

09

AVANCES DEL USO DE HORMIGÓN DE ULTRA ALTO RENDIMIENTO EN VIGAS PRE-TENSADAS: PERSPECTIVAS DESDE LA MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL

ADVANCES IN THE USE OF ULTRA-HIGH PERFORMANCE CONCRETE IN PRESTRESSED BEAMS: PERSPECTIVES FROM THE MASTER'S DEGREE IN CIVIL ENGINEERING

Jhenny Marcela Patiño-Yépez¹

E-mail: jhenny.patino.72@est.ucacue.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9208-0137>

Juan Sebastián Maldonado-Noboa¹

E-mail: jmaldonadon@ucacue.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5329-2201>

Cesar Humberto Maldonado-Noboa¹

E-mail: cmaldonadon@ucacue.edu.ec

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0383-5460>

¹ Universidad Católica de Cuenca. Ecuador.

Cita sugerida (APA, séptima edición)

Patiño-Yépez, J. M., Maldonado-Noboa, J. S., & Maldonado-Noboa, C. H. (2023). Avances del uso de hormigón de ultra alto rendimiento en vigas pretensadas: perspectivas desde la Maestría en Ingeniería Civil. *Revista Conrado*, *19*(95), 95-103.

RESUMEN

Este artículo, desde la perspectiva valiosa del ámbito de la Maestría en Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Cuenca, se adentra en el mundo del Hormigón de Ultra Alto Rendimiento, también conocido como UHPC por sus siglas en inglés. Este material de vanguardia se distingue por su extraordinaria resistencia a la compresión y su notable ductilidad, en marcado contraste con el hormigón tradicional. El objetivo central de esta investigación es llevar a cabo una revisión bibliográfica exhaustiva que aborde diversas dimensiones de la aplicación del UHPC en puentes. Esto incluye el análisis de experiencias prácticas, la identificación de ventajas sustanciales en su implementación y la exploración de los obstáculos específicos que se enfrentan en el contexto particular de nuestra región. Adicionalmente, se busca arrojar luz sobre la efectividad del UHPC en comparación con los materiales convencionales, como el concreto tradicional, considerando factores económicos, ambientales y estructurales. Este análisis proporcionará una visión más completa de la inversión en UHPC en términos de durabilidad, sostenibilidad y mantenimiento de puentes. Finalmente, se examinan las investigaciones más recientes relacionadas con la dosificación de las mezclas de UHPC, lo que contribuye a comprender mejor cómo optimizar su composición para obtener un rendimiento óptimo en vigas pretensadas.

Palabras clave:

Educación superior, posgrado, ingeniería de puentes, aplicación práctica, propiedades mecánicas.

ABSTRACT

This article, from the valuable perspective of the scope of the Master's Degree in Civil Engineering of the Catholic University of Cuenca, delves into the world of Ultra High Performance Concrete, also known as UHPC for its acronym in English. This cutting-edge material is distinguished by its extraordinary compressive strength and remarkable ductility, in stark contrast to traditional concrete. The central objective of this research is to conduct a comprehensive literature review that addresses various dimensions of the application of UHPC in bridges. This includes the analysis of practical experiences, the identification of substantial advantages in its implementation and the exploration of the specific obstacles faced in the particular context of our region. Additionally, it seeks to shed light on the effectiveness of UHPC in comparison with conventional materials, such as traditional concrete, considering economic, environmental and structural factors. This analysis will provide a more complete view of the investment in UHPC in terms of durability, sustainability and maintenance of bridges. Finally, the most recent research related to the dosage of UHPC mixes is reviewed, contributing to a better understanding of how to optimize its composition for optimal performance in prestressed beams.

Keywords:

Higher education, graduate school, bridge engineering, practical application, mechanical properties.

INTRODUCCIÓN

El Hormigón de Ultra Alto Rendimiento, conocido como UHPC, ha experimentado un crecimiento significativo en su uso en el diseño de estructuras en las últimas décadas. Este material se ha convertido en un foco de investigación constante debido a sus destacadas propiedades mecánicas. En contraste con el hormigón convencional, el UHPC ofrece notables ventajas reológicas, como una excelente trabajabilidad, autocolocación y autodensificación. Además, su alta resistencia a la compresión y su comportamiento de no fragilización han sido ampliamente documentados en investigaciones recientes (Christ et al., 2019).

Estas propiedades mecánicas excepcionales permiten la reducción de secciones en elementos estructurales, lo que a su vez optimiza la cantidad de material utilizado en la obra y reduce los desperdicios. Esto confiere al UHPC un gran potencial para abordar desafíos de sostenibilidad en la construcción, tanto en proyectos actuales como en futuras construcciones. Desde la perspectiva de la Maestría en Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Cuenca, esta evolución en el uso del UHPC representa una oportunidad valiosa para explorar soluciones innovadoras y sostenibles en el diseño y construcción de puentes con vigas pretensadas.

Se podría considerar que el origen del UHPC se remonta a los años 50, cuando Otto Graf desarrolló un hormigón con una resistencia de 70 . Ya en los años 80, se logró producir hormigones aún más resistentes, de hasta 100 , gracias al descubrimiento del efecto del humo de sílice y al desarrollo de superplastificantes (Punta de la Herrán, 2020).

En un principio estos hormigones no tuvieron un papel relevante en la industria de la construcción debido a su alto costo de producción, sin embargo, se observó que en algunos proyectos su uso permitía reducir secciones y espesores de ciertos elementos, convirtiéndolo en una alternativa competitiva. Más adelante, Hendrik Bache realizó un nuevo avance tecnológico al utilizar fibras de acero en la matriz del hormigón lo que permitió aumentar su resistencia hasta 200 N/mm² (Punta de la Herrán, 2020).

En 1994, Richard y Cheyreyz retomaron las ideas de Bache y desarrollaron aún más este material mejorando su resistencia y su durabilidad. Este comportamiento optimizado de sus características los llevó a la creación del término “Hormigones de Ultra Alto Desempeño” cuyas siglas en inglés son UHPC y a finales de los años 90 estos materiales empezaron a utilizarse en proyectos piloto de mayor envergadura (Punta de la Herrán, 2020).

Décadas de estudios posteriores han permitido desarrollar una gama de fórmulas comerciales para cubrir su demanda en la construcción, sin embargo, a pesar su amplio uso en el diseño de edificaciones en altura, su aplicación en la ingeniería de puentes pretensados ha sido condicionada por su elevado costo y limitada información en los códigos y normas de construcción vigentes.

Hasta la fecha se han descrito aplicaciones de UHPC en puentes pretensados en Europa, Norteamérica, Australia, Asia y Nueva Zelanda, pero aún existen desafíos para su aplicación generalizada en países en vías de desarrollo debido a desafíos específicos como el costo, la disponibilidad de recursos, la capacidad de producción y la falta de normativa. El costo del UHPC es considerablemente más caro que los materiales de construcción convencionales, como el concreto convencional o el acero y esto es un obstáculo significativo en países en desarrollo donde los recursos económicos son limitados. La disponibilidad de recursos es otro desafío, pues la fabricación del UHPC requiere de materiales específicos como polvos de sílice de alta pureza y fibras de acero especiales. Estos materiales no están fácilmente disponibles, lo que aumenta la complejidad logística.

La capacidad de producción también representa un reto para el uso masivo de UHPC en Latinoamérica, ya que su fabricación generalmente requiere equipos y tecnología especializados y ciertos países carecen de la infraestructura necesaria para producirlo a gran escala, lo que limita su adopción. Por último, el desafío principal es el uso efectivo de UHPC es la falta de normativa, debido a que su formulación requiere conocimientos técnicos y experiencia en su diseño, mezcla y aplicación y la falta de capacitación adecuada y normativas del manejo siguen siendo un desafío.

No obstante, y sobre estos retos, el uso estratégico de UHPC en proyectos críticos de infraestructura de alta carga, como en puentes de vigas pretensadas, puede ser no solo beneficioso sino necesario en nuestro contexto. Ecuador concretamente forma parte de la zona sísmica del cinturón del pacífico y sus movimientos telúricos son una amenaza significativa y constante, en donde la capacidad de un puente para soportar cargas y eventos extremos es limitada y representa un problema de seguridad estadísticamente real (Marín y Maldonado, 2020).

Según un estudio publicado en 2020 sobre las causas del colapso de puentes en Ecuador, el 47% de los casos estudiados corresponde a puentes de hormigón y las principales causas son “deficiencias estructurales y de diseño, sobrecargas e impacto, deficiencia en la construcción y falta de mantenimiento” (Marín & Maldonado, 2020,

p.373). La investigación reveló también que al menos 72 puentes de diversos tipos colapsaron en los últimos 23 años ente el 2000 y 2023 en el país y 24 de ellos fueron de tipo viga cuyo material de construcción principal fue el hormigón convencional (Tabla 1).

Tabla 1. Tipo y número de puentes colapsados en Ecuador.

Tipo de puente	Material	Número de fallas	%
Alcantarilla	Hormigón	1	1.39%
Arco	Acero	2	2.78%
Armadura	Acero	3	4.17%
Atirantado	Hormigón	1	1.39%
Bailey	Acero	7	9.72%
Colgante	Acero	6	8.33%
	Madera	5	6.94%
Losa	Hormigón	7	9.72%
Viga	Hormigón	24	33.33%
	Acero	11	15.28%
	Madera	4	5.56%
Viga-cajón	Hormigón	1	1.39%
Total		72	100%

Fuente: Marín & Maldonado (2020).

Un caso concreto del colapso de un puente de hormigón pretensado es el de la vía a Jipijapa en el cantón del mismo nombre en la provincia de Manabí el 14 de octubre del 2021, el cual dejó incomunicada a las provincias de Manabí y Guayas (Figura 1).



Figura 1. Hundimiento del puente que une Manabí con Guayas.

Fuente: El Comercio (2020).

Considerando que, según Marín & Maldonado (2020), las principales causas de colapso son la deficiencia en el diseño y la sobrecarga en puentes tipo viga de hormigón convencional, el UHPC se vuelve un material atractivo de revisar al ser capaz de resistir altas cargas de manera efectiva, garantizando la seguridad de las carreteras y reduciendo la necesidad de reparaciones costosas. Además, en situaciones donde se produce un fallo de pretensado es eficiente debido a su capacidad para mantener su integridad estructural, su durabilidad, su capacidad de carga y su resistencia a desastres.

A pesar de ser inicialmente más caro que otros tipos de concreto, el UHPC puede ahorrar dinero a largo plazo al minimizar la necesidad de reparaciones y reemplazos frecuentes, por lo que la toma de decisiones que impulsen el uso de este nuevo material debe basarse en un análisis cuidadoso de costos y beneficios técnicos y en las condiciones específicas de la ciudad de implementación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para abordar este tema, se utilizó una metodología de investigación que se apoya en una serie de métodos y técnicas específicas. En primer lugar, se realiza un análisis documental exhaustivo, recurriendo a fuentes académicas, literatura científica y estudios de casos previos relacionados con el uso del Hormigón de Ultra Alto Rendimiento (UHPC) en vigas pretensadas de puentes. Este enfoque permite recopilar información clave sobre los principios teóricos, las metodologías de diseño de mezclas y las propiedades del UHPC (Vásquez et al., 2023).

Se aplicaron técnicas de revisión sistemática para organizar y sintetizar la información recopilada de manera estructurada y objetiva. Esto facilita la identificación de tendencias, patrones y conclusiones significativas en la literatura existente sobre el tema.

Para evaluar la producción de UHPC, se utilizan técnicas de análisis de laboratorio, incluyendo ensayos de resistencia, durabilidad y comportamiento mecánico. Estos métodos permiten una evaluación cuantitativa de las características del UHPC y su idoneidad para su uso en vigas pretensadas de puentes.

Además, se empleó una metodología de estudio de casos para examinar las experiencias prácticas de implementación del UHPC en proyectos reales de puentes de tipologías convencionales (Erazo, 2021). Esto implicó la recopilación de datos de proyectos específicos, entrevistas con ingenieros y revisión de informes técnicos para

obtener información de primera mano sobre los resultados y desafíos encontrados en el campo.

Finalmente, se recurrió a técnicas comparativas para evaluar y contrastar el UHPC con materiales tradicionalmente utilizados en ingeniería, como el hormigón y el acero estructural. Esto incluye la elaboración de matrices de comparación que consideran factores económicos, ambientales y estructurales. La combinación de estos métodos y técnicas de investigación proporciona una base sólida para abordar de manera integral y rigurosa el tema del UHPC en vigas pretensadas de puentes y su comparación con materiales convencionales en el campo de la ingeniería civil.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El UHPC se diferencia del hormigón tradicional y alcanza mejores propiedades mecánicas debido al tratamiento del material en algunas etapas claves de su producción, como en la composición de su mezcla y sus procesos de hidratación, curado y compactación detallados a continuación.

Composición de la mezcla: En términos generales, el hormigón convencional se compone de cemento Portland, áridos finos, áridos gruesos, agua y aditivos, mientras que el UHPC se fabrica con una mezcla que excluye el árido grueso, sustituye parte del cemento por materiales con propiedades puzolánicas como las cenizas volantes y microsílíce y agrega adicionalmente superplastificantes para lograr relaciones agua/cemento más bajas (Wang et al., 2011).

Aunque el UHPC es fuerte en compresión, puede ser relativamente débil en tensión y propenso a agrietarse debido a la contracción plástica y secado, esto si no se utiliza refuerzo de fibra distribuida. Para prevenir la propagación de grietas, se pueden incorporar fibras de acero de alta resistencia a la tracción en la mezcla de hormigón para transferir las tensiones de tracción en la microestructura (Wang et al., 2011).

Así mismo sus proporciones agua a cemento resultan en una mayor densidad y resistencia, aunque al mismo tiempo disminuye su facilidad de manejo. Otras investigaciones han indicado que incorporar fibras de acero con relaciones de aspecto más pequeñas mejoran la facilidad de manejo del UHPC incluso cuando se aumenta la cantidad de fibras como se menciona en un estudio realizado por Christ et al. (2019).

La composición del UHPC puede variar según el requerimiento del diseño o el proyecto específico, pero en general suele contener los siguientes componentes:

1. **Cemento:** El UHPC utiliza cemento Portland, preferiblemente con una alta resistencia como el cemento Tipo I o Tipo II.
2. **Agregados finos:** Se emplean agregados finos como arena de sílice, que deben ser de alta calidad y limpios para mejorar la resistencia y durabilidad del concreto.
3. **Agregados ultrafinos:** Se utilizan partículas ultrafinas como cenizas volantes o sílice activada que mejoran la compactación y la resistencia del UHPC.
4. **Aditivos químicos:** Se agregan diversos aditivos químicos para mejorar la plasticidad, fluidez y trabajabilidad del concreto, además de aumentar su resistencia y durabilidad.
5. **Fibras de acero:** Las fibras de acero de alta resistencia son incorporadas para mejorar la ductilidad y resistencia a la tensión del UHPC.

Dosificación de la mezcla: La dosificación exacta de cada componente puede variar según los requisitos específicos del proyecto, como la resistencia deseada, las condiciones ambientales y las restricciones del diseño. Es importante tener en cuenta que el UHPC es un material avanzado y su manipulación requiere experiencia y conocimientos especializados. Por lo tanto, se debe llevar a cabo bajo la supervisión adecuada y siguiendo las pautas proporcionadas por estudios de laboratorio.

Un estudio reciente realizado con materiales locales por Maldonado et al., en 2022, determinó la dosificación de un UHPC de 600 kg/cm² en una práctica de laboratorio a través del método Fuller que comenzó con la selección de los materiales a emplear y la identificación de sus propiedades.

Según su informe, se procedió a diseñar la mezcla de concreto, seguido por la preparación del mismo. Posteriormente, se llevaron a cabo pruebas para determinar las propiedades del concreto y, finalmente se evaluaron e interpretaron los resultados obtenidos. Los materiales usados fueron cemento, agua, grava, arena, cuarzo, sílice y aditivos.

La dosificación precisa del UHPC para lograr una resistencia de 900 kg/cm² o 90 MPa variará según los componentes específicos y las proporciones utilizadas en la mezcla. Pero la dosificación en base al estudio de Maldonado et al., (2022), es la que se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Dosificación del UHPC.

	Mezcla para 1 m3	Mezcla para 6 litros	Porcentaje de materiales	Contenido de humedad	Mezcla para 7 litros
Dato	Kg	Kg	%	%	G
Agua	171.23919	0.941815547	7.1%	0	941.8155466
Cemento	685.185185	3.837037037	29.0%	0	3837.037037
Grava	954.416577	5.344732831	40.4%	1.01	5344.732831
Arena	330.032164	1.84818012	14.0%	11.11	1848.18012
Cuarzo	160.03944	0.896220862	6.8%	0.51	896.2208624
Silicén	65.6170247	0.367455338	2.8%	0	367.4553382
Aditivo	13.7037037	0.076740741	0.6%	0	76.74074074

Fuente: Maldonado et al. (2022).

Hidratación: Según Zhang et al. (2013), la hidratación de los materiales cementantes en el UHPC comienza con la hidratación del cemento Portland para formar hidrato de silicato de calcio e hidróxido de calcio, que pueden reaccionar con aditivos minerales (como por ejemplo el humo de sílice) para formar hidrato de silicato de calcio (C-S-H). Con un tratamiento térmico adecuado, las reacciones puzolánicas en las mezclas de UHPC pueden potenciarse, lo que resulta en un aumento de la velocidad de hidratación y la formación de C-S-H adicional. Estas fases C-S-H pueden rellenar los poros pequeños, dando lugar a una microestructura más densa y mejores propiedades mecánicas.

El UHPC, de acuerdo a la literatura debe mantenerse húmedo durante un período de tiempo inmediato al desmolde, que puede realizarse mediante pulverización de agua sobre la superficie de concreto, lo que ayuda a mantenerlo en condiciones óptimas para que ocurra el proceso de hidratación inicial. Además, este debe mantenerse a una temperatura adecuada durante todo el tiempo de curado a través de la utilización de equipos de control de temperatura o la utilización de métodos de curado a vapor.

Luego, para alcanzar su resistencia, el UHPC debe mantenerse húmedo durante un período de hidratación intermedio conocido como curado en húmedo, que consiste en la inmersión en agua o la utilización de mantas húmedas para enfriar el material. Finalmente, luego del período de curado en húmedo, el UHPC se somete a un período de curado en seco. Durante este tiempo, el concreto debe mantenerse en las condiciones adecuadas de temperatura y humedad para permitir que se produzca el proceso de endurecimiento.

En general, el proceso de curado del UHPC puede durar varias semanas, dependiendo de las condiciones específicas y la composición del concreto utilizado, pero es importante seguir cuidadosamente este procedimiento para lograr la máxima resistencia y durabilidad del UHPC.

Compactación: El proceso de compactación de UHPC es un paso crítico en la producción de este material. La compactación adecuada garantiza que el hormigón tenga una alta densidad y una resistencia idónea y los pasos de su proceso de compactación empiezan con la preparación de la superficie del molde donde se colocará el UHPC, el cual debe estar limpio y libre de cualquier material extraño.

La superficie del molde también debe estar bien lubricada para facilitar la extracción del hormigón después del fraguado (Céspedes, 2021). El siguiente paso es el vertido del hormigón. El UHPC se vierte en el molde en varias capas. Cada capa se compacta antes de agregar la siguiente. El hormigón debe ser colocado lo más uniformemente posible para asegurar una compactación uniforme.

La compactación de este material se realiza mediante vibración, al igual que en hormigón tradicional, donde se aplica con una aguja vibradora que se inserta en el hormigón y se mueve hacia arriba y hacia abajo. También se puede utilizar un vibrador de inmersión o un rodillo vibratorio para compactar el hormigón. El objetivo es lograr una compactación completa y uniforme del hormigón en el molde.

Después de la compactación, el UHPC se deja fraguar en el molde durante un período de tiempo específico y se desmolda con cuidado para evitar cualquier daño al material. Es importante tener en cuenta que el proceso de compactación del UHPC puede variar ligeramente dependiendo del tipo de molde y el equipo de vibración utilizado. Sin

embargo, en general la vibración es la técnica más comúnmente utilizada para compactar el UHPC y se considera esencial para lograr una alta densidad y resistencia en el material.

Pretensado: El proceso de pretensado es particular con el UHPC y es utilizado para aumentar la capacidad de carga de las estructuras. En el pretensado se aplica una fuerza de compresión a los elementos de hormigón antes de que se carguen y esta fuerza se alcanza con la colocación de tendones de acero tensados en el interior del concreto antes de que éste endurezca.

El proceso de pretensado con UHPC es similar al proceso de pretensado con hormigón convencional, pero se diferencia en algunos detalles debido a sus características especiales. Los pasos típicos del proceso de pretensado con UHPC arrancan con el diseño de la estructura para determinar la cantidad y la ubicación de los tendones de acero necesarios.

Los tendones de acero se fabrican de acuerdo con las especificaciones de diseño y se cubren con una capa de grasa o aceite para protegerlos contra la corrosión. Estos se colocan en los moldes donde se va a verter el UHPC y se fijan a los anclajes en las extremidades del molde para tensarse utilizando un sistema hidráulico de alta presión.

Después de colocar y tensar los tendones, se vierte el UHPC en el molde, se compacta y se deja fraguar. Una vez que el UHPC ha fraguado, se desmolda y se somete a un proceso de curado para asegurar que se desarrolle la resistencia adecuada. Luego del curado se aplica una carga en los extremos de los tendones para liberarlos del anclaje. A medida que los tendones se relajan, ejercen una fuerza de compresión en el hormigón, lo que aumenta la capacidad de carga de la estructura. Hay que mencionar que el proceso de pretensado con UHPC puede variar en función del tipo de estructura y las especificaciones de diseño.

Propiedades mecánicas resultantes: Las investigaciones revisadas coinciden al afirmar que el UHPC alcanza propiedades mecánicas diferentes a las de un hormigón convencional y en este artículo se detallan las siguientes. El concreto tradicional tiene una baja capacidad de resistencia a la tracción, mientras que el UHPC tiene un comportamiento que depende del volumen, orientación y tipo de fibras que se utilicen para su conformación, lo que le permite lograr una alta resistencia a la tracción después de la fisuración (superior a 7 MPa). Cuando se analiza el comportamiento del UHPC sometido a tracción directa, se pueden diferenciar tres momentos específicos: elástico, en el que no se producen fisuras y se rige por un comportamiento lineal; de endurecimiento, en el que las

fibras actúan para sellar las fisuras antes de que se formen; y de ablandamiento después de la rotura, que se produce debido al arrancamiento de la fibra en la fisura crítica (Cruz et al., 2022).

Resistencia a la compresión del UHPC: La resistencia a la compresión es la característica mecánica principal del concreto. Los diseños de mezclas de concretos convencionales deben contemplar mínimo 50 MPa de resistencia, mientras que el UHPC permite obtener resistencias de 150 a 250 MPa. La determinación de esta resistencia se realiza por medio de ensayos a probetas cilíndricas, cúbicas o primas (Cruz et al., 2022).

Resistencia a la flexión del UHPC: El comportamiento a flexión de este concreto podría categorizarse en los niveles de rotura frágil, reblandecimiento por deflexión y endurecimiento por deflexión. En la Figura 2.a se observa el comportamiento a flexión de los concretos que no están reforzados con fibras, en la Figura 2 b y c se representa el comportamiento de reblandecimiento por deformación generado por cierta participación de las fibras. Finalmente, se observa el endurecimiento por deflexión donde cumple la relación de Módulo de rotura y límite de proporcionalidad, debido a la manifestación de nuevas fibras, a este fenómeno se le conoce como multifisuración (Bravo & García, 2019).

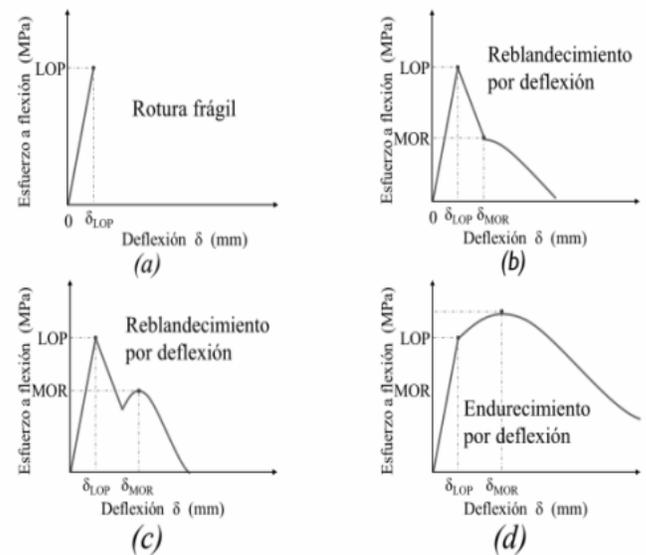


Figura 2. Diferentes comportamientos a flexión del UHPC.

Fuente: García (2020).

Durabilidad del UHPC: La durabilidad se la ha definido como la habilidad de soportar los ataques químicos, del medio ambiente, abrasión u otro agente que afecte a la estructura. Esta definición es muy amplia ya que existen

factores externos que pueden modificar las condiciones iniciales para la cual fue concebido la obra. Existen diferentes métodos de medición que resultan útiles para evaluar el desempeño del hormigón y de qué manera contribuirá a la durabilidad de la estructura. Entre las propiedades del UHPC que contribuyen con la durabilidad, se destacan la permeabilidad, resistencia a los sulfatos, reacción álcali-agregado y susceptibilidad a la fisuración (Bravo & García, 2019).

Permeabilidad del UHPC: El UHPC es un concreto que no requiere agregado grueso, por lo que depende de materiales alternos como humo de sílice, polvo de vidrio, harina de cuarzo y otros que permitan obtener una baja permeabilidad (Cruz et al., 2022). La baja permeabilidad de este concreto permite un uso importante en estructuras expuestas al agua (Bravo & García, 2019).

Resistencia a la fatiga del UHPC: Las estructuras que frecuentemente presentan el fenómeno de fatiga mecánica, son las que están sometidas a cargas cíclicas, repetidas o variables constantemente tales como puentes vehiculares, líneas férreas, fábricas o infraestructura construida en zonas de riesgo sísmico alto. Además, los cambios abruptos de temperatura a los que se pueden ver sometidas también configuran un factor causal en este fenómeno, debido a que la dilatación térmica somete ciertas fibras a diferentes tipos de esfuerzos en periodos tan cortos como incluso horas (Bravo & García, 2019). El UHPC ofrece grandes ventajas frente a este problema ya que tiene propiedades mecánicas tales como un módulo de elasticidad que duplica en magnitud al de un concreto convencional, o una resistencia a la flexo-tensión que ronda valores de entre 9 y 10 MPa.

Aplicaciones de UHPC: A pesar del elevado costo, en los últimos años la aplicación de UHPC en puentes ha aumentado gradualmente con un excelente rendimiento hasta la fecha. Solo en Malasia, se construyeron un total de 26 puentes de UHPC en 2014 y 2015, en vigas, tableros, arcos y otros componentes de su estructura. Los puentes construidos con UHPC ofrecen numerosas ventajas en comparación con los puentes de concreto convencionales, como la durabilidad, resistencia a la corrosión, menor mantenimiento y costos a largo plazo, así como una mayor capacidad de carga y una reducción en el peso y el tamaño de las secciones estructurales; y, las experiencias de su aplicación han arrojado información sobre sus ventajas de acuerdo a cada elemento estructural del puente y su función.

Pilares de puente: El primer estudio sobre pilares de UHPC se realizó en 2019, cuando mediante análisis experimentales y numéricos Ren (2019) investigó el

comportamiento de columnas de UHPC tipo cajón sometidas a cargas sísmicas, donde se consideró la ductilidad de las columnas bajo diferentes cargas axiales y ratios de refuerzo longitudinal.

De acuerdo con Xue et al. (2020), con la introducción del UHPC en la construcción de puentes, se han realizado amplios estudios sobre el comportamiento (capacidad axial y ductilidad) de los pilares tubulares de acero rellenos de UHPC (UHPCFT). Además, el UHPC también se ha utilizado con éxito para reparar columnas de hormigón armado gravemente dañadas en pilares de puentes. Según los resultados experimentales comunicados, el uso de revestimiento de UHPC para reparar columnas de hormigón mejoraría significativamente la capacidad de disipación de energía, la resistencia a cargas cíclicas, la ductilidad, la resistencia y la rigidez de la probeta de la columna.

A pesar de sus ventajas de resistencia y ductilidad, el coste relativamente alto asociado a la aplicación del UHPC en pilares de puentes impide su uso generalizado. Por lo tanto, se han realizado esfuerzos para identificar diseños de mezcla de UHPC optimizados para pilares de puentes. Según un estudio de Joe & Moustafa (2016), el uso de UHPC puede reducir las secciones transversales de las pilas de los puentes, lo que a su vez puede dar lugar a una reducción general del uso de materiales y cemento.

Vigas de puente: La resistencia de los elementos de un puente puede reducirse significativamente debido a la corrosión de los extremos de las vigas, lo que indica la necesidad de materiales con una resistencia sustancial a la penetración de sustancias nocivas. Estudios anteriores han verificado la mayor resistencia del UHPC a la corrosión. Sin embargo, debido al elevado coste del UHPC, su aplicación en vigas de puentes ha sido principalmente como material de reparación.

Xue et al. (2020), por ejemplo, informan que el UHPC se ha utilizado para recubrir los extremos dañados por la corrosión de las vigas de acero. En este novedoso método de reparación, los paneles de UHPC se fijaron a las vigas con pernos de cizallamiento soldados al alma y al ala que rodeaban la zona corroída.

Los resultados de su estudio muestran que el uso de UHPC puede restaurar la capacidad perdida debido a daños por corrosión. Graybeal, por otro lado, realizó una serie de pruebas relacionadas con el comportamiento a flexión de las vigas de puente de UHPC y concluyó que podían mostrar mayores capacidades a flexión que las de las vigas de hormigón armado con una geometría de sección transversal similar.

Las vigas de UHPC también poseen la ventaja de tener un peso propio más ligero, que podría utilizarse en puentes compuestos de acero-hormigón para reducir el coste de construcción en elementos continuos y de gran luz.

Losas de enlace: El UHPC también tiene una alta resistencia y ductilidad a la tracción; por lo tanto, también puede ser un material deseado en aplicaciones de losas de enlace. En el trabajo de Graybeal, por ejemplo, se dispuso con éxito el uso de una losa de enlace de UHPC para sustituir la junta con fugas y proporcionar un sellado duradero dando continuidad al tablero en el año 2013.

Lastimosamente, el comportamiento de los tableros de puentes sin juntas de UHPC no se conoce bien y el diseño puede incluir incertidumbres. A pesar de las numerosas ventajas de los tableros de puentes sin juntas, no existe un conjunto uniforme de normas y procedimientos de diseño para este tipo de puentes y solo se dispone de unas pocas especificaciones y recomendaciones de diseño.

Vigas pretensadas: En general, las experiencias de construcción de puentes de vigas pretensadas con UHPC han demostrado que el material es adecuado para su uso en aplicaciones estructurales críticas. El UHPC ha permitido una reducción significativa del peso de la estructura, mejorando la eficiencia estructural y reduciendo los costos de construcción. Además, ha demostrado tener una mayor capacidad de carga y una mayor durabilidad en comparación con otros materiales estructurales como el acero y el hormigón convencional.

El puente "Sherbrooke" fue uno de los primeros puentes en el mundo construido con vigas pretensadas de UHPC. El proyecto se completó en 2010, y las vigas de UHPC se utilizaron para reemplazar las vigas de acero originales. El uso de UHPC permitió una reducción significativa del peso de la estructura, mejorando la eficiencia estructural y reduciendo los costos de construcción.

El puente "Bayou Sorrel" es otro ejemplo de un puente construido con vigas pretensadas de UHPC. El proyecto se completó en 2012, y las vigas de UHPC se utilizaron para reemplazar las vigas de acero originales. El uso de UHPC permitió una mayor capacidad de carga y una mayor durabilidad en comparación con las vigas de acero.

El puente "Beaumont" también fue construido con vigas pretensadas de UHPC. El proyecto se completó en 2016, y las vigas de UHPC se utilizaron para reemplazar las vigas de acero originales. Se supo, que el uso de UHPC permitió una reducción significativa del peso de la estructura, mejorando la eficiencia estructural y reduciendo los costos de construcción.

Puente de la Bahía de False Creek, Canadá: Este puente, inaugurado en 2015, es un puente de vigas pretensadas que cruza el estrecho de False Creek en Vancouver. Se utilizaron vigas pretensadas de UHPC para reducir el peso de la estructura y aumentar la durabilidad del puente.

Y finalmente el puente de Heiligendamm, Alemania, el cual fue inaugurado en 2007 y es un puente de vigas pretensadas que cruza el río Warnow en Heiligendamm. Se utilizaron vigas pretensadas de UHPC para las partes superiores de las vigas, lo que permitió una reducción significativa en el tamaño de las vigas y en el peso total del puente.

Ha habido estudios que comparan las propiedades del UHPC con el acero estructural, y estos estudios han encontrado que el UHPC puede ser una alternativa viable al acero en ciertas aplicaciones estructurales.

En términos de resistencia, algunos estudios han encontrado que el UHPC puede tener una resistencia a la compresión y a la flexión comparable o incluso superior a la del acero. Por ejemplo, un estudio publicado en la revista *Materials and Design* encontró que el UHPC reforzado con fibras de acero tenía una resistencia a la flexión comparable a la del acero estructural en algunas situaciones de carga. Otro estudio publicado en la revista *Engineering Structures* encontró que el UHPC también podía soportar cargas más grandes que el acero en algunas aplicaciones de refuerzo de columnas.

En términos de durabilidad, el UHPC también ha demostrado ser una alternativa viable al acero en ciertas aplicaciones. Debido a su alta densidad y baja porosidad, el UHPC puede ser mucho menos permeable al agua y a los contaminantes ambientales que el acero, lo que puede resultar en una vida útil más larga en algunas aplicaciones.

Sin embargo, es importante tener en cuenta que el UHPC y el acero son materiales muy diferentes y tienen diferentes propiedades físicas y mecánicas. Por lo tanto, la elección entre UHPC y acero dependerá de las necesidades específicas de cada proyecto y de las condiciones de carga y ambiente en las que se utilizarán los materiales.

En general, los estudios sugieren que el UHPC puede ser una alternativa viable al acero en ciertas aplicaciones estructurales, pero es importante considerar cuidadosamente las propiedades específicas de cada material y las necesidades del proyecto antes de tomar una decisión sobre el uso de uno u otro.

CONCLUSIONES

Desde la perspectiva de la Maestría en Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Cuenca, resalta la importancia

de explorar y aplicar los avances que se mencionan a continuación de manera consciente y estratégica en proyectos de infraestructura.

Las vigas pretensadas con UHPC se caracterizan por la fabricación con hormigones de una resistencia excepcional, superando los 700 kgf/cm². Esta alta resistencia es una característica fundamental que potencia la capacidad estructural de las vigas.

La incorporación de fibras, ya sea de acero inoxidable o de polipropileno, al UHPC representa una estrategia efectiva para mejorar de manera significativa la resistencia a la flexión y la capacidad de transferencia de carga de las vigas pretensadas. Estas fibras refuerzan la matriz de UHPC y mejoran su comportamiento estructural.

El proceso de pretensado con UHPC conlleva una mayor complejidad en comparación con el pretensado utilizando hormigón convencional. Se requieren ajustes en la configuración de equipos y procedimientos de construcción para garantizar la correcta ejecución del proceso y la integridad de las vigas.

La utilización de UHPC en las losas de puentes permite reducir la sección transversal de las mismas, lo que se traduce en una disminución del peso de la estructura y una mejora en la eficiencia estructural. Esto contribuye a la optimización del diseño y a la reducción de costos.

La incorporación de materiales locales y económicamente accesibles, como la arena con humo de sílice o ceniza volante, así como la inclusión de triturado de cuarzo, desempeña un papel fundamental en la obtención de resistencias elevadas en el UHPC. Esta estrategia puede contribuir a la viabilidad económica de proyectos.

La aplicación de métodos de diseño y optimización de mezclas es esencial para reducir la cantidad de componentes y aditivos utilizados en la producción de UHPC. Esto no solo disminuye los costos, sino que también contribuye a la sostenibilidad y eficiencia del material.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bravo, M., & García-Taengua, E. (2019). Comportamiento de vigas pretensadas de UHPC. *Hormigón y Acero*, 70(3), 235-248.
- Céspedes Herrera, B. A. (2021). Aplicación de concretos de ultra altas prestaciones (UHPC) a la construcción de puentes. <https://www.researchgate.net/publication/351795096> **APLICACION DE CONCRETOS DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES UHPC A LA CONSTRUCCION DE PUENTES**
- Christ, R., Pacheco, F., Ehrenbring, H., Quinino, U., Mancio, M., & Tutikian, B.F. (2019). Estudio del comportamiento mecánico del hormigón de ultra-altas prestaciones (UHPC) reforzado con fibras híbridas y con consumo reducido de cemento. *Revista ingeniería de construcción*, 34(2), 159-168.
- Cruz Cruz, J., Rodríguez Mirena, J. L., & Rodríguez Muñoz, J. T. (2022). Análisis y evaluación de alternativa en concreto avanzado para la rehabilitación de un puente peatonal o vehicular. (Trabajo de grado). Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Erazo Álvarez, J. C. (2021). Capital intelectual y gestión de innovación: Pequeñas y medianas empresas de cuero y calzado en Tungurahua-Ecuador. *Revista De Ciencias Sociales*, 27, 230-245.
- Joe, C. D., & Moustafa, M. (2016). Cost and Ecological Feasibility of Using UHPC in Bridge Piers”, *International Interactive Symposium on Ultra-High Performance Concrete*, 1(1).
- Punta de la Herrán, J. A. (2020). Análisis de la viabilidad del uso de hormigones de ultra-altas prestaciones en estructuras de puentes con tipologías convencionales. (Tesis de maestría). Universidad de Sevilla.
- Vásquez Erazo, E. J., Álvarez Gavilanes, J. E., Murillo Párraga, D. Y., & Erazo Álvarez, J. C. (2023). Educación e identidad social del emprendimiento: factores de sostenibilidad de las pymes en Ecuador. *Revista Conrado*, 19(91), 280-285.
- Wang, F. M., Kang, S. Z., Cai, Y. C., & Li, X. L. (2011). Destructive Test Study of a Prestressed Concrete Hollow Slab Beam Bridge. 57-64. [https://doi.org/10.1061/47625\(404\)8](https://doi.org/10.1061/47625(404)8)
- Xue, J., Briseghella, B., Huang, F., Nuti, C., Tabatabai, H., & Chen, B. (2020). Review of ultra-high-performance concrete and its application in bridge engineering. *Construction and Building Materials*, 260. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119844>
- Zhang, J., Peng, H., & Cai, C. S. (2013). Destructive Testing of a Decommissioned Reinforced Concrete Bridge. *Journal of Bridge Engineering*, 18(6), 564-569.