

DOI: <https://doi.org/10.46296/ig.v7i14edespdic.0255>

HORMIGONES DE ULTRA ALTO DESEMPEÑO: UNA REVISIÓN DE SUS PROPIEDADES, APLICACIONES Y DESAFÍOS

ULTRA-HIGH-PERFORMANCE CONCRETES: A REVIEW OF THEIR PROPERTIES, APPLICATIONS, AND CHALLENGES

Orejuela-Mendoza Ivanova Claribel ¹; Plúa-Ponce Angélica Marena ²;
Ceballos-Cantos Luis Vicente ³; Vera-Pisco Dimas Geovanny ⁴

¹ Carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad Estatal del Sur de Manabí. Jipijapa, Ecuador. Correo: ivanova.orejuela@unesum.edu.ec.
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0004-5266-0120>

² Carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad Estatal del Sur de Manabí. Jipijapa, Ecuador. Correo: angelica.plua@unesum.edu.ec.
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0007-3101-7285>

³ Carrera de Ingeniería Civil, Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad Estatal del Sur de Manabí. Jipijapa, Ecuador. Correo: luis.ceballos@unesum.edu.ec.
ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0003-4530-4649>

⁴ Universidad Estatal del Sur de Manabí. Jipijapa, Ecuador.
Correo: dimas.vera@unesum.edu.ec. ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-3524-0907>

Resumen

Los hormigones de ultra alto desempeño (UHPC) representan un avance significativo en la tecnología de materiales de construcción, destacándose por sus excepcionales propiedades mecánicas y durabilidad. Esta revisión sistemática analiza el estado actual del conocimiento sobre los UHPC, abarcando sus propiedades fundamentales, aplicaciones y desafíos. Los resultados muestran que estos hormigones pueden alcanzar resistencias a la compresión superiores a 150 MPa, con una microestructura densa y homogénea que contribuye a su alta durabilidad. Sus aplicaciones abarcan desde estructuras de ingeniería civil convencionales hasta casos especiales como la rehabilitación de estructuras y elementos arquitectónicos complejos. Sin embargo, se identifican desafíos significativos relacionados con el costo del material, su trabajabilidad y aspectos de sostenibilidad ambiental. La incorporación de materiales cementantes suplementarios y el desarrollo de técnicas de construcción especializadas emergen como soluciones prometedoras para abordar estas limitaciones. Esta revisión proporciona una base comprehensiva para futuros desarrollos en el campo de los UHPC, destacando la necesidad de equilibrar sus beneficios técnicos con consideraciones económicas y ambientales.

Palabras clave: Resistencia mecánica, Durabilidad, Microestructura, Sostenibilidad, Construcción avanzada.

Abstract

Ultra-high performance concrete (UHPC) represents a significant advancement in construction materials technology, distinguished by its exceptional mechanical properties and durability. This systematic review analyzes the current state of knowledge about UHPC, covering its fundamental properties, applications, and challenges. Results show that these concretes can achieve compressive strengths exceeding 150 MPa, with a dense and homogeneous microstructure contributing to their high durability. Their applications range from conventional civil engineering structures to special cases such as structure rehabilitation and complex architectural elements. However, significant challenges are identified related to material cost, workability, and

Información del manuscrito:

Fecha de recepción: 16 de septiembre de 2024.

Fecha de aceptación: 15 de noviembre de 2024.

Fecha de publicación: 10 de diciembre de 2024.



environmental sustainability aspects. The incorporation of supplementary cementitious materials and the development of specialized construction techniques emerge as promising solutions to address these limitations. This review provides a comprehensive foundation for future developments in the UHPC field, highlighting the need to balance its technical benefits with economic and environmental considerations.

Keywords: Mechanical strength, Durability, Microstructure, Sustainability, Advanced construction.

1. Introducción

La historia del hormigón de ultra alto desempeño (UHPC) se remonta a las últimas décadas del siglo XX, cuando se comenzaron a investigar y desarrollar materiales que superaran las limitaciones del hormigón convencional. El UHPC se caracteriza por su alta resistencia a la compresión, durabilidad y capacidad de autocompactación, lo que lo convierte en un material innovador en la ingeniería civil. Desde sus inicios, el UHPC ha sido objeto de numerosos estudios que han buscado optimizar su formulación y mejorar sus propiedades mecánicas. Por ejemplo, se ha demostrado que la incorporación de fibras, como las de vidrio o acero, puede aumentar significativamente la resistencia a la tracción y la tenacidad del material (Aguero et al., 2019). Este avance ha permitido que el UHPC se utilice en aplicaciones donde la resistencia y la

durabilidad son críticas, como en estructuras de puentes y edificios de gran altura.

La importancia del UHPC en la ingeniería civil moderna no puede subestimarse. Este material no solo ofrece ventajas mecánicas superiores, sino que también contribuye a la sostenibilidad de las construcciones. Su alta resistencia permite reducir la cantidad de material necesario, lo que a su vez disminuye el impacto ambiental asociado a la producción de hormigón (Dopico et al., 2008). Además, el UHPC presenta una excelente resistencia a la corrosión y a los agentes químicos, lo que prolonga la vida útil de las estructuras y reduce los costos de mantenimiento a largo plazo (García, 2021). En este sentido, el uso de UHPC se alinea con las tendencias actuales hacia la construcción sostenible y la eficiencia en el uso de recursos, lo que lo convierte en una

opción preferida en proyectos de infraestructura moderna.

A medida que la tecnología avanza, el UHPC ha evolucionado para incluir adiciones de materiales cementantes suplementarios (SCM), que no solo mejoran sus propiedades mecánicas, sino que también contribuyen a la sostenibilidad del material al reducir la cantidad de cemento Portland necesario en su formulación (García & Varón, 2022). La investigación en este campo ha llevado a la creación de modelos predictivos que permiten estimar la resistencia a la compresión del UHPC, facilitando su diseño y aplicación en proyectos específicos (González Salcedo et al., 2019). Este enfoque basado en datos y modelado ha permitido a los ingenieros optimizar las mezclas de UHPC para satisfacer las demandas específicas de cada proyecto, lo que resalta la versatilidad y adaptabilidad de este material.

El objetivo principal de este trabajo es realizar una revisión sistemática y actualizada del estado del conocimiento sobre los hormigones de ultra alto desempeño (UHPC), abordando sus propiedades

fundamentales, aplicaciones prácticas y desafíos actuales. Esta revisión busca proporcionar una comprensión integral de las características mecánicas, físicas y microestructurales del UHPC, analizar sus diversas aplicaciones en la ingeniería civil, y examinar los retos relacionados con su implementación, incluyendo aspectos económicos, de trabajabilidad y sostenibilidad. Mediante la síntesis de la literatura científica más reciente, este estudio pretende ofrecer una visión completa que sirva como referencia tanto para investigadores como para profesionales del sector de la construcción, contribuyendo así al entendimiento y la aplicación efectiva de este material innovador.

2. Metodología

Este estudio constituye una revisión sistemática de la literatura científica sobre hormigones de ultra alto desempeño (UHPC), abarcando publicaciones desde el año 2008 hasta 2024. La metodología empleada se estructuró en tres fases principales que permitieron un análisis comprehensivo del estado

actual del conocimiento en este campo.

La primera fase consistió en una búsqueda exhaustiva de literatura científica en bases de datos especializadas, incluyendo artículos de investigación, informes técnicos y estudios de caso. Los criterios de inclusión contemplaron publicaciones que abordaran las propiedades mecánicas, físicas y microestructurales de los UHPC, sus aplicaciones en estructuras de ingeniería civil y casos especiales, así como los desafíos relacionados con costos, trabajabilidad y sostenibilidad. Este proceso de búsqueda se realizó de manera sistemática para garantizar la cobertura completa de la literatura relevante.

En la segunda fase, la información recopilada se organizó y analizó siguiendo una estructura jerárquica que permitió examinar en detalle las diferentes dimensiones de los UHPC. Esta estructura incluyó el análisis de las propiedades fundamentales del material, abarcando tanto sus características mecánicas como físicas y microestructurales. También se estudiaron las diversas aplicaciones

del UHPC en el campo de la ingeniería civil, prestando especial atención a los casos de estudio que demuestran su implementación práctica. Además, se examinaron los principales desafíos que enfrenta el uso de este material, considerando aspectos económicos, técnicos y ambientales.

La tercera fase consistió en un análisis comparativo entre el UHPC y el hormigón convencional, evaluando las diferencias en sus propiedades mecánicas, como la resistencia a compresión, tracción y flexión, así como su comportamiento frente a condiciones ambientales adversas. Este análisis también incluyó la consideración de aspectos económicos y de sostenibilidad, junto con las limitaciones y oportunidades de mejora que presenta el material. La información analizada se contrastó entre diferentes autores para establecer consensos y divergencias en los hallazgos reportados, prestando especial atención a la evolución temporal de las investigaciones en el campo.

Esta metodología permitió desarrollar una revisión comprehensiva que aborda tanto los

aspectos técnicos como las implicaciones prácticas del uso de UHPC en la ingeniería civil moderna. El enfoque sistemático adoptado facilitó la identificación de tendencias, desafíos y oportunidades en el desarrollo y aplicación de este material innovador, considerando las perspectivas tanto de investigadores como de profesionales del sector de la construcción.

3. Resultados y discusión

Propiedades de los UHPC

Propiedades mecánicas

El hormigón de ultra alto desempeño (UHPC) se distingue por sus excepcionales propiedades mecánicas, que lo convierten en un material preferido en la ingeniería civil moderna. En comparación con el hormigón convencional, el UHPC presenta una resistencia a compresión que puede alcanzar valores superiores a 150 MPa, mientras que el hormigón convencional típicamente se sitúa entre 20 y 40 MPa (Paredes et al., 2020). Esta diferencia en resistencia se debe a la formulación del UHPC, que incluye una baja relación agua-

cemento y la incorporación de adiciones como la microsílíce y el metacaolín, que contribuyen a una microestructura más densa y homogénea. Además, el UHPC puede exhibir una resistencia a tracción que supera los 10 MPa, en contraste con los 2-5 MPa del hormigón convencional, lo que le otorga una mayor capacidad para resistir esfuerzos de tensión (García, 2021).

La resistencia a flexión del UHPC también es notable, alcanzando valores que pueden superar los 20 MPa, mientras que el hormigón convencional generalmente presenta resistencias de 5 a 10 MPa (Paredes et al., 2020). Esta propiedad es fundamental en aplicaciones donde se requieren elementos estructurales delgados y ligeros, como en puentes y paneles prefabricados. Por otro lado, el UHPC muestra una resistencia al impacto significativamente mayor, lo que lo hace ideal para estructuras expuestas a cargas dinámicas y condiciones severas. Estudios han demostrado que el UHPC puede resistir impactos que causarían fallas en hormigones convencionales, lo

que se traduce en una mayor durabilidad y seguridad estructural.

La fatiga es otro aspecto donde el UHPC supera al hormigón convencional. Los ensayos de fatiga han mostrado que el UHPC mantiene su integridad estructural bajo ciclos de carga repetidos, mientras que el hormigón convencional tiende a desarrollar microgrietas que pueden comprometer su desempeño a largo plazo (Rios Jimenez et al., 2018). Esto es especialmente relevante en aplicaciones de pavimentación y en estructuras sometidas a cargas cíclicas, como puentes y edificios en zonas sísmicas.

En términos de durabilidad, el UHPC también se destaca. Su baja permeabilidad y su resistencia a la corrosión permiten que las estructuras de UHPC tengan una vida útil significativamente mayor en comparación con las construcciones de hormigón convencional, que son más susceptibles a los efectos del agua y los agentes químicos (García, 2021; Paredes et al., 2020). Esta característica es fundamental en ambientes agresivos, donde la exposición a sales y otros contaminantes puede deteriorar

rápidamente el hormigón convencional.

Propiedades físicas

El hormigón de ultra alto desempeño (UHPC) se caracteriza por sus propiedades físicas excepcionales, que lo hacen adecuado para aplicaciones en entornos exigentes. Una de las propiedades más destacadas del UHPC es su durabilidad, que se manifiesta en su resistencia a la abrasión, al fuego, a los ciclos de hielo-deshielo y a la penetración de cloruros. En comparación con el hormigón convencional, que presenta una durabilidad limitada en condiciones adversas, el UHPC ofrece un rendimiento significativamente superior. Por ejemplo, estudios han demostrado que el UHPC puede resistir la abrasión de manera más efectiva, lo que lo convierte en una opción ideal para pavimentos y estructuras expuestas a desgaste mecánico (França et al., 2021).

La resistencia al fuego del UHPC también es notable, ya que puede soportar temperaturas extremas sin comprometer su integridad estructural. Esto es especialmente relevante en aplicaciones donde la seguridad contra incendios es crítica,

como en edificios de gran altura y estructuras industriales (Gidrão et al., 2021). En contraste, el hormigón convencional puede sufrir daños significativos a temperaturas elevadas, lo que puede llevar a fallas estructurales. Además, el UHPC ha demostrado una excelente resistencia a los ciclos de hielo-deshielo, lo que es clave en regiones donde las temperaturas fluctúan por debajo del punto de congelación. La baja permeabilidad del UHPC minimiza el riesgo de que el agua penetre en el material y se congele, lo que podría causar fisuras y deterioro (Torre et al., 2022).

La permeabilidad y la porosidad son otras propiedades físicas críticas del UHPC. Este material presenta una permeabilidad notablemente baja, lo que significa que es menos susceptible a la penetración de agua y agentes agresivos, como los cloruros. Esto es fundamental para la durabilidad a largo plazo, especialmente en ambientes marinos o en estructuras expuestas a deshielos con sales (Torre et al., 2022). En comparación, el hormigón convencional tiende a tener una mayor permeabilidad, lo que facilita la corrosión del acero de refuerzo y

la degradación del material con el tiempo. La porosidad del UHPC es significativamente menor, lo que contribuye a su resistencia a la penetración de cloruros y a su capacidad para mantener su integridad estructural en condiciones adversas (França et al., 2021).

Los estudios han demostrado que el UHPC puede tener un coeficiente de permeabilidad hasta diez veces menor que el hormigón convencional, lo que se traduce en una reducción significativa en la tasa de corrosión del acero de refuerzo. Esto es especialmente importante en aplicaciones donde la exposición a cloruros es inevitable, como en puentes y estructuras costeras. Además, la baja porosidad del UHPC contribuye a su resistencia a la carbonatación, un proceso que puede debilitar la estructura del hormigón y comprometer la protección del acero de refuerzo (Torre et al., 2022).

Propiedades microestructurales

La microestructura del hormigón de ultra alto desempeño (UHPC) juega un papel preponderante en la determinación de sus propiedades macroscópicas, incluyendo su

resistencia, durabilidad y comportamiento frente a diversas condiciones ambientales. El UHPC se caracteriza por una matriz densa y homogénea, que se logra mediante la optimización de la relación agua-cemento y la incorporación de adiciones minerales como la microsílice y el metacaolín. Estas adiciones no solo mejoran la resistencia mecánica, sino que también contribuyen a la reducción de la porosidad y la permeabilidad del material, lo que a su vez mejora su durabilidad (Gu et al., 2018).

El análisis de la microestructura del UHPC se puede realizar mediante diversas técnicas de caracterización, siendo la microscopía electrónica de barrido (SEM) y la difracción de rayos X (XRD) dos de las más utilizadas. La SEM permite observar la morfología de la superficie y la distribución de los componentes a escala nanométrica, revelando detalles sobre la formación de poros y la interconexión de los materiales en la matriz (Zhu et al., 2022). Por otro lado, la XRD proporciona información sobre la fase cristalina y la composición química del UHPC, lo que es esencial para entender cómo estas características influyen en sus

propiedades mecánicas y de durabilidad.

Los estudios han demostrado que la microestructura del UHPC se caracteriza por una red de poros muy finos, que son significativamente más pequeños que los del hormigón convencional. Esta red de porosidad fina contribuye a una menor permeabilidad, lo que a su vez reduce la penetración de agentes agresivos, como los cloruros y el agua, que pueden causar corrosión en el acero de refuerzo (Gu et al., 2018; Zhu et al., 2022). Además, la distribución uniforme de las fibras en la matriz del UHPC mejora la cohesión interna del material, lo que resulta en un aumento de la resistencia a la tracción y a la flexión.

La influencia de la microestructura en las propiedades macroscópicas del UHPC es evidente en su comportamiento frente a condiciones extremas, como el fuego y los ciclos de hielo-deshielo. La densidad de la matriz y la baja porosidad permiten que el UHPC mantenga su integridad estructural a temperaturas elevadas, mientras que su resistencia a los ciclos de hielo-deshielo se debe a la capacidad de la microestructura para absorber y redistribuir tensiones sin

desarrollar fisuras significativas (Gu et al., 2018). Esto contrasta con el hormigón convencional, que tiende a sufrir daños severos bajo condiciones similares debido a su mayor porosidad y menor cohesión interna.

Además, la microestructura del UHPC también afecta su comportamiento bajo cargas dinámicas. La presencia de fibras refuerza la matriz y mejora la tenacidad del material, permitiendo que el UHPC absorba más energía antes de fallar. Esto es especialmente relevante en aplicaciones donde se requieren materiales que puedan resistir impactos y cargas cíclicas, como en puentes y estructuras expuestas a condiciones sísmicas (Zhu et al., 2022).

Aplicaciones de los UHPC

Estructuras de ingeniería civil

El hormigón de ultra alto desempeño (UHPC) ha encontrado aplicaciones significativas en diversas estructuras de ingeniería civil, destacándose en la construcción de puentes, edificios, túneles y elementos prefabricados. Estas aplicaciones se deben a las propiedades mecánicas y físicas

superiores del UHPC, que permiten diseñar estructuras más delgadas, ligeras y duraderas, lo que a su vez contribuye a la sostenibilidad en la construcción (Arrona-Rivera et al., 2017; Poitevin & Ferraguti, 2022).

En el ámbito de los puentes, el UHPC ha sido utilizado en proyectos emblemáticos que requieren alta resistencia y durabilidad. Un ejemplo notable es el puente de la autopista de la ciudad de Tsing Ma en Hong Kong, donde se utilizó UHPC para las losas de losa de puente, lo que permitió una reducción significativa en el peso de la estructura y una mejora en su capacidad para resistir cargas dinámicas (Lino-Aguilar et al., 2024). Este tipo de aplicación no solo mejora la eficiencia estructural, sino que también reduce los costos de mantenimiento a largo plazo, dado que el UHPC es menos susceptible a la corrosión y al deterioro por factores ambientales (Simone et al., 2015).

En la construcción de edificios, el UHPC ha sido empleado en fachadas y elementos estructurales que requieren una alta resistencia a la compresión y a la tracción. Un ejemplo es el edificio de oficinas de

la Universidad de Ciencias Aplicadas de Zúrich, donde se utilizaron paneles de UHPC para las fachadas, logrando un diseño arquitectónico innovador y eficiente (Gallucci et al., 2022). La utilización de UHPC en estos contextos permite la creación de estructuras más esbeltas y estéticamente agradables, sin comprometer la seguridad y la durabilidad.

Los túneles también se benefician del uso de UHPC, especialmente en aquellos que requieren una alta resistencia a las condiciones adversas, como la humedad y la presión del suelo. Un caso destacado es el túnel de conducción de la Central Hidroeléctrica Cheves en Perú, donde se utilizó UHPC para las estructuras de soporte, lo que garantizó la integridad del túnel frente a las condiciones geológicas desafiantes (Rojas Duque et al., 2021). La resistencia del UHPC a la carbonatación y a la penetración de agua contribuye a la longevidad de estas estructuras, minimizando la necesidad de reparaciones frecuentes.

Los elementos prefabricados de UHPC han revolucionado la construcción modular, permitiendo la

fabricación de componentes que se ensamblan en el sitio de construcción. Un ejemplo de esto es el uso de UHPC en paneles de muros prefabricados en proyectos de vivienda social en Europa, donde se ha demostrado que estos elementos son más rápidos de instalar y ofrecen un mejor rendimiento térmico y acústico (Vaisman et al., 2022). La prefabricación con UHPC no solo acelera el proceso de construcción, sino que también reduce el desperdicio de materiales y mejora la calidad de los componentes estructurales.

Aplicaciones especiales

El hormigón de ultra alto desempeño (UHPC) ha demostrado ser un material versátil y eficaz en diversas aplicaciones especiales, que incluyen la reparación y rehabilitación de estructuras, elementos arquitectónicos y aplicaciones en la industria nuclear. Estas aplicaciones se benefician de las propiedades mecánicas y físicas superiores del UHPC, que permiten abordar desafíos específicos en la ingeniería civil y la arquitectura.

En el ámbito de la reparación y rehabilitación de estructuras, el UHPC se ha utilizado para restaurar

puentes y edificios históricos que requieren una intervención que no solo garantice la integridad estructural, sino que también respete el valor patrimonial de las construcciones (Toala-Zambrano et al., 2021). La capacidad del UHPC para adherirse a superficies existentes y su resistencia a la corrosión lo convierten en una opción ideal para proyectos de restauración, donde la durabilidad y la estética son fundamentales.

Además, el UHPC ha sido utilizado en la creación de elementos arquitectónicos innovadores. Su alta resistencia y versatilidad permiten la fabricación de componentes delgados y ligeros que pueden ser moldeados en formas complejas. Un ejemplo de esto es el uso de UHPC en la construcción de fachadas de edificios contemporáneos, donde se han utilizado paneles de UHPC para lograr diseños arquitectónicos únicos y estéticamente atractivos (Herráez & Vendrell, 2018). Estos paneles no solo ofrecen ventajas estéticas, sino que también mejoran el rendimiento térmico y acústico de los edificios, contribuyendo a la sostenibilidad y eficiencia energética.

En la industria nuclear, el UHPC ha encontrado aplicaciones en la construcción de estructuras críticas que requieren alta resistencia a la radiación y durabilidad frente a condiciones extremas. Por ejemplo, se ha utilizado UHPC en la construcción de contenedores de residuos nucleares, donde su baja permeabilidad y resistencia a la corrosión son esenciales para garantizar la seguridad a largo plazo de los materiales radiactivos (Chico-Brito & Moreno-Gavilanes, 2024). La capacidad del UHPC para resistir la penetración de agentes agresivos y su estabilidad química lo convierten en un material ideal para aplicaciones en entornos donde la seguridad es primordial.

La combinación de estas propiedades hace que el UHPC sea un material de elección en aplicaciones donde la seguridad, la durabilidad y la estética son fundamentales. A medida que la tecnología avanza y se desarrollan nuevas formulaciones de UHPC, es probable que su uso se expanda aún más en estos campos, ofreciendo soluciones innovadoras para los desafíos de la ingeniería civil y la arquitectura contemporánea.

(Lozano Molina et al., 2024; Santa María Chimbor & Valverde Chávez, 2022).

Desafíos en el uso de los UHPC

Costo

El uso del hormigón de ultra alto desempeño (UHPC) en la construcción presenta varios desafíos, siendo el costo uno de los más significativos. Aunque el UHPC ofrece propiedades mecánicas y físicas superiores que pueden justificar su uso en aplicaciones críticas, su costo inicial más elevado en comparación con el hormigón convencional puede ser un obstáculo para su adopción generalizada en proyectos de construcción. Este desafío se manifiesta en varias dimensiones, incluyendo los costos de materiales, la mano de obra y el proceso de construcción (Bautista Hernández, 2022; Del Campo Saltos et al., 2023).

En primer lugar, los costos de los materiales para la producción de UHPC son considerablemente más altos que los del hormigón convencional. Esto se debe a la necesidad de utilizar adiciones minerales de alta calidad, como la microsílice y el metacaolín, así como

superplastificantes que mejoran la trabajabilidad y la resistencia del material (Sánchez Tróchez et al., 2021). Estos componentes, aunque esenciales para lograr las propiedades deseadas del UHPC, incrementan el costo total del material. Por ejemplo, la microsílice puede costar hasta cinco veces más que el cemento Portland convencional, lo que impacta directamente en el costo por metro cúbico de UHPC.

Además de los costos de los materiales, la mano de obra especializada requerida para trabajar con UHPC también puede ser un factor limitante. La formulación y el manejo del UHPC requieren un conocimiento técnico avanzado, así como habilidades específicas para garantizar que se logren las propiedades mecánicas y de durabilidad esperadas (Serna Mendoza & Serna Giraldo, 2022). Esto puede traducirse en costos laborales más altos, ya que se necesita personal capacitado para la mezcla, colocación y curado del material. En proyectos donde se utiliza UHPC, es común que se requiera un mayor tiempo de capacitación para los trabajadores,

lo que también contribuye a los costos generales del proyecto (Cajamarca-Solis et al., 2023).

El proceso de construcción en sí mismo también puede ser más costoso al utilizar UHPC. Debido a su alta resistencia y durabilidad, el UHPC permite la construcción de elementos estructurales más delgados y ligeros, lo que puede reducir la cantidad de material utilizado en comparación con el hormigón convencional. Sin embargo, esta ventaja se ve contrarrestada por la necesidad de técnicas de colocación más cuidadosas y el uso de encofrados más sofisticados para manejar el material adecuadamente (Ramos-Fuentes et al., 2016). Estos factores pueden aumentar el tiempo de construcción y, por ende, los costos asociados al proyecto.

A pesar de estos desafíos de costo, es importante considerar el ciclo de vida del UHPC en la evaluación de su viabilidad económica. Aunque el costo inicial puede ser más alto, la durabilidad y la resistencia a la corrosión del UHPC pueden resultar en menores costos de mantenimiento y reparación a lo

largo del tiempo (Cruz Espinoza et al., 2023). Por ejemplo, en proyectos de infraestructura crítica, como puentes y edificios, la reducción en la frecuencia de reparaciones y la prolongación de la vida útil de la estructura pueden justificar la inversión inicial más alta en UHPC (Meneses Cerón et al., 2024).

Trabajabilidad

La trabajabilidad del hormigón de ultra alto desempeño (UHPC) es un desafío significativo que debe ser abordado para garantizar su correcta aplicación en la construcción. A pesar de sus propiedades mecánicas superiores, el UHPC presenta una consistencia muy densa y una baja relación agua-cemento, lo que puede dificultar su manipulación y colocación en obra (Erazo-Rivera et al., 2024). Esta dificultad en la trabajabilidad puede llevar a problemas durante el proceso de vertido, como la segregación de los componentes y la formación de burbujas de aire, que pueden comprometer la integridad estructural del material.

Para mejorar la trabajabilidad del UHPC, se han desarrollado diversas técnicas y aditivos. Uno de los

enfoques más comunes es la incorporación de superplastificantes, que son aditivos químicos que permiten reducir la cantidad de agua necesaria en la mezcla sin afectar la fluidez del hormigón (Reyes, 2024). Estos superplastificantes ayudan a aumentar la fluidez del UHPC, facilitando su colocación en formas complejas y reduciendo el riesgo de segregación. Sin embargo, es vital seleccionar el tipo adecuado de superplastificante, ya que su interacción con otros componentes de la mezcla puede variar y afectar las propiedades finales del UHPC (Gagetti et al., 2020).

Otra técnica utilizada para mejorar la trabajabilidad es la optimización de la granulometría de los áridos. La selección de áridos con diferentes tamaños y formas puede contribuir a una mejor compactación y a una distribución más uniforme de los materiales en la mezcla (França et al., 2021). Por ejemplo, el uso de áridos de forma angular puede aumentar la fricción interna, lo que puede dificultar la fluidez, mientras que los áridos redondeados tienden a mejorar la trabajabilidad (Contreras Vásquez et al., 2024). La combinación adecuada de áridos

puede, por lo tanto, facilitar el proceso de mezcla y colocación del UHPC.

Además, se ha investigado el uso de adiciones minerales, como la microsilíce y el metacaolín, que no solo mejoran las propiedades mecánicas del UHPC, sino que también pueden influir en su trabajabilidad. Estas adiciones pueden ayudar a reducir la cantidad de agua necesaria en la mezcla, manteniendo al mismo tiempo una buena fluidez (Abo-El-Enein et al., 2010). Sin embargo, es importante encontrar un equilibrio, ya que un exceso de adiciones puede llevar a una mezcla demasiado densa y difícil de trabajar.

La temperatura también juega un papel esencial en la trabajabilidad del UHPC. En climas fríos, la baja temperatura puede hacer que el tiempo de fraguado se alargue, dificultando la colocación del material antes de que comience a endurecerse (Obando-Guillermo et al., 2023). Por otro lado, en climas cálidos, el aumento de la temperatura puede acelerar el fraguado, lo que puede resultar en una pérdida de trabajabilidad. Por lo tanto, es fundamental considerar las

condiciones ambientales al planificar el uso de UHPC y ajustar la formulación de la mezcla en consecuencia.

Sostenibilidad

El hormigón de ultra alto desempeño (UHPC) ha emergido como un material innovador en la construcción, ofreciendo propiedades mecánicas y físicas superiores. Sin embargo, su producción y uso también plantean desafíos significativos en términos de sostenibilidad ambiental. Estos desafíos incluyen el alto consumo de recursos naturales, la generación de residuos y las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas con la producción de cemento, que es un componente clave del UHPC (Abadel, 2023; Santos et al., 2021).

Uno de los principales impactos ambientales del UHPC proviene de la producción de cemento, que es responsable de aproximadamente el 8% de las emisiones globales de CO₂ (García, 2021). La fabricación de cemento implica procesos altamente energéticos que requieren grandes cantidades de combustibles fósiles, lo que contribuye a la huella de carbono del material. Para mitigar

este impacto, se han propuesto varias estrategias, como la incorporación de materiales cementantes suplementarios (SCM), como la ceniza volante y la escoria de alto horno, que pueden reemplazar parcialmente el cemento Portland en la mezcla de UHPC (Abadel, 2023). Estas adiciones no solo reducen la cantidad de cemento necesario, sino que también mejoran las propiedades del UHPC, como la durabilidad y la resistencia a la corrosión.

Además, el uso de agregados reciclados en la formulación de UHPC es otra estrategia que puede mejorar su sostenibilidad. La incorporación de agregados reciclados, provenientes de la demolición de estructuras existentes, no solo reduce la demanda de recursos naturales vírgenes, sino que también disminuye la cantidad de residuos que terminan en vertederos (Aguero et al., 2019). Sin embargo, la variabilidad en la calidad de los agregados reciclados puede afectar las propiedades mecánicas del UHPC, lo que requiere un cuidadoso control de calidad y pruebas de desempeño para garantizar que se

cumplan los estándares necesarios (Scherer, 2011).

La evaluación del ciclo de vida (LCA) es una herramienta clave para analizar el impacto ambiental del UHPC y sus componentes. A través de la LCA, es posible identificar las etapas del ciclo de vida del UHPC que generan mayores impactos ambientales, desde la extracción de materias primas hasta la producción, uso y disposición final del material (Du et al., 2024). Esta evaluación permite a los ingenieros y diseñadores tomar decisiones informadas sobre la selección de materiales y procesos de producción que minimicen el impacto ambiental.

Además, la implementación de prácticas de construcción sostenibles, como la reducción de residuos en el sitio de construcción y el uso de tecnologías de construcción más limpias, puede contribuir a mejorar la sostenibilidad del UHPC (Pacheco Neto et al., 2018). Por ejemplo, el uso de técnicas de prefabricación puede reducir el desperdicio de materiales y mejorar la eficiencia en el uso de recursos durante la construcción (Krag et al., 2013).

4. Conclusiones

El análisis exhaustivo de la literatura sobre hormigones de ultra alto desempeño (UHPC) revela que este material representa un avance significativo en la tecnología del hormigón, ofreciendo propiedades mecánicas y físicas superiores que lo distinguen claramente del hormigón convencional. La evidencia recopilada demuestra que el UHPC puede alcanzar resistencias a la compresión superiores a 150 MPa, con una notable mejora en la resistencia a la tracción y flexión, características que lo hacen especialmente valioso para aplicaciones estructurales exigentes.

Las aplicaciones prácticas del UHPC han demostrado su versatilidad y eficacia en diversos contextos de la ingeniería civil. Su uso en puentes, edificios y estructuras especiales ha permitido el desarrollo de soluciones innovadoras que combinan eficiencia estructural con durabilidad mejorada. La capacidad del material para ser utilizado en elementos prefabricados y en la rehabilitación de estructuras existentes amplía significativamente su campo de aplicación, ofreciendo alternativas

viables para la modernización de infraestructuras.

Sin embargo, los desafíos identificados en relación con el costo y la trabajabilidad del UHPC siguen siendo obstáculos significativos para su adopción más generalizada. El alto costo inicial del material, aunque puede justificarse considerando su ciclo de vida completo y sus beneficios a largo plazo, representa una barrera importante para su implementación en proyectos con presupuestos limitados. La trabajabilidad del material requiere consideraciones especiales durante su colocación y curado, demandando mano de obra especializada y técnicas de construcción específicas.

La sostenibilidad del UHPC emerge como un aspecto fundamental que requiere mayor atención. Si bien el material permite reducir las cantidades necesarias en las estructuras debido a su alta resistencia, la intensidad de carbono asociada a su producción plantea desafíos ambientales significativos. Las investigaciones actuales sobre la incorporación de materiales cementantes suplementarios y

agregados reciclados muestran caminos prometedores para mejorar el perfil ambiental del UHPC.

En perspectiva, el futuro del UHPC parece promisorio, especialmente en aplicaciones donde sus propiedades superiores justifican la inversión inicial. La continua investigación en la optimización de mezclas, la mejora de la trabajabilidad y la reducción del impacto ambiental sugiere que el material continuará evolucionando para abordar sus limitaciones actuales. Se recomienda un enfoque equilibrado que considere tanto los beneficios técnicos como los aspectos económicos y ambientales al evaluar su implementación en proyectos específicos.

Bibliografía

- Abadel, A. A. (2023). Physical, Mechanical, and Microstructure Characteristics of Ultra-High-Performance Concrete Containing Lightweight Aggregates. *Materials*, 16(13), 4883. <https://doi.org/10.3390/ma16134883>
- Abo-El-Enein, S. A., Abbas, R., & Ezzat, E.-S. (2010). Propiedades y durabilidad de

- los cementos adicionados con metacaolín. *Materiales de Construcción*, 60(299), 21–35.
<https://doi.org/10.3989/mc.2010.50509>
- Aguero, R. R., Korzenowski, C., Aguirre, J. R. Y., Beraldin, R., Silva, L. C. P. D., & Campos Filho, A. (2019). Investigación de diseños de mezcla para producir Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) usando ANOVA. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 24(2), e12365.
<https://doi.org/10.1590/s1517-707620190002.0680>
- Arrona-Rivera, A. E., Hernández-Velasco, X., & Basurto-Argueta, E. (2017). Identificación de *Eustongylides tubifex* (Nitzsch in Rudolphi, 1819) (Nematoda: Dioctophymatidae) en una garza estriada (*Butorides striata*, Pelecaniforme: Ardeidae) en el humedal el banco, Michoacán, México. *ACTA ZOOLOGICA MEXICANA (N.S.)*, 33(2), 181–187.
<https://doi.org/10.21829/azm.2017.3321059>
- Bautista Hernández, O. (2022). Propuesta de un índice sintético adelantado de desempeño fiscal para el estado de Querétaro. *Revista GEON (Gestión, Organizaciones y Negocios)*, 9(1).
<https://doi.org/10.22579/23463910.752>
- Cajamarca-Solis, D., Heras-Benavides, D., & Mendoza-Enríquez, N. (2023). Diseño y validación de un instrumento para medir la percepción sobre la gestión de residuos sólidos de construcción en las empresas de la ciudad de Cuenca 2021. *593 Digital Publisher CEIT*, 8(1–1), 370–384.
<https://doi.org/10.33386/593dp.2023.1-1.1683>
- Chico-Brito, F. J., & Moreno-Gavilanes, K. A. (2024). Plan de gestión de marca urbanista basado en los factores arquitectónicos, culturales y turísticos de la ciudad de Ambato. *MQRInvestigar*, 8(1), 1–21.
<https://doi.org/10.56048/MQR20225.8.1.2024.1-21>
- Contreras Vásquez, L., Mayorga-Amaguaya, D., Peñafiel-Valla, G., & Navarro-Peñaherrera, C. (2024). Análisis Comparativo de la Resistencia a compresión entre el hormigón tradicional y el preparado con escombros de hormigón. *Investigación y Desarrollo*, 18(1).
<https://doi.org/10.31243/id.v18.2023.2020>
- Cruz Espinoza, L. A., Quizhpe Campoverde, J. D., &

- Mendoza Enríquez, N. (2023). Análisis de los rendimientos de mano de obra en rubros de mampostería en viviendas de dos plantas en la ciudad de Cuenca. *ConcienciaDigital*, 6(1.1), 35–61. <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v6i1.1.2462>
- Del Campo Saltos, G., Villota Oyarvide, W., Andrade Sánchez, E., & Montero Reyes, Y. (2023). Bibliometric analysis on neuroscience, artificial intelligence and robotics studies: Emphasis on disruptive technologies in education. *Salud, Ciencia y Tecnología*, 3, 362. <https://doi.org/10.56294/saludcyt2023362>
- Dopico, J. J., Martirena Hernandez, F., Day, R. L., Middendorf, B., Gehrke, M., & Martinez, L. (2008). Desarrollo de hormigones con aglomerante cal-puzolana fina como material cementicio suplementario. *Revista Ingeniería de Construcción*, 23(3). <https://doi.org/10.4067/S0718-50732008000300005>
- Du, L., Ji, X., Lu, K., & Wang, J. (2024). Experimental and theoretical studies on postfire behavior of functionally graded ultra-high performance concrete. *Advances in Structural Engineering*, 27(10), 1635–1647. <https://doi.org/10.1177/13694332231196508>
- Erazo-Rivera, R. P., Pancorbo-Sandoval, J. A., Leyva-Ricardo, S. E., & Barba-Mosquera, A. E. (2024). Mapa de Investigaciones Científicas sobre Economía Circular con Origen en Ecuador. *Economía y Negocios*, 15(1), 86–100. <https://doi.org/10.29019/eyn.v15i1.1260>
- França, L. H. P., Júnior, M. S. M., & Mont'alverne, A. D. M. (2021). Durabilidade do UHPC e UHPFRC contendo metacaulim. *Congresso Internacional sobre Patologia e Reabilitação das Construções*, 231–239. <https://doi.org/10.4322/CINPA.R.2021.029>
- Gagetti, P., Pasteran, F., Ceriana, P., Prieto, M., Cipolla, L., Tuduri, E., Bruinsma, N., Galas, M., Ramón-Pardo, P., & Corso, A. (2020). Evolución del desempeño de Laboratorios de Referencia de América Latina en la detección de mecanismos de resistencia a los antimicrobianos. *Revista Panamericana de Salud Pública*, 44, 1. <https://doi.org/10.26633/RPS.P.2020.42>
- Gallucci, G., Rosa, Y., Brandariz, R., Cerrutti, W., & Tanoira, I. (2022). Túnel carpiano con

- anestesia local versus WALANT. *Revista de la Asociación Argentina de Ortopedia y Traumatología*, 87(3), 335–340. <https://doi.org/10.15417/issn.1852-7434.2022.87.3.1430>
- García, J. A. (2021). Predicción basada en redes neuronales de la resistencia a compresión a los 7 días de los UHPC incorporando SCM. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 26(4), e13080. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620210004.1380>
- García, J. A., & Varón, F. A. P. (2022). Modelo predictivo de redes neuronales para estimar la resistencia a compresión de hormigones con materiales cementantes suplementarios y agregados reciclados. *Matéria (Rio de Janeiro)*. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620220002.1318>
- Gidrão, G. D. M. S., Zaramella, G., Hardt, S. O., Parabocz, W. L., Bosse, R. M., Souza, C. F. P. D., Ribeiro, R. S., & Silva, D. A. (2021). Propriedades mecânicas do Concreto de Ultra Alto Desempenho Reforçado por Fibras (UHPRFC): Uma revisão de literatura. *Conjecturas*, 21(5), 52–80. <https://doi.org/10.53660/CONJ-220-715>
- González Salcedo, L. O., Guerrero Zúñiga, A. P., Delvasto Arjona, S., & Will, A. L. E. (2019). Artificial Neural Model based on radial basis function networks used for prediction of compressive strength of fiber-reinforced concrete mixes. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 29(2), 37–52. <https://doi.org/10.18359/rcin.3737>
- Gu, C., Sun, W., Guo, L., Wang, Q., Liu, J., Yang, Y., & Shi, T. (2018). Investigation of Microstructural Damage in Ultrahigh-Performance Concrete under Freezing-Thawing Action. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018(1), 3701682. <https://doi.org/10.1155/2018/3701682>
- Herráez, B. J., & Vendrell, E. (2018). Segmentación de mallas 3d de edificios históricos para levantamiento arquitectónico. *Virtual Archaeology Review*, 9(18), 66. <https://doi.org/10.4995/var.2018.5858>
- Krag, M. N., Vale, R. S. D., Silva, E., Oliveira, F. D. A., Gama, M. A. P., & Silva, P. D. T. E. D. (2013). Avaliação qualitativa de impactos ambientais considerando as etapas de limpeza e preparo do terreno em plantios florestais no Nordeste paraense. *Revista*

- Árvore, 37(4), 725–735.
<https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000400016>
- Lino-Aguilar, V., Calixto-Arellano, F., González-Manrique, R. A., & Flores-Tochihuitl, J. (2024). Cobertura radicular con la técnica en túnel combinada con injerto de tejido conectivo subepitelial. *Revista Odontológica Mexicana Órgano Oficial de la Facultad de Odontología UNAM*, 26(3). <https://doi.org/10.22201/fo.1870199xp.2022.26.3.80901>
- Lozano Molina, M., Suárez Loor, C., Pita Mera, M., & Corrales Zambrano, S. (2024). Reciclaje arquitectónico. Caso: Zona de regeneración urbana de Portoviejo. *Revista InGenio*, 7(1), 43–57. <https://doi.org/10.18779/ingenio.v7i1.805>
- Meneses Cerón, L. A., Orozco Álvarez, J. E., Mosquera Muñoz, J. C., & Vélez Rivera, V. M. (2024). Una nueva perspectiva del contagio financiero energético en Colombia: Evidencia del análisis de ondas y dinámicas de comovimientos. *Revista CEA*, 10(22), e2578. <https://doi.org/10.22430/24223182.2578>
- Obando-Guillermo, H., Carranza-Muñoz, Z., Díaz-Quepuy, J., Serrano-Otoya, D., & Muñoz-Perez, S. (2023). RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DE HORMIGONES REFORZADOS CON FIBRA DE POLIPROPILENO. *Paideia XXI*, 11(2), 369–382. <https://doi.org/10.31381/paideia.v11i2.4039>
- Pacheco Neto, G., Bus, T. O. D. L., Aguiar, J. T. D., Schneider, C. R., Kanieski, M. R., & Almeida, A. N. D. (2018). Avaliação dos impactos ambientais de atividade avicultora em Pinhal da Serra, Rio Grande do Sul, Brasil. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*, 5(9), 41–48. <https://doi.org/10.21438/rbgas.050903>
- Paredes, J. A., Gálvez, J. C., Alberti, M. G., & Enfedaque, A. (2020). Influencia del uso de metacaolín y el humo de sílice en el desarrollo de la resistencia a compresión del hormigón de altas prestaciones y su relación con la microestructura = Influence of metakaolin and silica fume in the development of compressive strength of high performance concrete and its relationship with the microstructure. *Anales de Edificación*, 6(1), 70. <https://doi.org/10.20868/ade.2020.4457>
- Poitevin, L., & Ferraguti, M. S. (2022). Anestesia local con

- epinefrina, sin manguito hemostático, para la liberación del túnel carpiano. Estudio comparativo de dos variantes técnicas en 89 casos. *Revista de la Asociación Argentina de Ortopedia y Traumatología*, 87(6), 789–797. <https://doi.org/10.15417/issn.1852-7434.2022.87.6.1466>
- Ramos-Fuentes, G. A., Melo-Lagos, I. D., & Regino-Ubarnes, F. J. (2016). Control repetitivo impar de alto orden de un rectificador monofásico: Operación a frecuencia variable. *TecnoLógicas*, 19(36), 63. <https://doi.org/10.22430/22565337.587>
- Rios Jimenez, J. D., Cifuentes Bulté, H., & Medina Encina, F. (2018). Determinación de las curvas de Wöhler en fatiga a flexotracción de un hormigón de muy alta resistencia sometido a temperatura elevada. *Libro de Comunicaciones / Livro das Comunicações*, 1–1. <https://doi.org/10.4995/HAC2018.2018.5527>
- Rojas Duque, G., González, C. J., Torres Mayorga, A., Hernández Ramírez, R. A., & Muñoz Medina, S. E. (2021). Resultados funcionales a largo plazo de la cirugía abierta de liberación del túnel carpiano. *Revista de la Asociación Argentina de Ortopedia y Traumatología*, 86(5), 601–612. <https://doi.org/10.15417/issn.1852-7434.2021.86.5.1305>
- Sánchez Tróchez, D. X., Diago Ortiz, A., Rivera Martínez, W. F., Potes Ordoñez, L. B., & Navia Mera, M. V. (2021). Fortalecimiento de asociaciones campesinas del municipio del Tambo mediante la transformación de cultivos tradicionales hacia frutos de alto valor agregado: Caso de estudio: Producto Sacha Inchi de la Cooperativa “Sachatambo” del Municipio del Tambo, Cauca, Colombia. *ESIC Market*, 52(170), e5235. <https://doi.org/10.7200/esicm.168.0523.5>
- Santa María Chimbor, C. A., & Valverde Chávez, M. A. (2022). Estrategias proyectuales en la enseñanza del proyecto arquitectónico en la Facultad de Arquitectura – UNCP 2018. *Prospectiva Universitaria*, 16(1), 69–75. <https://doi.org/10.26490/uncp.prospectivauniversitaria.2019.16.1027>
- Santos, O. S. D., Silva Coelho, L. O. D., Nascimento, L., Fernandes, R. T. V., & Oliveira, J. F. D. (2021). O CONHECIMENTO DISCENTE SOBRE IMPACTOS AMBIENTAIS EM CAROLINA, MARANHÃO.

- Acta Tecnológica, 15(2), 27–40.
<https://doi.org/10.35818/acta.v15i2.860>
- Scherer, M. E. G. (2011). Análise da qualidade técnica de estudos de impacto ambiental em ambientes de Mata Atlântica de Santa Catarina: Abordagem faunísticaDOI:10.5007/2175-7925.2011v24n4p171.
Biotemas, 24(4), 171–181.
<https://doi.org/10.5007/2175-7925.2011v24n4p171>
- Serna Mendoza, C. A., & Serna Giraldo, D. S. (2022). Residuos Sólidos y Cambio Climático. Revista del Instituto de investigación de la Facultad de minas, metalurgia y ciencias geográficas, 25(50), 393–399.
<https://doi.org/10.15381/iigeo.v25i50.24552>
- Simone, J., Maletti, F., & Azulay, G. (2015). Síndrome del túnel cubital causado por el músculo anconeus epitrochlearis. Reporte de un caso. [Cubital tunnel syndrome caused by anconeus epitrochlearis muscle. Case Report]. Revista de la Asociación Argentina de Ortopedia y Traumatología, 80(1), 53.
<https://doi.org/10.15417/344>
- Toala-Zambrano, L. A., Vanga-Arvelo, M. G., Muñoz-Molina, J. G., & Zambrano-Quiroz, F. N. (2021). Percepción del Confort Térmico en Conjuntos Residenciales y su Incidencia en la Calidad de Vida. Revista Lasallista de Investigación, 18(1), 34–47.
<https://doi.org/10.22507/rli.v18n1a3>
- Torre, A. V., Espinoza, P. C., & Matias, J. A. (2022). Uso de las redes neuronales artificiales en el estudio del coeficiente de permeabilidad de concretos adicionados con microsílice, metacaolín y puzolana. Información Tecnológica, 33(5), 81–92.
<https://doi.org/10.4067/S0718-07642022000500081>
- Vaisman, A., Cañas, M., Ruiz, A., Edwards, D., Arellano, S., & Schmidt-Hebbel, A. (2022). La fijación con tornillo de interferencia tibial cuadrante específico permite un constante desplazamiento de los injertos de tejido dentro de tuneles tibiales mal posicionados: Análisis cuantitativo de ligamento cruzado anterior en porcinos. Revista Chilena de Ortopedia y Traumatología, 63(01), e9–e16. <https://doi.org/10.1055/s-0042-1743545>
- Zhu, Z., Lian, X., Zhai, X., Li, X., Guan, M., & Wang, X. (2022). Mechanical Properties of Ultra-High Performance Concrete with Coal

Gasification Coarse Slag as
River Sand Replacement.
Materials, 15(21), 7552.
<https://doi.org/10.3390/ma15217552>