



Proceso constructivo de la rehabilitación de pavimentos mediante sobre-carpetas de concretos de ultra altas prestaciones reforzados con fibras (UHPFRC)

César Iván Ramírez Munévar

Escuela Colombiana de ingeniería Julio Garavito

Facultad de ingeniería civil

Bogotá, Colombia

2020

**Proceso constructivo de la rehabilitación de pavimentos
mediante sobre-carpetas de concretos de ultra altas
prestaciones reforzados con fibras (UHPFRC)**

César Iván Ramírez Munévar

Director:

M.Sc. 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

En la presente investigación se identificarán y analizarán las propiedades de los concretos de ultras altas prestaciones reforzados con fibras (UHPFRC) frente al campo de la rehabilitación de pavimentos. Luego de conocer las propiedades y el comportamiento del UHPFRC se mencionan los métodos de rehabilitación más reconocidos en pavimentos, entre ellos, el método de la instalación de sobre-carpetas de UHPFRC. Se expondrán aplicaciones del UHPFRC en la actualidad como por ejemplo en mobiliario, estructuras y arquitectura.

Como parte fundamental en la investigación, se hablará acerca de la importancia y necesidad de ejecutar obras de rehabilitación de pavimentos en Colombia y el mundo, mencionando temas como la economía, costos y desarrollo de una sociedad. Conociendo lo anterior se establecen los métodos más usados, sus diferencias, ventajas y desventajas, con el fin de recalcar y diferenciar el uso de sobre-carpetas de UHPFRC respecto a los demás.

Los objetivos y la finalidad de esta investigación se basan en identificar, comprender, comparar y analizar la utilización de este método de rehabilitación de vías respecto a métodos convencionales. Para ello, se expondrán casos aplicativos de las sobre-carpetas de UHPFRC en Colombia y el exterior. Se identificará quién realizó el proyecto, el lugar, las condiciones existentes de ese entonces, las propiedades del UHPFRC, los equipos usados durante todo el proceso constructivo, posibles pruebas posteriores y conclusiones expuestas por los realizadores del proyecto.

Finalmente, después de exponer los casos aplicativos más relevantes en el mundo, se puede concluir que el método de las sobre-carpetas de UHPFRC es técnicamente válido y supone una tecnología para tener en cuenta en las obras de rehabilitación de pavimentos en el país. Además, las experiencias presentadas demuestran que los costos asociados a la tecnología de sobre-carpetas de UHPFRC son similares o menores comparados con la rehabilitación mediante sobre-carpetas ejecutadas con materiales convencionales. Esto es debido no sólo a que el tiempo de obra es menor por la utilización de maquinaria específica desarrollada para esta tecnología, sino también a las propiedades del material, que evitan futuros sobre costos en mantenimiento y permiten reducir el espesor de la sobre-carpeta.

Palabras clave: Alta Resistencia, Rehabilitación, Pavimentos, Sostenibilidad, Durabilidad e Innovación.

Contenido

Página:

Resumen.....	III
Lista de Ilustraciones.....	VI
Lista de tablas	VIII
Introducción.....	9
1. Marco teórico	10
1.1. Concreto de ultra altas prestaciones sin y con fibras	10
1.2. Rehabilitación de pavimentos de carreteras:.....	22
2. Estado del arte	23
2.1. Necesidad de rehabilitación de carreteras.....	23
2.2. Métodos para la rehabilitación de carreteras	23
2.3. Sobre-carpetas Asfálticas	25
2.4. Sobre-carpetas de UHPFRC	25
3. Objetivos.....	26
3.1. Objetivo general.....	26
3.2. Objetivos específicos:.....	26
4. Metodología	26
4.1. Recolección de Datos.....	26
4.2. Conclusiones y discusión	26
5. Análisis de casos de aplicación de UHPFRC en sobre-carpetas para rehabilitación de pavimentos de carreteras	27
5.1. Tramo de prueba en planta de concreto de Argos.....	27
5.1.1. Introducción.....	27
5.1.2. UHPFRC	27
5.1.3. Metodología.....	27
5.1.4. Pruebas a posteriori.....	29
5.1.5. Conclusiones de la actuación.....	30
5.2. Tramo de prueba en zona de pesaje en Medellín.....	30
5.2.1. Introducción.....	30

5.2.2.	UHPFRC	30
5.2.3.	Metodología.....	30
5.2.4.	Pruebas a posteriori.....	32
5.2.5.	Conclusiones de la actuación.....	33
5.3.	Tramo de prueba para el uso público en Medellín	33
5.3.1.	Introducción.....	33
5.3.2.	UHPFRC	33
5.3.3.	Metodología.....	33
5.3.4.	Pruebas a posteriori.....	34
5.3.5.	Conclusiones de la actuación.....	34
5.4.	Laporte Road Bridge.....	35
5.4.1.	Introducción.....	35
5.4.2.	UHPFRC	35
5.4.3.	Metodología.....	35
5.4.4.	Pruebas a posteriori.....	38
5.4.5.	Conclusiones de la actuación.....	42
5.5.	Viaducto de Chillon	42
5.5.1.	Introducción.....	42
5.5.2.	UHPFRC	42
5.5.3.	Metodología.....	43
5.5.4.	Pruebas a posteriori.....	47
5.5.5.	Conclusiones de la actuación.....	47
5.6.	Viaducto de Kander.....	48
5.6.1.	Introducción.....	48
5.6.2.	UHPFRC	48
5.6.3.	Metodología.....	48
5.6.4.	Pruebas a posteriori.....	49
5.6.5.	Conclusiones de la actuación.....	49
5.7.	Bridge over Floyd River.....	49
5.7.1.	Introducción.....	49
5.7.2.	UHPFRC	49
5.7.3.	Metodología.....	49

5.7.4. Pruebas a posteriori.....	52
5.7.5. Conclusiones de la actuación.....	53
5.8. Little Heaven	53
5.8.1. Introducción.....	53
5.8.2. UHPFRC	53
5.8.3. Metodología.....	54
5.8.4. Pruebas a posteriori.....	55
5.8.5. Conclusiones de la actuación.....	55
6. Conclusiones.....	55
7. Recomendaciones.....	56
Bibliografía	57

Lista de Ilustraciones

Ilustración 1. Tipos de fibras usados para el UHPFRC [3].	10
Ilustración 2. – Cuerpo de prueba “dogbone” para ensayo a tracción directa conforme a JSCE-08 [4,5].....	11
Ilustración 3. Diagrama esfuerzo-alargamiento unitario de un UHPFRC con comportamiento de endurecimiento por deformación [4].	11
Ilustración 4. Gráfico de esfuerzos Vs Deformación a tracción [6].....	12
Ilustración 5. Ensayo a compresión del UHPFRC realizado por Argos	12
Ilustración 6. Diagrama de esfuerzo Vs deformación en ensayo a compresión [9]	13
Ilustración 7. Resultados y niveles por ensayo de flexión [3].	13
Ilustración 8. Ensayo de Flexión a cuatro puntos sobre lámina por Argos [2].....	14
Ilustración 9. Diagrama de Carga Vs Desplazamiento, ensayo realizado por Argos [2].....	14
Ilustración 10. Mezcla sin tixotropía [6].....	14
Ilustración 11. Mezcla tixotrópica [6].....	15
Ilustración 12. Aplicación de ciclos de carga en superficie con actuador dinámico [1].....	16
Ilustración 13. Desplazamientos sobre mezcla densa en caliente y posteriormente en sobrecarpeta de UHPFRC 2cm [1]	16
Ilustración 14. Pasarela sobre el barranco de las Ovejas, en Alicante [13].....	17
Ilustración 15. Puente peatonal Seonyu en Corea del Sur [9]	18
Ilustración 16. Puente peatonal Sherbrooke en Canadá [14].....	18
Ilustración 17. Puente peatonal de la universidad Eafit en Medellín [15]	18
Ilustración 18. La Marseillaise Tower en Francia [16].....	19
Ilustración 19. Puente en Sutong China 2008 [13].....	19
Ilustración 20. Peaje en el viaducto de Millau en Francia 2007 [13].....	19
Ilustración 21. Edificio Operturm en Alemania[13].....	20

Ilustración 22. Viaducto de Chillón en Suiza [12].	20
Ilustración 23. Puente de carretera Laporte en Iowa [12]	20
Ilustración 24. Tramo vial en planta de concreto Argos [1].	21
Ilustración 25. Proceso de aplicación de sobre-carpetas de UHPC en planta de producción de concreto de Argos.[1]	28
Ilustración 26. Ejemplo de rodillo vibrante para la compactación y colocación de la sobre-carpeta.[15]	28
Ilustración 27. Textura de la superficie de rodadura del tramo de prueba [1].	29
Ilustración 28. Tramo de prueba en operación [1].	29
Ilustración 29. Sobre-carpetas de UHPC en tramos de pesaje de prefabricados en Antioquia. [1]	31
Ilustración 30. Fresadora de pavimentos. [16]	31
Ilustración 31. Lonas de plástico para el curado del concreto [22].	32
Ilustración 32. Tramo de prueba con espesores de capa de 3 y 5 cm de UHPC. [1]	32
Ilustración 33. Perfil del tramo de sobre-carpeta en UHPC para uso público [1].	34
Ilustración 34. Tramo de sobre-carpeta en UHPC para uso público [1].	34
Ilustración 35. Región afectada en dirección al oeste del puente [12].	35
Ilustración 36. Zona afectada en dirección al oeste [12].	36
Ilustración 37. Superficie escarificada en el tablero del puente [12].	36
Ilustración 38. Equipos utilizados para la colocación de la sobre-carpeta de UHPC [12].	37
Ilustración 39. Plástico protector del proceso de curado [12].	37
Ilustración 40. Acabado superficial del tablero del puente [12].	38
Ilustración 41. Extracción de núcleos para revisión [12].	39
Ilustración 42. Tipos de fractura en la extracción de los núcleos [12].	39
Ilustración 43. Extracción de los núcleos para su evaluación [12].	40
Ilustración 44. Vista del espacio ocupado por los cilindros, diferencia entre sustrato de concreto y UHPC [12].	40
Ilustración 45. Núcleo extraído de la zona G [12].	40
Ilustración 46. Núcleo extraído de la zona B [12].	41
Ilustración 47. Resumen de resultados en las pruebas a posteriori [12].	41
Ilustración 48. Planta en sitio de UHPFRC en el viaducto de Chillón [24].	43
Ilustración 49. Fresado de la capa de rodadura existente en el viaducto de Chillón [24].	44
Ilustración 50. Retroexcavadoras sobre neumáticos en el viaducto de Chillón [24].	44
Ilustración 51. Retroexcavadora sobre orugas en el viaducto de Chillón [24].	44
Ilustración 52. Barredora en el viaducto de Chillón [24].	45
Ilustración 53. Instalación de la malla de acero de refuerzo. [18].	45
Ilustración 54. Vaciado de UHPFRC con la repavimentadora [24].	46
Ilustración 55. Parte posterior del proceso de vaciado [24].	46
Ilustración 56. Lonas de plástico para el curado y protección del material [24].	46
Ilustración 57. Curado de la sobre-carpeta de UHPFRC [24].	47
Ilustración 58. Viaducto con sobre-carpeta de UHPFRC de Kander [24].	48

Ilustración 59. Máquina que efectúa la hidrodemolición por WALO en el puente de Sheldon, Iowa [24].	50
Ilustración 60. Extracción de los residuos con una retroexcavadora cargadora sobre neumáticos [24].	50
Ilustración 61. Planta en sitio para la fabricación del UHPFRC [24].	51
Ilustración 62. Descarga del UHPFRC a la retroexcavadora cargadora para transportar a la repavimentadora [24].	51
Ilustración 63. Transporte del material a la repavimentadora [24].	51
Ilustración 64. Descarga del UHPFRC a la repavimentadora [24].	52
Ilustración 65. Trabajadores con rastrillos para esparcir el material [24].	52
Ilustración 66. Textura superficial del puente de Sheldon, Iowa [24].	53
Ilustración 67. Instalación de la sobre-carpetas de UHPFRC en Delaware [25].	54

Lista de Tablas

Tabla 1. Propiedades típicas del UHPFRC [12].	17
Tabla 2. Obras en las que se ha usado UHPFRC en Colombia [17].	21
Tabla 3. Propiedades del UHPFRC trabajado por WALO en las obras de restauración con sobre-carpetas [24].	43

Introducción

En el transcurso de los años a nivel nacional e internacional la cantidad de vehículos particulares, comerciales y públicos ha venido en aumento, por lo que las capacidades y características de las vías se ha convertido en un tema realmente significativo. Estados Unidos y la Unión Europea han reportado un aumento en las operaciones de transporte por vías urbanas y rurales, según la FHWA (Federal Highway Administration)[1]. En Colombia sucede de la misma manera, por lo que el campo investigativo respecto a las vías y las estructuras de sus pavimentos giran en torno a la búsqueda de nuevos materiales y procesos de rehabilitación, restauración, refuerzo y reciclado, con el fin de prevenir fallas y aumento de costos en reparaciones y mantenimientos.

Buscando mitigar el daño por fatiga (cargas cíclicas) debido al aumento vehicular, se buscan materiales resistentes y duraderos para intervenir carreteras y vías urbanas que se vean o puedan llegarse a ver afectadas. Compañías como Argos están en la búsqueda de generar patentes frente a nuevos materiales que aporten grandes resistencias y que posean propiedades mecánicas adecuadas para esto. El material innovador que sobresale en las investigaciones de obras para la rehabilitación y sustitución en infraestructura vial es el UHPC (Ultra High Performance Concrete). Este concreto de propiedades especiales ha demostrado grandes resultados tanto a nivel de capacidad y resistencia como a nivel económico, pues al poseer excelentes propiedades mecánicas hace que disminuya la cantidad de material necesaria para soportar esfuerzos debidos a tráfico pesados y livianos.

El UHPC actualmente se utiliza como refuerzo estructural, en elementos de la superestructura de los puentes vehiculares y urbanos, fachadas, mobiliario y restauración o rehabilitación de pavimentos. En este trabajo investigativo se conocerán las propiedades, resultados, ventajas y desventajas respecto al uso del UHPC y UHPFRC (UHPC con fibras de refuerzo) como material principal para la rehabilitación de pavimentos con sobre-carpetas. Además, se analizarán los resultados y costos de algunas obras en donde utilizaron este método, se identificarán las metodologías usadas en cada caso (equipos, curado, controles), se explicará la composición del UHPC usado en cada una de estas, se hablará sobre posibles pruebas posteriori con el fin de evaluar el comportamiento y finalmente se concluirá respecto a los resultados de cada caso de aplicación.

1. Marco teórico

En este inciso se hablará acerca de las definiciones y conceptos acerca de los procesos de rehabilitación de pavimentos y el concreto de ultras altas prestaciones sin y con fibras, considerando que respecto a este último se investigaran los casos de aplicación, por lo cual se hará más énfasis en sus propiedades y características.

1.1. Concreto de ultra altas prestaciones sin y con fibras

Concreto de ultra-altas Prestaciones (UHPC): Es un concreto de última tecnología que tiene materiales muy especiales en su interior, comparado con un concreto convencional, según Andrés Núñez (PhD, Ingeniero Civil y Líder Proyectos de I&D de Argos) [2]. Una dosificación común de UHPC contiene cemento Portland, materiales cementantes suplementarios, micro sílice, harina de cuarzo, arena fina silícea y superplastificante reductor de agua de alto rango (HRWR)[3].

Concreto de ultra-altas prestaciones reforzado con fibras (UHPFRC): El concreto de ultras-altas prestaciones por lo general tienen un comportamiento frágil, por lo que para conseguir un adecuado comportamiento se adicionan fibras, las cuales incrementan la resistencia a tracción y flexión. El UHPFRC posee un mejor comportamiento que el UHPC, pues, permite que el material sea capaz de soportar incrementos de carga después de la aparición de la primera fisura (tenacidad). El UHPFRC busca reducir en gran medida las cuantías de acero de refuerzo necesarias en todo tipo de estructuras. Algunos tipos de fibras son: fibras metálicas acabadas en gancho, metálicas lisas, metálicas retorcidas, monofilamento de polivinilo de alcohol, fibra de polipropileno y fibra de polietileno [3].



Ilustración 1. Tipos de fibras usados para el UHPFRC [3].

Comportamiento a tracción directa del (UHPFRC): El cuerpo de ensayo habitual para evaluar el comportamiento del UHPFRC a tracción directa se ve representado en la ilustración 2. En la ilustración 3 se evidencia como este material soporta esfuerzos a tracción superiores a 7 o 8 Mpa. Al revisar la Ilustración 3 se identifican tres zonas. La zona 1 es la zona elástica en donde el material puede volver a su estado original. En la zona 2, que inicia tras la aparición de la primera fisura al alcanzarse la tensión σ_{cc} , ya se presenta el endurecimiento por deformación. En esta zona el material no vuelve a su estado natural porque ya alcanzo la tensión de fisuración (deformación plástica). En esta zona se produce además la absorción de energía y se presenta el fenómeno de la multifisuración. Por último, tras alcanzar la tensión máxima σ_{pc} , encontramos la zona 3 en la que se da el reblandecimiento por deformación, se presenta el deslizamiento de la fibra y finalmente ocurre la rotura. El UHPFRC ofrece rotura dúctil con endurecimiento por deformación a tracción directa si y solo si $\sigma_{cc} < \sigma_{pc}$. Cabe resaltar que la ubicación, tipo, distribución y orientación de las fibras afectan los resultados del ensayo [4].



Ilustración 2. – Cuerpo de prueba “dogbone” para ensayo a tracción directa conforme a JSCE-08 [4,5].

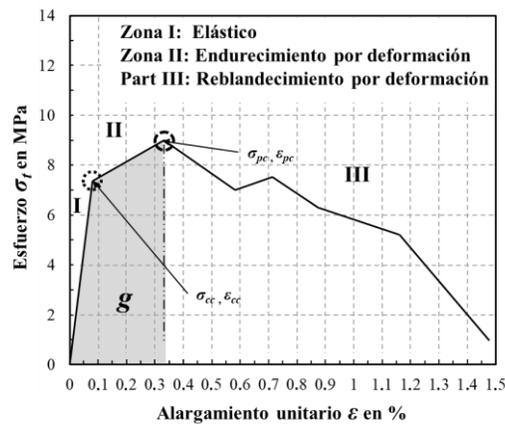


Ilustración 3. Diagrama esfuerzo-alargamiento unitario de un UHPFRC con comportamiento de endurecimiento por deformación [4].

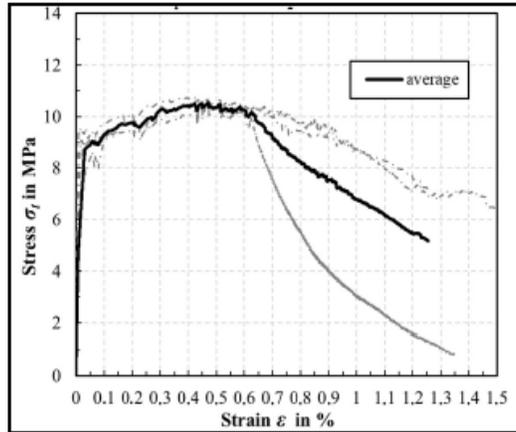


Ilustración 4. Gráfico de esfuerzos Vs Deformación a tracción [6].

Comportamiento a compresión del (UHPFRC): Frente a el ensayo de compresión este material soporta esfuerzos superiores a 150MPa [7], siendo este uno de los factores más importantes en la ingeniería civil. También brinda capacidad de absorber la energía a compresión. Uno de los principales causantes de tan excelentes propiedades es el elevado grado de empaquetamiento de partículas. En este sentido, la densidad de empaquetamiento de partículas de los UHPC y UHPFRC es muy superior a la de los concretos convencionales, ya que su dosificación se realiza a nivel micro, reduciéndose el porcentaje de vacíos dentro de la mezcla [8]. Por ejemplo, el reducido tamaño de las partículas de humo de sílice hace que éstas, con la dosificación adecuada, puedan ubicarse entre los espacios del cemento, arena y fibras, llegando a quedar una mezcla sin porosidad, densa y homogénea.



Ilustración 5. Ensayo a compresión del UHPFRC realizado por Argos

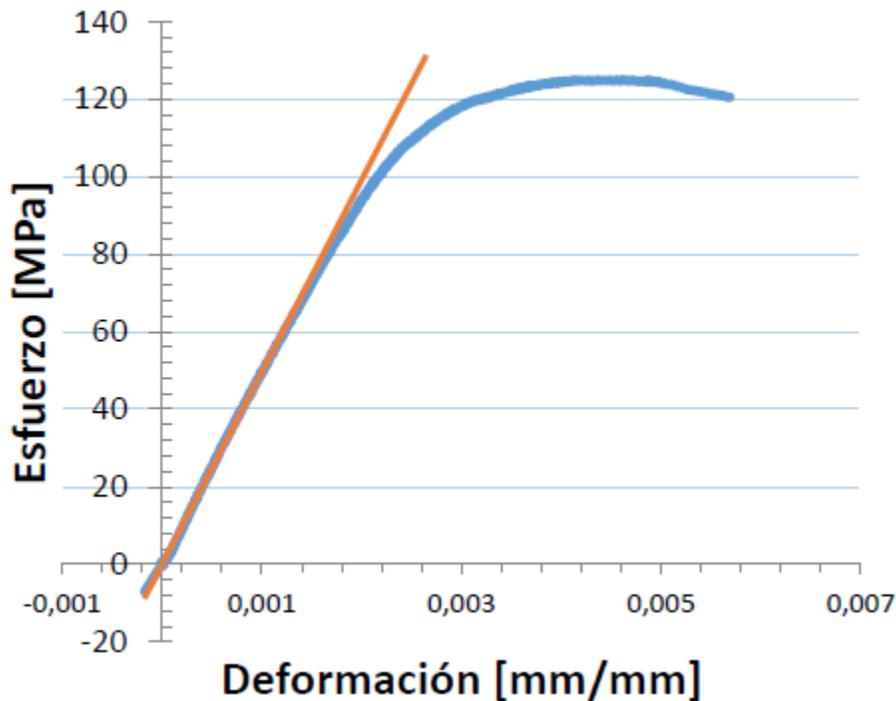


Ilustración 6. Diagrama de esfuerzo Vs deformación en ensayo a compresión [9]

Comportamiento a flexión del (UHPFRC): El ensayo más reconocido y usado para evaluar la flexión del material es el ensayo a tres puntos sobre vigas de 40x40x160 mm [3]. En la ilustración 7 se puede ver los 3 niveles en los que se podría categorizar, rotura frágil, reblandecimiento por deflexión y endurecimiento por deflexión. Cabe resaltar que cada comportamiento depende de la cantidad y tipo de fibras que lleve el concreto, si es escaso o no y si son adecuadas o no. El ultimo nivel es causado por la fisuración, en donde se evidencia un endurecimiento (por deformación a tracción directa) y crecimiento de la resistencia, debido a la multifisuración (comportamiento dúctil del UHPFRC). Se obtienen resistencias de hasta 24MPa [3].

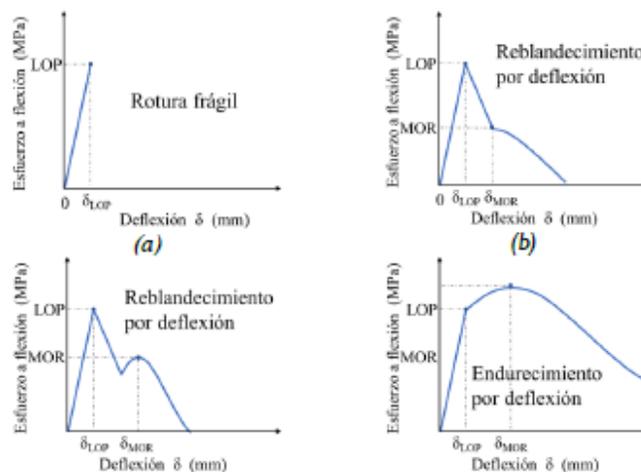


Ilustración 7. Resultados y niveles por ensayo de flexión [3].

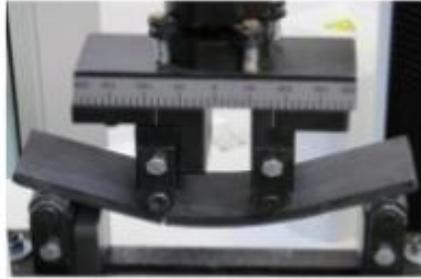


Ilustración 8. Ensayo de Flexión a cuatro puntos sobre lámina por Argos [2].

Flexo-tracción

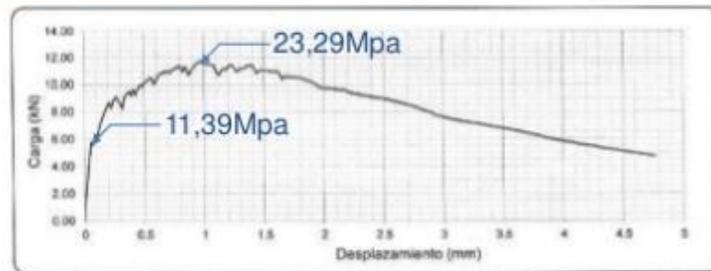


Ilustración 9. Diagrama de Carga Vs Desplazamiento, ensayo realizado por Argos [2].

Comportamiento tixotrópico del (UHPFRC): Para la rehabilitación de pavimentos con sobre-carpetas de este material es fundamental el aspecto tixotrópico como se observa en la ilustración 11, pues, las pendientes de las vías no permitirían a un concreto sin tixotropía mantenerse en su lugar. Esto se logra ajustando los contenidos de agua y superplastificante dentro de unos rangos para poder obtener la mezcla tixotrópica. Para ello se deben tener aspectos en cuenta como los procesos de hidratación del cemento y la viscosidad necesaria para la extracción del aire ocluido en el concreto.



Ilustración 10. Mezcla sin tixotropía [6].

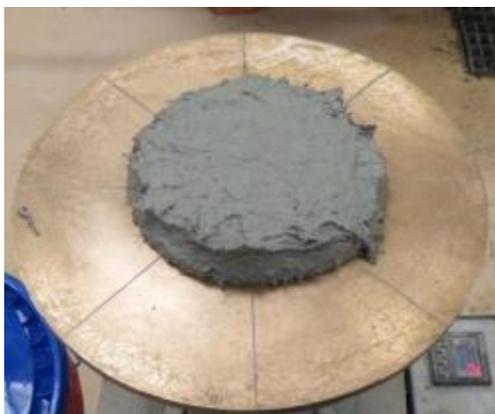


Ilustración 11. Mezcla tixotrópica [6].

Permeabilidad del (UHPFRC): Este concreto es muy poco permeable ya que tiene un alto y proporcionado contenido de cemento, materiales cementantes y finos, obteniendo una mezcla con elevada densidad debido al empaquetamiento de las partículas. A consecuencia de esto el concreto tiene menos porosidad y, por tanto, mayor durabilidad. El contenido del cemento oscila entre 600 y 1000 kilos por metro cubico, con el fin de reducir la cantidad de cemento se añaden materiales cementantes suplementarios (ceniza volante, escoria de alto horno, metacaolín, etc.). El humo de sílice es muy usado para las mezclas de UHPFRC, pues, el tamaño de sus partículas es de 0,15 micras (las partículas del cemento están entre 8 y 20 micras) relleno así los espacios que las partículas de cemento dejan entre sí [10,11]. Se considera que el UHPC/UHPFRC tiene una permeabilidad al agua 30 veces más baja que el límite para concretos de baja permeabilidad y con resistencia a la penetración del ion cloruro seis veces menor que un concreto convencional [1].

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. Este es un factor muy importante para saber su posible comportamiento a cargas del tráfico en los pavimentos [1].

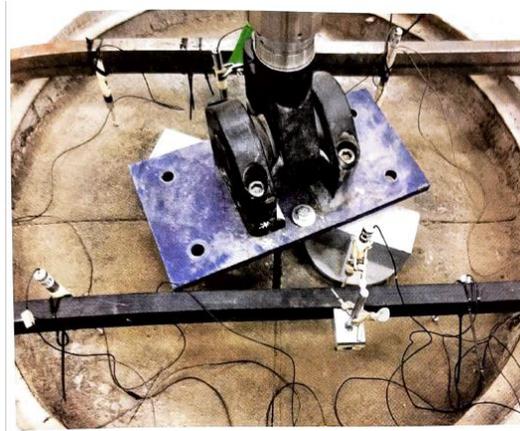


Ilustración 12. Aplicación de ciclos de carga en superficie con actuador dinámico [1].

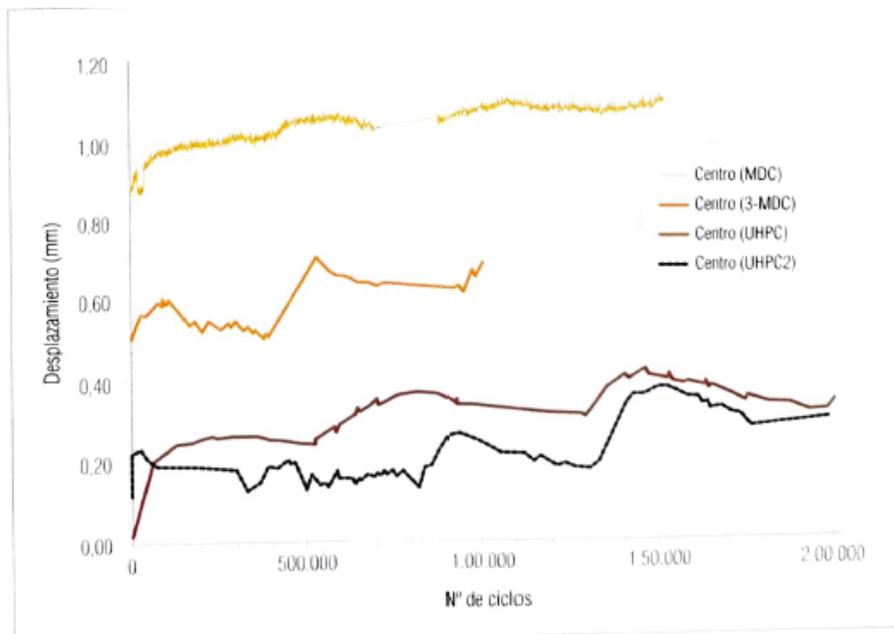


Ilustración 13. Desplazamientos sobre mezcla densa en caliente y posteriormente en sobre-carpeta de UHPFRC 2cm [1]

Como recopilación de los datos y conceptos anteriores se presentan en la siguiente tabla, de manera resumida, algunas propiedades y características del UHPFRC, según la FHWA [12]:

Material Characteristic	Average Result
Density	155 lb/ft ³ (2,480kg/m ³)
Compressive strength (ASTM C39; 28-day strength)	24 ksi (165 MPa)
Modulus of elasticity (ASTM C469; 28-day modulus)	7,000 ksi (48 GPa)
Direct tension cracking strength (uniaxial tension with multiple cracking)	1.2 ksi (8.5 MPa)
Split cylinder cracking strength (ASTM C496)	1.3 ksi (9.0 MPa)
Prism flexural cracking strength (ASTM C1018; 12 in (305-mm) span)	1.3 ksi (9.0 MPa)
Tensile strain capacity before crack localization and fiber debonding	>0.003
Long-term creep coefficient (ASTM C512; 11.2 (77 MPa) load)	0.78
Long-term shrinkage (ASTM C157; initial reading after set)	555 microstrain
Total shrinkage (embedded vibrating wire gage)	790 microstrain
Coefficient of thermal expansion (AASHTO TP60-00)	8.2 x10 ⁻⁶ in/in/°F (14.7 x10 ⁻⁶ mm/mm/°C)
Chloride ion penetrability (ASTM C1202; 28-day test)	360 coulombs
Chloride ion penetrability (AASHTO T259; 0.5-in (12.7-mm) depth)	<0.10 lb/yd ³ (<0.06 kg/m ³)
Scaling resistance (ASTM C672)	No scaling
Abrasion resistance (ASTM C944 2x weight; ground surface)	0.026 oz. (0.73 g) lost
Freeze-thaw resistance (ASTM C666A; 600 cycles)	RDM = 99 percent
Alkali-silica (ASTM C1260; 28-day test)	Innocuous

RDM = Relative dynamic modulus of elasticity; ASTM = American Society of Testing and Materials; AASHTO = American Association of State Highway and Transportation Officials.

Tabla 1. Propiedades típicas del UHPFRC [12].

Aplicaciones del concreto UHPFRC: A continuación, se mostrarán algunas de las aplicaciones del UHPFRC más comunes e importantes.

Aplicaciones estructurales:

- **Puentes peatonales:**



Ilustración 14. Pasarela sobre el barranco de las Ovejas, en Alicante [13]



Ilustración 15. Puente peatonal Seonyu en Corea del Sur [9]



Ilustración 16. Puente peatonal Sherbrooke en Canadá [14]



Ilustración 17. Puente peatonal de la universidad Eafit en Medellín [15]

- **Estructuras:**



Ilustración 18. La Marseillaise Tower en Francia [16].



Ilustración 19. Puente en Sutong China 2008 [13].



Ilustración 20. Peaje en el viaducto de Millau en Francia 2007 [13].



Ilustración 21. Edificio Operturm en Alemania[13].

- **Vías:**



Ilustración 22. Viaducto de Chillón en Suiza [12].



Ilustración 23. Puente de carretera Laporte en Iowa [12]



Ilustración 24. Tramo vial en planta de concreto Argos [1].

Con lo anterior se confirma la importancia actual de este material, así como las diferentes aplicaciones que puede llegar a tener en el campo de la ingeniería civil. Se trata, por lo tanto, de un material versátil y con grandes ventajas respecto a los concretos convencionales.

En la siguiente tabla se recopilan obras colombianas en las que se ha usado el UHPFRC y muestra la cantidad usada con una breve descripción de su uso.

Project	Volume (m ³)	Description
EAFIT Footbridge	140	Precast segments, foundation and abutments cast on site
UNAL Footbridge	16	Precast segments, foundations and encased columns cast on site
Slab reinforcement, Medellin clinic	12	Cast-in-place, post-tensioned
Overlays/pavements	25	Cast-in-place, thickness 2, 3, 4 cm

Tabla 2. Obras en las que se ha usado UHPFRC en Colombia [17].

1.2. Rehabilitación de pavimentos de carreteras:

La rehabilitación de pavimentos de carreteras consiste en restaurar, reparar o rehabilitar superficies de pavimentos ya existentes con el fin de extender su vida útil, evitar problemas viales futuros, mejorar el rendimiento y su durabilidad [18]. Según el Instituto Nacional de Vías [19] el buen servicio de un pavimento es su capacidad para proporcionar a los usuarios comodidad, seguridad y economía.

La rehabilitación de un pavimento es necesaria cuando se cumplen una o más de las siguientes razones: incomodidad para la circulación vehicular, exceso de defectos superficiales, reducción de la adherencia entre la calzada y los neumáticos de los vehículos, necesidad excesiva de servicios de mantenimiento rutinario, costos de operación elevados para los usuarios y capacidad estructural inadecuada para las solicitaciones del tránsito previsto [19].

Sobre-carpetas: Es la capa o conjunto de capas constituidas por materiales pétreos y productos asfálticos que se colocan sobre un pavimento existente deteriorado por el uso. Sus funciones principales son restituir las características adecuadas de servicio que tuvo la carretera cuando fue terminada y aumentar la resistencia estructural del pavimento [20].

Otras soluciones: La rehabilitación o restauración de pavimentos cuenta con varias soluciones o métodos. A continuación, se mencionarán los más usados a nivel nacional e internacional.

1. **Tratamiento superficial Cape Seal:** Consiste en realizar un tratamiento superficial simple y posteriormente un vaciado de lechada asfáltica sobre el tratamiento superficial simple terminado.
2. **Reciclado de pavimento asfáltico In-situ empleando ligantes bituminosos:** Este tratamiento consiste en fresar el pavimento existente y añadirle una mezcla de emulsión con agua para su reciclado in-situ.
3. **Reciclado de pavimento asfáltico en planta y en caliente:** El RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) o pavimento reciclado, es transportado hasta una planta para su proceso de mezcla en caliente. Se identifica el tipo de empleo que este tendrá y de esta manera se procesa.

2. Estado del arte

2.1. Necesidad de rehabilitación de carreteras

Debido al aumento mundial de vehículos comerciales, públicos y privados en el mundo, es de vital importancia mantener una malla vial en buen estado. Conservar el pavimento de carreteras en condiciones adecuadas de servicio es uno de los más grandes retos de los departamentos de transporte del mundo [15]. El estado de las vías en un país es sinónimo de crecimiento económico, pues a medida en que el tiempo de desplazamiento de un lugar a otro disminuye los costos de transporte también se reducen. De acuerdo con esto, el gobierno de Colombia y otros países como EE. UU. están implementando nuevos proyectos en búsqueda de tener vías de alta calidad, generando de manera efectiva operaciones tales como de comercio exterior y así demostrarse como centro de crecimiento y desarrollo.

Colombia por su ubicación estratégica es considerada como la puerta de entrada a Sudamérica, viéndose obligada a ser el país de transición para muchas embarcaciones que se dirigen al oeste y este del país. La capacidad de las vías debe ser suficiente para lograr soportar el tráfico pesado de mercancías varias sin contar con el tráfico ligero de vehículos particulares. Aunque el gobierno colombiano se está esforzando por brindar vías de calidad, es inevitable que estas se desgasten y dejen de soportar el tráfico. Por lo que la rehabilitación de carreteras toma un valor fundamental en cuanto al crecimiento y desarrollo, ya que, al disminuir los costos de reestructurar las vías desde cero y brindar mejores condiciones para los usuarios se reducen los costos de exportaciones y transporte [15].

Según un estudio realizado por la Fundación para la Educación Superior y el Desarrollo (Fedesarrollo), el 71% de la carga transportada al interior del país se moviliza por carreteras, el 28% en vías férreas, el 1% a través de los ríos y menos del 0,5% en avión.[15] Estos indicadores soportan la importancia de la rehabilitación y construcción de carreteras puesto que la mayoría de carga transportada se realiza por carreteras.

2.2. Métodos para la rehabilitación de carreteras

El mejoramiento o rehabilitación de una carretera comprende cuatro alternativas de intervención denominadas como las 4R, Según el Instituto Nacional de Vías (INVIAS, 2008).[13]

- **Restauración:** consiste en la ejecución de trabajos que mejoran la condición superficial del pavimento, pero no aumentan su capacidad estructural.
- **Refuerzo:** consiste en la colocación de capas de pavimento que proporcionan capacidad estructural adicional o mejoran el nivel de servicio a los usuarios.

- **Reciclado:** consiste en la reutilización de parte de las capas de la estructura existente, para mejorar su capacidad estructural. La adición de nuevos materiales es necesaria para mejorar la resistencia y el comportamiento del pavimento mejorado.
- **Reconstrucción:** consiste en la remoción de capas y el reemplazo parcial o total del pavimento, para mejorar su capacidad estructural, adaptándolo a las necesidades del tránsito futuro.

Como se mostró anteriormente, los métodos más comunes para la rehabilitación de pavimentos son:

1. **Lechada Asfáltica:** Es una mezcla de consistencia fluida, compuesta por emulsión asfáltica de rotura lenta, agregado fino bien gradado, llenante mineral, agua y, eventualmente, aditivos, elaborada en una máquina especial que también se encarga de su extensión. Debido a que las lechadas asfálticas no aportan a la estructura del pavimento es necesario aplicarla sobre superficies que aun conserven su valor estructural y portante. Los objetivos de este tratamiento son el de impermeabilizar, rejuvenecer, detener procesos erosivos, sellar grietas superficiales y mejorar la resistencia al deslizamiento. Se considera como un proceso restaurativo.
2. **Tratamiento superficial Cape Seal:** Es un tratamiento muy utilizado a la hora de mejorar las propiedades de un pavimento existente. Consiste en realizar un tratamiento superficial simple y posteriormente un vaciado de lechada asfáltica. Es de bajo costo comparado con la aplicación de una mezcla en caliente. Cabe resaltar que esta solución aporta a la estructura del pavimento, rejuvenece superficies desgastadas por el tráfico, considerado como un proceso restaurativo, aunque no tiene normativa colombiana.
3. **Reciclado de pavimento asfáltico In-situ empleando ligantes bituminosos:** Este tratamiento consiste en fresar el pavimento existente y añadirle una mezcla de emulsión con agua para su reciclado in-situ. Tiene una gran ventaja al rehabilitar estructuralmente al pavimento, sin embargo, depende de muchos factores (clima, tiempo y estado) para su correcta aplicación y funcionamiento, considerado como un proceso de reciclado.
4. **Reciclado de pavimento asfáltico en planta y en caliente:** El RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) o pavimento reciclado, es transportado hasta una planta para su proceso de mezcla en caliente. Se identifica el tipo de empleo que este tendrá y de esta manera se procesa. Puede ser utilizado como agregado o ligante para ser manejado en la restauración del pavimento, considerado como un proceso de reciclado.
5. **Sobre-carpetas:** Consiste en la colocación de capas asfálticas o de concreto sobre el pavimento existente y deteriorado. Siendo el material asfáltico o concreto, estas sobre-carpetas brindarían capacidad estructural al pavimento. Se considera como un proceso de refuerzo o restaurativo.

2.3. Sobre-carpetas Asfálticas

Las sobre-carpetas asfálticas son utilizadas para la rehabilitación y/o reforzamiento, en situaciones donde la superficie asfáltica existente se encuentra muy deteriorada y cuando se espera un aumento del tráfico durante la vida útil de la estructura [21]. Con el fin de evitar el reflejo de fisuras en la superficie existente generalmente se fresa. Con este proceso también permite conservar las pendientes requeridas en la vía.

Las sobre-carpetas asfálticas deben proporcionar una superficie de rodamiento adecuada con textura y color conveniente y debe resistir los efectos abrasivos del tránsito. Debe ser en la medida de lo posible una capa impermeable. Los espesores de las carpetas varían dependiendo el material que se quiere vaciar y el tráfico estimado según el periodo de diseño [19].

2.4. Sobre-carpetas de UHPFRC

El método de sobre-carpetas de UHPFRC es el más innovador en la actualidad para la rehabilitación de pavimentos. Consiste en adecuar el pavimento existente (fresado) para el posterior vaciado del nuevo material, en este caso UHPFRC, recubriendo zonas afectadas o fisuras existentes. La gran diferencia con las sobre-carpetas asfálticas es el espesor necesario para soportar las cargas del tráfico, ya que el UHPFRC al tener mayores resistencias y propiedades requiere de espesores entre 1 y 4 cm, que comparados con las sobre-carpetas asfálticas son mucho menores [1]. La permeabilidad es casi nula por la gran cantidad de finos, cemento y materiales cementantes (empaquetamiento de las partículas) permitiendo al nuevo pavimento ser mucho más durable [3]. Este material responde de manera adecuada frente a la adherencia con el pavimento antiguo. Al tener espesores reducidos es posible agregarle acero sin aumentar el peso de una estructura como un puente (realizando el fresado) y con esto añadir resistencia estructural al pavimento.

3. Objetivos

3.1. Objetivo general

- Evaluar el proceso constructivo de la rehabilitación de pavimentos mediante sobre-carpetas de concretos de ultra altas prestaciones reforzados con fibras (UHPFRC) teniendo en cuenta los costos, equipos, material y la facilidad para realizarse dentro del entorno colombiano y mundial.

3.2. Objetivos específicos:

- Determinar el proceso constructivo para la rehabilitación de una obra vial con sobre-carpetas de UHPFRC.
- Identificar los distintos equipos y herramientas necesarios dentro del proceso constructivo para la rehabilitación de un pavimento con UHPFRC.
- Comparar los costos, la viabilidad y el funcionamiento (resistencia y durabilidad) frente a otros métodos para la rehabilitación de un pavimento.

4. Metodología

La metodología que se llevará a cabo para cumplir los objetivos propuestos en el trabajo se divide en dos aspectos: Recolección de datos sobre casos de sobre-carpetas de UHPFRC en funcionamiento y conclusiones frente a los resultados obtenidos en cada caso analizado.

4.1. Recolección de Datos

Se recolectará información sobre la rehabilitación de pavimentos mediante sobre-carpetas de concretos de ultras altas prestaciones reforzados con fibras a nivel nacional e internacional. Se expondrán las situaciones de los casos tratados con esta metodología de rehabilitación y posteriormente se mostrará la solución a éstos. En cada caso a analizar se tratarán aspectos como la localización del proyecto, quien lo realizo, características del UHPFRC usado, equipos necesarios para la culminación del proyecto y pruebas posteriores si las hubiese.

4.2. Conclusiones y discusión

Se analizarán los casos de aplicación encontrados, evaluando las condiciones de las vías actualmente y comparando los resultados del antes y después de la rehabilitación. Es importante discutir qué tan efectivo es este proceso frente a los demás a nivel económico, ambiental e ingenieril, con el fin de establecer las ventajas y desventajas que este método tiene respecto a los demás en la rehabilitación de pavimentos. Se

identificarán los puntos clave y diferenciadores de todos los casos aplicativos para establecer este método como una alternativa atractiva e innovadora a nivel mundial.

5. Análisis de casos de aplicación de UHPFRC en sobre-carpetas para rehabilitación de pavimentos de carreteras

A continuación, se mostrarán distintos casos de aplicación frente a la rehabilitación de pavimentos con sobre-carpetas de UHPFRC, en donde se explicará la situación del caso y cómo se desarrolló todo el proceso constructivo, así como las consideraciones finales.

5.1. Tramo de prueba en planta de concreto de Argos

5.1.1. Introducción

Este tramo de prueba se ubica en la ciudad de Medellín, Colombia, en una planta de producción de concreto de la compañía Argos. Comprende una sobre-carpeta de UHPFRC con fibras de refuerzo metálicas. Pertenece al proyecto de Argos “Concreto de ultra alto desempeño” en donde se quiere evaluar e identificar la solución a los retos del proceso de diseño [1].

5.1.2. UHPFRC

Las propiedades del UHPFRC manejado en este proyecto son estimadas al no tener una ficha técnica específica en el caso de rehabilitación de pavimentos. Se utilizó el Concreto Avanzado (nombre comercial de la patente de UHPFRC desarrollada por argos) modificado para ser usado como sobre-carpeta. El concreto tiene una tracción directa de 11Mpa, una resistencia a compresión de 150 Mpa, contenido de fibras del 2% y 180 mm de fluidez [1]. Los valores son estimados y se podrían basar en la Tabla 1.

5.1.3. Metodología

En este proyecto se realizó un fresado manual y extracción del pavimento base existente con el fin de vaciar el UHPFRC como sobre-carpeta con espesor igual a 4 cm sin presentar desniveles con los tramos adyacentes. El vaciado fue realizado directamente sobre una capa de nivelación de un concreto pobre. Se vació desde el mixer para su posterior compactación por medio del rodillo vibrador (Ilustración 26), la tixotropía de la mezcla permitió mantenerse de manera adecuada pese a pendientes en la zona [1]. Se mostrará una imagen del proceso:



Ilustración 25. Proceso de aplicación de sobre-carpetas de UHPC en planta de producción de concreto de Argos.[1]



Ilustración 26. Ejemplo de rodillo vibrante para la compactación y colocación de la sobre-carpeta.[15]

Como se puede ver en la Ilustración 25 Se necesitan al menos 4 trabajadores para supervisar, regular y compactar el material vaciado en el lugar. El curado, aunque no fue especificado, se pudo haber hecho con una lona exterior con el fin de proteger el concreto de la intemperie y que permitiera a éste no perder humedad en sus días iniciales del proceso de endurecimiento.

5.1.4. Pruebas a posteriori

En este proyecto Argos no realizo pruebas a posteriori del material. Sin embargo, se muestran imágenes del estado del tramo cierto tiempo después de la colocación de la sobre-carpeta y además una imagen un año después de estar sometida a cargas considerables. Se logran observar buenos resultados frente al acabado superficial y estado de la sobre-carpeta.



Ilustración 27. Textura de la superficie de rodadura del tramo de prueba [1].



Ilustración 28. Tramo de prueba en operación [1].

5.1.5. Conclusiones de la actuación

Los resultados obtenidos por Argos con este tramo de prueba en su planta de producción de concreto fueron satisfactorios, pues, el estado del pavimento al estar sometido a grandes y repetitivas cargas diarias, después de un año en operación como se ve en la Ilustración 28 presenta muy buen comportamiento. Este tramo está localizado justo al frente del área de cargue de los camiones mezcladores y a la zona de maniobra de los camiones graneleros que descargan cemento en la planta, por lo que estuvo y está en constante sometimiento a cargas significativas. Actualmente este tramo continúa siendo monitorizado por Argos.

5.2. Tramo de prueba en zona de pesaje en Medellín

5.2.1. Introducción

Este tramo de prueba se ubica en Antioquia, Colombia, en una planta de prefabricados en Girardota. Comprende dos tramos de sobre-carpetas de UHPFRC con fibras de refuerzo metálicas realizado en diciembre del 2017. Pertenece al proyecto de Argos “Concreto de ultra alto desempeño” en donde se quiere evaluar e identificar la solución a los retos del proceso de diseño [1].

5.2.2. UHPFRC

Las propiedades del UHPFRC usado en este tramo por Argos mantienen los mismos valores del concreto avanzado modificado para uso en vías producido por esta compañía. Los valores acerca de cada especificación se encuentran en el caso aplicativo anterior.

5.2.3. Metodología

Al igual que en el tramo de prueba en la planta de concreto de Argos, se realizó un fresado y extracción del pavimento base existente con el fin de vaciar el UHPFRC como sobre-carpetas a nivel de las carpetas adyacentes. Las carpetas de UHPFRC fueron divididas en dos tramos continuos con una junta central, cada una de 16 metros de longitud y un ancho de 4,8 metros. El tramo de 32 metros fue dividido en dos con el objeto de evaluar dos espesores de 3 y 5 cm de carpeta instalada de UHPFRC.



Ilustración 29. Sobre-carpetas de UHPC en tramos de pesaje de prefabricados en Antioquia. [1]

No se conocen equipos y herramientas utilizadas en este proyecto por Argos, sin embargo, se pudo haber usado el rodillo vibrante en la compactación, fresadora para el fresado y extracción del pavimento existente (Ilustración 30) y lonas de plástico para el curado del concreto (Ilustración 31).



Ilustración 30. Fresadora de pavimentos. [16]



Ilustración 31. Lonas de plástico para el curado del concreto [22].

5.2.4. Pruebas a posteriori

Como se puede ver en la Ilustración 32, se realizó una instrumentación del tramo mediante celdas de presión (d), sensores de deformación tipo H (a), termocuplas a diferente profundidad de la capa de UHPFRC para cada una de las secciones construidas (b). En la siguiente imagen se pueden ver las instrumentaciones aplicadas para evaluar las deformaciones obtenidas por el paso de los vehículos de carga para su pesaje [1].



Ilustración 32. Tramo de prueba con espesores de capa de 3 y 5 cm de UHPC. [1]

5.2.5. Conclusiones de la actuación

Argos concluye que se han obtenido resultados satisfactorios con la implementación de estas sobre-carpetas en la zona de pesaje de la planta de prefabricados, pues, se encuentra en buen estado tras un año de operación, teniendo en cuenta que las cargas a la que se someten las carpetas son grandes y diariamente transitan más de 200 volquetas cargadas. El tramo continúa en monitores, y pese a ser un tramo con altos grados de sometimiento, se ha observado hasta la fecha un buen comportamiento [1].

5.3. Tramo de prueba para el uso público en Medellín

5.3.1. Introducción

Este tramo de prueba se ubica en la ciudad de Medellín, Colombia, en un barrio ubicado en el sector noroccidental de la ciudad entre la carrera 80 y 81. Comprende un tramo de sobre-carpeta de UHPC con fibras de refuerzo. Pertenece al proyecto de Argos “Concreto de ultra alto desempeño” en donde se quiere evaluar e identificar la solución a los retos del proceso de diseño con mayor número y diversidad de usuarios [1].

5.3.2. UHPFRC

Las propiedades del UHPFRC usado en este tramo por Argos mantienen los mismos valores del concreto avanzado modificado para uso en vías producido por esta compañía. Los valores acerca de cada especificación se encuentran en el primer caso aplicativo. Cabe resaltar que debido a la pendiente tan pronunciada es necesario y fundamental la tixotropía.

5.3.3. Metodología

Al igual que en el tramo de prueba en la planta de prefabricados se realizó un fresado y extracción del pavimento base existente con el fin de vaciar el UHPFRC como sobre-carpetas a nivel de las carpetas adyacentes. La sobre-carpeta tiene un espesor de 4 cm y fue vaciada sobre una base compactada en una pendiente de 8% junto a pavimento de concreto convencional como se ve en la Ilustración 33 [1].

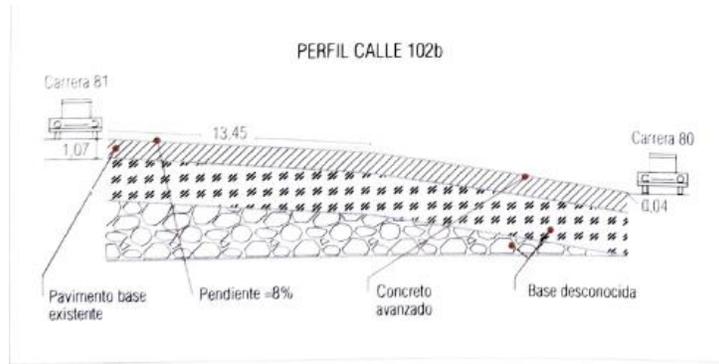


Ilustración 33. Perfil del tramo de sobre-carpeta en UHPC para uso público [1].

No se conocen equipos y herramientas utilizadas en este proyecto por Argos. Sin embargo, se pudo haber usado picas o fresadora para la extracción de la carpeta de rodadura en el pavimento existente (Ilustración 30), el rodillo vibrante para la compactación y colocación y lonas de plástico para el curado del concreto con el fin de mantener una humedad adecuada en su proceso de curado (Ilustración 31).

5.3.4. Pruebas a posteriori

Aunque no se evidencia que Argos haya realizado pruebas a posteriori de la colocación de la sobre-carpeta, en la Ilustración 34 se logra ver el estado superficial de ésta ya terminada y endurecida.



Ilustración 34. Tramo de sobre-carpeta en UHPC para uso público [1].

5.3.5. Conclusiones de la actuación

Para Argos y el campo de investigación colombiano este proyecto muestra la importancia y la viabilidad del UHPFRC al ser instalado en pendientes considerables. Se

obtuvieron resultados satisfactorios hasta el momento. La empresa comunicó su intención de seguir mejorando e investigando a nivel colombiano frente a la tecnología del concreto y sus grandes ventajas y diversidad de aplicaciones [1,2].

5.4. Laporte Road Bridge

5.4.1. Introducción

Este proyecto de rehabilitación en el tablero de un puente se realizó en el puente Laporte Road, sobre el Mud Creek. Es un puente de losas de concreto armado ubicado en Brandon, Iowa (Estados Unidos). Se encuentra a 56,3 km al noroeste de Cedar Rapids. Es un puente que, aunque tiene un tráfico diario promedio bajo (TDA), soporta el tránsito de grandes camiones con cargas agrícolas. Sus dimensiones son 30,5 metros de largo y 8,53 metros de ancho. Este proyecto fue el primero en utilizar la nueva solución de rehabilitación de vías con sobre-carpetas de UHPFRC en Estados Unidos. Se terminó a finales de mayo del 2016, cuando se intervinieron los dos carriles del puente. Fue un gran proyecto auspiciado por Iowa Department of Transportation (el departamento de transporte de Iowa) [12].

5.4.2. UHPFRC

Las propiedades del UHPFRC utilizado en este proyecto serían valores cercanos a los de referencia presentados por la FHWA [12]. Los valores se pueden ver en la Tabla 1.

5.4.3. Metodología

A continuación, se mostrarán algunas imágenes del estado en que se encontraba el tablero del puente:



Ilustración 35. Región afectada en dirección al oeste del puente [12].



Ilustración 36. Zona afectada en dirección al oeste [12].

Como primer paso en la realización de este proyecto se procedió a identificar y rectificar las zonas en donde el concreto estaba en mal estado y de esta manera eliminarlo. Se debe tener en cuenta que por ser una rehabilitación en un puente se debe fresar el concreto presente, pues, al aplicar una sobre-carpeta se aumenta el peso muerto de la estructura y se sobre-esforzaría. Luego, se proporcionó una superficie rugosa con el fin de promover la buena adherencia entre el sustrato de concreto antiguo y el recubrimiento con UHPFRC. Cabe resaltar que la adherencia con el concreto es mecánica y química, pues, el humo de sílice del material de la sobre-carpeta reacciona con la portlandita del concreto existente y de esta manera forman gel CSH (causante de las propiedades del concreto) entre el UHPFRC y la superficie que se tratará [23]. Luego se escarifica la superficie quedando como en la Ilustración 37, luego se removieron los escombros y finos que quedan como residuos de las obras preliminares a el vaciado del UHPFRC [12].



Ilustración 37. Superficie escarificada en el tablero del puente [12].

A la hora de realizar el vaciado y la compactación de la carpeta se usaron dos mixers, mientras una descargaba la otra cargaba. De esta manera el proceso era continuo. El material se descargaba en un *buggy* motorizado hasta la zona de aplicación, como se

muestra en la Ilustración 38. Los trabajadores que utilizaron herramientas manuales se encargaban de colocar y distribuir de manera uniforme el concreto vaciado del *buggy*. A medida que se lograba el espesor ($e=3,8\text{cm}$) deseado se ubicaba en el carril la regla vibrante para la compactación de manera progresiva [12].



Ilustración 38. Equipos utilizados para la colocación de la sobre-carpeta de UHPC [12].

Luego de esto se aplicó un compuesto de curado especial para evitar la deshidratación del UHPFRC. Cuando se terminó el tramo de la sobre-carpeta, se colocó una lona de plástico para cubrir el material de la intemperie y evitar pérdida de humedad en el proceso de curado, como se muestra en la Ilustración 39 [12].



Ilustración 39. Plástico protector del proceso de curado [12].

La superficie fue fresada para darle ese acabado superficial que mejore la adherencia entre el neumático del vehículo y el pavimento. En este acabado el estriado superficial es longitudinal, en lugar de transversal al tráfico rodado, como se muestra en la Ilustración 40 [12].



Ilustración 40. Acabado superficial del tablero del puente [12].

5.4.4. Pruebas a posteriori

Luego de terminar el proyecto de rehabilitación del puente se hablaba de que en algunos tramos había disgregaciones o delaminaciones en cuanto a la superposición del UHPFRC y el sustrato del concreto. Por este motivo fue necesario intervenir y extraer núcleos de las zonas en donde había dudas frente a la adherencia del UHPFRC al concreto existente [12].

La extracción de estos núcleos se efectuó por medio de unos discos que se adherían a el UHPC y se jalaban. Se perforo el perímetro de los cilindros hasta 2,5 cm bajo el sustrato de concreto antiguo, luego se accionó el disco. Este proceso se muestra en la Ilustración 41.

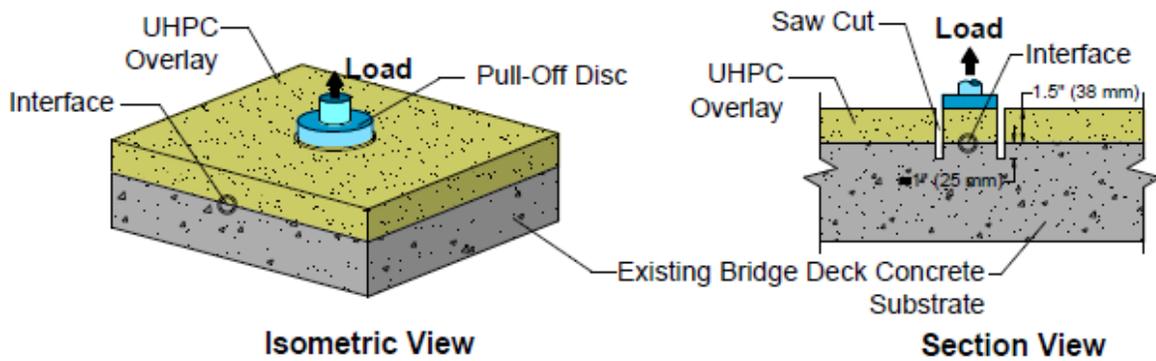


Ilustración 41. Extracción de núcleos para revisión [12].

Los resultados dependen de en donde se fracture el cilindro, considerando que si este se fractura a una distancia adecuada del UHPFRC será un buen resultado. Lo que no se desea es que esta fractura ocurra en el UHPFRC o muy cerca a la superposición del material con el sustrato de concreto. En la siguiente ilustración se observan los tipos de fractura siendo el tipo A lo deseado y el tipo D como problema.



A. Mode 1: Substrate failure.



B. Mode 2: Bond failure at the interface.



C. Mode 3: Failure in the bonded material.



D. Mode 4: Failure in the disc adhesive.

Ilustración 42. Tipos de fractura en la extracción de los núcleos [12].

Los resultados de la extracción de estos núcleos se muestran a continuación:



Ilustración 43. Extracción de los núcleos para su evaluación [12].



Ilustración 44. Vista del espacio ocupado por los cilindros, diferencia entre sustrato de concreto y UHPC [12].



Ilustración 45. Núcleo extraído de la zona G [12].



Ilustración 46. Núcleo extraído de la zona B [12].

Los resultados fueron positivos al encontrar una adherencia adecuada entre el sustrato de concreto y el UHPFRC. Las resistencias a la tensión fueron mucho mayores que las de otros concretos usados como carpetas. Sin embargo, en la zona B se encontró un daño en el sustrato de concreto que podría reflejarse en la sobre-carpeta de UHPC, por lo que se tomaron las medidas del caso para prevenir fisuras en la sobre-carpeta [12].

En la siguiente tabla se recopilan los resultados obtenidos de estas pruebas a posteriori por el constructor:

Location ID	Sample	Test Day	Lane	Potential Delamination	Scarified Surface	Peak Stress, psi (MPa)		Failure Mode	Interface Condition ^c
G1	1	1	West-bound	No	Yes	248.6	(1.71)	4	Bond appeared intact
	2					420.3	(2.90)		
	5					394.5	(2.72)		
	6					270.1	(1.86)		
G2	7	2	East-bound	No	Yes	286.7	(1.98)	4	Bond appeared intact
	8					290.2	(2.00)		
	9					233.9	(1.61)		
	10					182.9	(1.26)		
G3	13	2	East-bound	No	No	474.6	(3.27)	1	Bond appeared intact
	14					344.6	(2.37)		
B1	3	1	West-bound	Yes	Yes	— ^a		1 ^b	Bond appeared intact
	4					114	(0.79)	1	
B7	11	2	East-bound	Yes	Yes	35.7	(0.25)	1	Bond appeared intact
	12					— ^a		1 ^b	

Ilustración 47. Resumen de resultados en las pruebas a posteriori [12].

5.4.5. Conclusiones de la actuación

Por parte de la compañía que realizó el proyecto y las pruebas a posteriori se evaluó el método como exitoso. El UHPFRC y el concreto presentan una buena unión. Las tensiones de tracción máximas fueron significativamente superiores a las de un concreto convencional. Aunque en algunas zonas se tenían dudas de la unión ente el UHPFRC y el concreto antiguo (escarificado o no) se verificó y comprobó que los núcleos se comportaron adecuadamente en la unión y soportaron grandes esfuerzos a tracción. En conclusión, se obtuvieron buenos resultados al rehabilitar una estructura que comunica y permite transportar productos agrícolas apoyando la economía y el desarrollo.

5.5. Viaducto de Chillon

5.5.1. Introducción

El viaducto de Chillon se encuentra en Suiza, sobre el extremo este del lago de Ginebra, al suroeste de Montreux. Está conformado por dos puentes de vigas en cajón de concreto pretensado, que llevan en dirección este y oeste de la autopista suiza A9. Se construyó en la década de 1960 y fue una de las obras mayores de concreto pretensado en mucho tiempo. Originalmente fue diseñado para soportar un volumen de 10.000 vehículos por día, actualmente lo utilizan 50.000 vehículos por día. La compañía WALO de USA participo en la rehabilitación de este viaducto, debido a deficiencias estructurales y reacciones químicas negativas (reacción agregado-álcali) que podrían haber causado una reconstrucción total del viaducto [24].

5.5.2. UHPFRC

En algunos tramos se usaron refuerzos como barras de acero en conjunto con concreto de ultras altas prestaciones sin fibras, en zonas donde no se usó refuerzo de acero el concreto era UHPFRC. Lo anterior con el fin de satisfacer las necesidades del proyecto y cumplir los requerimientos necesarios para solucionar la complejidad del problema con el menor costo posible. Para WALO este material tenía cualidades de refuerzo e impermeabilización, su colocación era rápida y podría abrirse al tráfico lo más rápido posible minimizando costos e interrupciones. Las propiedades de este UHPFRC se pueden evidenciar en la Tabla 1, donde se tienen las propiedades típicas del material según la FHWA [12]. Sin embargo, cabe resaltar que las propiedades en cuanto a flexión, tracción e impermeabilización son mayores en este caso de aplicación debido a las exigencias del problema. Las propiedades del UHPFRC manejadas por WALO se muestran en la siguiente tabla:

Hardened Properties

Compressive:
120 - 150 MPa (17k - 22k psi)

Flexural:
15 - 25 MPa (2200 - 3600 psi)

Modulus of Elasticity:
45 - 50 GPa (6500 - 7300 ksi)

Durability Specifications

Freeze/Thaw (~300 cycles)
100%

Salt-scaling (loss of residue)
< 60 g/m² (< 0.013 lb/ft³) Abrasion (relative volume loss index): 1.7

Cl - permeability (total load)
< 10 C

Tabla 3. Propiedades del UHPFRC trabajado por WALO en las obras de restauración con sobre-carpetas [24].

5.5.3. Metodología

Con el fin de aplicar la sobre-carpeta de UHPFRC para la rehabilitación del viaducto se adecuo una planta en sitio para la fabricación de este, estuvo ubicada en uno de los extremos del viaducto [24].



Ilustración 48. Planta en sitio de UHPFRC en el viaducto de Chillon [24].

Posteriormente se fresó la carpeta de rodadura existente extrayendo el material antiguo como se ve en la Ilustración 49, adelante va una volqueta en la que se descargarán los residuos del fresado [24].



Ilustración 49. Fresado de la capa de rodadura existente en el viaducto de Chillon [24].

Se usaron retroexcavadoras de neumáticos y sobre orugas para retirar parte de la carpeta existente que la fresadora no extrajo, se usaron dos retroexcavadoras sobre neumáticos y una sobre orugas para este proceso. El material resultante fue descargado en volquetas y en buggies de neumáticos para botadero o planta de reciclaje, se ve en la Ilustración 50 [24].



Ilustración 50. Retroexcavadoras sobre neumáticos en el viaducto de Chillon [24].



Ilustración 51. Retroexcavadora sobre orugas en el viaducto de Chillon [24].

Posterior a la extracción de la capa existente en el viaducto se usó una barredora para limpiar y adecuar la superficie en donde sería vertido el UHPFRC, dejando la superficie sin residuo alguno, como se ve en la Ilustración 52.



Ilustración 52. Barredora en el viaducto de Chillon [24].

Se instaló la malla de acero de refuerzo en la superficie, se humedeció y adecuó para el posterior vaciado de UHPFRC.



Ilustración 53. Instalación de la malla de acero de refuerzo. [18]

Para el vaciado y extendido del UHPFRC se usó una repavimentadora de WALO como se muestra en la Ilustración 54. En la imagen se puede ver el *buggy* utilizado para la extracción del material antiguo. Este equipo se utilizó también para transportar el UHPFRC de la planta a la repavimentadora, con el fin de abastecerla continuamente de material [24].



Ilustración 54. Vaciado de UHPFRC con la repavimentadora [24].

La repavimentadora tiene en la parte posterior del vaciado una especie de rastrillo que nivela la superficie para un adecuado extendido del material. Detrás de la repavimentadora se encontraban 4 trabajadores verificando la regularidad en la nivelación de la sobre-carpeta [24].



Ilustración 55. Parte posterior del proceso de vaciado [24].

Detrás de la repavimentadora luego de verificar la nivelación y espesor deseado (4,5cm) se coloca una lona para el proceso del curado, evitando que se pierda humedad y protegiendo el UHPFRC de la intemperie.



Ilustración 56. Lonas de plástico para el curado y protección del material [24].

La superficie se humedece continuamente a partir del día siguiente al vaciado, como se ve en la Ilustración 57.



Ilustración 57. Curado de la sobre-carpeta de UHPFRC [24].

5.5.4. Pruebas a posteriori

La empresa WALO no reportó en su análisis de caso [24] las pruebas a posteriori del proceso. Esto no quiere decir que no se hayan efectuado, pues ya se ha visto en casos anteriores la importancia de realizar las pruebas a posteriori.

5.5.5. Conclusiones de la actuación

La compañía WALO USA al terminar la actuación en el viaducto de Chillón concluyó que este método era viable para rehabilitar estructuras en estados críticos en el menor tiempo posible. El UHPFRC permite impermeabilizar, reforzar y mejorar las condiciones de una estructura de gran envergadura como esta. Este material para WALO es determinante, pues, en la rehabilitación minimiza tiempos (un año de construcción) y costos a tal punto de competir con soluciones convencionales de manera innovadora. Se rehabilitó una longitud de 4,4 km con un ancho de 24 m, el área extendida de UHPFRC fue de 53.000 m² con un espesor de 4,5 cm. WALO estableció que el viaducto soportara un tráfico de 50.000 vehículos por día y cargas entre 24 y 44 toneladas [24].

5.6. Viaducto de Kander

5.6.1. Introducción

El viaducto de Kander se encuentra en el punto más alto de la montaña Lötschberg, Suiza. Fue construido en 1911 y es uno de los puentes más famosos de la región. Es un puente de mampostería de piedra con una longitud de 274 metros. Ha sido utilizado como una importante conexión de pasajeros y mercancías entre el norte y el sur de Europa durante más de cien años.

Al momento de haber inspeccionado el puente se evidenció que el ligante bituminoso que impermeabilizaba la estructura, instalado hacia 60 años aproximadamente, ya no cumplía la función de cubrir la estructura de agentes externos como el agua. A causa de esto último, la estructura se había comenzado a dañar. Con el fin de preservar la estructura y garantizar la integridad de esta la empresa WALO propuso intervenir en este proyecto [24].

5.6.2. UHPFRC

Se definió el uso de concreto de ultras altas prestaciones reforzado con fibras con propiedades estructurales e impermeabilizantes de tal forma que se satisfagan los requerimientos para la solución del problema. Las propiedades del UHPFRC, al igual que en el inciso anterior, pueden ser similares a los datos encontrados en la Tabla 3.

5.6.3. Metodología

Se fresó la carpeta existente, de tal forma que se pudiera extender 3,5 cm de UHPFRC en el viaducto como sobre-carpeta. Luego del fresado y extracción del material antiguo se vació de manera similar al caso aplicativo 4 (Laporte Road Bridge) pues las dimensiones del viaducto no permitían maquinarias de gran tamaño. El material se extendió con ayuda de un *buggy* desde el mixer al punto de vaciado. Posteriormente, se compactó con una regla vibrante y se cubrió con lonas de plástico para su proceso de curado y endurecimiento [24].



Ilustración 58. Viaducto con sobre-carpeta de UHPFRC de Kander [24].

5.6.4. Pruebas a posteriori

Aunque no se presentaron pruebas a posteriori de la actuación por parte de WALO en el viaducto, es importante que se evalúen los resultados y el comportamiento de la estructura en el transcurso del tiempo, con el fin de conocer el comportamiento impermeable y de refuerzo del UHPFRC analizando los resultados comparándolos con el uso de concretos convencionales.

5.6.5. Conclusiones de la actuación

WALO concluye de esta actuación que el UHPFRC puede restaurar y mejorar las carpetas y estructuras de un puente, manteniendo así obras antiguas y de gran valor histórico en la zona. Las propiedades de este material son versátiles y se pueden acomodar a las necesidades de cada situación a tratar. El tiempo de construcción se reduce de manera significativa al usar este método de rehabilitación, en este caso el proyecto se realizó en 4 meses [24].

5.7. Bridge over Floyd River

5.7.1. Introducción

La empresa WALO en el año 2018 participo en la rehabilitación del puente vial principal en Sheldon, Iowa. Este fue un proyecto planificado por el departamento de transporte de Iowa (DOT). WALO realizó este proyecto de restauración con sobre-carpetas de UHPFRC utilizando por primera vez maquinaria especial en los Estados Unidos. El puente tiene una longitud 62,5 metros y ancho de 13,4 metros. Este fue un proyecto de restauración de gran impacto en donde la compañía WALO, por su amplio conocimiento frente a la rehabilitación y restauración de puentes, participo de manera exitosa [24].

5.7.2. UHPFRC

El UHPFRC utilizado en este proyecto se puede asemejar a los utilizados anteriormente por la compañía WALO en Suiza (Viaducto de Chillon y Viaducto de Kander), pues, lo que se buscó en este proyecto (al igual que en los anteriores) fue impermeabilizar la superficie del puente para así evitar futuros costos en mantenimiento y extender la durabilidad del puente por décadas. Las propiedades mínimas del UHPFRC se pueden establecer de acuerdo con los datos típicos de la Tabla 1 y las propiedades obtenidas por WALO en la Tabla 3 [24].

5.7.3. Metodología

Para el proceso de instalación de la sobre-carpetas de UHPFRC en el puente se demolió y retiró el material existente desgastado, mediante el proceso de hidrodemolición. Este

proceso de demolición fue una alternativa muy llamativa puesto que no provoca microfisuraciones ni afecta a la estructura existente. Además, la hidrodemolición es un proceso que se realiza de manera rápida, eficiente y rentable frente a otros equipos (fresadora). En la Ilustración 59 se puede observar como el equipo de hidrodemolición avanza destruyendo la capa de rodadura existente en el puente por medio de un chorro de agua localizado a alta presión. Este método proporciona una alta adherencia del nuevo material al material existente obteniendo resultados superiores. Luego de que se termine este proceso, los residuos deben ser recogidos y extraídos, en este caso con una retroexcavadora cargadora, para preparar el vaciado de la nueva superficie [24].



Ilustración 59. Máquina que efectúa la hidrodemolición por WALO en el puente de Sheldon, Iowa [24].



Ilustración 60. Extracción de los residuos con una retroexcavadora cargadora sobre neumáticos [24].

Se ubico una planta en sitio cerca a el puente para la producción del UHPFRC. El material fue transportado en retroexcavadoras cargadoras hasta la repavimentadora y esta se encargó de vaciarlo sobre la superficie del puente.



Ilustración 61. Planta en sitio para la fabricación del UHPFRC [24].



Ilustración 62. Descarga del UHPFRC a la retroexcavadora cargadora para transportar a la repavimentadora [24].



Ilustración 63. Transporte del material a la repavimentadora [24].



Ilustración 64. Descarga del UHPFRC a la repavimentadora [24].

Mientras que el material era vaciado por la repavimentadora dos personas en la parte posterior iban esparciendo el material sobrante con un rastrillo con el fin de rellenar espacios libres restantes [24].



Ilustración 65. Trabajadores con rastrillos para esparcir el material [24].

Después de vaciar y compactar el material se superpuso una lona plástica para el proceso de curado y endurecimiento.

5.7.4. Pruebas a posteriori

Este proyecto fue realizado en el año 2018 y aún no se conocen pruebas a posteriori realizadas por WALO. Sin embargo, cabe resaltar que, por la experiencia de esta compañía, la construcción y parámetros de diseño fueron acertados y por consecuencia se tuvieron buenos resultados. Al ver la textura superficial se ve una incongruencia, pues, esta fisuración superficial debe ir en sentido perpendicular al flujo vehicular y en este caso va paralelo al flujo como se muestra en la Ilustración 66.



Ilustración 66. Textura superficial del puente de Sheldon, Iowa [24].

5.7.5. Conclusiones de la actuación

Para WALO USA este proyecto significo un reto importante, pues, fue el primero en utilizar maquinaria especial para la aplicación de sobre-carpetas de UHPFRC en Estados Unidos. Sin embargo, los resultados fueron satisfactorios, ya que se logró aumentar la vida útil del puente alrededor de 20 años más, el tiempo de restauración fue de tan solo 2 semanas y no se interrumpió de manera significativa la movilidad de la zona. La sobre-carpeta tuvo un espesor de 4,5 cm y ocupó un área de 838 m² aproximadamente [24].

5.8. Little Heaven

5.8.1. Introducción

Este caso aplicativo fue realizado en Bowers, Delaware (Estados Unidos) en febrero del año 2019. Se trató acerca de la rehabilitación de dos puentes, de 36,6 metros de largo y 12,8 metros de ancho cada uno, los cuales presentaban una superficie muy permeable y que estaba afectando las condiciones de toda la estructura. El proyecto de rehabilitación con sobre-carpetas de UHPFRC estuvo auspiciado por el departamento de transporte de Delaware [25].

5.8.2. UHPFRC

Las propiedades del UHPFRC utilizado en este proyecto no están establecidas. Se mencionaron resistencias a compresión de 100MPa aproximadamente y un contenido de fibras de refuerzo de 3,25%.

5.8.3. Metodología

Para la realización de este proyecto de rehabilitación de los puentes con sobre-carpetas de UHPFRC se empezó por un proceso de hidrodemolición como en el caso del puente sobre el río Floyd. La maquinaria usada fue la misma como se muestra en la Ilustración 59 por WALO, teniendo en cuenta que en algunos tramos se diseñaron sobre-carpetas de 12,7 cm y 4,5 cm, en promedio se tuvo un espesor de 7,6 cm [25].

Luego del proceso de hidrodemolición se realizó la limpieza y extracción del material desgastado. El UHPFRC se vació en tres días; se vació directamente de las retroexcavadoras cargadoras, las cuales lo transportaron desde la panta en sitio hasta la zona de vaciado [25].

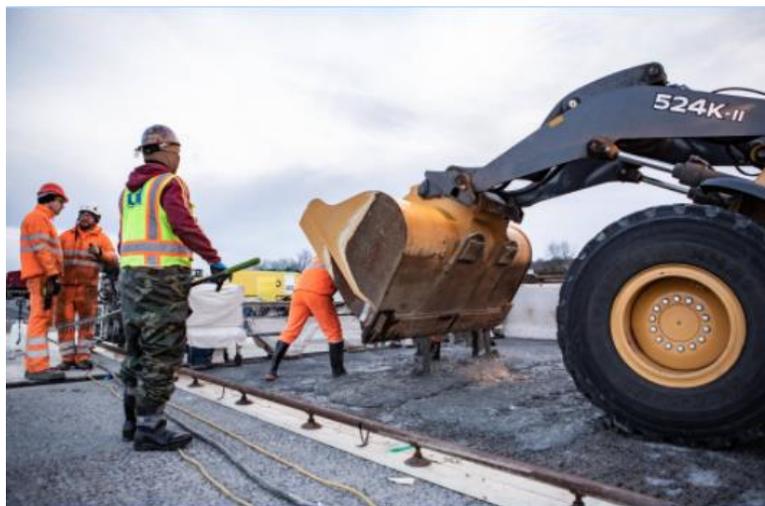


Ilustración 67. Instalación de la sobre-carpetas de UHPFRC en Delaware [25].

El UHPFRC se extendió y esparció con el uso de rastrillos y se compactó con rodillos vibrantes similares a los mostrados en casos anteriores. La forma en que se extendió el UHPFRC fue en tres carriles de 5,4 metros y dos de 3,7 metros. Las juntas se ubicaron entre los carriles del puente.

Para lograr un desarrollo de la resistencia adecuado, en el proceso del curado, se colocó una lona de plástico para evitar la pérdida de humedad y la fisuración por retracción del concreto. Luego de 24 horas se quitaron las lonas y se activó un proceso de calefacción, pues, debido a las bajas temperaturas en ese entonces se vieron en la necesidad de subir la temperatura en los primeros tres días del curado. Se tuvo que aumentar la temperatura para evitar el congelamiento de la capa de UHPFRC y así prevenir la no adherencia con la superficie. Lo anterior se logró mediante aire forzado y sistemas de mangueras hidráulicas encima y debajo del tablero del puente [25].

Finalmente, se realizó el pulido de la superficie con diamante, cumpliendo con requisitos frente a la textura superficial como suavidad y microtextura.

5.8.4. Pruebas a posteriori

No se reportaron pruebas a posteriori por parte del departamento de transporte de Delaware [25].

5.8.5. Conclusiones de la actuación

El departamento de transporte de Delaware reconoció las ventajas de este método frente a los métodos convencionales respecto a el tiempo y costo de la instalación. Este proyecto duró tan solo dos semanas para culminarse.

Por otro lado, es importante considerar que las propiedades del material extienden la vida útil del puente dos décadas más y aporta resistencia estructural a la misma, según estimaciones de [25]. Además, se obtuvieron resultados satisfactorios pese a los inconvenientes con la temperatura de la zona. Cabe resaltar que este factor influiría mucho a las condiciones de aplicación del UHPFRC ya que puede afectar la adherencia de este con la superficie existente [25].

6. Conclusiones

- El análisis de los casos de aplicación de la rehabilitación de pavimentos con sobre-carpetas de UHPFRC muestra que es una metodología forma eficaz y eficiente de rehabilitación de pavimentos. Las propiedades mecánicas y de durabilidad del UHPFRC permiten mantener en funcionamiento la estructura de una vía o puente por tiempos mayores a los estimados desde su construcción. Es decir, la técnica de sobre-carpetas de UHPFRC brinda mayor durabilidad y por ende un aumento de la vida útil de las vías.
- Los tiempos de construcción de las sobre-carpetas de UHPFRC utilizando maquinaria especializada son mínimos, como se pudo ver en los casos realizados por WALO USA. Las obras analizadas duraron semanas, meses y hasta un año, dependiendo de la envergadura del proyecto. Comparando estas obras con la rehabilitación, restauración, refuerzo o reconstrucción efectuadas con métodos convencionales se concluye que existe una disminución y compensación de costos al disminuir el tiempo de uso de la maquinaria y mano de obra.
- Los costos asociados a la tecnología de sobre-carpetas de UHPFRC son similares o menores comparados con la rehabilitación mediante sobre-carpetas ejecutadas con materiales convencionales. Esto es debido no solo a que el tiempo de obra es menor, sino también a las propiedades del material, que evitan futuros costos en mantenimiento y reparaciones y permiten reducir el espesor

de la carpeta. Estas ventajas han permitido el desarrollo de esta técnica en la rehabilitación de vías en grandes países como Suiza y Estados Unidos.

- La calidad de las vías de un país está estrechamente relacionada con el desarrollo de este. Por lo que la importancia de tener vías con niveles de servicio adecuados ha tomado gran valor en los últimos años. Países como Estados Unidos buscan minimizar los tiempos de viajes y disminuir los costos de transporte de mercancías, apoyando la economía y comercio. Colombia como país de conexión en Sur América necesitan construir y rehabilitar todas sus vías para su desarrollo. Por estos motivos, el UHPFRC es un material llamativo e innovador al momento de buscar poseer vías de alta calidad con una vida útil significativa.

7. Recomendaciones

A toda persona que desee realizar un trabajo de investigación relacionado con la rehabilitación de pavimentos con sobre-carpetas de UHPFRC se le realizan las siguientes recomendaciones:

- Es recomendable buscar la información en fuentes confiables, directamente de páginas, tesis o artículos de revista en donde se especifique la veracidad de la información.
- La mayoría de información acerca del UHPFRC se encuentra en páginas de compañías o instituciones americanas, por lo que se recomienda buscar la información en páginas de Estados Unidos (país con más experiencia en sobre-carpetas de UHPFRC).
- Al ser este método innovador y poco conocido la recopilación de datos debe ser concisa y minuciosa, evitando la redundancia de la información y especificando cada proceso, equipos usados y resultados para el entendimiento del lector.

Bibliografía

- [1] Arango-Campo, S., Nuñez-Lopez, A., Alvarado, Y., Vacca, H., Pavimentos ultradelgados con UHPC, *Noticreto*. (2018) 8–13.
- [2] Nuñez-Lopez, A., Concreto de ultra alto desempeño Ultra High Performance Concrete UHPC, in: Argos 360 (Ed.), Argos 360°, Medellín, 2015: pp. 1–29. <https://www.slideshare.net/tabaresargos/concreto-de-ultra-alto-desempeo>.
- [3] 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>.
- [4] Abellán-García, J., Fernández-Gómez, J., Torres-Castellanos, N., Núñez-López, A., Tensile behavior of normal strength steel fiber green UHPFRC, *ACI Mater. J.* (n.d.).
- [5] 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>.
- [6] Abellán-García, J., Ampliación de construcción de carreteras, in: *Construcción de Infraestructuras*, Bogotá D.C, 2020: pp. 4–38.
- [7] ACI Committe 239, ACI – 239 Committee in Ultra-High Performance Concrete, (2018).
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] Haber, Z.B., Munoz, J.F., Graybeal, B.A., Field Testing of an Ultra-High Performance Concrete Overlay, 2017.
- [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] Tagnit-Hamou, A., Soliman, N.A., Omran, A., “Green Ultra - High - Performance Glass Concrete,” *First Int. Interact. Symp. UHPC - 2016*. 3 (2016) 1–10.
- [15] Abellán-García, J., Nuñez-Lopez, A., Arango-Campo, S., PEDESTRIAN BRIGDE OVER LAS VEGAS AVENUE IN MEDELLÍN . FIRST LATIN AMERICAN INFRASTRUCTURE IN, in: *BEFIB 2020*, Valencia (Spain), 2020: pp. 24–32.
- [16] Halfen, Halfen, La Marseillaise Tower. (2015). [https://www.halfen.com/es/3918/referencias/?search\[product-category\]=1](https://www.halfen.com/es/3918/referencias/?search[product-category]=1).
- [17] Nuñez, A., Patiño, J., Arango, S., Echeverri, W., Review on first structural applications of UHPC in Colombia, in: *2nd Int. Interact. Symp. UHPC*, Iowa State University, Iowa, USA, 2019.
- [18] Marchan Moreno, R.M., *Metodos de rehabilitación de pavimentos*, Instituto Politecnico Nacional (Mexico), 2005.
- [19] Intituto Nacional de Vias, *Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos en carreteras*, Segunda, Bogotá D.C, 2008.
- [20] Tencate, *Rehabilitación de pavimentos*, Tencate Geosynth. (2017). <https://www.tencategeo.us/es-la/solutions/pavement-rehabilitation#:~:text=Es la>

reparación y restauración de las estructuras del pavimento.

- [21] Structuralia, 9 maquinarias empleadas en la rehabilitación de firmes de carretera, Blog Struct. Carreteras. (2018). <https://blog.structuralia.com/9-maquinas-empleadas-en-la-rehabilitacion-de-firmes>.
- [22] Argos, La importancia del vibrado en el concreto, Argos 360°. (2018). <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/importancia-del-vibrado-en-el-concreto>.
- [23] Tayeh, B.A., Abu Bakar, B.H., Megat Johari, M.A., Voo, Y.L., "Utilization of ultra-high performance fibre concrete (UHPC) for rehabilitation - A review," Procedia Eng. 54 (2013) 525–538. doi:10.1016/j.proeng.2013.03.048.
- [24] WALO, WALO Case studies, (2018). <https://walo.com/case-studies/>.
- [25] UHPC SOLUTIONS, UHPC Solutions, (2020). <https://www.uhpc-solutions.com/case-studies>.