

APLICACIÓN DE CONCRETOS DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES (UHPFRC) A LA CONSTRUCCIÓN DE PUENTES



Brayan Alexander Cespedes Herrera

Escuela Colombiana de ingeniería Julio Garavito

Facultad de ingeniería civil

Bogotá, Colombia

2021

APLICACIÓN DE CONCRETOS DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES (UHPFRC) A LA CONSTRUCCIÓN DE PUENTES

Brayan Alexander Cespedes Herrera

Director:

Ing. Joaquín Abellán García

Énfasis en construcción

Línea de investigación:

Materiales para construcción en ingeniería civil

Grupo de investigación:

Centro de estudios de Estructuras, Materiales y Construcción

Escuela Colombiana de ingeniería Julio Garavito

Facultad de ingeniería civil

Bogotá, Colombia

2020

Resumen

El presente trabajo académico tiene por objetivo evidenciar y analizar los aportes que ha generado la aplicación de concretos de ultra altas prestaciones reforzados con fibras (UHPFRC) sobre la construcción de puentes. Se darán a conocer las principales características de estos concretos especiales con la finalidad de resaltar las ventajas y posibilidades que ha aportado el uso del UHPFRC en la ingeniería de puentes en general y en su construcción en particular.

Durante el desarrollo de este trabajo se expondrán diferentes análisis de casos, en los que se analizará la construcción de diferentes puentes utilizando UHPFRC. Entre los casos analizados, se encuentran los casos de puentes peatonales existentes en Colombia, en Medellín y Manizales. En el análisis se tratará de temas relativos a las resistencias de los UHPFRC empleados, la disminución de secciones alcanzadas y los llamativos diseños constructivos de los puentes, así como de las ventajas y diferencias con uso de concreto convencional.

Este documento presentará no sólo las principales ventajas que demuestra el uso de UHPFRC en la ingeniería de puentes, sino también los principales obstáculos que tiene el escoger este material, entre las que se encuentran su elevado costo y, sobre todo, la ausencia de normativa y códigos locales que avalen los cálculos estructurales.

Como conclusión, y pese a esta ausencia de normativa, el UHPFRC es un material idóneo por sus excelentes propiedades mecánicas y de durabilidad para la ingeniería de puentes, lo que se verá demostrado por los casos de éxito desarrollados en todo el mundo desde finales de la década de los noventa hasta nuestros días.

Palabras clave: UHPFRC, Construcción de puentes, Prefabricación, Sostenibilidad, Durabilidad e Innovación.

Contenido

Resumen.....	3
Lista de tablas.....	6
Introducción	7
1. UHPC	¡Error! Marcador no definido.
1.1. Concreto de ultra-altas Prestaciones (UHPC):.....	8
1.2. Concreto de ultra-altas prestaciones reforzado con fibras (UHPFRC):.....	8
1.3. Dosificación matriz cementicia.....	8
1.5. Resistencia a la compresión:.....	10
1.6. Resistencia a flexión:.....	11
1.7. Permeabilidad del UHPFRC:.....	12
1.8. Resistencia a la Fatiga del UHPFRC:.....	12
2. Aplicación en puentes y pasarelas:	15
3. Objetivos.....	16
3.1. Objetivo general.....	16
3.2. Objetivos específicos:	16
4. Metodología.....	16
4.1. Recolección de Datos	17
4.2. Conclusiones y discusión	17
5. Análisis de casos de aplicación de UHPFRC en la aplicación de puentes.	17
5.1. PUENTE PEATONAL SHERBROOKE (CANADA,1997)	17
5.1.1. Introducción	17
5.1.2. Características	18
5.2. PUENTE MARS HILLS (WAPELLO, 2005)	21
5.2.1. Introducción	21
5.2.2. Características	21
5.3. PUENTE PEATONAL SAKATA (JAPON,2002)	23
5.3.1. Introducción	23
5.3.2. Características	24
5.4. PUENTE BUNA (CROACIA, 2010).....	28
5.4.1. Introducción	28
5.4.2. Características	29

5.5. VIADUCTOS DE CHILLON (SUIZA, 2012)	31
5.5.1. Introducción	31
5.5.2. Características	32
5.6. PASARELA SOBRE EL BARRANCO DE LAS OVEJAS (ESPAÑA, 2015)	34
5.6.1. Introducción.....	34
5.7. PUENTE PEATONAL DE LA UNIVERSIDAD EAFIT (COLOMBIA, 2017)	38
5.7.1. Introducción.....	38
5.7.2. Características.....	39
5.8. PUENTE PEATONEAL DE LA UNAL (COLOMBIA, 2018).....	40
5.8.1. Introducción	40
5.8.2. Características.....	41
6. Conclusiones	42
7. Recomendaciones	43
Bibliografía	43

Lista de ilustraciones.

ILUSTRACIÓN 1. – DIFERENTES FIBRAS EMPLEADAS EN LA FABRICACIÓN DE UHPFRC [37,38].....	9
ILUSTRACIÓN 2. – CUERPO DE PRUEBA “DOGBONE” Y ENSAYO A TRACCIÓN DIRECTA CONFORME A JSCE-08 [27,37,39].....	10
Ilustración 3. Diagrama tensión-deformación unitaria para el UHPFRC [37].....	10
Ilustración 4. CURVA CONSTITUTIVA A COMPRESIÓN EL UHPC CON DIFERENTES PORCENTAJES DE FIBRAS [30].....	11
Ilustración 5. CURVA CONSTITUTIVA PROPUESTA POR LA SETRA-AFGC Y JSCE [39,44]	11
Ilustración 6. PUENTE PEATONAL SAKATA	14
Ilustración 7. PASARELA BARRANCO DE LAS OVEJAS.....	14
Ilustración 8. PUENTE PEATONAL SHERBROOKE	14
Ilustración 9. PUENTE DE MARS HILLS	14
Ilustración 10. VIADUCTOS DE CHILLON.....	14
Ilustración 11. PUENTE PEATONAL EAFIT	14
Ilustración 12. PUENTE BUNA.....	14
Ilustración 13. PUENTE PEATONAL DE UNAL	14
Ilustración 14. EMPAQUETAMIENTO DE PARTICULAS.	15
Ilustración 15. PUENTE PEATONAL DE SHERBROOKE EN QUEBEC.	18
Ilustración 16. SECCION TRANSVERSAL DE LA ARAMADURA DEL PUENTE (ELEMENTOS ESTRUCTURALES Y DIMENSIONES PRINCIPALES).....	19

Ilustración 17. PUENTE EN MARS HILLS WAPELLO.	21
Ilustración 18. SECCION TRANSVERSAL DE LOS ELEMENTOS PREFABRICADOS.	22
Ilustración 19. UBICACION DEL PUENTE PEATONAL SAKATA	23
Ilustración 20. PUENTE PEATONAL SAKATA.	24
Ilustración 21. SEGMENTOS PREFABRICADOS.	25
Ilustración 22. SECCION LONGITUDINAL DEL PUENTE PEATONAL SAKATA.	26
Ilustración 23. RESULTADOS DE PRUEBAS A COMPRESION DE LOS UHPFRC.	27
Ilustración 24. PUENTE FERROCARRIL BUNA.	28
Ilustración 25. SECCION DE ACERO.	29
Ilustración 26. SECCION TRANSEVERSAL DEL PUENTE FERROCARRIL BUNA.	30
Ilustración 27. VIADUCTOS DE CHILLON.	31
Ilustración 28. SECCION TRANSVERSAL	33
Ilustración 29. CORTE TRANSVERSAL DE LA LOSA DE UHPFRC	33
Ilustración 30. PASARELA BARRANCO DE LAS OVEJAS.	34
Ilustración 31. VISTA LONGITUDINAL.	36
Ilustración 32. CELOCIAS DE LA PASARELA.	36
Ilustración 33. DISEÑOS DE LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS. DE IZQUIERDA A DERECHA: ALTERNATIVA EN ACERO, CONCRETO ESTRUCTURAL Y UHPFRC.	38
Ilustración 34. PUENTE PEATONAL DE LA UNIVERSIDAD EAFIT	38
Ilustración 35. SECCION TRANSVERSAL (ELEMENTOS PREFABRICADOS).	39
Ilustración 36. PUENTE PEATONAL DE LA UNAL.	40
Ilustración 37. DISEÑO ARQUITECTONICO DEL PUENTE PEATONAL DE LA UNAL.	41

Lista de tablas

Tabla 1. PROPIEDADES TÍPICAS DEL UHPFRC.	13
Tabla 2. PROPORCION USADA EN LA MEZCLA DE UHPC	19
Tabla 3. DISEÑO DE MEZCLA (PUENTE PEATONAL SAKATA).	26
Tabla 4. COEFICIENTE DE DIFUSION DE CLORUROS SOBRE EL PUENTE PEATONAL SAKATA.	27
Tabla 5. COMPARACION ENTRE DIFERENTES ALTERNATIVAS.	37

Introducción

Con el paso del tiempo se ha tenido la necesidad de generar nuevas tecnologías del concreto hasta evolucionar a ser un material que ofrezca una mejora global [1]. En este sentido, la búsqueda de concretos con especiales propiedades a llevado a la creación del concreto de ultra altas prestaciones reforzado con fibras (UHPFRC por sus siglas en inglés), el cual da solución a las deficiencias que muchos hormigones tienen en la actualidad, especialmente en cuanto a temas de durabilidad, resistencia, ductilidad y tenacidad incluso a tracción directa [2-4]. Este concreto especial, por lo tanto, proporciona una elevada relación entre la resistencia y el peso, gran resistencia a la tracción, ductilidad y facilidad de construcción [5]. El documento ACI239 [6] define al UHPFRC como un concreto con resistencia a la compresión superior a los 150 MPa, y requisitos especiales en cuanto a ductilidad, tenacidad y durabilidad. Estos requisitos especiales de ductilidad y tenacidad se alcanzan gracias a la incorporación de fibras [3,7-9].

Sin embargo, al ser un material relativamente nuevo y fuera de lo convencional, presenta gran desconocimiento incluyendo que es inexistente una normativa que rijan el uso de este material [10,11]. Además, presenta grandes obstáculos iniciales como el elevado coste inicial y la necesidad de materiales exclusivos [3,12-15]. Éstos han sido factores importantes que han frenado la implementación del UHPFRC como material de construcción en general, y de puentes en particular.

Es por esto por lo que es importante el recolectar información de casos existente donde se implementara el uso de UHPFRC como material para la construcción de puentes. No sólo para exponer las características más importantes del material y sus beneficios, sino también como ejemplo para su implementación, y animar al desarrollo local. Es una forma de contrarrestar la ausencia de una normativa y aprovechar los aportes que ofrece este material.

El presente documento expondrá brevemente las características que aporta este material a la construcción de puentes, exponiendo las ventajas que resultó el uso de UHPFRC mediante el resumen de algunos casos encontrados donde el aporte fue significativo y concluyó en mejoras constructivas y diseños arquitectónicos de mayor valor estético. Siempre sea posible, se expondrá la comparación con la obra alternativa en la que se hubiera implementado un concreto convencional.

Debido a sus resistencias a compresión superiores a 150 MPa, se disminuye considerablemente el espesor tanto en las losas, como en almas y alas en los tableros, lo que conlleva a una reducción de peso propio considerable cuando se la compara con una solución en concreto convencional. Como veremos más adelante, los espesores almas de tableros en UHPFRC pueden reducirse hasta los 6-8 cm, de tres a seis veces menos que los habituales en secciones de concreto presforzado para puentes peatonales [16,17]. Por otro lado, encontramos una facilidad constructiva debido a que es habitual que para estos casos se crearan elementos prefabricados de UHPFRC que permiten un fácil ensamblaje [18,19].

1. Marco teórico

En el presente apartado se tratará acerca de las definiciones y conceptos acerca del concreto de ultras altas prestaciones sin y con fibras, considerando que respecto a este último se investigaran los casos de aplicación en ingeniería de puentes, por lo cual se hará más énfasis en sus propiedades y características.

- 1.1. Concreto de ultra-altas Prestaciones (UHPC):** es uno de los recientes desarrollos en tecnología de concreto [2,20]. Es un material que permite construir con secciones mucho más delgadas y ligeras en comparación con el concreto convencional, consumiendo un menor número de recursos naturales y permitiendo mayor luz con secciones muy esbeltas [16,21–23]. Sus componentes habituales serían cemento (en dosificación superior a los 800 kg/m³), microsílíce o humo de sílice (en cantidades por encima de los 200 kg/m³) agua, superplastificante a base de éter de poli carboxilato (en contenidos alrededor de 30 kg/m³) y arena fina silíce. En los últimos años, se han llevado a cabo diferentes investigaciones para reducir los contenidos de cemento y microsílíce, mediante el uso de materiales cementantes suplementarios, con la finalidad de reducir costos y mejorar la huella de carbono del material [2,3,12,20,24–28].
- 1.2. Concreto de ultra-altas prestaciones reforzado con fibras (UHPFRC):** Con la finalidad de mejorar el comportamiento del UHPC frente a tracciones, así como de aportar ductilidad a este material, se procede a la adición de fibras de diversos materiales en la dosificación de la mezcla [7,9,29–31]. De esta forma se consigue que el material tenga un comportamiento dúctil, pasando a denominarse concreto de ultra altas prestaciones reforzado con fibras (UHPFRC por sus siglas en ingles). Convirtiéndolo en uno de los mayores exponentes de la evolución en la tecnología del concreto de las últimas décadas. Este material combina, en uno solo, cuatro de las mejoras obtenidas por diferentes líneas de investigación: concreto de muy alta resistencia, reforzado con fibras, autocompactante y con durabilidad mejorada debido a su baja porosidad [32,33].
- 1.3. Dosificación matriz cementicia:** el diseño de la mezcla de UHPC o UHPFRC debe lograr una matriz con la mayor densidad de empaquetamiento posible, una porosidad reducida y una microestructura interna mejorada. Estos condicionantes en su dosificación son la causa de sus propiedades mecánicas y de durabilidad superiores [34,35].

Una alta densidad de empaquetamiento de un concreto tipo UHPC/UHPFRC se logra mediante la aplicación de modelos de empaquetamiento. Los modelos de empaquetamiento de partículas más empelados en la actualidad son el modelo de Andreasen y Andersen modificado desarrollado por Funk y Dinger [36] y el modelo de empaquetamiento compresivo (CPM por sus siglas en inglés) desarrollado por Larrard y Sedran [37]. Para alcanzar los objetivos expuestos, además es necesaria una baja relación agua conglomerante, para lo que es necesario el uso de los superplastificantes [38,39].

1.4. Fibras utilizadas en el UHPFRC:

Tal y como se ha descrito anteriormente, para alcanzar los requisitos de ductilidad y tenacidad, es necesario añadir fibras a la mezcla de UHPC, constituyendo así UHPFRC. Algunas de las fibras empleadas en la fabricación de UHPFRC se pueden observar en la ilustración 1. La fibra más empleada en UHPFRC es la fibra recta de acero de alta resistencia que se aprecia en la ilustración 1.b. Sin embargo, diferentes investigaciones revelan que esta fibra tiene el mayor peso en los costos de estos concretos especiales [30,40]. Por ello, en los últimos años se han desarrollado estudios para reducir el impacto en costo de la fibra, analizando el uso de fibras de bajo costo y la mezcla híbrida de fibras [9,30,31,40,41].

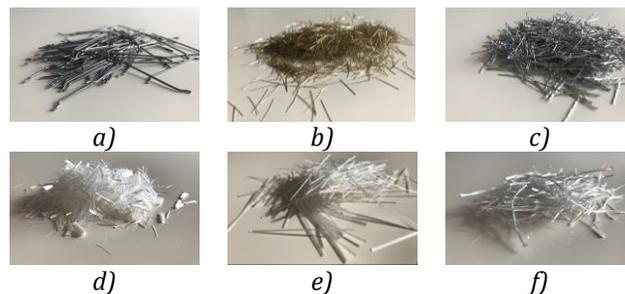


ILUSTRACIÓN 1. – DIFERENTES FIBRAS EMPLEADAS EN LA FABRICACIÓN DE UHPFRC [40,41].

1.5. Comportamiento a la tracción del UHPFRC:

El comportamiento a tracción del UHPFRC es, sin duda, la propiedad más relevante, para la mayor parte de las aplicaciones que se expondrán al final de este capítulo. El espécimen habitual para evaluar este comportamiento a tracción directa del UHPFRC se muestra en la ilustración 2, así como el ensayo. Ambos están descritos en la norma japonesa JSCE-08[42]. Por su parte, en la ilustración 3 se presenta el gráfico tensión deformación del UHPFRC sometido a tracción directa. En este gráfico podemos distinguir tres zonas. La zona 1 es la zona elástica en la cual el material podría volver a su estado original si la carga cesa. En la zona 2, que inicia tras alcanzarse la tensión σ_{cc} que provoca la fisuración, y que representa la rama de endurecimiento por deformación. En esta zona, el material no podría volver a su estado natural al cesar la carga pues nos encontramos en la zona de deformación plástica. En esta rama de endurecimiento por deformación es donde se produce la absorción de energía,

presentándose el fenómeno de la multifisuración. Finalmente, tras alcanzar la tensión máxima σ_{pc} , pasaríamos a la zona 3, conocida como rama de reblandecimiento por deformación. En esta última parte se produce la falla, provocada por el deslizamiento de la fibra o pullout. El UHPFRC, con la dosificación adecuada de fibras, ofrece rotura dúctil con endurecimiento por deformación atracción directa cuando se cumple la condición $\sigma_{cc} < \sigma_{pc}$. Es importante decir que el tipo, distribución y orientación de las fibras afectan significativamente los resultados del ensayo [30].



ILUSTRACIÓN 2. – CUERPO DE PRUEBA “DOGBONE” Y ENSAYO A TRACCIÓN DIRECTA CONFORME A JSCE-08 [30,40,42].

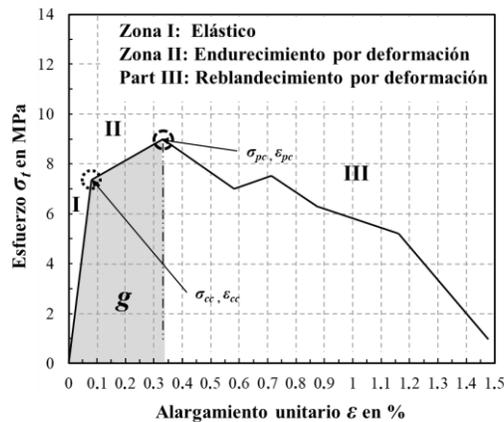


Ilustración 3. Diagrama tensión-deformación unitaria para el UHPFRC [40].

1.6. Resistencia a la compresión:

Una de las principales propiedades mecánicas del concreto es la resistencia a compresión. Dentro de la resistencia a compresión de un concreto convencional se encuentran valores aproximados de 30 MPa; para un hormigón de alta resistencia [HAR] los valores ascienden hasta un rango de 83 a 124 MPa [43]. En

el caso del UHPC las resistencias se mueven en el rango de a 150-220 MPa existiendo grandes diferencias dependiendo no sólo de las dosificaciones, sino por su tratamiento de curado y sus porcentajes en fibras [16,44,45].

La rama elástica a compresión se mantiene hasta un nivel del 70-80% de la carga máxima. En la ilustración 2 se puede observar un diagrama a compresión típico del UHPC y su variación de ductilidad en función de la cantidad de fibras presentes [33].

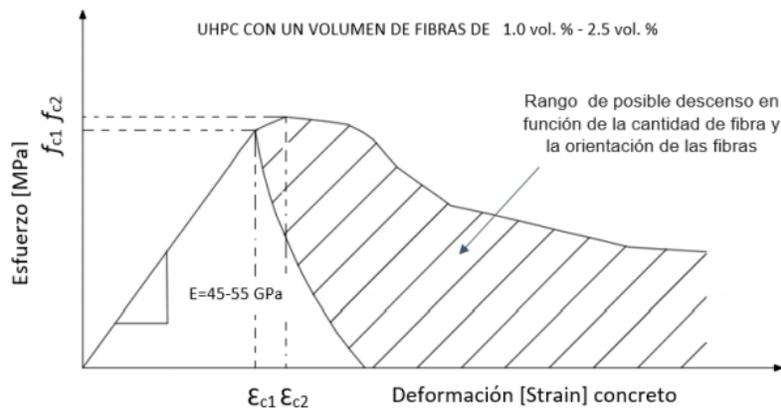


Ilustración 4. CURVA CONSTITUTIVA A COMPRESIÓN EL UHPC CON DIFERENTES PORCENTAJES DE FIBRAS [33]

La deformación máxima en el UHPFRC a compresión puede llegar hasta niveles del 3.5-5 por mil [46]. Las recomendaciones de cálculo francesas y japonesas limitan el nivel de deformación máxima hasta un 3.5 por mil [42,47]. En ellas se propone un diagrama constitutivo elástico perfectamente plástico, con el final de la rama lineal al 85% de la resistencia máxima a compresión, tal y como se presenta en la ilustración 5.

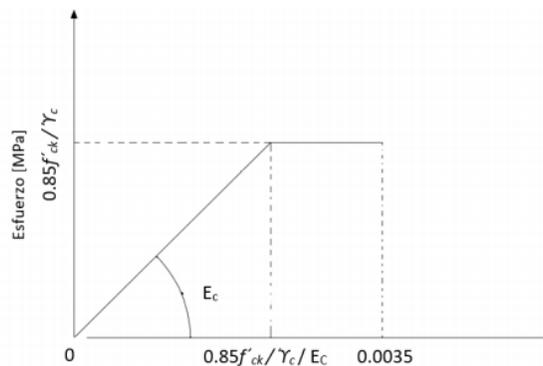


Ilustración 5. CURVA CONSTITUTIVA PROPUESTA POR LA SETRA-AFGC Y JSCE [42,47]

1.7. Resistencia a flexión:

Análogamente a lo ocurrido en el caso de la resistencia a tracción, la implementación de fibras de acero, fibras de vidrio, polímeros de diferentes

longitudes y otro tipo de formas, mejora la resistencia a flexión del concreto. Para el caso del UHPFRC, debido a que los esfuerzos a tracción son transmitidos de una parte de la matriz cementicia a otra por la adherencia de las fibras con esta, se produce una mayor deformación y evita una falla frágil del elemento[31,48].

1.8. Permeabilidad del UHPFRC:

La alta densidad de empaquetamiento de partículas sobre matriz cementicia de los concretos tipo UHPC y UHPFRC proporciona un concreto más denso y menos permeable. Esto tiene como consecuencia una mejora en la durabilidad del material al dificultar la entrada de agentes nocivos para el concreto que puedan acelerar procesos de carbonatación, oxidación, lixiviación, etc. [49,50]. Esta mejora en las propiedades de durabilidad del material tiene su reflejo en un incremento de la vida útil de la infraestructura construida con UHPFRC.

1.9. Resistencia a la Fatiga del UHPFRC:

Este material presenta muy buen desempeño frente a las cargas cíclicas, definiéndose una deformación máxima de la estructura a 10 millones de ciclos de carga.

Por último, se reflejan mediante la Tabla 1 las principales propiedades y propiedades del UHPC

Características del Material	Resultado Promedio
Densidad	2.480 kg/m ³
Resistencia a compresión (ASTM C39; Resistencia a los 28 días)	165 MPa
Módulo de elasticidad (ASTM C469; Modulo a los 28 días)	48 GPa
Resistencia a la compresión por tracción directa (Tensión uniaxial con múltiples fisuraciones)	8.5 MPa
Resistencia a la tracción por compresión diametral de especímenes cilíndricos (ASTMC496)	9.0 MPa
Resistencia a la tracción por compresión de especímenes prismáticos (ASTMC1018; 12 in (305-mm)) luz)	9.0 MPa
Capacidad de deformación por tracción antes de la localización de grietas y el desprendimiento de fibras	>0.003
coeficiente de fluencia a largo duración (ASTM C152; 11.2 (77 MPa) carga)	0.78
Retracción a larga duración (ASTM C157; lectura inicial después de fraguado)	555 micro esfuerzos
Reacción total (embebido en alambre calibrado de vibración)	790 micro esfuerzos
Coefficiente de expansión térmica (AASHTO TP60-00)	14.7 x 10 ⁻⁶ mm/mm/°C
Penetrabilidad de ion cloruro (ASTM C1202; ensayo a los 28 días)	360 Coulombs
Penetrabilidad de ion cloruro (ASTM T259; 0.5-in (12.7 mm) espesor)	< 0.06 kg/m ³

Resistencia escalonada (ASTM C672)	0.73 g
Resistencia a la abrasión (ASTM C944 2x peso; superficie del suelo)	RDM = 99 %
Alkali-silice (ASTM C1260; ensayo a los 28 días)	inocua

RDM =Modulo de elasticidad dinámico relativo.

ASTM = American Society of Testing and Materials.

AASHTO = American Association of State Highway and transportation official

TABLA 1. PROPIEDADES TÍPICAS DEL UHPFRC [51].

1.10. Aplicaciones del concreto UHPFRC: El UHPFRC, gracias a sus excelentes propiedades, ha sido utilizado en las últimas décadas en diferentes aplicaciones, entre las que destacan: rehabilitación de estructuras, reparación de pavimentos, mobiliario urbano, plataformas portuarias, fachadas, entre otras [19,52–56].

1.11. Aplicaciones del concreto UHPFRC en la construcción de puentes: A continuación, se mostrarán los casos que se expondrán en el análisis de casos de aplicación del UHPFRC en la construcción de puentes.



Ilustración 6. PUENTE PEATONAL SAKATA



Ilustración 7. PASARELA BARRANCO DE LAS OVEJAS

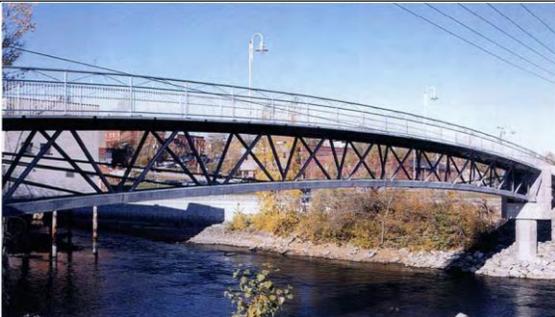


Ilustración 8. PUENTE PEATONAL SHERBROOKE



Ilustración 9. PUENTE DE MARS HILLS



Ilustración 10. VIADUCTOS DE CHILLON



Ilustración 11. PUENTE PEATONAL EAFIT



Ilustración 12. PUENTE BUNA



Ilustración 13. PUENTE PEATONAL DE UNAL

2. Aplicación en puentes y pasarelas:

Desde su aparición en el siglo 19 el concreto convencional, con resistencias de hasta 30 MPa, ha sido el material más usado en la construcción en todo el mundo [43]. Como se mencionó en la introducción, en las últimas décadas, los estudios y el avance de nuevas tecnologías han proporcionado el desarrollo de UHPFRC, un material que ha presentado diferentes aplicaciones en el campo de la ingeniería civil. Entre éstas, podemos destacar la construcción de puentes modernos. El UHPFRC también tiene propiedades de durabilidad superiores gracias a una porosidad extremadamente baja, y una baja permeabilidad. Todas estas características mencionadas se logran por su alta densidad de empaquetamiento de partículas. [ver ilustración 14]

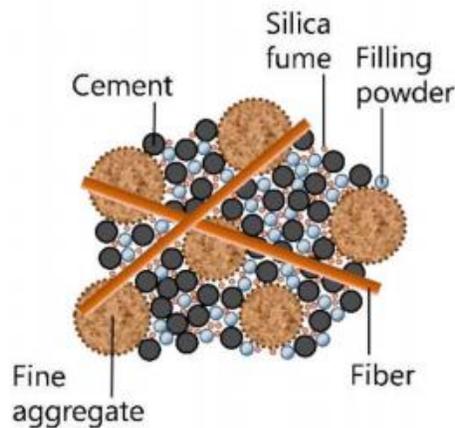


Ilustración 14.EMPAQUETAMIENTO DE PARTICULAS.

Aunque el uso de este este material presenta grandes ventajas en la construcción como lo son:

- Nuevos diseños estructurales que permiten secciones más esbeltas.
- Reducción considerable en el peso propio de las estructuras.
- Mayor durabilidad, lo que permite aumentar la vida útil de la infraestructura.
- Menores tiempos de ejecución

Sin embargo, también presenta varios aspectos negativos que se deben tomar a consideración antes de su implementación. Los más relevantes son:

- Mayor consumo por metro cubico de cemento portland
- Mayor costo por metro cubico
- Se trata de un material exigente y delicado en su producción, ya que pequeñas variaciones en sus insumos o procesos tiene un reflejo muy grande en las propiedades del producto final
- La inexistencia de normativa local que regule y avale su uso como material para elementos estructurales

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

El objetivo general del presente trabajo académico se expone a continuación:

- Evaluar la viabilidad del uso de concreto de ultra altas prestaciones reforzados con fibras (UHPFRC) en la aplicación de puentes por medio del análisis de casos reales.

3.2. Objetivos específicos:

- Comparar los resultados mecánicos del material aplicado en la construcción de puentes.
- Determinar la viabilidad de elementos prefabricados con UHPFRC con respecto a los convencionales en acero.
- Evaluar las diferentes alternativas para disminuir los costes iniciales sin perder la sostenibilidad de la mezcla.

4. Metodología

Este proyecto está enmarcado en la investigación llevada a cabo por el ingeniero Joaquín Abellán García sobre la aplicación de concretos de ultra altas prestaciones reforzados con fibras. En este trabajo la metodología consistirá en analizar casos reales de construcción de puentes empleando UHPFRC. Los datos para la elaboración del presente trabajo se obtendrán de diferentes artículos y congresos publicados en revistas científicas.

4.1. Recopilación de datos sobre casos reales

Para la recolección de datos sobre la aplicación de concreto de ultras altas prestaciones reforzado con fibras en puentes se acudió a la literatura científica. Ocho artículos y congresos fueron seleccionados para la elaboración del presente trabajo. Estos artículos cuentan con información sobre casos reales a lo largo del mundo, incluso dos en Colombia, incluyendo técnicas constructivas y repositorios con información relacionados al tema de exposición con el fin de analizar los casos más relevantes y donde poder identificar las ventajas del uso de este material

4.2. Conclusiones y discusión

Se analizó y comparó la información recolectada sobre la aplicación de UHPFRC en puentes en los casos encontrados, pasando a la discusión sobre las ventajas y aportes de la implementación de este material, además de sus limitaciones u obstáculos que se tienen antes del escogerlo. Es importante también reflejar qué tan efectivo es el UHPFRC frente a los materiales convencionales (acero y concreto) a nivel económico, ambiental e ingenieril. Se destacaron las características más relevantes en los casos expuestos.

5. Análisis de casos de aplicación de UHPFRC en la aplicación de puentes.

5.1. PUENTE PEATONAL SHERBROOKE (CANADA,1997)

5.1.1. Introducción

La primera aplicación de UHPFRC en la construcción de puentes que vamos a analizar será el puente Sherbrooke en Quebec, Canadá en el año 1997 que se puede observar en la ilustración 15. El análisis de este caso, primera aplicación del UHPFRC a la ingeniería de puentes, nos brindará la posibilidad de analizar las características y las ventajas del uso del UHPFRC que han permitido a la construcción moderna diseñar y producir formas complejas de gran resistencia, muy ligeras y esbeltas [57]. Estas propiedades muy apreciadas en la construcción de puentes peatonales se complementan por las excelentes propiedades del UHPFRC: elevada resistencia a la compresión, flexión y al desgaste, además de una gran durabilidad [16,17,58].



ILUSTRACIÓN 15. PUENTE PEATONAL DE SHERBROOKE EN QUEBEC [59].

5.1.2. Características

El diseño de construcción del puente peatonal Sherbrooke se estableció para salvar una luz de 60 m por medio de 6 elementos prefabricados que de 10 metros de longitud cada uno [59].

Cada uno de los elementos que constituyen este puente se caracterizan por tener secciones transversales tubulares de acero rellenos de UHPFRC. Esta sección transversal se presenta en la ilustración 16. Tal y como se muestra en esta ilustración, los perfiles de secciones tubulares se emplearon para formar una sección transversal de 3 metros de altura, espaciados cada 1.25 m a lo largo de los 10 metros de cada segmento, además de contar con las siguientes características en su perfil transversal [59]:

- Ala superior de 30 mm de espesor con 3.3 m de longitud
- Diámetro de almas de 6 pulgadas.
- El ala inferior consiste en 2 armaduras metálicas de 320 X 380 mm

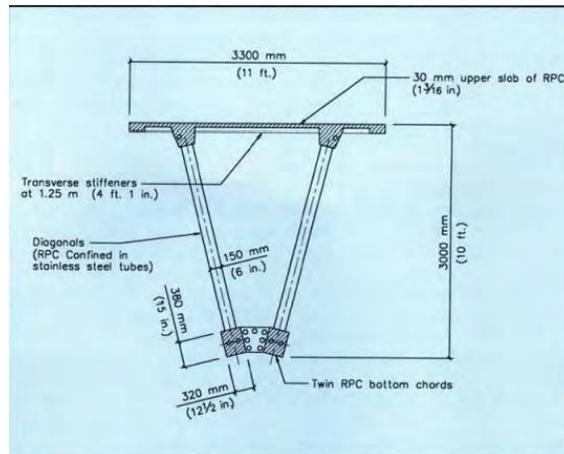


ILUSTRACIÓN 16. SECCION TRANSVERSAL DEL TABLERO DEL PUENTE (ELEMENTOS ESTRUCTURALES Y DIMENSIONES PRINCIPALES) [59].

Como se mencionó, el UHPFRC empleado en este diseño sobre los perfiles transversales fue capaz de alcanzar una resistencia a compresión de 200 MPa, estando confinado en tubos de acero de resistencia a la tracción de 350 MPa. Constituyendo una sección estructural híbrida acero-UHPFRC [59].

Estos resultados obtenidos en esta construcción reflejan que el usar UHPFRC garantiza resistencias altas, las cuales caracterizan este material. Sin embargo, el uso del UHPFRC está ligado a la consecución de un diseño de mezcla optimizado que no solo permita alcanzar las altas resistencias, sino también el aumento de ductilidad y e impermeabilidad. [59]

Con la importancia que tiene el optimizado diseño de mezcla, para el caso del puente peatonal Sherbrooke, se empleó la dosificación mostrada en la tabla 2.

Tabla 2. PROPORCION USADA EN LA MEZCLA DE UHPC

Diseño de mezcla	S. I
Cemento (ASTM tipo 2)	710 kg
Humo sílice (micro sílice)	230 kg
Cuarzo molido	210 kg
Arena	1010 kg
Fibras metálicas	190 kg
Superplastificantes	19 litros
Agua (total)	200 litros

Es importante resaltar que el puente presentó un costo total de \$ 425,000 (dólares). Este costo se extendió debido a la ausencia de una normativa que rija sobre este material. Es por esto por lo que se implementó un extenso programa de monitoreo, que supuso un incremento del costo de \$ 70,000. Sumando un rublo total la ejecución del proyecto de \$ 495,000 (dólares). Es muy relevante decir aquí que esta fue la obra pionera que posibilitó toda la aplicación posterior que analizaremos en secciones posteriores.

Por último, se expondrán las ventajas obtenidas en la construcción puente peatonal Sherbrooke usando UHPFRC como material[59]:

- Alta ductilidad que proporciona una mayor confiabilidad en condiciones de sobrecarga.
- Alta resistencia a los ciclos de congelación-descongelación, sales de deshielo y carbonatación que proporciona una vida útil más larga con un mantenimiento reducido.
- Elevada resistencia a la abrasión.
- Alta resistencia a la flexión entre 3000 a 5000 psi (25 a 35 MPa) que elimina la necesidad de acero de refuerzo, ampliando la gama de formas estructurales y formas para el arquitecto y diseñador.

Como conclusión al uso de UHPFRC para la construcción del puente peatonal Sherbrooke, podríamos citar que supuso un ahorro significativo del peso propio debido a la reducción en áreas debido la elevada resistencia a la compresión del UHPFRC empleado, con valores de 200 MPa. Este ahorro supone que las estructuras construidas con este material pueden pesar un tercio o la mitad de lo que correspondientes estructuras de concreto convencionales, siendo casi tan ligeras como estructuras de acero, lo que no sólo implica reducción de costos en el tablero del puente, sino también en las subestructuras (pilas, estribos y cimentaciones).

5.2. PUENTE MARS HILLS (WAPELLO, 2005)

5.2.1. Introducción

El puente Mars Hill del condado de Wapello (ver ilustración 17) es el primer puente de carretera en América del Norte en utilizar UHPFRC [60]. El puente tiene un tablero isostático constituido por tres vigas de concreto prefabricado de con una longitud de 34 metros de largo. Gracias a la resistencia que ofrece el UHPFRC no fue necesario ningún tipo de refuerzo de cizallamiento. Además, el tiempo constructivo fue muy corto, debido a la prefabricación de vigas del tablero [60].



ILUSTRACIÓN 17. PUENTE EN MARS HILLS WAPELLO [60].

5.2.2. Características

Gracias al uso del UHPFRC fue posible disminuir el peso de la estructura disminuyendo las dimensiones típicas a comparación de un concreto convencional [60]. La ilustración 18 muestra la sección de una viga del tablero del puente. El UHPFRC empleado en la prefabricación de las vigas alcanzó resistencias a compresión superiores a los 125 MPa. Debido al añadido de 2% por volumen de fibras de acero no solo se eliminó la necesidad de armadura de cortante en los apoyos, sino también el refuerzo en la zona de anclaje de las cuñas de pretensado y la armadura longitudinal de flexión [60].

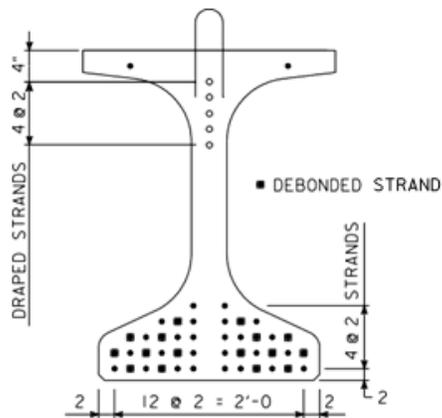


ILUSTRACIÓN 18. SECCION TRANSVERSAL DE LOS ELEMENTOS PREFABRICADOS [60].

Por lo tanto, además de diseñar vigas más livianas con secciones transversales más delgadas, de gran luz y puentes más elegantes, el empleo del UHPFRC permitió eliminar la necesidad de barras de refuerzo [60]. Adicional a lo anterior, este concreto revolucionario proporcionó una ventaja adicional porque es altamente impermeable, lo que reduce la amenaza de corrosión dentro de la estructura [60]. De acuerdo con el ingeniero Bierwagen: "Esto debería proporcionar una vida útil más larga para los puentes sujetos a la humedad y los efectos de la sal de la carretera" [60].

El tablero del puente se establece por 3 vigas espaciadas entre sí a 2.9 metros dando así un ancho compuesto de 7.6 metros [60]. Estos elementos fueron creados con materiales que se encuentran comúnmente en un concreto tradicional como cemento portland, humo de sílice, arena, reductor de agua de alta gama y agua, además de otros materiales más exclusivos como cuarzo molido y fibras de acero de alta resistencia [60]. Como ya se hizo mención el implementar el UHPFRC en puente disminuye considerablemente los tiempos de construcción. En el caso del puente de Mars Hills, la construcción del puente se inició en agosto de 2005 y para febrero de 2006 el puente ya estaba abierto al tráfico reflejando un tiempo de construcción de tan solo 6 meses [60].

5.3. PUENTE PEATONAL SAKATA (JAPON,2002)

5.3.1. Introducción

La siguiente aplicación de UHPFRC en la construcción de puentes que vamos a analizar será el Puente de Sakata en la ciudad de Sakata, en Yamagata (Japón) frente al mar de Japón (ver Ilustración 19). En este puente se implementó el uso de UHPFRC por sus excelentes propiedades de durabilidad que permitiesen contrarrestar los ataques corrosivos y para aprovechar las excelente propiedades ya conocidas que adquieren las estructuras con el uso de este material [61].



ILUSTRACIÓN 19. UBICACION DEL PUENTE PEATONAL SAKATA [61]

Como introducción, esta construcción del puente de Sakata tenía como finalidad reemplazar una estructura antigua construida en el año 1965 la cual quedó fuera de uso a causa de fuertes ataques corrosivos. Esta estructura, demolida en la intervención en el año 2002 constaba de cuatro tramos de concreto pretensados repartidos a lo largo de una luz de 50 metros. Con esta exposición de precedente, se concluye que el nuevo puente debía ser resistente a las condiciones adversas que concluyeron en la demolición de esta infraestructura en el año 2002.

El nuevo puente peatonal construido en el año 2002 conservó la misma luz del antiguo y se establecieron ciertas características técnicas que deberían mantenerse durante el

diseño y el proceso constructivo según los estudios y análisis pertinentes, las cuales eran [61]:

- No se debía cambiar el nivel del suelo o la pendiente del suelo.
- La línea inferior del puente no debía estar a menos de 0,6 m del alto nivel del agua.
- La pendiente longitudinal del puente debería ser inferior al 5%.

5.3.2. Características

La selección del UHPFRC como material para este proyecto no solo estuvo motivada por las excelentes propiedades mecánicas de este material, o por la posibilidad de reducir pesos y costos, sino también por las sobresalientes propiedades de durabilidad del UHPFRC sobre ataques de cloruro y su coeficiente de difusión de iones [61]. Propiedades necesarias para resistir el ambiente que había llevado a la retirada de servicio de la infraestructura anterior.

Sin embargo, también, y gracias ahora a las excelentes propiedades mecánicas del UHPFRC, se consiguieron establecer luces largas sin apoyos intermedios como se observa en la Ilustración 20. Es por eso que, a continuación, se señalarán las características en la construcción del puente peatonal Sakata.



ILUSTRACIÓN 20. PUENTE PEATONAL SAKATA [61].

Basados en los diseños constructivos de esta infraestructura, se puede apreciar el aprovechamiento al máximo de las propiedades mecánicas del UHPFRC. Conforme se observa en las Ilustraciones 21 y 22, se elaboraron dovelas prefabricadas para la construcción de este puente peatonal.

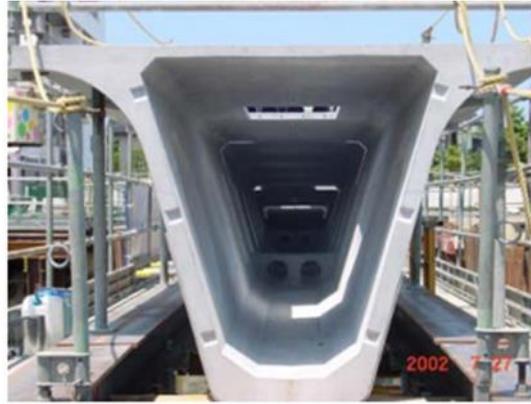


Ilustración 21. SEGMENTOS PREFABRICADOS.

Los elementos prefabricados (dovelas) huecos para la construcción de este puente peatonal, tenían 1.56 m de alto y contaban con los siguientes espesores:

- Losa superior o Ala superior: 5 cm.
- Almas: 8 cm.
- Ala inferior: 15 cm.

La unión de las dovelas para constituir un tablero cajón monolítico se realizó mediante postesado de los segmentos. Las secciones prefabricadas, como se aprecia en la ilustración 21, constaban de llaves de cortante y cuñas internas para tensado de segmentos. Esta composición permitió el ensamblaje de estos elementos a lo largo de una luz de 50 metros sin ningún refuerzo pasivo, únicamente la fijación cables pretensados en el exterior de las secciones transversales con la finalidad de aprovechar mejor el esfuerzo a tracción. Ocho segmentos de distintas longitudes (ver ilustración 22) que fueron conectados a lo largo de los 50 metros del puente por juntas húmedas mediante un tratamiento térmico [61].

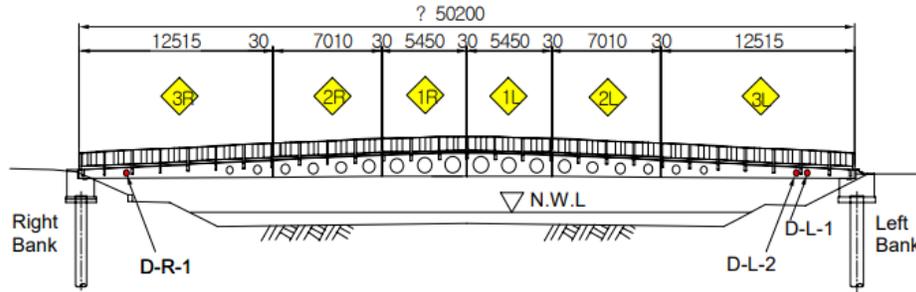


Ilustración 22. SECCION LONGITUDINAL DEL PUENTE PEATONAL SAKATA [61].

Como ya se mencionó en la introducción, estas características descritas anteriormente se logran por la alta densidad de empaquetamiento de partículas y la optimización de agregados. En la Tabla 3 se presenta la dosificación del UHPFRC empleado en la construcción de este puente peatonal [61].

Tabla 3. DISEÑO DE MEZCLA (PUENTE PEATONAL SAKATA) [61].

Composición de la mezcla					
Unidades	Ingredientes de la mezcla (cemento, humo sílice, Cuarzo)	agua	fibras	super plastificante	A/C
kg/m ³	2254	180	157	24	22

Por último, es importante mencionar las ventajas y resultados que se concluyeron en la implementación del UHPFRC en el puente peatonal Sakata, Japón [61]:

- Mínimos defectos de microgrietas y espacios porosos logrados por una relación agua/cemento extremadamente baja (0.22).
- Mejor densidad de empaquetamiento de partículas mediante la optimización de la mezcla granular.
- Mejora la microestructura de la mezcla.
- La incorporación de fibras de acero; mejoro la ductilidad y el rendimiento como era de esperarse obteniendo una absorción de energía a flexión de 36.000Nm/m²
- La mezcla alcanza mejores niveles de asentamiento (240 – 260 mm) a temperaturas entre 20° - 25° C.
- La viscosidad de la pasta cemento no afecta a la segregación de la fibra de acero dentro de la mezcla.
- El peso muerto de cada elemento prefabricado oscilaba en el rango entre 57 y 135 kN con un peso total de la construcción de 2780kN.

Con respecto con el problema principal que era el de disminuir el coeficiente de difusión de iones de cloruro, se realizaron ensayos tanto sobre especímenes de prueba como en la cara de la estructura expuesta a ataques corrosivos. Los resultados demostraron que el coeficiente de difusión de iones cloruro obtenido en la muestra de campo fue mucho menor que el obtenido en la muestra de laboratorio, como se observa en la Tabla 4. Por lo que por criterio estaría en el lado de la seguridad [61].

Tabla 4. COEFICIENTE DE DIFUSION DE CLORUROS SOBRE EL PUENTE PEATONAL SAKATA [61].

	Cara	Aparente coeficiente de difusión de iones de cloruro ($\text{cm}^2/\text{año}$)	Concentración de ion de cloruro superficial (kg/m^3)
Especímen de prueba	Superior	0.0001730	7.1
	Inferior	0.0002700	4.9
	Izquierda	0.0007530	9.9
	Derecha	0.0003320	7.0
Prueba, superficie expuesta al mar	Interior	0.0000503	3.8
	Exterior	0.0000667	21.1

Por ultimo y cómo podemos observar en la Ilustración 23, como era de esperar, el UHPFRC empleado en la construcción de esta infraestructura alcanzó resistencias a compresión superiores a los $150 \text{ N}/\text{mm}^2$.

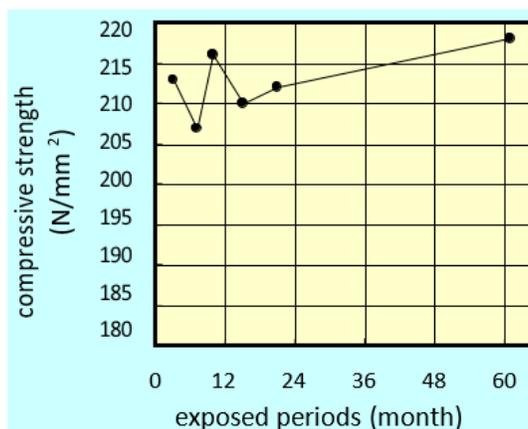


Ilustración 23. RESULTADOS DE PRUEBAS A COMPRESION DE LOS UHPFRC [61].

5.4. PUENTE BUNA (CROACIA, 2010)

5.4.1. Introducción

El puente peatonal Buna en Croacia fue una construcción de 1893 que tuvo 2 intervenciones de rehabilitación [62]. La primera rehabilitación tuvo lugar en 1953 mediante un remache de acero y la segunda en 2010. En esta segunda ocasión se empleó UHPFRC en las operaciones de rehabilitación, aprovechando las propiedades mecánicas y de durabilidad de este material para planificar un programa de fortalecimiento, mediante la ejecución de una losa de compresión de espesor delgado [62]. La ilustración 24 muestra una imagen de este puente de ferrocarril rehabilitado. Se trata de una solución de tablero mixto, con vigas metálicas roblonadas y losa de UHPFRC.



Ilustración 24. PUENTE FERROCARRIL BUNA

Esta intervención es una de las primeras a nivel mundial en la rehabilitación en una antigua estructura, el puente Buna, perteneciente a la línea férrea Zagreb-Sisak. El puente, que se aprecia en la ilustración 24, tiene una longitud de 9 m de largo y un ancho de 2.5 m, con un diseño típico del período de finales del siglo XIX. La sección transversal consta de dos vigas principales de acero laminado, placas unidas con remaches conectadas horizontalmente y rejillas verticales para rigidizar, como se aprecia en la ilustración 25 [62].



Ilustración 25. SECCION DE ACERO

5.4.2. Características

Con el fin de rehabilitar el puente se implementó un estudio desarrollado en dos etapas. La primera, consistió en una prueba estática con el objetivo de determinar la máxima deflexiones y tensiones bajo la carga de un tren. La segunda campaña se centró en las pruebas dinámicas, bajo el uso de dos escenarios de excitación. En la primera etapa la excitación se obtuvo mediante un actuador que realizaba la formación de vibraciones tanto en dirección vertical como transversal, mientras el segundo caso, la excitación ambiental fue simulado mediante dos percutores que golpean la estructura [62].

Durante la pruebas e inspección iniciales, se resaltaron las siguientes deficiencias, las cuales se pretendían mitigar con las medidas de rehabilitación de este puente [62]:

- fatiga en la mitad del vano y tensiones excesivas en áreas localizadas, así como distribución desigual de cargas laterales entre ambas vigas.
- falta de capa impermeabilizante entre los raíles y la subestructura, permitiendo que las sustancias contaminadas caigan directamente sobre el lecho del río.

Para la mitigación de estos problemas mencionados se optó por la fundición de una losa de UHPFRC de 70 mm de espesor encima de las vigas de acero existentes. Losa que estaría reforzada en la dirección transversal con varilla de 12 mm espaciadas cada 250 mm. Se puede observar una sección detallada en la ilustración 26 [62].

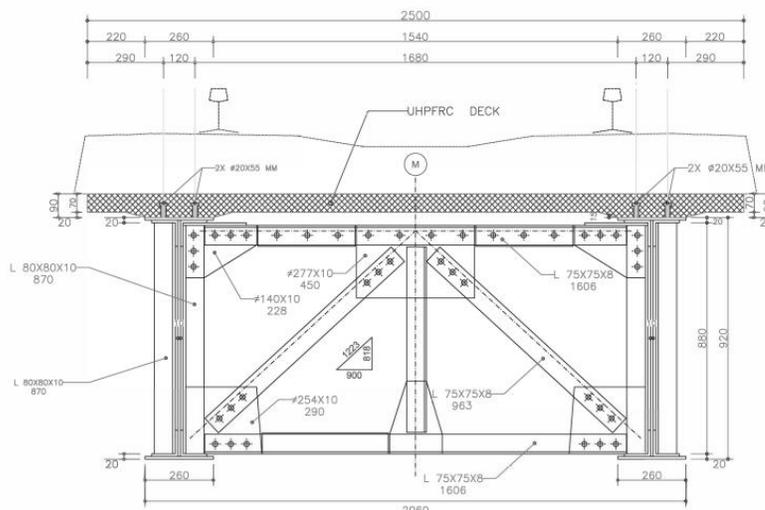


ILUSTRACIÓN 26. SECCION TRANSEVERSAL DEL PUENTE DERROCARRIL BUNA [62]

Esta rehabilitación mediante una losa de UHPFRC demostró ser adecuada como capa impermeable. Su alta densidad, baja porosidad y el efecto de micro fisuración hacen que el material sea una solución más que factible. En este caso, el beneficio es doble: por un lado, se controla el derrame de líquidos o sustancias que puedan caer sobre el río; por otro lado, la estructura de acero está protegida de agentes corrosivos que puedan deteriorar el puente y provocar daños. En términos de estabilidad, la losa permite la transferencia de cargas laterales y crea una mayor estructura estable. Tras la rehabilitación, ambas vigas se deforman con amplitud similar en dirección transversal y deflexiones [62].

Debido a su peso de manipulación de solo 8.0 toneladas (sin balasto) este puente ofrece una oportunidad única para el transporte y posterior experimentación en el laboratorio. Las técnicas de monitoreo de salud estructural utilizadas en este proyecto permitieron obtener parámetros que logren, en una primera etapa, una identificación de la condición real de la estructura, junto con una comparación con el comportamiento del puente una vez realizada la rehabilitación [62].

5.5. VIADUCTOS DE CHILLON (SUIZA, 2012)

5.5.1. Introducción

Los viaductos Chillón son dos puentes paralelos de concreto reforzado construidos a finales de la década de 1960. La ilustración 27 muestra una fotografía de estos viaductos. Estos puentes situados a orillas del lago de Ginebra cerca de Montreux en Suiza se abrieron al tráfico hasta 1969. Durante el paso del tiempo han presentado sobre las losas de concreto de la cubierta signos de las primeras etapas de reacción álcali agregado (RAA), lo que inducirá, con el tiempo, una disminución de la resistencia [5,63].



ILUSTRACIÓN 27. VIADUCTOS DE CHILLON [5]

Estos puentes son el principal enlace entre las orillas del lago de Ginebra y el cantón montañoso de Wallis, transportando aproximadamente 50'000 vehículos por día. Debido a que esta estructura tiene un alto valor cultural y una importancia económica para la región, se tomó a consideración el reforzamiento de ésta para asegurar el funcionamiento estructural para futuras demandas de tráfico. Por este motivo se decidió reforzar la losa añadiendo una capa de 40 mm de UHPFRC [5,63].

Los viaductos Chillón tiene una estructura que consta de columnas de altura variable en el rango entre 92 m y 104 m sobre una longitud total de 2120 m.

Para solucionar los problemas que se manifestaban en la estructura se plantearon obras de rehabilitación en el año 2012 sobre los viaductos, en las que se descubrieron los primeros signos de la reacción álcali agregado (RAA) en el concreto. Esta reacción podría conducir al deterioro de la resistencia a compresión del concreto. Esto significaría una seguridad estructural insuficiente del puente. Por lo que se planteó

necesario una rehabilitación y fortalecimiento que ayudara a reducir la velocidad de la RAA, protegiendo el concreto de la entrada de agua, ayudando a aumentar la resistencia y la rigidez definitiva en la capa de compresión del tablero del puente [5,63].

Gracias a extensas jornadas de investigación durante los últimos años, se ha demostrado que uno de los mejores usos del UHPFRC ha sido para fortalecer estructuras expuestas a condiciones ambientales severas (sales descongelación, medio marino, etc.) y alta carga mecánica (fuerzas concentradas, fatiga, impacto). Por lo tanto, el UHPFRC es aplicable tanto para mejorar y fortalecer las estructuras existentes como para construir nuevas estructuras robustas y duraderas. Es muy adecuado para losas de puentes, edificios, galerías, túneles y muros de contención [5,63].

5.5.2. Características

Para las operaciones de rehabilitación de los viaductos Chillón se introducen elementos estructurales compuestos que combinan concreto convencional y UHPFRC. Las propiedades protectoras y mecánicas de UHPFRC combinadas con barras de refuerzo de acero proporcionan una forma sencilla y eficiente de aumentar la rigidez y la resistencia estructural manteniendo secciones transversales [5,63].

El objetivo de la intervención era con el propósito de reducir la tasa de la reacción RAA y anticipar la pérdida de fuerza del concreto. Para ello, las actuaciones sobre los viaductos Chillón debían garantizar los siguientes efectos beneficiosos [5,63]:

- Aumentar la resistencia final de la capa de compresión de los puentes en la dirección transversal en flexión y cizallamiento.
- Incrementar la rigidez de la losa de cubierta para mejorar la capacidad de servicio de la losa y la seguridad a la fatiga de los elementos existentes en vista de futuras demandas de tráfico más altas.
- Aumentar la resistencia a flexión y la rigidez en la dirección longitudinal de la viga de canto variable.
- Proporcionar impermeabilización para proteger el concreto existente de la losa de la entrada de agua y así limitar el desarrollo posterior de la RAA.

Como ya se mencionó se implementó una capa de UHPFRC sobre la estructura existente la cual como se observa en las ilustraciones 28 y 29. La losa tiene un espesor

(h_u) de 40 mm de UHPFRC con refuerzo transversal de varillas de 12 mm de diámetro espaciadas cada 125 mm y un espesor (h_c) de 180 mm de concreto reforzado con varillas de 16 mm espaciadas también cada 125 mm [5,63].

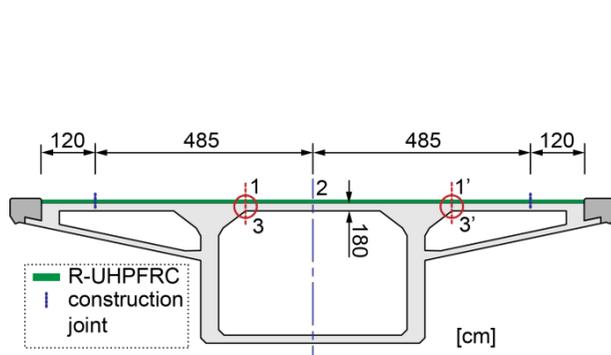


ILUSTRACIÓN 28. SECCION TRANSVERSAL [63]

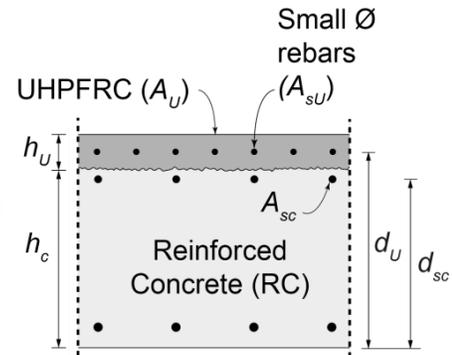


ILUSTRACIÓN 29. CORTE TRANSVERSAL DE LA LOSA DE UHPFRC [63]

La intervención sobre los viaductos tenía que ser rentable en términos de costos directos de construcción y costos de usuario, y también tenía que ser no invasiva para respetar el valor cultural. La aplicación de una capa de un material compuesto a base de UHPFRC reforzado con armaduras, se encontró rápidamente como la técnica más eficiente para cumplir todos estos objetivos [63].

Por sus excelentes propiedades, el implementar una capa de UHPFRC. logró combinar impermeabilización y el refuerzo de la losa. Además, es un material que logra una implementación en un corto período de tiempo, reduciendo así los costos por lo que se puede determinar que fortalecimiento de la losa de cubierta de los viaductos Chillon afectados por la RAA mediante una capa de UHPFRC fue el método más eficiente en tiempo y costo para resolver los problemas estructurales, respetando al mismo tiempo las limitaciones socioeconómicas y los valores culturales importantes[5,63].

5.6. PASARELA SOBRE EL BARRANCO DE LAS OVEJAS (ESPAÑA, 2015)

5.6.1. Introducción

Esta construcción trata de una pasarela prefabricada de UHPC de 42.81 m de luz (ver ilustración 30) ubicada sobre la zona próxima a la desembocadura conocida como el Barranco de las Ovejas en Alicante (España).

Inicialmente, para esta infraestructura se contaba con diseño de acero, aunque finalmente se optó por el uso de UHPFRC. Este cambio en diseño original aportó una reducción al costo por manteniendo hasta situar este costo prácticamente a cero. Además, gracias a su diseño la solución en UHPFRC no supuso un incremento considerable del peso propio de la estructura con respecto a la solución inicial en acero [64].



ILUSTRACIÓN 30. PASARELA BARRANCO DE LAS OVEJAS [64]

5.6.2. Características

Este puente peatonal consta de una doble celosía de canto variable, las cuales se conectan mediante una tercera celosía inferior y un tablero intermedio de 3 m de ancho y un ancho libre mínimo en el tablero para el tránsito de peatones de 2,80 m [64]. Con una única viga principal de canto variable entre 3.13 y 3.76 m a la que se une un cajón en su parte interior para constituir el tablero y una cubierta de cobre en la zona superior [64]. Esta disposición estructural puede observarse en la ilustración 32.

Como ya hizo mención, el diseño original en acero del puente peatonal se reemplazó por una propuesta que otorgara un carácter innovador a esta construcción mediante el uso de las tecnologías más vanguardistas en concreto estructural que asegurara un costo de mantenimiento mínimo dentro de unos parámetros prestablecidos [64]. Además, este nuevo diseño mantuvo tanto el costo como el peso de la estructura original en acero, con el fin de evitar sobrecostos en la cimentación [64].

Algunas de las propiedades del UHPFRC empleado en este puente peatonal se muestran a continuación [64]:

- Resistencia a compresión superior a 80, 135 y 150 MPa a 1, 28 y 90 días, respectivamente.
- Resistencia a la tracción superior a 25 MPa.
- Selección especial de materiales finos y ultrafinos proporcionando propiedades autocompactantes.
- Elevada densidad de empaquetamiento de partículas.
- Baja permeabilidad y durabilidad extrema incluso en los ambientes más agresivos.
- Presencia de una elevada cantidad de fibras metálicas ($\sim 150 \text{ kg/m}^3$) para resistir los esfuerzos secundarios de retracción, incrementar la ductilidad y controlar la fisuración.
- Disminución de las secciones de concreto que representan en una reducción de los elementos estructurales entre un 60-75%.
- Disminución de las necesidades de equipos de elevación.
- Eliminación de las armaduras de cortante.
- Disminución de los recubrimientos mínimos y una mayor esbeltez.
- Mayor aprovechamiento del pretensado y agilización de los procesos de prefabricación.

Existieron diversos factores que condicionaron el diseño de esta infraestructura, y que tuvieron repercusión tanto en el diseño como en la geometría final de la pasarela. Estos condicionantes se enumeran a continuación [64]:

- El costo de la nueva pasarela no podía superar el costo de la inicial presupuestado (solución en acero).
- Luz de 42,81 m, sin apoyos intermedios.
- La altura total del puente peatonal debería estar fijada en 0,42 m, limitando las opciones de diseño de la infraestructura.

- Peso total de la estructura que no podría superar las 70 Ton para evitar el sobrecoste en las subestructuras (cimentaciones y estribos).
- Por criterios de impacto visual y diseño arquitectónico, se requirió que no hubiese barandilla, lo que significó que esta función debería estar a cargo de la misma estructura.

Entrando a detalle el diseño del puente peatonal en UHPFRC, éste consta de una luz libre de 42,81 m sobre un elemento longitudinal de 43,51 m conectados por dos apoyos inclinados en los extremos [64]. A lo largo de la sección longitudinal encontramos secciones transversales que, de acuerdo con lo mencionado anteriormente y lo observa en las ilustraciones 31 y 32, se construye por dos celosías longitudinales que presentan una variación en la altura de sus almas que cambia de 1,44 m en los apoyos hasta 2,07 m en el centro [64].

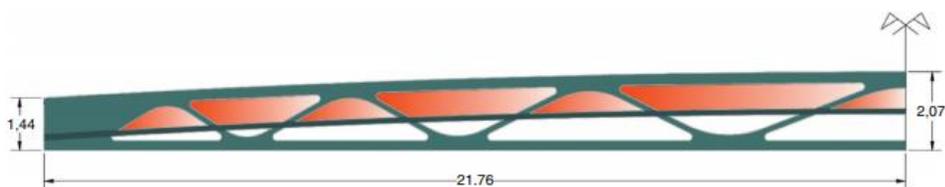


ILUSTRACIÓN 31. VISTA LONGITUDINAL [64].



ILUSTRACIÓN 32. CELOSIAS DE LA PASARELA

Como se puede observar en la ilustración 32, estas celosías se encuentran ligeramente inclinadas hacia el exterior con una pendiente 1 H:6 V. Las celosías quedan conectadas en su parte inferior por una celosía en X, y en su parte intermedia por el tablero, a una distancia constante de 1 m del ala superior [64]. Tanto las celosías laterales como la inferior se han aligerado buscando un equilibrio entre la componente estética y la eficiencia del material, manteniendo un criterio formal [64].

Por otro lado, para garantizar un agradable efecto visual en el resultado final, las diagonales, que forman la celosía tienen una sección rectangular de 0,12 m de ancho y 0,15 m de alto [64].

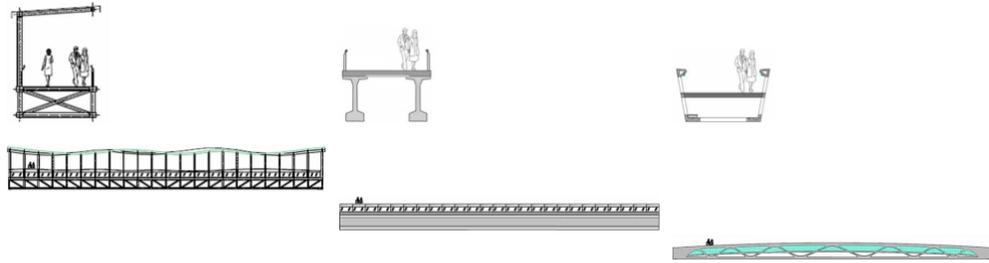
Por último, mediante una comparación hecha para evaluar la viabilidad de cambiar el diseño original, se elaboró una tabla comparativa (ver tabla 5). En esta tabla se donde se evidencian las diferencias importantes para cambiar el diseño original en acero por un diseño creado por concreto convencional o en UHPFRC [64].

Tabla 5. COMPARACION ENTRE DIFERENTES ALTERNATIVAS [64]

	Acero	Concreto Convencional	UHPFRC
Costo del material			
\$/m ³	\$33,583,000.00	\$258,000.00	\$6,450,000.00
\$/kg	\$4,300.00	\$103.20	\$2,580.00
Volumen Total (m ³)	8.6	101.5	26.7
Peso Total (Ton)	67	253.7	66.8
Costo de la Estructura			
\$/m ³	\$81,502.20	\$4,992.30	\$29,794.70
\$/kg	\$10,449.00	\$1,978.00	\$11,911.00
\$	\$704,340,000.00	\$533,200,000.00	\$795,500,000.00
%	40.9	4.9	21.6
Costo de Fabricación (%)	59	95.1	78.4
Cuantía de Armado (kg/m ²)	-	77	57
Equipamiento Básico (\$)	\$150,500,000.00	\$137,600,000.00	\$73,100,000.00
Costo de Transporte (\$)	\$64,500,000.00	\$133,300,000.00	\$77,400,000.00
Subestructuras (\$)	\$73,100,000.00	\$111,800,000.00	\$73,100,000.00
Costo Total (\$)	\$992,440,000.00	\$915,900,000.00	\$1,022,540,000.00

En la Tabla 5 se aprecia que no hay incremento de peso propio del tablero en la solución de UHPFRC con respecto a la solución en acero, lo que permite no incrementar costos en subestructuras. Caso contrario acontece con la solución en concreto convencional, donde se produce un incremento de peso de casi el 400%, lo que sin duda conllevará un redimensionamiento de los estribos y cimentaciones, y por tanto, a un incremento del costo de éstos

En la Ilustración 33 se muestran las diferencias entre las secciones transversales y el perfil longitudinal de las alternativas, para la construcción de este puente peatonal (acero, concreto convencional y UHPFRC).



*ILUSTRACIÓN 33.*DISEÑOS DE LAS DIFERENTES ALTERNATIVAS. DE IZQUIERDA A DERECHA: ALTERNATIVA EN ACERO, CONCRETO ESTRUCTURAL Y UHPFRC [64].

5.7. PUENTE PEATONAL DE LA UNIVERSIDAD EAFIT (COLOMBIA, 2017)

5.7.1. Introducción

El puente peatonal EAFIT ubicado en Medellín, Colombia (ver ilustración 34) sobre la avenida une el campus de la universidad EAFIT con la nueva sede de su edificio de Idiomas [23]. Construido con UHPFRC, esta construcción constituyó la primera infraestructura construida en Colombia y en Latinoamérica mediante el uso de UHPFRC, lo que representa un gran exponente para el avance y la investigación en futuras construcciones en la región [18,65].



ILUSTRACIÓN 34. PUENTE PEATONAL DE LA UNIVERSIDAD EAFIT [18]

5.7.2. Características

Este puente peatonal construido en 2017 tiene una longitud de 110 metros y cuenta con 43 metros de luz principal, 5 apoyos (4 columnas y un muro con ménsula vaciadas en concreto autocompactante de 42 Mpa). El tablero, construido por segmentado (dovelas) con unión postesada, consta de 29 dovelas prefabricadas en UHPFRC cada una con un peso propio de 10 toneladas. Por lo tanto, el peso total del tablero es de unas 300 toneladas.

La construcción de este puente se llevó a cabo mediante el proceso de construcción de puentes elementos prefabricados, colocados con grúa telescópica hasta una cimbra, y unidos mediante postensado no adherido para las 29 dovelas. Como se puede observar en la ilustración 35, estas dovelas se diseñaron con una geometría asimétrica, sometiendo a la estructura a esfuerzos de torsión que un concreto convencional no lograría soportar. Las propiedades del UHPFRC empleado en la construcción de este puente peatonal fueron: resistencias a la compresión de 150 MPa; módulo elástico de 40 GPa; 10 MPa de resistencia a la tracción directa; y resistencia a la flexión de 36 MPa [18,65].

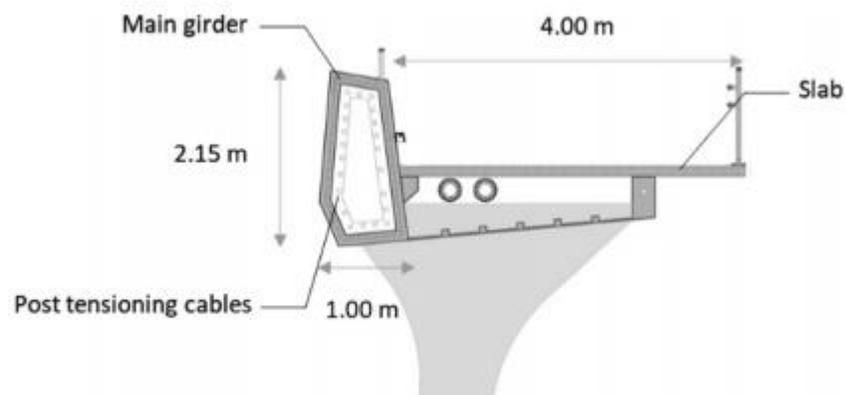


Ilustración 35. SECCION TRANSVERSAL (ELEMENTOS PREFABRICADOS) [18].

Al ser la primera construcción en América Latina que utilizara UHPFRC [18,23], logró ser un gran exponente y generar grandes expectativas en la construcción de nuevas tecnologías de concretos especiales, ya que este proyecto reflejó buenas prácticas de implementación y aplicación de UHPFRC [18,23]. Además, la selección de este material no solo aportó una reducción del 33% en el costo a comparación de una estructura en

acero inicialmente planteada, sino también el posicionar a Colombia en el mercado como pionera en la implementación del UHPFRC en la región [18,23].

5.8. PUENTE PEATONEAL DE LA UNAL (COLOMBIA, 2018)

5.8.1. Introducción

El puente peatonal en la Universidad Nacional de Colombia en la ciudad de Manizales es una muestra importante para el avance del uso de UHPFRC en el país. La ilustración 36 representa una fotografía del sistema estructural del tablero de este puente peatonal. Esta infraestructura constituye la segunda aplicación de UHPFRC en el país en construcción de puentes tras la construcción del puente EAFIT [18,19].

La inexistencia de una normativa y la reducida experiencia hace que estas muestras de aplicación del UHPFRRC se conviertan en vitales para la evolución de mejores y nuevas metodologías en la construcción. Por este motivo, exponer este caso es de gran importancia para el estudio del UHPFRC en el país.



ILUSTRACIÓN 36. PUENTE PEATONAL DE LA UNAL [19].

5.8.2. Características

Este puente se construyó en la ciudad de Manizales (Colombia) en el año 2018 teniendo como objetivo conectar diferentes áreas educativas dentro de la institución [19]. Con una longitud de tablero de 26 metros, el tablero de este puente peatonal está compuesto por 14 elementos prefabricados de UHPFRC unidos por postensado no adherente modelando un diseño arquitectónico novedoso el cual fue inspirado en esqueleto de un pez, así como se observa en la ilustración 37 [19].

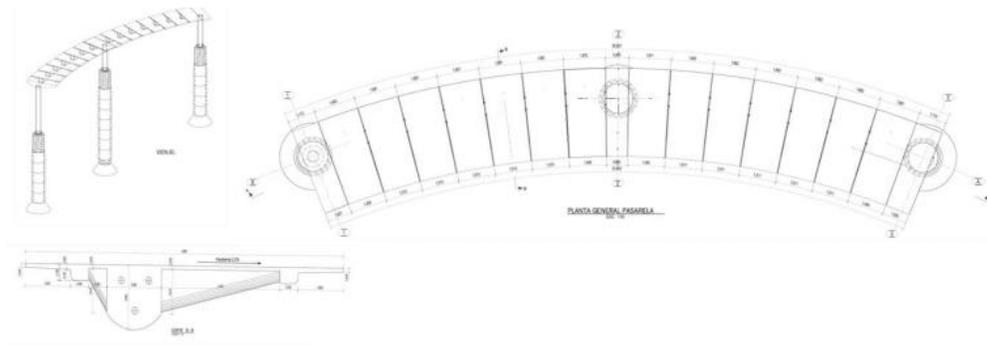


ILUSTRACIÓN 37. DISEÑO ARQUITECTONICO DEL PUENTE PEATONAL DE LA UNAL [19].

Tal y como se aprecia en la ilustración 37, el sistema estructural de esta pasarela se compone por una viga principal, construida mediante el ensamblaje de los 14 elementos de UHPFRC. Cada uno de estos elementos (dovelas) tenía un peso de 3 toneladas, por lo que la colocación de éstas en la cimbra se pudo realizar con grúas de baja capacidad. Una vez colocadas en posición, las dovelas fabricadas con UHPFRC con resistencia a compresión de 150 MPa, se unen entre sí por un sistema de 3 cables postensados no adherentes [19].

Este diseño novedoso y llamativo que presenta el puente peatonal UNAL busca poder aprovechar las propiedades mecánicas del UHPFRC, que como en algunos otros casos demostró una reducción de coste a comparación con un diseño elaborado en acero. Además, conforme a lo reportado en las investigaciones consultadas, el uso de UHPFRC en esta construcción proporcionó una rápida construcción, mínimas afectaciones por agentes contaminantes, proyecciones de mayor vida útil y menores costos por mantenimiento [19].

6. Conclusiones

Durante los casos expuesto para la aplicación de concreto de ultra altas prestaciones reforzado con fibras en puentes se analizó el alcance de las propiedades mecánicas de este material tanto en la construcción de nuevos puentes (viarios y peatonales) como en la rehabilitación. Los casos presentados presentan además de una alta resistencia mecánica con resistencia a la compresión superiores a los 150 MPa, lo que permite diseños de espesores menores de las secciones transversales, en comparación con la solución en concreto convencional. Esto tiene una especial relevancia en el caso de los puentes, que son estructuras caracterizadas por el elevado porcentaje de carga a resistir que supone su peso propio. Entre otras, las siguientes conclusiones pueden extraerse de este trabajo:

- La reducción de secciones transversales además de reducir el peso total de las estructuras mostró una reducción en costos comparándolo con concretos estructurales convencionales llegando a ser similares al peso de una estructura en acero. En algunos casos expuestos, ver caso 5.6. (Pasarela sobre el Barranco de las ovejas), la reducción de secciones con respecto a la solución en concreto convencional alcanzaba el 60-75% de reducción.
- Dentro de los beneficios que aportan las propiedades mecánicas del UHPFRC en la construcción de puentes es que brindan una mayor durabilidad que se refleja en un aumento de la vida útil de las estructuras. Además, brinda una gran impermeabilidad debido a su alta densidad de empaquetamiento de partículas, esto se refleja en una disminución en costes de mantenimiento llegando a ser una opción para reducir costos operativos a largo plazos siendo una opción muy viable para la rehabilitación de puentes como se observó en el caso 5.5 (Viaductos de Chillón) que añadiendo una capa de UHPFRC sobre el ala superior permitió combatir las problemáticas patógenas creados por la reacción Alkali agrado a la que fue expuesta antes de la rehabilitación.
- Las posibilidades mostradas para la construcción de nuevos puentes se basan en la mayoría de los casos analizados en las técnicas de prefabricación, dada las excelentes propiedades del UHPFRC, su alta resistencia inicial, que facilita el desmoldeo, y el reducido peso de los elementos prefabricados (en comparación con el concreto convencional) lo que facilita su transporte y puesta en obra.
- Además de la construcción de nuevos puentes, las aplicaciones del UHPFRC en la ingeniería de puentes permiten también la recuperación y rehabilitación de puentes deteriorados.

7. Recomendaciones

A toda persona que desee realizar un trabajo de investigación relacionado con la aplicación de UHPFRC en puentes se le realizan las siguientes recomendaciones:

Debido que, a la fecha no existe una normativa internacional aceptada para la aplicación del UHPC es difícil el encontrar información confiable. Por eso se recomienda la búsqueda de casos existentes para luego hacer una búsqueda minuciosa de fichas técnicas de los reservorios de información, fichas técnicas y tesis de investigación relacionadas con el tema, información que exprese métodos constructivos, diseños estructurales y resultados de laboratorio y ensayos finales.

Bibliografía

- [1] Wang, S., Li, V.C., Engineered Cementitious Composites with High-Volume Fly Ash, *ACI Mater. J.* (2007) 233–268. doi:10.1201/b15883-8.
- [2] Abellán-García, J., Dosage optimization and seismic retrofitting applications of Ultra-HighPerformance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC), PhD Thesis. Universidad Politécnica de Madrid, 2020.
- [3] Abellán, J., Fernández, J., Torres, N., Núñez, A., Statistical optimization of ultra-high-performance glass concrete, *ACI Mater. J.* 117 (2020) 243–254. doi:10.14359/51720292.
- [4] Abellán-García, J., An overview of the development and applications of UHPFRC in Colombia, in: *Concr. Plant Int. Worldw., CONCRETE TECHNOLOGY*, Cape Town, 2020: pp. 48–52. ISBN: 1437-9023
- [5] Martin-Sanz, H., Chatzi, E., Brühwiler, E., The use of Ultra High Performance Fibre Reinforced cement-based Composites in rehabilitation projects: a review, in: V. Saouma, J. Bolander, E. Landis (Eds.), *9th Int. Conf. Fract. Mech. Concr. Concr. Struct.*, 2016. doi:10.21012/fc9.219.
- [6] ACI Committe 239R, *ACI - 239 Committee in Ultra-High Performance Concrete*, ACI, Toronto, 2018.
- [7] Wille, K., El-tawil, S., Naaman, A.E., Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading, *Cem. Concr. Compos.* 48 (2014) 53–66. doi:10.1016/j.cemconcomp.2013.12.015.
- [8] Pyo, S., El-Tawil, S., Naaman, A.E., Direct tensile behavior of ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) at high strain rates, *Cem. Concr. Res.* 88 (2016) 144–156. doi:10.1016/j.cemconres.2016.07.003.

- [9] Abellán-García, J., Fernández-Gómez, J.A., Torres-Castellanos, N., Núñez-López, A.M., Machine Learning Prediction of Flexural Behavior of UHPFRC, in: P. Serna, A. Llano-Torre, J.R. Martí-Vargas, J. Navarro-Gregori (Eds.), *Fibre Reinf. Concr. Improv. Innov. BEFIB 2020*, RILEM Bookseries, Valencia, Spain, 2020: pp. 570–583. doi:10.1007/978-3-030-58482-5_52.
- [10] Shi, C., Wu, Z., Xiao, J., Wang, D., Huang, Z., Fang, Z., A review on ultra high performance concrete: Part II. Hydration, microstructure and properties, *Constr. Build. Mater.* 96 (2015) 368–377. doi:10.1016/j.conbuildmat.2015.10.088.
- [11] Abellan, J., Torres, N., Núñez, A., Fernández, J., Ultra high performance fiber reinforced concrete: state of the art, applications and possibilities into the latin american market, in: XXXVIII Jornadas Sudam. Ing. Estructural, Lima, Peru, 2018.
- [12] Abellán-García, J., Fernández-Gómez, J., Torres-Castellanos, N., Properties prediction of environmentally friendly ultra-high-performance concrete using artificial neural networks, *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 0 (2020) 1–25. doi:10.1080/19648189.2020.1762749.
- [13] Serna Ros, P., López Martínez, J.Á., Camacho Torregosa, E., UHPFRC : De los componentes a la estructura, in: *Simp. Latinoam. Sobre Concreto Autocompactante*, 2012: pp. 1–21.
- [14] Abellán-García, J., Núñez-López, A., Torres-Castellanos, N., Fernández-Gómez, J., Factorial design of reactive powder concrete containing electric arc slag furnace and recycled glass powder, *Dyna.* 87 (2020) 42–51. doi:http://doi.org/10.15446/dyna.v87n213.82655.
- [15] Abellán-García, J., Torres-Castellanos, N., Fernández-Gómez, J.A., Núñez-López, A.M., Ultra-high-performance concrete with local high unburned carbon fly ash, *Dyna.* 88 (2021) 38–47. doi:http://doi.org/10.15446/dyna.v88n216.89234.
- [16] Man-Chung Tang, *High Performance Concrete – Past, Present and Future*, 2004. <http://www.upress.uni-kassel.de/katalog/abstract.php?978-3-89958-376-2>.
- [17] Toutlemonde, F., Resplendino, J., *Designing and Building with UHPFRC*, 2013. doi:10.1002/9781118557839.
- [18] Abellán-García, J., Nuñez-Lopez, A., Arango-Campo, S., Pedestrian Bridge over Las Vegas Avenue in Medellín. First Latin American Infrastructure in UHPFRC, in: P. Serna, A. Llano-Torre, J.R. Martí-Vargas, J. Navarro-Gregori (Eds.), *BEFIB 2020*, RILEM Bookseries, Valencia (Spain), 2020: pp. 864–872. doi:https://doi.org/10.1007/978-3-030-58482-5_76.
- [19] Abellán, J., Núñez, A., Arango, S., Pedestrian bridge of UNAL in Manizales : A new UHPFRC application in the Colombian building market, in: *Proc. Hipermat 2020 - 5th Int. Symp. UHPC Nanotechnol. Constr. Mater.*, Kassel, Germany, 2020: pp. 43–44.
- [20] Abellán-García, J., Núñez-López, A., Torres-Castellanos, N., Fernández-Gómez, J.,

- Effect of FC3R on the properties of ultra-high-performance concrete with recycled glass, *Dyna*. 86 (2019) 84–92. doi:10.15446/dyna.v86n211.79596.
- [21] Richard, P., Cheyrezy, M., Composition of reactive powder concretes, *Cem. Concr. Res.* 25 (1995) 1501–1511.
- [22] Haber, Z.B., Graybeal, B.A., Lap-Spliced Rebar Connections with UHPC Closures, *ASCE J. Bridg. Eng.* (2018).
- [23] Abellán, J., Torres, N., Núñez, A., Fernández, J., Concretos de muy altas prestaciones reforzados con fibras: Estado del arte y aplicaciones en el mercado Latinoamericano, in: XXXVIII Jornadas Sudam. Ing. Estructural, Lima, 2018.
- [24] Abellán-García, J., Four-layer perceptron approach for strength prediction of UHPC, *Constr. Build. Mater.* 256 (2020). doi:10.1016/j.conbuildmat.2020.119465.
- [25] Abellán-García, J., K-fold Validation Neural Network Approach for Predicting the One-Day Compressive Strength of UHPC, *Adv. Civ. Eng. Mater.* Doi10.1520/ACEM20200055. 10 (2021) 223–243. doi:10.1520/ACEM20200055.
- [26] Abellan-Garcia, J., Santofimo-Vargas, M.A., Torres-Castellanos, N., Analysis of metakaolin as partial substitution of ordinary Portland cement in Reactive Powder Concrete, *Adv. Civ. Eng. Mater.* 9 (2020) 368–386. doi:10.1520/ACEM20190224.
- [27] Ferdosian, I., Camões, A., Ribeiro, M., “High-volume fly ash paste for developing ultra-high performance concrete (UHPC),” *Cienc. e Tecnol. Dos Mater.* 29 (2017) e157–e161. doi:10.1016/j.ctmat.2016.10.001.
- [28] Abellán, J., Fernández, J., Torres, N., Núñez, A., Development of cost-efficient UHPC with local materials in Colombia, in: *Proc. Hipermat 2020 - 5th Int. Symp. UHPC Nanotechnol. Constr. Mater.*, Kassel, Germany, 2020: pp. 97–98.
- [29] Kim, D.J., Wille, K., Naaman, A.E., El-Tawil, S., Strength Dependent Tensile Behavior of Strain Hardening Fiber Reinforced Concrete, in: *High Perform. Fiber Reinf. Cem. Compos.* 6, Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 2011: pp. 3–10. doi:10.1007/978-94-007-2436-5.
- [30] Abellán-García, J., Fernández-Gómez, J., Torres-Castellanos, N., Núñez-López, A., Tensile behavior of normal strength steel fiber green UHPFRC, *ACI Mater. J.* 118 (2021) 127–138. doi:10.14359/51725992.
- [31] Abellán-García, J., Comparison of artificial intelligence and multivariate regression in modeling the flexural behavior of UHPFRC, *Dyna*. 87 (2020) 239–248. doi:http://doi.org/10.15446/dyna.v87n214.86172.
- [32] Camacho, E., López, J.Á., Serna, P., “Definition of three levels of performance for UHPFRC-VHPFRC with available materials, in *Proceedings of Hipermat 2012*,” in: M. Schmidt, E. Fehling, C. Glotzbach, S. Fröhlich, S. Piotrowski (Eds.), 3rd Int.

Symp. UHPC Nanotechnol. Constr. Mater., Kassel Uni, Kassel, Germany, 2012: pp. 249–256.

- [33] Reyes Suarez, M.M., Camargo Jiménez, J.F., Placas De Sconcreto De Ultra Alto Desempeño (UHPC) Como Solución Para Pisos En Estaciones De Transmilenio., Pontificia Universidad Javeriana, 2016.
- [34] Wille, K., Naaman, A.E., Parra-Montesinos, G.J., Ultra-High Performance Concrete with Compressive Strength Eceeding 150 MPa (22 ksi): A Simpler Way, *ACI Mater. J.* (2011).
- [35] Abellán, J., Torres, N., Núñez, A., Fernández, J., Influencia del exponente de Fuller, la relación agua conglomerante y el contenido en policarboxilato en las propiedades de concretos de muy altas prestaciones, *19 Conv. Cient. Ing. y Arquit.* (2018) 1–16.
- [36] Funk, J.E., Dinger, D.R., *Predictive Process Control of Crowded Particulate Suspensions*, 1994.
- [37] de Larrard, F., Sedran, T., Optimization of ultra-high-performance concrete by the use of a packing model, *Cem. Concr. Res.* 24 (1994) 997–1009. doi:10.1016/0008-8846(94)90022-1.
- [38] Chang, P., Peng, Y., Influence of mixing techniques on properties of high performance concrete, *31* (2001) 87–95.
- [39] Taфраoui, A., Escadeillas, G., Lebaili, S., Vidal, T., Metakaolin in the formulation of UHPC, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 669–674. doi:10.1016/j.conbuildmat.2008.02.018.
- [40] Abellán-garcía, J., Guzmán-guzmán, J.S., Sánchez-díaz, J.A., Rojas-grillo, J., Experimental validation of Artificial Intelligence model for the energy absorption capacity of UHPFRC, *Dyna.* 88 (2021) 150–159. doi:https://doi.org/10.15446/dyna.v88n217.
- [41] Abellán-García, J., Guzmán-Guzmán, J.S., Random forest-based optimization of UHPFRC under ductility requirements for seismic retrofitting applications, *Constr. Build. Mater.* 285 (2021). doi:10.1016/j.conbuildmat.2021.122869.
- [42] Yokota, H., Rokugo, K., Sakata, N., (JSCE-2008) Recommendations for Design and Construction of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites with Multiple Fine Cracks (HPFRCC), (2008). doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.dci.2010.01.003.
- [43] Büyükköztürk, O., Lau, D., High performance concrete: fundamentals and application, in: *Proc. Int. Conf. New Dev. Concr. Technol.*, Bijing (China), 2002: pp. 177–198.
- [44] Wu, Z., Shi, C., He, W., Comparative study on flexural properties of ultra-high performance concrete with supplementary cementitious materials under different curing regimes, *Constr. Build. Mater.* 136 (2017) 307–313.

doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.01.052.

- [45] Graybeal, B., Davis, M., Cylinder or Cube : Strength Testing of 80 to 200 Fiber-Reinforced Concrete Cylinder or Cube : Strength Testing of 80 to 200 MPa (11 . 6 to 29 ksi) Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete, *ACI Mater. J.* 105 (2014) 603–609.
- [46] Bărbos, G.– A., Long-term Behavior of Ultra – High Performance Concrete (UHPC) Bended Beams, *Procedia Technol.* 22 (2016) 203–210. doi:10.1016/j.protcy.2016.01.045.
- [47] AFGC and SETRA, Ultra High Performance Fibre-Reinforced Concretes - Recommendations, Associatio, 2013.
- [48] Tu'ma, N.H., Aziz, M.R., Flexural Performance of Composite Ultra-High-Performance Concrete-Encased Steel Hollow Beams, *Civ. Eng. J.* 5 (2019) 1289–1304. doi:10.28991/cej-2019-03091332.
- [49] Ahmad, S., Hakeem, I., Maslehuddin, M., Development of UHPC Mixtures Utilizing Natural and Industrial Waste Materials as Partial Replacements of Silica Fume and Sand, *Eur. J. Environ. Civ. Eng.* 2014 (2014) 1106–1126. doi:10.1155/2014/713531.
- [50] Corinaldesi, V., Moriconi, G., Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete, *Constr. Build. Mater.* 23 (2009) 2869–2876. doi:10.1016/j.conbuildmat.2009.02.004.
- [51] Graybeal, B.A., Characterization of the behaviour of Ultra-High Performance Concrete, in: *Dep. Civ. Environ. Eng., University, College Park, MD, USA, 2005.*
- [52] Nehdi, M., Abbas, S., Soliman, A., Exploratory study of ultra-high performance fiber reinforced concrete tunnel lining segments with varying steel fiber lengths and dosages, *Eng. Struct.* 101 (2015) 733–742. doi:10.1016/j.engstruct.2015.07.012.
- [53] Tayeh, B.A., Abu Bakar, B.H., Megat Johari, M.A., Voo, Y.L., Utilization of ultra-high performance fibre concrete (UHPFC) for rehabilitation - A review, *Procedia Eng.* 54 (2013) 525–538. doi:10.1016/j.proeng.2013.03.048.
- [54] Soliman, N.A., Tagnit-Hamou, A., “Using glass sand as an alternative for quartz sand in UHPC,” *Constr. Build. Mater.* 145 (2017) 243–252. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.03.187.
- [55] Kalny, M., Kvasnicka, V., Komanec, J., “First Practical Applications of UHPC in the Czech Republic,” in: E. Fehling, B. Middendorf, J. Thiemicke (Eds.), *Proc. Hipermat 2016 - 4th Int. Symp. UHPC Nanotechnol. Constr. Mater., Kassel, Germany, 2016:* pp. 147–148.
- [56] Rai, B., Wille, K., Development and testing of High / Ultra-High Early Stregnth Concrete, in: B. Middendorf, E. Fehling, A. Wetzels (Eds.), *Proceeding 5th Int. Symp. Fract. Mech. Concr. Concr. Struct., University of Kassel, Germany, Kassel,*

Germany, 2020: pp. 7–8.

- [57] Abellán, J., Sánchez, J., Ospina, V., Neural network-based optimization of fibers for seismic retrofitting applications of UHPFRC, (2020).
- [58] Joe, C., Moustafa, M., Cost and Ecological Feasibility of Using UHPC in Bridge Piers, in: First Int. Interact. Symp. UHPC – 2016, 2016: pp. 1–8. doi:10.21838/uhpc.2016.103.
- [59] Blais, P.Y., Couture, M., Precast, prestressed pedestrian bridge - world's first Reactive Powder Concrete structure, PCI J. 44 (1999) 60–71. doi:10.15554/pcij.09011999.60.71.
- [60] Sritharan, S., Aaleti, S., Bierwagen, D., Garder, J., Abu-Hawash, A., Current research on Ultra High Performance Concrete (UHPC) for Brid, in: M. Schmidt, E. Fehling, C. Glotzbach, S. Fröhlich, S. Piotrowski (Eds.), Proc. Hipermat 2012 3rd Int. Symp. UHPC Nanotechnol. High Perform. Constr. Mater., Kassel University, Kassel, Germany, 2012: pp. 857–864.
- [61] Tanaka, Y., Musha, H., Tanaka, S., Ishida, M., Durability performance of UFC sakata-mira footbridge under sea environment, in: H.B. Oh, E. Al. (Eds.), Fract. Mech. Concr. Concr. Struct. - High Performance, Fiber Reinf. Concr. Spec. Loadings Struct. Appl., Korea Concrete Institute, 2010: pp. 1648–1654.
- [62] Martín-Sanz, H., Tatsis, K., Chatzi, E., Brühwiler, E., Stipanovic, I., Mandic, A., Damjanovic, D., Sanja, A., Towards the use of UHPFRC in railway bridges: The rehabilitation of buna bridge, Life-Cycle Anal. Assess. Civ. Eng. Towar. an Integr. Vis. - Proc. 6th Int. Symp. Life-Cycle Civ. Eng. IALCCE 2018. (2019) 203–210.
- [63] Brühwiler, E., Bastien-Masse, M., Mühlberg, H., Houriet, B., Fleury, B., Cuennet, S., Schär, P., Boudry, F., Maurer, M., Strengthening the Chillon viaducts deck slabs with reinforced UHPFRC, IABSE Conf. Geneva 2015 Struct. Eng. Provid. Solut. to Glob. Challenges - Rep. (2015) 1171–1178. doi:10.2749/222137815818358457.
- [64] Serna, P., López, J.Á., Coll, H., Camacho, E., Navarro-Gregori, J., Galán, F., Pasarela de hormigón de muy alto rendimiento sobre el Barranco de las Ovejas (Alicante), Hormigón y Acero. 66 (2015) 23–42. doi:10.1016/j.hya.2014.12.001.
- [65] Abellán, J., Torres, N., Núñez, A., Fernández, J., “Ultra high performance fiber reinforced concrete: state of the art, applications and possibilities into the latin american market,” in: XXXVIII Jornadas Sudam. Ing. Estructural, Lima, Peru, 2018. doi:XXXVIIIJSIE-07-001.