiva a la fisuración. Posteriormente, las fibras compensan la pérdida de resistencia, manteniendo la capacidad del material sin grandes pérdidas hasta que las fibras empiezan a desprenderse. La deformación final se acumula en una sola grieta y la resistencia a tracción disminuye.

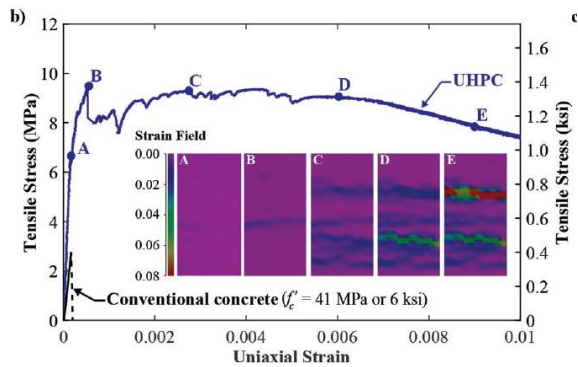


Ilustración 2. Curva esfuerzo - deformación del UHPC a tracción, (El-Helou et al., 2022b).

Los materiales UHPC muestran dos comportamientos típicos: uno con una meseta de esfuerzo después de la fisuración y otro donde la tensión aumenta hasta un valor último en la localización de la fisura. En la Ilustración 3 se logra observar ambos comportamientos.

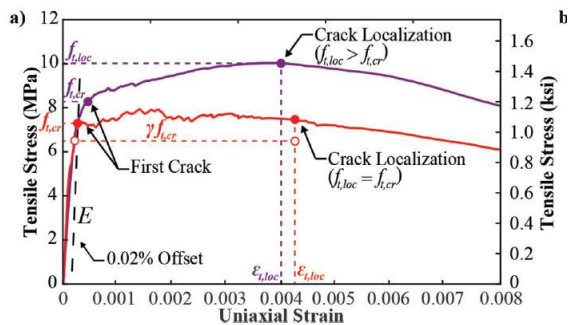


Ilustración 3. Comportamiento del UHPC a tracción, con respuesta de ablandamiento y endurecimiento por deformación, (El-Helou et al., 2022b).

Estos comportamientos se modelan con enfoques elástico-plásticos o bilineales en diseño, tal como se aprecia en la Ilustración 4 y en la Ilustración 5, aunque la fase de post-localización de la grieta no se considera en los modelos de diseño debido a su dependencia de la apertura de la grieta (El-Helou et al., 2022b).

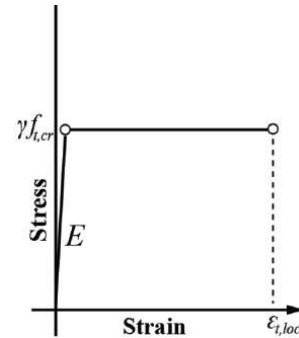


Ilustración 4. Modelo endurecimiento por deformación con meseta, (El-Helou et al., 2022b).

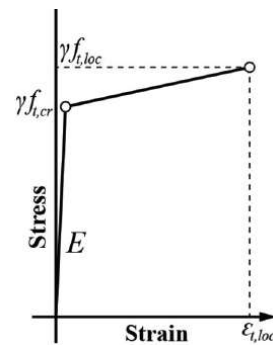


Ilustración 5. Modelo endurecimiento por deformación con incremento del esfuerzo, (El-Helou et al., 2022b).

5. CONCLUSIONES

- Los resultados de la investigación señalan que el UHPC presenta varias ventajas significativas sobre el concreto convencional, tales como una mayor resistencia a la compresión, flexión y tracción, mayor durabilidad frente al agrietamiento, ataque químico y abrasión, así como una microestructura más densa y homogénea.
- Se logró evidenciar la influencia del diseño de mezcla y los materiales adicionados en las propiedades mecánicas del material, y cómo pueden variar las dosificaciones dependiendo del objetivo final del diseño de mezcla. Hasta el momento, no existe un diseño de mezcla global; sin embargo, diversas investigaciones

se han enfocado en esto, ofreciendo así amplias posibilidades para futuras creaciones.

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

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdellatif, M., AL-Tam, S. M., Elemam, W. E., Alanazi, H., Elgendy, G. M., & Tahwia, A. M. (2023). Development of ultra-high-performance concrete with low environmental impact integrated with metakaolin and industrial wastes. *Case Studies in Construction Materials*, 18. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01724>
- Abellán, J., Torres, N., Fnerández, J., & Núñez, A. (2020). Ultra-high-performance concrete with local high unburned carbon fly ash. *DYNA*, 88(216), 38–47.
- ACI Committee 239. (2018). *Ultra-high-performance concrete : an emerging technology report (ACI 239R-18)*.
- Ahmad, S., Hakeem, I., & Maslehuddin, M. (2016). Development of an optimum mixture of ultra-high performance concrete. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 20(9), 1106–1126. <https://doi.org/10.1080/19648189.2015.1090925>
- Akhnoukh, A. K., & Buckhalter, C. (2021). Ultra-high-performance concrete: Constituents, mechanical properties, applications and current challenges. *Case Studies in Construction Materials*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00559>
- Amanjean, E. N., & Vida, T. (2015). Low cost Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPRFC) with flash metakaolin. *Key Engineering Materials*, 629–630, 55–63. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.629-630.55>
- Ambily, P. S., Umarani, C., Ravisankar, K., Prem, P. R., Bharatkumar, B. H., & Iyer, N. R. (2015). Studies on ultra high performance concrete incorporating copper slag as fine aggregate. *Construction and Building Materials*, 77, 233–240. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.092>
- Amran, M., Huang, S. S., Onaizi, A. M., Makul, N., Abdelgader, H. S., & Ozbakkaloglu, T. (2022). Recent trends in ultra-high performance concrete (UHPC): Current status, challenges, and future prospects. In *Construction and Building Materials* (Vol. 352). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129029>
- Arora, A., Aguayo, M., Kianmofrad, F., Yao, Y., Mobasher, B., & Neithalath, N. (2018). First Principles-Based Design of Economical Ultra-High Performance Concrete. *Sixth International Conference on Durability of Concrete Structures*, 877–889.
- Arora, A., Aguayo, M., Kianmofrad, F., Yao, Y., & Neithalath, N. (2018). First Principles-Based Design of Economical Ultra-High Performance Concrete. *Sixth International Conference on Durability of Concrete Structures*, 877–889.
- Ban, C. C., Kang, S. Y., Siddique, R., & Tangchirapat, W. (2023). Properties of ultra-high performance concrete and conventional concrete with coal bottom ash as aggregate replacement and nanoadditives: A review. In *Reviews on Advanced Materials Science* (Vol. 62, Issue 1). Walter de Gruyter GmbH. <https://doi.org/10.1515/rams-2022-0323>

- Chen, Y., Matakah, F., Balachandra, A., & Soroushian, P. (2019). Ultra-High-Performance Concrete: Development of On-Site Fresh Mix Rheology Test Methods. *Journal of Advanced Research in Applied Mechanics Journal Homepage*, 55, 1–11. www.akademiabaru.com/aram.html
- Choi, D., Hong, K., Ochirbud, M., Meiramov, D., & Sukontaskuul, P. (2023). Mechanical Properties of Ultra-High Performance Concrete (UHPC) and Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC) with Recycled Sand. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, 17(1). <https://doi.org/10.1186/s40069-023-00631-2>
- El-Helou, R. G., Haber, Z. B., & Graybeal, B. A. (2022a). Mechanical Behavior and Design Properties of Ultra-High- Performance Concrete. *ACI Materials Journal*, 119(1), 181–194. <https://doi.org/10.14359/51734194>
- El-Helou, R. G., Haber, Z. B., & Graybeal, B. A. (2022b). Mechanical Behavior and Design Properties of Ultra-High- Performance Concrete. *ACI Materials Journal*, 119(1), 181–194. <https://doi.org/10.14359/51734194>
- Faysal, A., Ali, G., Hiwa, H., & Shwan, R. (2022). *Mix Design and Structural Applications of Ultra-High Performance Concrete (UHPC)*.
- Flatt, R., & Schober, I. (2012). Superplasticizers and the rheology of concrete. In *Understanding the Rheology of Concrete* (pp. 144–208). Elsevier. <https://doi.org/10.1533/9780857095282.2.144>
- Gannon, K. (2016). ARCHITECTURAL ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE. TAKTL. <http://go.hw.net/AR516Course5>
- Ghafari, E., Ghahari, S. A., Costa, H., Júlio, E., Portugal, A., & Durães, L. (2016). Effect of supplementary cementitious materials on autogenous shrinkage of ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 127, 43–48. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.09.123>
- Groupe de travail BFUP. (2013). *Bétons fibrés à ultra-hautes performances*.
- Hannawi, K., Bian, H., Prince-Agbodjan, W., & Raghavan, B. (2015). Effect of different types of fibers on the microstructure and the mechanical behavior of Ultra-High Performance Fiber-Reinforced Concretes. *Composites Part B: Engineering*, 86, 214–220. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.09.059>
- He, Z. hai, Du, S. gui, & Chen, D. (2018). Microstructure of ultra high performance concrete containing lithium slag. *Journal of Hazardous Materials*, 353, 35–43. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.03.063>
- Li, P. P., Brouwers, H. J. H., Chen, W., & Yu, Q. (2020). Optimization and characterization of high-volume limestone powder in sustainable ultra-high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 242. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118112>
- Li, P. P., Yu, Q. L., & Brouwers, H. J. H. (2018). Effect of coarse basalt aggregates on the properties of Ultra-high Performance Concrete (UHPC). *Construction and Building Materials*, 170, 649–659. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.03.109>
- Meng, W., & Khayat, K. (2017). Effects of saturated lightweight sand content on key characteristics of ultra-high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 101, 46–54. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.08.018>
- Meng, W., Valipour, M., & Khayat, K. H. (2017). Optimization and performance of cost-effective ultra-high performance concrete. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 50(1). <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0896-3>
- Mishra, O., & Singh, S. P. (2019). An overview of microstructural and material properties of ultra-high-performance concrete. In *Journal of*

- Sustainable Cement-Based Materials* (Vol. 8, Issue 2, pp. 97–143). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/21650373.2018.1564398>
- Neville, A. (2016). *Properties of concrete* (Vol. 5th).
- Palmieri, A., Guzmán, A., & Cantillo, V. (2017). Evaluación de esfuerzos tangenciales y radiales en cilindros de concreto de paredes gruesas sometidos a presión interna. *Ingeniería y Desarrollo*, 1–11.
- Park, S., Wu, S., Liu, Z., & Pyo, S. (2021). The role of supplementary cementitious materials (Scms) in ultra high performance concrete (uhpc): A review. In *Materials* (Vol. 14, Issue 6). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ma14061472>
- Shi, C., Wu, Z., Xiao, J., Wang, D., Huang, Z., & Fang, Z. (2015). A review on ultra high performance concrete: Part I. Raw materials and mixture design. In *Construction and Building Materials* (Vol. 101, pp. 741–751). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088>
- Silva, O. J. (2019). *Tipos de agregados y su influencia en las mezclas de concreto*. 360enconcreto.
- Soliman, N. A., & Tagnit-Hamou, A. (2017). Using particle packing and statistical approach to optimize eco-efficient ultra-high-performance concrete. *ACI Materials Journal*, 114(6), 847–858. <https://doi.org/10.14359/51701001>
- Swiss Society of Engineers and Architects (SIA). (2015). *prSIA 2052: "UHPC: Material, Design and Construction (Béton fibré ultra-performant [BFUP]: Matériaux, dimensionnement et exécution)*.
- Tafraoui, A., Escadeillas, G., Lebailli, S., & Vidal, T. (2009). Metakaolin in the formulation of UHPC. *Construction and Building Materials*, 23(2), 669–674. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.02.018>
- Ullah, R., Qiang, Y., Ahmad, J., Vatin, N. I., & El-Shorbagy, M. A. (2022). Ultra-High-Performance Concrete (UHPC): A State-of-the-Art Review. *Materials*, 15(12). <https://doi.org/10.3390/ma15124131>
- Wang, X., Yu, R., Song, Q., Shui, Z., Liu, Z., Wu, S., & Hou, D. (2019). Optimized design of ultra-high performance concrete (UHPC) with a high wet packing density. *Cement and Concrete Research*, 126. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2019.105921>
- Yan, X., Gao, Y., Luo, Y., Bi, Y., & Xie, Y. (2021). Effect of different steel fiber types on mechanical properties of ultra-high performance concrete. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 1167(1), 012001. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1167/1/012001>
- Zhang, X., Zhao, S., Liu, Z., & Wang, F. (2019). Utilization of steel slag in ultra-high performance concrete with enhanced eco-friendliness. *Construction and Building Materials*, 214, 28–36. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.106>