

ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE ALTERNATIVA EN CONCRETO AVANZADO PARA LA REHABILITACIÓN DE UN PUENTE PEATONAL O VEHICULAR

Elaborado por:

Claudia Janeth Cruz Cruz
Juan Thomas Rodríguez Muñoz
José Luis Rodríguez Mirena

Director:

Jorge Enrique Rodríguez Pinilla

Escuela Colombiana de ingeniería Julio Garavito
Programa de ingeniería civil
Bogotá D.C, Colombia 2022

TABLA DE CONTENIDO

| | | |
|----------|---|----------|
| 1 | INTRODUCCIÓN..... | 7 |
| 2 | OBJETIVOS | 8 |
| 2.1 | <i>OJETIVO GENERAL</i> | 8 |
| 2.2 | <i>OBJETIVOS ESPECÍFICO</i> | 8 |
| 3 | MARCO TEÓRICO..... | 8 |
| 3.1 | <i>MATERIALES</i> | 8 |
| 3.1.1 | <i>CONCRETO DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES (UHPC).....</i> | 8 |
| 3.1.2 | <i>CONCRETO DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES REFORZADO CON FIBRAS (UHPRFC).....</i> | 8 |
| 3.1.3 | <i>FIBRAS UTILIZADAS EN UHPRFC</i> | 9 |
| 3.1.4 | <i>DOSIFICACIÓN MATRIZ CEMENTICIA</i> | 10 |
| 3.2 | <i>PROPIEDADES DEL CONCRETO</i> | 12 |
| 3.2.1 | <i>COMPORTAMIENTO A TRACCIÓN DEL UHPRFC.....</i> | 12 |
| 3.2.2 | <i>RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL UHPRFC.....</i> | 13 |
| 3.2.3 | <i>RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL UHPRFC</i> | 13 |
| 3.2.4 | <i>PERMEABILIDAD DEL UHPRFC.....</i> | 14 |
| 3.2.5 | <i>COMPORTAMIENTO TIXOTRÓPICO DEL UHPRFC.....</i> | 14 |
| 3.2.6 | <i>RESISTENCIA A LA FATIGA DEL UHPC Y EL UHPRFC.</i> | 14 |
| 3.2.7 | <i>PROPIEDADES DEPENDIENTES DEL TIEMPO Y DE LA EDAD TEMPRANA</i> | 15 |
| 3.3 | <i>DISEÑO ESTRUCTURAL DEL ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE</i> | 15 |
| 3.3.1 | <i>PRINCIPIOS DE DISEÑO.....</i> | 15 |
| 3.3.2 | <i>GUÍAS PARA EL DISEÑO.....</i> | 17 |
| 3.3.3 | <i>NECESIDADES DE INVESTIGACIÓN ESTRUCTURAL.....</i> | 18 |
| 3.4 | <i>REFORZAMIENTO DE ESTRUCTURAS UTILIZANDO UHPRFC EN ELEMENTOS DE CONCRETO REFORZADO.....</i> | 18 |
| 3.4.1 | <i>ESTADO LIMITE ULTIMO</i> | 19 |
| 3.4.1.1 | <i>MODOS DE FALLA</i> | 20 |
| 3.4.1.2 | <i>FACTORES DE SEGURIDAD</i> | 21 |
| 3.4.1.3 | <i>MOMENTO DE DISEÑO</i> | 21 |
| 3.4.1.4 | <i>VERIFICACIÓN DE MOMENTO NEGATIVO EN FLEXIÓN.....</i> | 21 |
| 3.4.1.5 | <i>VERIFICACIÓN DE MOMENTO POSITIVO EN FLEXIÓN</i> | 22 |
| 3.5 | <i>CONDICIONES Y CUIDADOS DE APLICACIÓN.....</i> | 23 |
| 3.5.1 | <i>MEZCLADO.....</i> | 23 |
| 3.5.2 | <i>COLOCACIÓN.....</i> | 23 |
| 3.5.3 | <i>CURADO.....</i> | 24 |
| 3.6 | <i>APLICACIONES.....</i> | 24 |
| 3.6.1 | <i>PUENTES VEHICULARES.....</i> | 25 |
| 3.6.2 | <i>PUENTE PEATONAL</i> | 25 |
| 3.6.3 | <i>ACTUALIZACIÓN SÍSMICA.....</i> | 25 |
| 3.6.4 | <i>REHABILITACIÓN DE PAVIMIENTOS.....</i> | 26 |
| 3.6.5 | <i>AMBIENTES AGRESIVOS.....</i> | 26 |
| 3.6.6 | <i>PREFABRICADOS PARA MARQUESINAS Y CASCARONES.</i> | 27 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4 | PATOLOGÍAS | 27 |
| 4.1 | DAÑOS POR DISEÑO | 27 |
| 4.2 | FISURAS | 27 |
| 4.3 | APLASTAMIENTO LOCAL | 29 |
| 4.4 | ASENTAMIENTO..... | 29 |
| 4.5 | VOLCAMIENTO | 30 |
| 4.6 | DAÑOS POR CONSTRUCCIÓN..... | 30 |
| 4.7 | RECUBRIMIENTO INADECUADO (RE) Y EXPOSICIÓN DEL ACERO DE REFUERZO (EXA)..... | 30 |
| 4.8 | CONSTRUCCIÓN INADECUADA DE JUNTAS FRIAS..... | 31 |
| 4.9 | DAÑOS DURANTE EL FUNCIONAMIENTO | 32 |
| 4.10 | EFLORESCENCIA/OXIDO..... | 32 |
| 4.11 | CARBONATACIÓN | 33 |
| 4.12 | CORROSIÓN DE LA ARMADURA..... | 33 |
| 4.13 | SOCAVACIÓN..... | 34 |
| 4.14 | IMPACTO O COLISIÓN DE INFRAESTRUCTURA DE PUENTES..... | 35 |
| 4.15 | ABRASIÓN..... | 35 |
| 5 | MÉTODOS DE INTERVENCIÓN A ESTRUCTURAS PARA REMEDIAR LAS PATOLOGÍAS | 35 |
| 5.1 | TRATAMIENTO PARA PATOLOGÍA DE EFLORESCENCIA | 35 |
| 5.2 | TRATAMIENTO DE PATOLOGÍA DE FISURACIÓN | 35 |
| 5.3 | TRATAMIENTO DE LA PATOLOGÍA DE CORROSIÓN..... | 36 |
| 5.4 | RECUBRIMIENTO INADECUADO Y EXPOSICIÓN DEL ACERO DE REFUERZO | 36 |
| 5.5 | REPOSICIÓN DE SECCIÓN POR DAÑOS DISTINTOS A LA CORROSIÓN..... | 37 |
| 5.6 | TRATAMIENTO DE LA PATOLOGÍA DE ABRASIÓN | 38 |
| 5.7 | MÉTODOS PARA LA REHABILITACIÓN DE CARRETERAS..... | 38 |
| 5.8 | RESTAURACIÓN..... | 38 |
| 5.9 | REFUERZO..... | 39 |
| 5.10 | RECICLADO | 39 |
| 5.11 | RECONSTRUCCIÓN..... | 39 |
| 6 | DETERMINACIÓN PUENTE A ESTUDIAR | 39 |
| 6.1.1 | PUENTES INVIAS..... | 40 |
| 6.1.2 | PUENTES IDU..... | 41 |
| 6.2 | SELECCIÓN DEL PUENTE | 43 |
| 7 | PUENTE LA LIBERTAD | 47 |
| 7.1 | MATERIALES | 48 |
| 8 | PROVEEDORES CONSULTADOS | 48 |
| 9 | APLICACIONES DE CONCRETO UHPC PARA REFORZAR LOSAS DE PUENTES | 48 |
| 9.1 | PUENTE CONMEMORATIVO DE DELAWARE (DMB)..... | 48 |
| 9.2 | BRUCKNER EXPRESSWAY SOBRE ST. ANN´S AVENIU..... | 50 |
| 9.3 | NJ159 WB SOBRE RÍO PASSAIC..... | 52 |
| 9.4 | VIADUCTO CHILLON | 54 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 9.4.1 | REFORZAMIENTO DE LOSAS DE CONCRETO CON UHPFRC | 54 |
| 9.4.2 | RESISTENCIA A LA FLEXIÓN EN ESTADO LIMITE ÚLTIMO | 56 |
| 9.4.3 | RESISTENCIA A CORTANTE EN ESTADO LIMITE ÚLTIMO | 57 |
| 9.4.4 | RESISTENCIA A LA FATIGA | 57 |
| 9.4.5 | VALIDACIÓN EMPLEANDO ANÁLISIS NUMÉRICOS Y ENSAYOS | 57 |
| 9.4.6 | MÉTODO CONSTRUCTIVO | 58 |
| 9.4.7 | RESULTADOS DE PROCESO DE REHABILITACIÓN EN PUENTE CHILLON..... | 59 |
| 10 | REHABILITACIÓN 2015 | 59 |
| 11 | PROPUESTA | 62 |
| 11.1 | MEZCLA DE UHPC | 63 |
| 11.1.1 | EQUIPOS..... | 63 |
| 11.1.1.1 | Equipos de fabricación | 63 |
| 11.1.1.2 | Equipos para ensayo en fresco | 64 |
| 11.1.1.3 | Instrumentación | 64 |
| 11.1.2 | DOSIFICACIÓN DE MEZCLA..... | 64 |
| 11.1.3 | PROCESO DE MEZCLA | 64 |
| 11.1.4 | CARACTERIZACIÓN DEL CONCRETO RESULTANTE | 65 |
| 11.2 | REHABILITACIÓN DE LOSA | 66 |
| 11.3 | JUSTIFICACIÓN ESPESOR CAPA DE RODADURA | 66 |
| 11.4 | PROCESO CONSTRUCTIVO..... | 68 |
| 11.5 | ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS (APUS)..... | 68 |
| 12 | CONCLUSIONES | 73 |
| 13 | REFERENCIAS | 74 |
| 14 | ANEXOS | 76 |
| 14.1 | ANEXO 1. CÁLCULOS DE LA SECCIÓN DE LOSA | 76 |
| 14.1.1 | MOMEMNTO NEGATIVO | 76 |
| 14.1.1.1 | ANÁLISIS..... | 77 |
| 14.1.2 | MOMENTO POSITIVO | 79 |
| 14.1.2.1 | ANÁLISIS..... | 80 |
| 14.1.3 | VERIFICACIONES PUENTE LA LIBERTAD | 81 |

LISTA DE FIGURAS

| | | |
|-----------|--|----|
| FIGURA 1 | EMPAQUETAMIENTO DE PARTÍCULAS DE UN UHPFRC COMPUESTO POR CEMENTO, FILLER, HUMO DE SÍLICE, AGREGADO FINA Y FIBRA. [5] | 11 |
| FIGURA 2 | DIAGRAMA TENSIÓN -DEFORMACIÓN UNITARIA DEL UHPFRC SOMETIDO A TRACCIÓN. [10] | 13 |
| FIGURA 3 | DIFERENTES COMPORTAMIENTOS A FLEXIÓN DEL UHPFRC [4] | 14 |
| FIGURA 4 | EJEMPLO DE RELACIONES CONSTITUTIVAS PARA EL UHPC EN EL ESTADO LIMITE ULTIMO (ULS POR SUS SIGLAS EN INGLÉS) EN: (A) COMPRESIÓN Y (B) ESFUERZO-ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN [14] | 16 |
| FIGURA 5 | RELACIONES CONSTITUTIVAS DE FLEXIÓN EN ESTADO LIMITE ÚLTIMO PARA:(A) UHPC REFORZADO; Y (B) CONCRETO REFORZADO CONVENCIONAL [14] | 17 |
| FIGURA 6. | CONFIGURACIONES DE SECCIONES COMPUESTAS PROPUESTAS POR KATRIN HABEL EN SUS TESIS DE DOCTORADO [15]. | 19 |

| | |
|--|----|
| FIGURA 7. MODOS DE FALLA DE VIGAS COMPUESTAS DE UHPFRC Y CONCRETO REFORZADO PARA A) MOMENTO NEGATIVO, B) MOMENTO POSITIVO..... | 20 |
| FIGURA 8. VERIFICACIÓN SIMPLIFICADA DE MOMENTO NEGATIVO EN FLEXIÓN [15]. | 22 |
| FIGURA 9. SIMPLIFICACIÓN DE LA VERIFICACIÓN DEL MOMENTO POSITIVO EN FLEXIÓN [15]. | 22 |
| FIGURA 10. ANÁLISIS DETALLADO: VERIFICACIÓN A MOMENTO POSITIVO EN FLEXIÓN [15]. | 23 |
| FIGURA 11 SHERBROOKE PEDESTRIAN BRIDGE (PHOTO COURTESY) [14] | 25 |
| FIGURA 12 PATOLOGÍA POR APLASTAMIENTO EN EL PEDESTAL. PUENTE CAÑADA PROFUNDA, NARIÑO. [17]..... | 29 |
| FIGURA 13 PATOLOGÍA ESTRUCTURAL EXPOSICIÓN DE REFUERZO EN EL PUENTE Q. LAS ÁNIMAS. [17]..... | 31 |
| FIGURA 14 JUNTA FRÍA CON VACIADO INADECUADO SOBRE CONCRETOS EXISTENTES [17] | 31 |
| FIGURA 15 EFLORESCENCIA EN EL ESTRIBO DEL PUENTE DEL RÍO MELDAR [17]..... | 32 |
| FIGURA 16 MANCHAS DE ÓXIDO EN SUPERFICIE DE CONCRETO. [17] | 34 |
| FIGURA 17 SUPERFICIE DEL PUENTE LA LIBERTAD [22] | 44 |
| FIGURA 18 ESTRIBO #2 PUENTE LA LIBERTAD. [22] | 44 |
| FIGURA 19 ESTRIBO #1 PUENTE LA LIBERTAD [22]..... | 45 |
| FIGURA 20 LOSA PUENTE LA LIBERTAD. [22]..... | 45 |
| FIGURA 21 VIGAS/LARGUEROS/DIAFRAGMAS PUENTE LA LIBERTAD. [22]..... | 46 |
| FIGURA 22. SECCIÓN LONGITUDINAL DEL PUENTE LA LIBERTAD. | 47 |
| FIGURA 23. SECCIÓN TRANSVERSAL DEL PUENTE LA LIBERTAD. | 47 |
| FIGURA 33 PAVIMENTADORA DE UHPC THIN LIFT USADA EN EL DMB. [24] | 49 |
| FIGURA 34 SUPERFICIE DE CAPA DE RODADURA DMB. [24]..... | 50 |
| FIGURA 35 EXPOSICIÓN DE ACERO EN BRUCKE EXPRESSWAY SOBRE ST. ANN'S AVENUE. [24] | 51 |
| FIGURA 36 REGLA VIBRADORA UTILIZADA EN BRUCKE EXPRESSWAY SOBRE ST. ANN'S AVENUE. [24]..... | 52 |
| FIGURA 37 PUENTE NJ 159 WB SOBRE RÍO PASSAIC. | 53 |
| FIGURA 38 CAPA DE RODADURA DEL PUENTE NJ159 WB SOBRE EL RÍO PASSAIC | 53 |
| FIGURA . SECCIONES DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES COMPUESTAS, COMO RESULTADO DE PROCESOS DE REHABILITACIÓN CON UHPFRC. | 55 |
| FIGURA . COMPORTAMIENTO A TENSIÓN DEL UHPFRC [23]. | 55 |
| FIGURA . CORTE TRANSVERSAL DEL VIADUCTOS CHILLON, SISTEMA DE LOSA [23]. | 56 |
| FIGURA . ANÁLISIS DE SECCIÓN PLANA. A) RESISTENCIA A FLEXIÓN A MOMENTO NEGATIVO, B) EFECTOS DE ACCIÓN DE FATIGA. [23]. | 56 |
| FIGURA . MÁQUINA EMPLEADA EN LA COLOCACIÓN DEL UHPFRC [23]. | 58 |
| FIGURA 27 PROCESO DE REHABILITACIÓN PUENTE LA LIBERTAD 1. FUENTE: GOOGLE MAPS | 61 |
| FIGURA 28 PROCESO DE REHABILITACIÓN PUENTE LA LIBERTAD 2. FUENTE: GOOGLE MAPS | 62 |
| FIGURA 29 PROCESO DE REHABILITACIÓN PUENTE LA LIBERTAD 3. FUENTE: GOOGLE MAPS | 62 |
| FIGURA 30 PROCESO DE REHABILITACIÓN PUENTE LA LIBERTAD 4. FUENTE: GOOGLE MAPS | 62 |
| FIGURA 31. CURVA ESFUERZO VS DEFORMACIÓN DE LA MEZCLA DE UHPC PROPUESTA EN LA REHABILITACIÓN DEL PUENTE LA LIBERTAD. | 65 |
| FIGURA 32. ESFUERZO CORTANTE VS DESPLAZAMIENTO DEL UHPC PROPUESTA PARA LA REHABILITACIÓN DEL PUENTE LA LIBERTAD [8]. | 66 |
| FIGURA 39. DEFORMACIÓN MÁXIMA DEL UHPFRC. | 81 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| TABLA 1 GUÍA PARA ANCHO ADMISIBLE DE FISURAS EN ESTRUCTURAS DE CONCRETO REFORZADO BAJO CARGAS DE SERVICIO. [17] | 28 |
| TABLA 2 LISTA DE POSIBLES PUENTES DE INVIAS A CONSIDERAR | 40 |
| TABLA 3. LISTA DE POSIBLES PUENTES A PARTIR DE INFORMACIÓN RECOPIADA EN EL SIPUCOL..... | 41 |
| TABLA 4 LISTA DE POSIBLES PUENTES DEL IDU A EVALUAR..... | 43 |
| TABLA 5. MEZCLA DE UHPC PROPUESTA PARA LA REHABILITACIÓN DEL PUENTE LA LIBERTAD. ADAPTADA DE [8]..... | 64 |
| TABLA 6 COMPARACIÓN PROYECTOS DE REHABILITACIÓN CON CAPA DE RODADURA EN UHPC | 67 |
| TABLA 7 APU FUNDIDO DE CAPA DE RODADURA EN UHPC. FUENTE: AUTORIDAD PROPIA .. | 71 |
| TABLA 8. MOMENTOS DE DISEÑO. FUENTE: DIAGNOSTICO ESTRUCTURAL, JG CONSULTORIA Y PROYECTOS SAS..... | 82 |
| TABLA 9. COMPARACIÓN DEL REFUERZO EN LA CAPA DE UHPFRC. FUENTE: PROPIA..... | 82 |
| TABLA 10. VERIFICACIÓN A MOMENTO POSITIVO. FUENTE: PROPIA..... | 83 |

1 INTRODUCCIÓN

Con el paso de los años los retos en la ingeniería han venido transformándose, día a día se buscan materiales con avanzadas características mecánicas que permitan construir lo que años atrás se hubiese considerado imposible, llegando a innovar y con ello a inventar nuevos materiales o modificar los existentes con el fin de lograr un mejor desempeño ante las sollicitaciones de carga y esfuerzos a los que se ven sometidos durante su vida útil. Un ejemplo de lo anterior es el concreto, un material que se ha venido reinventando para garantizar un buen desempeño ante condiciones específicas como son: ambientes agresivos, temperaturas altas, limitaciones constructivas, entre otros escenarios que han impulsado la investigación y desarrollo de tecnologías como los concretos de Ultra alta prestaciones (UHPC) y ultra altas prestaciones reforzados con fibras (UHPRFC), materiales que gracias a una cuidadosa dosificación y modificación en sus componentes han permitido lograr características mecánicas muy superiores en comparación con un concreto convencional tales como: mayor resistencia a esfuerzos de compresión, flexión y tracción, incremento de la rigidez, un comportamiento dúctil y notoria mejora en durabilidad.

El desarrollo de estas nuevas tecnologías representa un avance en la ingeniería y aumenta las posibilidades en la selección de alternativas permitiendo escoger la que mejor se adapte según sea las condiciones técnicas, económicas, ambientales, entre otras. Particularmente, los UHPC y UHPRFC han recibido distintos usos que van desde la construcción de nuevas obras, hasta la reparación o mantenimiento de estructuras existentes. Específicamente, a lo largo del presente escrito se busca plantear una alternativa de rehabilitación para del puente La Libertad, el cuál fue reconstruido en el año 2005 y en el último informe de inspección principal realizada por el Sistema de Administración de Puentes de Colombia (SIPUCOL) presentó una serie de patologías que dieron lugar a unas actividades de obra para la rehabilitación del puente en el 2015, con el propósito de prolongar la vida útil de este.

Es importante recordar que los puentes son obras de infraestructura que tienen un alto impacto económico y social, pues permiten salvar depresiones y obstáculos facilitando la movilización de personas y mercancías, reduciendo tiempos, costos y aumentando el potencial económico de una población. Adicionalmente, es importante hacer énfasis en realización de actividades de mantenimiento a este tipo de estructuras, así como la planeación y ejecución de obras de rehabilitación que permitan reparar patologías para llevar la estructura a condiciones de durabilidad, resistencia y funcionamiento similares o superiores a las iniciales, con lo que se busca alargar la vida útil, teniendo un impacto favorable a nivel económico y ambiental.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar una alternativa usando concretos avanzados para la rehabilitación de un puente.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICO

- a) Identificar las patologías que se deben presentar para justificar la intervención de un puente con concretos avanzados.
- b) Definir el puente objeto de análisis.
- c) Estimar los costos de producción, instalación, mano de obra y procesos constructivos necesarios para la rehabilitación usando concretos avanzados.
- d) Desarrollar la alternativa de rehabilitación con base en la información recopilada.

3 MARCO TEÓRICO

3.1 MATERIALES

3.1.1 CONCRETO DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES (UHPC)

Es un concreto de elevadas prestaciones que se ha convertido en un material preferido en la construcción y rehabilitación de infraestructura, ya que, con una cuidadosa selección de sus componentes permite lograr una matriz cementante ultradensa que mejora sus propiedades mecánicas y de durabilidad (Abellan-garcia, 2021). Una mezcla clásica de este concreto utiliza relaciones agua/binder (binder corresponde a la suma de cemento y adiciones puzolánicas como el humo de sílice, meta caolín, entre otros) que van desde 0.15 hasta 0.25, contiene un alto contenido de cemento Portland, materiales cementicos suplementarios, agregado fino, agua y aditivos reductores de agua de alto rango (Jaramillo-murcia, 2020).

Dentro de las mejoras en sus propiedades se destaca mayor resistencia a la compresión alcanzando los 150 y 250 MPa, resistencia a la tracción directa con valores de 6 a 12 MPa y módulos de elasticidad entre 40 a 50 GPa, características superiores en comparación con un concreto convencional que alcanza entre 20-40 MPa, 1-3 MPa y 25-30 GPa, respectivamente (Abellan-garcia, 2021).

3.1.2 CONCRETO DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES REFORZADO CON FIBRAS (UHPFRC)

Es un tipo de concreto cuidadosamente dosificado con el fin de tener una matriz con la máxima densidad optimizando sus componentes para lograr propiedades mecánicas y de durabilidad muy superiores comparadas con un concreto convencional. Dentro de sus atributos está su baja porosidad capilar (inferior a 1.5%), elevada capacidad para resistir esfuerzos a compresión, que según el ACI239R-18 y algunos investigadores debe ser mayor a 150 MPa y desarrollar un comportamiento dúctil (Abellán-garcía, 2021) (García, 2020) (Abellán, Torres, Núñez, & Fernández, 2018) (Sousa, Buttignol, & Bittencourt, 2017).

Los factores que permiten lograr un concreto con las características anteriormente descritas son: rigurosos procesos de producción, densidad de empaquetamiento de las partículas y selección de sus componentes (Abellan, 2018). Dentro de los materiales empleados en su fabricación se encuentra el uso de fibras metálicas, alto contenido de Cemento Portland (mayor a 600 kg), materiales cementicios como ceniza volante, harina de cuarzo, humo de sílice, entre otros, además, contiene agregado fino con tamaños inferiores a 6 mm como por ejemplo arena fina silíceas y para reducir la relación agua/cemento (menor a 0.2) se emplean superplastificantes reductores de agua de alto rango (Abellán-garcía, 2021) (García, 2020) (Sousa, Buttignol, & Bittencourt, 2017). Cada uno de los ingredientes tienen diferentes efectos dentro de la mezcla; por un lado, las fibras metálicas son las encargadas de aumentar la resistencia del concreto en tracción y flexión permitiendo alcanzar altas deformaciones, garantizando así un comportamiento dúctil al presentarse el fenómeno conocido como endurecimiento por deformación. Por su parte, la harina de cuarzo o polvo de cuarzo junto con los finos se adicionan para aumentar el empaquetamiento de las partículas gracias al efecto de reducir las conexiones de los poros, con lo que se consigue mejorar sus propiedades de durabilidad. Por otro lado, el humo de sílice actúa otorgando alta resistencia mecánica y química debido a que reacciona con el hidróxido de calcio generando mayor cantidad de gel de silicato de calcio (Reyes Suárez & Camargo Jimenez, 2016). En cuanto a los superplastificantes se incorporan para mantener la fluidez requerida de la mezcla y así favorecer la manejabilidad (Jaramillo-murcia, 2020) (García, 2020) (Abellán, Torres, Núñez, & Fernández, 2018).

El UHPFRC alcanza resistencias a la compresión que se encuentran entre 150-220 MPa, resistencia a la tracción superior a 7-8 MPa (depende de la cantidad, tipo y orientación de las fibras), relaciones agua/binder típicas entre 0.16 y 0.10. Al comparar esta tecnología con el UHPC se evidencia que poseen características similares, en donde es importante aclarar que el UHPFRC partió del UHPC al cual se le incorporó la extensa experiencia en el uso de fibras (Abellán, Torres, Núñez, & Fernández, 2018).

Esta nueva tecnología en concretos ha sido empleada en aplicaciones tales como: rehabilitación de estructuras que presenten patologías estructurales en donde se usa como material de refuerzo, también son usadas en puentes que son construidos con un sistema acelerado o metodología conocida como ABC (según sus cifras en inglés), se ha encontrado aplicación en dovelas para revestimiento de túneles, mobiliaria urbano y fachadas en donde prima el componente estético (Abellán-garcía, 2021) (García, 2020).

3.1.3 FIBRAS UTILIZADAS EN UHPFRC

Las fibras hacen parte de los componentes del Concreto de Ultra altas Prestaciones Reforzados con fibras con el fin de mejorar su comportamiento frente a tracciones, flexión y garantizar una falla dúctil (Abellán, Torres, Núñez, & Fernández, 2018).

Durante el desarrollo de la tecnología del UHPFRC se ha utilizado una amplia gama de fibras metálicas dentro de las cuales se tienen: fibras de acero con extremo acabado en gancho, fibras de acero rectas, fibras de acero retorcidas, fibras de PVA, fibras de polietileno, fibras de polipropileno, entre otras, en la Ilustración 1 se muestra algunos de los tipos de fibras

empleados en la fabricación de concretos UHPFRC. Por lo anterior dada la variedad de fibras que se tienen para añadirse a las mezclas, se ha realizado investigaciones que han arrojado que las fibras adicionadas preferiblemente deben ser combinadas, es decir que no haya solo un tipo de fibras, ya que, esto tiene un efecto positivo en la absorción de energía; un ejemplo de ello es el efecto que se logra al agregar micro y macro fibras, una unión híbrida que garantiza se controlen las primeras micro fisuras presentadas y se desarrolle un comportamiento dúctil ante altas deformaciones, en la que cada tipo de fibra se encarga de una función, respectivamente, además esta mezcla ha mostrado mejoras en el módulo de rotura, deflexión y tenacidad (Abellán-garcía, 2021) (García, 2020).

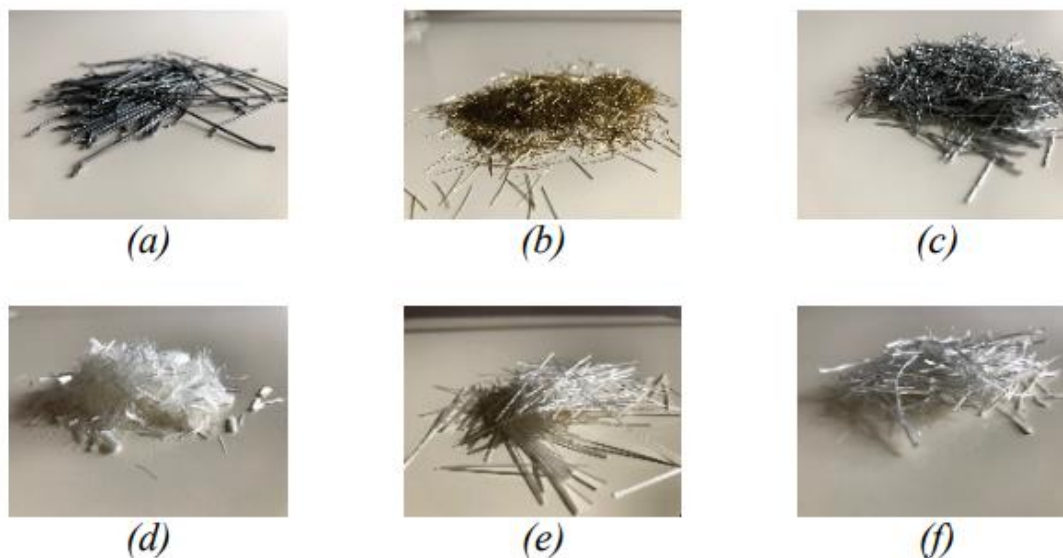


Ilustración 1. Algunos de los diferentes tipos de fibras para UHPFRC: a) metálica acabada en ganchos(hook-end); b) metálica lisa, c) metálica retorcida (twisted), d) monofilamento de polivinilo de alcohol; e) fibra de polipropileno; f) fibra de polietileno. (García, 2020)

Por otra parte, las fibras se diferencian por sus propiedades resultando indispensable caracterizarlas de acuerdo con su geometría (tamaño, forma), el material a partir del cual se fabrican y la resistencia a tracción que desarrollan, ya que, cada tipología, cantidad y orientación tiene un aporte en el desempeño de UHPFRC, específicamente en el incremento de la resistencia a tracción; siendo necesario recurrir a la experimentación para definir las características mecánicas y de ductilidad que resultan en la mezcla a partir de la dosificación utilizada (Abellán-garcía, 2021) (García, 2020) (Abellán, Torres, Núñez , & Fernández, 2018). Adicionalmente, es importante mencionar que la capacidad de “cosido” que tienen las fibras está en función del factor de fibra ($V_f \cdot l_f / d_f$), siendo este aspecto fundamental para definir la tensión máxima que resiste el UHPFRC una vez se presenten fisuras (Abellán, Torres, Núñez , & Fernández, 2018).

3.1.4 DOSIFICACIÓN MATRIZ CEMENTICIA

El logro de concretos de Ultra altas prestaciones (UHPC) y Ultra Altas Prestaciones Reforzados con Fibras (UHPFRC) se debe principalmente a la posibilidad de proporcionar un elevado empaquetamiento de partículas a partir de la cuidadosa selección y dosificación

de sus componentes empleados en el proceso de mezcla; para lo cual se hace necesario especificar la gradación de los materiales contando con tamaños micro y nano-partículas, además, se requiere sustituir el agregado grueso para aumentar la adherencia de los materiales, todo estas consideraciones se traducen en una matriz cementicia más densa, menos porosa y con microestructura mejorada (Jaramillo-murcia, 2020) . En la Figura 1 se muestra el empaquetamiento que se logra en una matriz de UHPFRC compuesta por cemento, humo de sílice, filler, agregado fino y fibra en donde se evidencia como los diferentes tamaños permiten conectar los poros reduciendo el espaciamiento existente entre partículas (Abellán, Torres, Núñez , & Fernández, 2018).

Lo anterior permite apreciar la importancia del diseño de mezcla de este tipo de concretos avanzados, es por esto que se han desarrollado varios modelos para definir las dosificaciones de la matriz cementicia del UHPC. Un primer modelo corresponde al LPDM (por sus siglas en inglés) o típicamente conocido como el modelo de densidad de empaquetamiento lineal desarrollado en 1994 por Francois de Larrard y Thierry Sedran, no obstante, debido a su naturaleza lineal no se enfocó en las proporciones de los materiales y la densidad de empaquetamiento, por tal motivo fue mejorado considerando la teoría de densidad virtual introduciendo en el mismo año y por los mismos investigadores el modelo SSM (por sus siglas en inglés) o conocido como el modelo de suspensión sólida. Más tarde hacia el año 2002 Larrard y Sedran desarrollaron el modelo CPM (por sus siglas en inglés) o también conocido como el modelo de empaquetamiento compresible, el cual se basó en los conceptos de índice y densidad de empaquetamiento virtual. A pesar de los esfuerzos de los estudiadores anteriores y de muchos otros investigadores, los diseños de mezclas propuestas no han arrojado buenos resultados para predecir la consistencia del concreto en estado fresco ni la resistencia en estado endurecido, lo que ha aumentado el número de ensayos realizados y aun así, no se presentan conclusiones acerca de una dosis óptima para la matriz cementicia del UHPC que asegure alta fluidez y altas resistencias a la compresión (Abellán, Torres, Núñez , & Fernández, 2018).

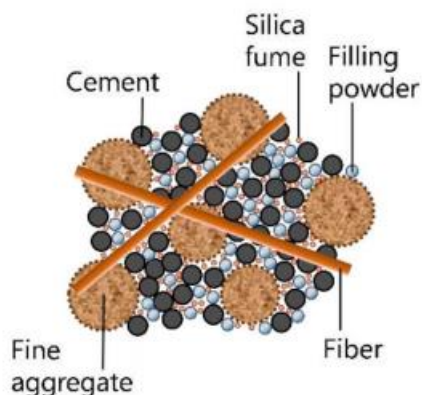


Figura 1 Empaquetamiento de partículas de un UHPFRC compuesto por cemento, filler, humo de sílice, agregado fina y fibra. (Abellán, Torres, Núñez , & Fernández, 2018)

Dadas las limitaciones y falta de resultados favorables, se han realizado diseños de mezcla de UHPC con modelos estadísticos. Investigadores como Ehsan Ghafari, Hugo Costa, Eduardo Nuno y Brito Santos en el año 2014 emplearon la metodología de superficie de respuesta o RSM (por sus siglas en inglés) para predecir la mayor resistencia a la flexión de los UHPC reforzados con fibras de acero (Abellán, Torres, Núñez , & Fernández, 2018).

Más tarde en el año 2015, Ehsan Ghafari, Hugo Costa y Eduardo Julio realizaron un estudio en el que desarrollaron un diseño estadístico de mezcla o SMD (por sus siglas en inglés) para optimizar la dosificación del UHPC, buscando predecir la máxima resistencia a compresión al minimizar el contenido de cemento empleado; además, con este mismo modelo estudiaron el efecto que tiene cada uno de los componentes individuales y la interacción de estos en la mezcla. Estos mismos investigadores desarrollaron el modelo de redes neurales artificiales o ANN (por sus siglas en inglés) el cual buscaba estimar el rendimiento del UHPC al someterse a diferentes condiciones de curado, finalizado este estudio encontraron que para predecir determinadas propiedades en las mezclas de UHPC era adecuado emplear el modelo de regresión polinomial. Finalmente, estos autores establecieron que el modelo ANN presenta resultados más eficientes para optimizar y caracterizar las mezclas de UHPC en comparación con el modelo SMD (Abellán, Torres, Núñez , & Fernández, 2018).

3.2 PROPIEDADES DEL CONCRETO

3.2.1 COMPORTAMIENTO A TRACCIÓN DEL UHPFRC

El concreto convencional posee una baja resistencia a la tracción, por lo que esta no se tiene en cuenta en los diseños estructurales normados, pero en el concreto UHPFRC, el comportamiento está determinado por el volumen, orientación y tipo de fibras, dando a lugar altas resistencias a la tracción posterior a la fisuración (superiores a 7 MPa). En la figura se muestra el comportamiento del UHPFRC sometido a tracción directa donde claramente se diferencian 3 zonas: una elástica que está regida por un comportamiento lineal y en la cual no se presentan fisuras, una de endurecimiento que se presenta debido a la actuación de las fibras al intentar sellar las fisuras antes de ser formadas y una de ablandamiento tras la rotura que se presenta debido al arrancamiento de la fibra en la fisura crítica. (Guzmán J. J., 2020).

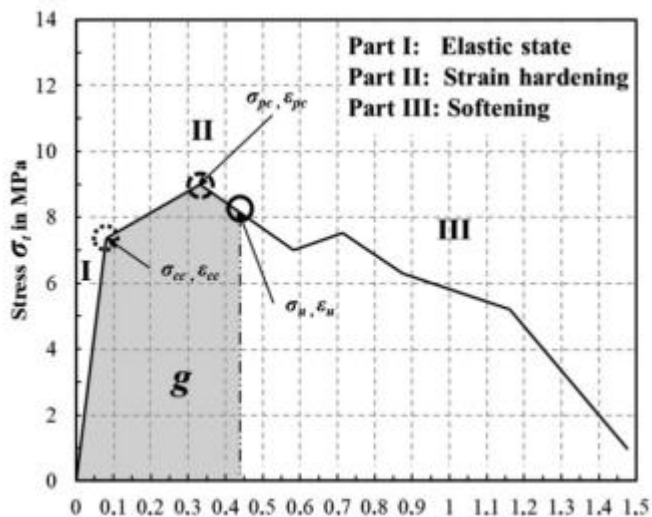


Figura 2 Diagrama tensión -deformación unitaria del UHPFRC sometido a tracción. (Abellán García & Guzmán Guzmán, 2021)

3.2.2 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL UHPFRC

La resistencia a la compresión es la característica mecánica principal del concreto. Los diseños de mezcla de concreto deben contemplar que los resultados de pruebas de resistencia a compresión cumplan con los requisitos de la resistencia $f'c$. El UHPFRC permite obtener resistencias de 150 a 250 MPa. La determinación de esta resistencia se realiza por medio de ensayos a probetas cilíndricas, cúbicas o primas. (Guzmán J. S., 2020).

3.2.3 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN DEL UHPFRC

El comportamiento a flexión de este concreto podría categorizarse en los niveles de rotura frágil, reblandecimiento por deflexión y endurecimiento por deflexión. En la figura 2a se observa el comportamiento a flexión de los concretos que no están reforzados con fibras, en la Figura 3b y Figura 3c se representa el comportamiento de reblandecimiento por deformación generado por cierta participación de las fibras. Finalmente, en la Figura 1Figura 3d se observa el endurecimiento por deflexión donde cumple la relación de Módulo de rotura $>$ límite de proporcionalidad, debido a la manifestación de nuevas fibras, a este fenómeno se le conoce como multifisuración. (García, 2020)

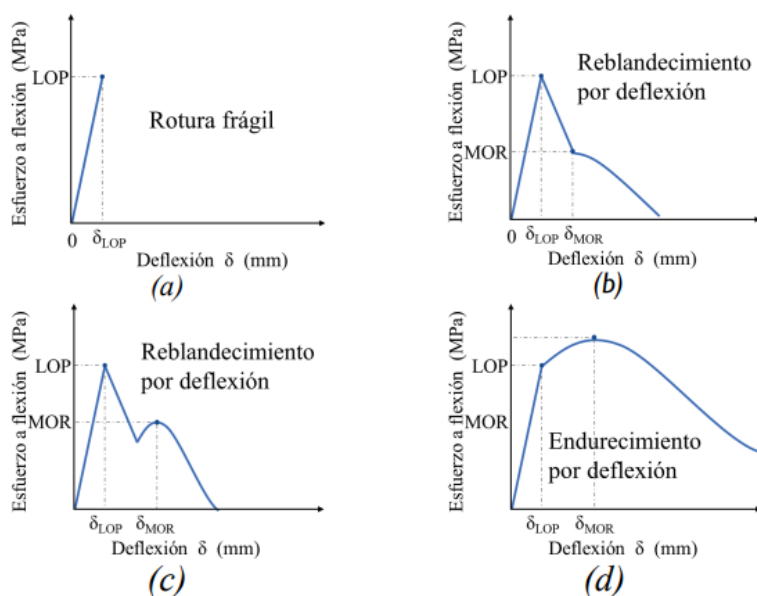


Figura 3 Diferentes comportamientos a flexión del UHPFRC (García, 2020)

3.2.4 PERMEABILIDAD DEL UHPFRC

El UHPFRC es un concreto que no requiere agregado grueso, por lo que depende de materiales alternos como humo de sílice, polvo de vidrio, harina de cuarzo y otros que permitan obtener una baja permeabilidad (Abellán García & Guzmán Guzmán, 2021). La baja permeabilidad de este concreto permite un uso importante en estructuras expuestas al agua.

3.2.5 COMPORTAMIENTO TIXOTRÓPICO DEL UHPFRC

La tixotropía permite al concreto mantenerse relativamente estático cuando es utilizado en la rehabilitación de pavimentos, sin esta propiedad este se desplazaría según la pendiente del pavimento o superficie en la que es colocado. Es importante realizar adecuados procesos de hidratación del cemento y al mismo tiempo, el concreto debe contener la viscosidad necesaria para la extracción del aire interno del concreto. (Munévar, 2020)

3.2.6 RESISTENCIA A LA FATIGA DEL UHPC Y EL UHPFRC.

Las estructuras que frecuentemente presentan el fenómeno de fatiga mecánica, son las que están sometidas a cargas cíclicas, repetidas o variables constantemente tales como puentes vehiculares, líneas férreas, fábricas o industria con maquinaria, o infraestructura construida en zonas de riesgo sísmico alto; Además, los cambios abruptos de temperatura a los que se pueden ver sometidas también configuran un factor causal en este fenómeno, debido a que la dilatación térmica somete ciertas fibras de los elementos a diferentes tipos de esfuerzos en periodos tan cortos como incluso horas.

El UHPC y el UHPFRC ofrecen grandes ventajas frente a este problema ya que al tener propiedades mecánicas tales como un módulo de elasticidad de casi el doble de la magnitud del de un concreto convencional, o una resistencia a la flexo-tensión que ronda valores de

entre 9 y 10 MPa, son materiales que a pesar de tener diferencias físicas notables, como la disposición del acero de refuerzo en cada uno, lograran una mejoría en el desempeño estructural de los elementos sometidos a cargas cíclicas más que notable, como lo demostraron Xiugui S. et al, en su trabajo “*Effects of stiffener type on fatigue resistance of Steel-UHPC composite Bridge decks*” además, al ser materiales que permiten una sección transversal reducida, incluso el peso específico de los elementos se ve reducido solo adicionando valor al uso de estos concretos en estructuras que soporten este tipo de cargas. (Xiugui, Jianhua , Yu , & Guoping , 2022)

3.2.7 PROPIEDADES DEPENDIENTES DEL TIEMPO Y DE LA EDAD TEMPRANA

La tasa de hidratación temprano del concreto de ultra alto rendimiento (UHPC) está influenciada por el tipo de cemento, aditivos y temperatura del material. La tasa de hidratación puede ser más rápida en climas cálidos o con cementos de fraguado rápido y más lenta en climas más fríos o con cementos de fraguado más lento. La tasa de hidratación puede acelerarse mediante la aplicación de calor o aditivos acelerados. La reacción de hidratación produce una fuerte liberación de calor y un rápido desarrollo de las propiedades mecánicas. El calor que produce la hidratación del UHPC es mayor al del concreto convencional, debido al alto contenido de aglutinante. Las temperaturas medias registradas en cilindros aislados oscilan entre 36 y 52°. (ACI, 2018)

3.3 DISEÑO ESTRUCTURAL DEL ULTRA HIGH PERFORMANCE CONCRETE

Como se mencionó anteriormente, el concreto de ultra alto desempeño tiene propiedades mecánicas superiores a concretos convencionales por este motivo los principios de diseño estructural para elementos utilizando UHPC deben ir más allá de la aplicación de metodologías convencionales (ACI, 2018).

El UHPC se espera en un corto plazo sea empleado en construcciones en donde se puedan aprovechar eficientemente sus propiedades de durabilidad, resistencia y capacidad de disipación de energía, contando con la posibilidad de fabricar elementos estructurales usando únicamente concreto de ultra alto desempeño o elementos compuestos con concretos convencionales u otros materiales. Adicional, su uso estará sujeto a aquellas estructuras que busquen apostar a soluciones innovadoras y en las que se acepte depender de la confianza en la experticia del ingeniero y en los resultados de investigación, esto debido a que actualmente no hay especificaciones de diseños para este material (ACI, 2018).

3.3.1 PRINCIPIOS DE DISEÑO

El diseño de concreto convencional parte del supuesto que los esfuerzos de compresión son soportados únicamente por el concreto mientras que, los esfuerzos de tensión son resistidos por el refuerzo siendo común el uso de barras de acero. Principios del comportamiento mecánico combinados con relaciones empíricas han permitido crear códigos con especificaciones de diseño que pueden ser empleadas por ingenieros para diseñar estructuras en concreto reforzado (ACI, 2018).

Para aprovechar las avanzadas propiedades del concreto de ultra altas prestaciones es necesario entender sus propiedades mecánicas, y es que en el diseño del UHPC generalmente se incluye su capacidad de soportar fuerzas de tracción, una diferencia si se compara con el diseño de concreto convencional. Un método conveniente para considerar la respuesta esfuerzo-deformación del UHPC en tensión y compresión es usar un proceso de diseño basado en la deformación, ya que, los límites mecánicos del concreto se pueden definir en términos de resistencia y deformación (ACI, 2018).

Para un diseño analítico debe determinarse la respuesta del UHPC a compresión y tracción, y mediante la aplicación de factores de seguridad junto a simplificaciones se obtiene relaciones esfuerzo-deformación conservadoras, con base en estas se establece un número de parámetros de esfuerzo y deformación tal como se evidencia en Figura 4. Una típica respuesta esfuerzo-deformación de diseño a compresión se muestra en la Figura 4a) con un comportamiento lineal hasta el esfuerzo de diseño a compresión, además de limitarse un valor de deformación. En la Figura 4b) se muestra una respuesta de diseño a tracción que incluye un comportamiento deformación-ablandamiento, un comportamiento deformación-endurecimiento, un comportamiento elástico-plástico y una respuesta rígida-plástica en la resistencia al agrietamiento por tracción a través de un valor límite de deformación (ACI, 2018)

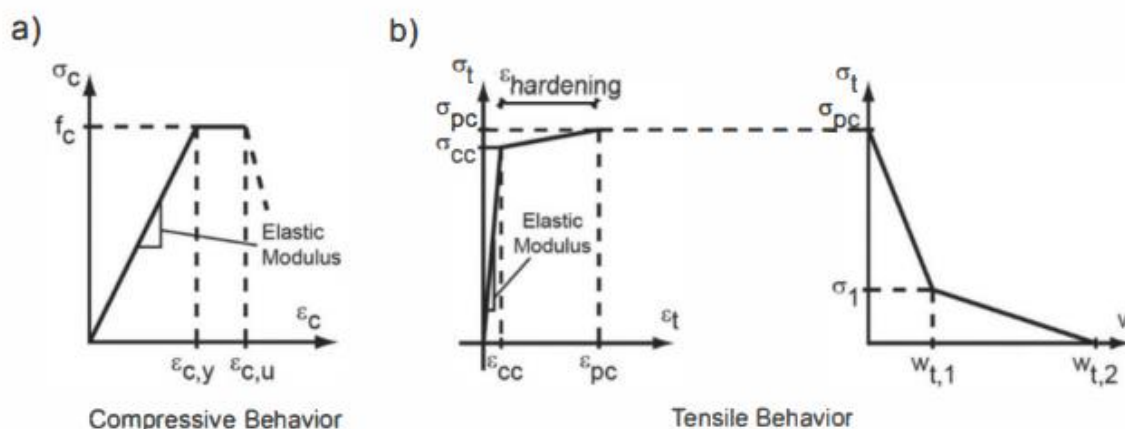


Figura 4 Ejemplo de relaciones constitutivas para el UHPC en el estado límite último (ULS por sus siglas en inglés) en: (a) compresión y (b) esfuerzo-endurecimiento por deformación (ACI, 2018)

Por otra parte, en la Figura 5a se muestran los diagramas de deformación, esfuerzos y fuerzas para una viga de UHPC reforzada, sometida a flexión en estado límite último, en donde se satisface la hipótesis de que las secciones planas permanecen planas una vez la viga sea deformada y cargada. Por otra parte, en la Figura 5b se muestra los diagramas para una viga en concreto reforzado convencional. Al comparar la Figura 5a y Figura 5b encuentra que las diferencias se presentan en compresión y tracción (ACI, 2018), evidenciando por una parte que el diagrama de esfuerzos en compresión para el UHPC se asume triangular mientras que para un diseño de concreto reforzado convencional se toma rectangular debido a que se considera el bloque de esfuerzos de Whitney, adicional se aprecia como en el diseño de

concreto convencional se desprecia la resistencia a la tracción del concreto mientras que en el diseño de UHPC si se considera su efecto.

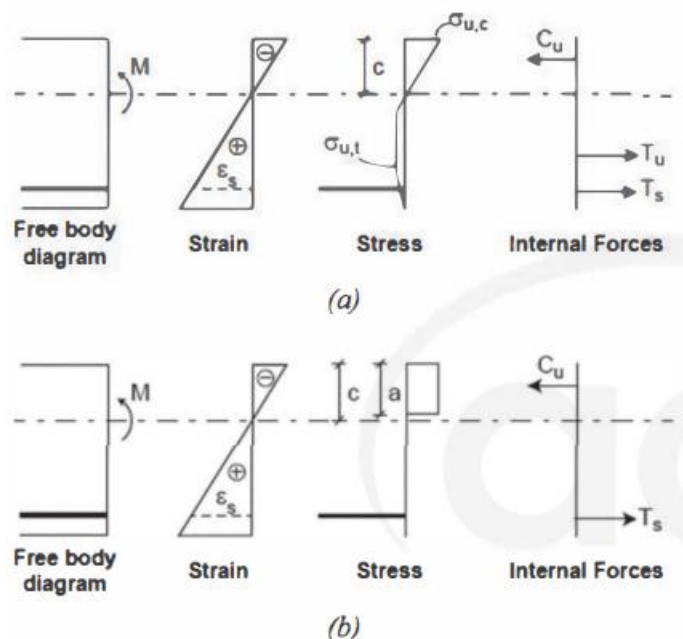


Figura 5 Relaciones constitutivas de flexión en estado limite último para:(a) UHPC Reforzado; y (b) concreto reforzado convencional (ACI, 2018)

En lo referente a las diferencias de durabilidad del UHPC comparado con el concreto convencional; este aspecto puede tratarse con modificaciones en las especificaciones de diseño existentes, en donde se especifican requerimientos para el recubrimiento del refuerzo y las configuraciones efectivas en este para limitar el ancho de fisuras. La reducida permeabilidad del UHPC puede facilitar la reducción de los requerimientos de recubrimiento y permitir el uso eficiente de este material como barrera ante la humedad. En cuanto a las limitaciones en el ancho de fisura se manejan implícitamente a través del refuerzo interno de fibras considerado en el diseño del UHPC, recordando que las fibras proveen de una importante resistencia a tensión luego que se presenten fisuras (ACI, 2018).

3.3.2 GUÍAS PARA EL DISEÑO

Alrededor del mundo se ha venido trabajando en el desarrollo de especificaciones de diseño estructural. Directrices francesas AFGC seguidas por NF P18-710, son un estándar de diseño formal para el UHPC. El AFGC en el 2013 entregó un marco para el diseño de UHPC en elementos sujetos a condiciones estructurales de carga comunes, cuyas recomendaciones se basan y son aplicables en formulaciones de UHPC producidas y desarrolladas en Francia y Estados Unidos. En esta guía se incluye métodos para el diseño estructural de UHPC reforzado con fibras, incluye factores de eficiencia de fibras locales y globales, métodos de ensayos para cuantificar la respuesta a tensión de una mezcla de UHPC, y factores de resistencia basados en pruebas estructurales de los componentes del UHPC (ACI, 2018).

Por otra parte, guías de diseño han venido desarrollándose en Japón, Alemania y Suiza. The International Federation of Structural Concrete está desarrollando una guía a través del Task Group 8.6 que se alinea con el 2010 Model Code y más ampliamente con el Eurocode (ACI, 2018).

¹ El Comité 239 ACI (*American Concrete Institute*) publicó en octubre de 2018 el documento: *Ultra-High-Performance Concrete: An Emerging Technology Report ACI 239R-18*, Informe de Tecnología Emergente Concreto UHPC. Al inicio del reporte menciona: “*Este informe de tecnología emergente brinda una descripción general del concreto de ultra alto desempeño. Presenta brevemente la producción de estos concretos, sus propiedades, principios de diseño para su uso y aplicaciones de ejemplo. No pretende ser un documento exhaustivo, sino más bien servir como punto de partida para el práctico concreto en la comprensión de esta clase de materiales*”.

3.3.3 NECESIDADES DE INVESTIGACIÓN ESTRUCTURAL

Gracias a la popularidad que ha venido tomando el UHPC en la aplicación estructural, continuamente se han realizado investigaciones con la particularidad de que algunas jurisdicciones están enfocadas en el desarrollo de guías de diseño en componentes específicos. En los Estados Unidos, The Federal Highway Administration (FHWA) ha publicado una guía para el diseño y construcción de conexiones fundidas en campo dentro de componentes estructurales prefabricados. Investigadores como Aaleti, Petersen y Sritharan en el 2013 produjeron una guía para el diseño de tableros de puentes en losas prefabricadas nervadas en dos direcciones de UHPC, un documento reportado al FHWA. Por su parte, en Australia fue publicada una guía para el diseño de vigas en UHPC pretensadas (ACI, 2018). Finalmente, el ACI 239 publicó un reporte denominado “Ultra-High-Performance Concrete: An Emerging Technology Report” en el que se abordan particularidades del UHPC relacionadas con Definiciones, producción, propiedades, diseño y aplicación de UHPC, entre otros aspectos.

3.4 REFORZAMIENTO DE ESTRUCTURAS UTILIZANDO UHPFRC EN ELEMENTOS DE CONCRETO REFORZADO

El uso de UHPFRC en secciones compuestas con concreto reforzado extiende la durabilidad e incrementa la rigidez y resistencia de los elementos. La Ing. Katrin HABEL propone tres configuraciones básicas en sus tesis para obtener el título de doctor las cuales consisten: la primera sección (P) tiene como función ofrecer protección, la segunda (PR) plantea una sección diseñada para proteger y en algunos casos para aumentar resistencia y, una tercera opción (R) que tiene como objeto proteger e incrementar la resistencia (Katrin, 2004).

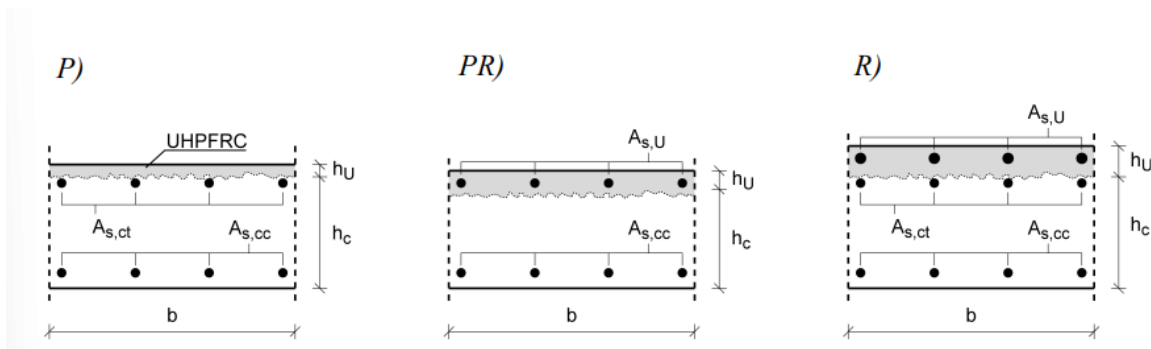


Figura 6. Configuraciones de Secciones Compuestas Propuestas por Katrin HABEL en sus Tesis de Doctorado (Katrin, 2004).

Las configuraciones mencionadas anteriormente se muestran en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y son descritas a continuación:

- Primera configuración (véase P, Figura 6): Consiste en una sección de concreto con una capa delgada de UHPFRC, en donde el refuerzo a tensión es colocado cerca de la zona de transición entre los dos materiales. La sección propuesta corresponde a una campaña de experimentación en vigas, que por sus características puede emplearse cuando se presenta poco o ningún deterioro en el refuerzo a tensión del concreto existente y, la resistencia del elemento es suficiente para soportar las solicitaciones de carga a las que será sometido durante su vida útil (Katrin, 2004).
- Segunda configuración (véase PR, Figura 6): Corresponde a una sección en la que el refuerzo a tensión es ubicado dentro de la capa de UHPFRC para reemplazar las barras de acero existente producto de un fuerte deterioro. La función principal de esta reparación es proteger, no obstante, se puede aumentar la cuantía de acero colocada en la capa de UHPFRC, con lo que se tendría el efecto de aumentar la resistencia (Katrin, 2004).
- Tercera configuración (véase R, Figura 6): el diseño de esta sección está enfocado a incrementar la resistencia del elemento estructural. La sección transversal está conformada por concreto reforzado y una capa de UHPFRC reforzada, estructura que aumenta la resistencia y de paso permite aprovechar la función de protección del UHPFRC (Katrin, 2004).

El uso de elementos compuesto de UHPFRC y concreto está enfocado a estructuras sometidas a condiciones atmosféricas severas, sustancias químicas o incremento de las cargas, en donde se busca proteger la estructura y/o proporcionar un reforzamiento. Desde este punto de vista, las secciones compuestas (UHPFRC-concreto) tiene aplicación en cubiertas de puentes, losas de parqueaderos, muros de contención, muelles, entre otras estructuras.

3.4.1 ESTADO LIMITE ULTIMO

Los elementos de secciones compuestas con concreto reforzado y UHPFRC tienen como consecuencia la reducción de la capacidad de deformación en flexión si es comparado con elementos de concreto reforzado, debido a que puede ocurrir una falla prematura en el

concreto a compresión como consecuencia de la incorporación del UHPFRC, el cual fortalece el comportamiento a tensión mientras que la zona en compresión permanece igual. Para el análisis de seguridad estructural del elemento de sección compuesta en estado límite último se emplean factores parciales de seguridad aplicados a las propiedades de los materiales (γ_m), incertidumbres del modelo (γ_R) y en el lado de acción, que son factores independientes del material (Katrin, 2004).

3.4.1.1 MODOS DE FALLA

Durante experimentación, se encontró que las secciones de vigas compuestas de UHPFRC y concreto reforzado tienen distintos modos de falla en cortante los cuales son ilustrados en la figura Figura 7 (Katrin, 2004).

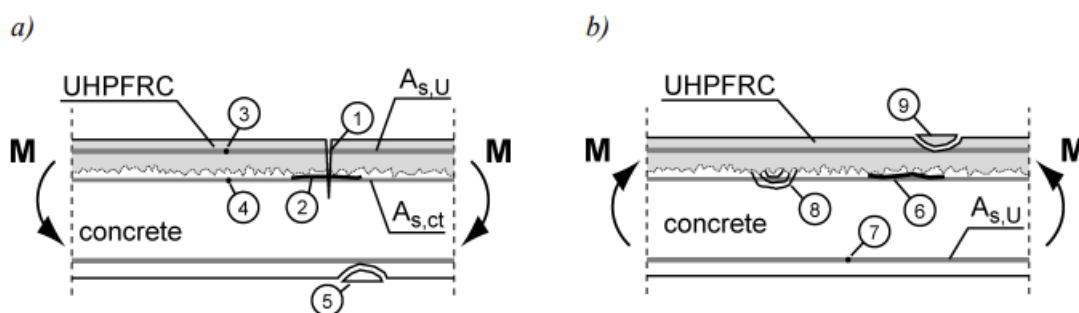


Figura 7. Modos de Falla de Vigas Compuestas de UHPFRC y Concreto Reforzado para a) Momento Negativo, b) Momento Positivo.

En el caso específico a momento negativo en flexión, se identifican 5 tipos de falla (véase a, Figura 7) tomados de (Katrin, 2004):

1. Falla en toda la capa de UHPFRC (forma y localización de macro fisuras).
2. Desvinculación entre la capa de UHPFRC y el concreto (pérdida del comportamiento monolítico; debe evitarse debido a que el comportamiento monolítico es importante en la respuesta estructural de los elementos compuestos).
3. Fractura del refuerzo $A_{s,U}$ (Refuerzo en la capa de UHPFRC).
4. Fractura del refuerzo $A_{s,ct}$ (Refuerzo ubicado en el concreto).
5. Fractura del concreto en compresión (determina un modo de falla frágil en el concreto, por ende, no debe ser un modo de falla determinante).

El diseño de los elementos compuestos debe buscar que los modos de falla 1, 3 o 4 por momento negativo no lleguen a ser cruciales. Por otra parte, dependiendo de la configuración que se tenga en el elemento compuesto se aplicaran estrategias para definir el modo de falla en la sección. En el caso de elementos compuestos con refuerzo en la capa de UHPFRC (configuraciones PR y R) deben evitarse que los modos de falla 1 o 3 sean decisivos. Por su parte, para elementos compuestos sin refuerzo en la capa de UHPFRC (configuración P) no debe permitirse que sean determinantes los modos de falla 1 o 4. Así mismo, si la capa de UHPFRC es considerada para el diseño, el modo de falla en el elemento compuesto va a depender de la geometría de elemento, de las propiedades de refuerzo y del UHPFRC. Si el

modo de falla 4 es determinante en el elemento compuesto, el riesgo de que se pierda el comportamiento monolítico es alto (Katrin, 2004).

En lo correspondiente a momento positivo en flexión, se distinguieron 4 modos de falla (véase b, Figura 7) tomados de (Katrin, 2004), los cuales se enumeran a continuación:

1. Desvinculación de la interface entre los dos materiales (pérdida del comportamiento monolítico).
2. Fractura en el refuerzo, $A_{s,cc}$.
3. Fractura del concreto sometido a compresión.
4. Fractura de UHPFRC sometido a compresión.

Con el diseño de elementos compuestos (UHPFRC-concreto) se busca que a momento positivo por flexión se presente un modo de falla 2. Así mismo, se debe evitar los modos 3 y 4, ya que se produce falla frágil en el elemento. Por último, debe evitar que el modo de falla 1 sea determinante en la sección (Katrin, 2004).

3.4.1.2 FACTORES DE SEGURIDAD

El diseño de elementos compuestos de concreto reforzado y UHPFRC requiere la consideración de factores de seguridad parciales. Estos incluyen un factor parcial debido a la variabilidad del material (γ_m), el cual parte de buen proceso constructivo, en donde los factores del concreto convencional son aplicables al UHPFRC cuando son usados métodos de ensayo apropiados. También, se incluye un factor por modelamiento (γ_R), sin embargo, no puede asignarse un valor definido debido al poco conocimiento que se tiene de las secciones compuestas (UHPFRC-concreto). Los factores anteriores están contenidos en el factor γ_M ($\gamma_M = \gamma_m \cdot \gamma_R$) que considera la resistencia del lado de la verificación. Finalmente, se tiene un factor de seguridad parcial para el UHPFRC (γ_U) y que en (Katrin, 2004) se propone igual a 1.5, no obstante, se menciona que requiere caracterizarse el UHPFRC para determinar la validez de esta hipótesis.

3.4.1.3 MOMENTO DE DISEÑO

El momento de diseño en elementos compuestos (UHPFRC-concreto) se calcula siguiendo el mismo procedimiento que en secciones de concreto reforzado, en donde el factor de mayoración del momento último corresponde al factor de seguridad parcial del UHPFRC que se mencionó anteriormente. Matemáticamente, el momento de diseño se escribe así:

$$M_{RD} = M_U \gamma_U \quad [Ecuación 1]$$

En donde,

M_{RD} : momento último de diseño

M_U : momento último en la sección debido a las solicitaciones de cargas.

γ_U : factor parcial de seguridad del UHPFRC.

3.4.1.4 VERIFICACIÓN DE MOMENTO NEGATIVO EN FLEXIÓN

El proceso de diseño de secciones compuestas puede realizarse de manera simplificada partiendo del mismo supuesto que para elementos de concreto reforzado, despreciando el aporte a la resistencia del UHPFRC y asumiendo la zona de compresiones de forma

rectangular. Posteriormente debe realizarse un análisis de fuerzas internas y deformaciones como se muestra en la Figura 8, específicamente para una configuración R debe considerarse en los cálculos el refuerzo a tensión de la capa de concreto y del UHPFRC (Katrin, 2004).

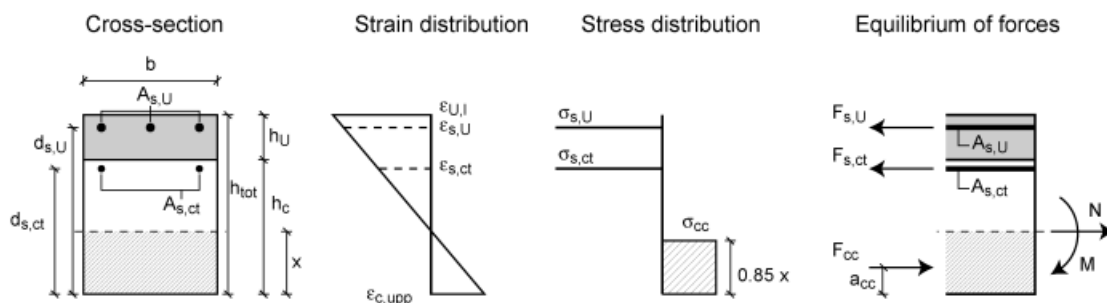


Figura 8. Verificación Simplificada de Momento Negativo en Flexión (Katrin, 2004).

Es importante mencionar que, existe un método alternativo y detallado para la verificación del momento negativo que considera la capacidad de rotación, la longitud de referencia, entre otras variables cuya determinación tiene un alto grado de dificultad. Para mayor detalle se recomienda consultar (Katrin, 2004).

3.4.1.5 VERIFICACIÓN DE MOMENTO POSITIVO EN FLEXIÓN

Al igual que en el momento negativo, la verificación por momento positivo puede realizarse de manera simplificada considerando únicamente el aporte en tensión del refuerzo $A_{s,cc}$ y en compresión a la capa de UHPFRC (véase Figura 9).

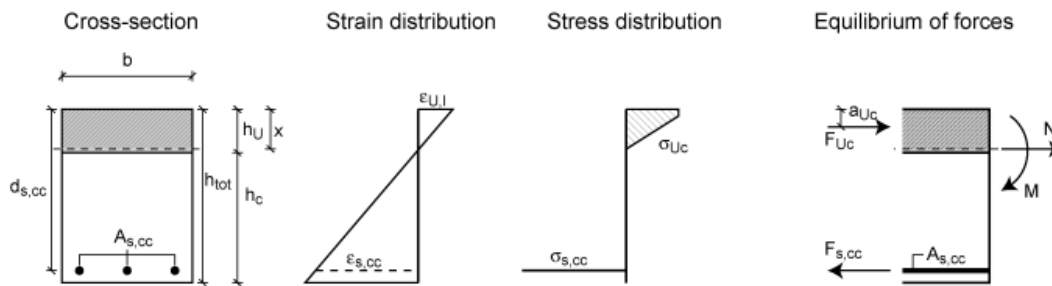


Figura 9. Simplificación de la Verificación del Momento Positivo en Flexión (Katrin, 2004).

Si la condición anterior no se cumple, se puede realizar un análisis más detallado siguiendo el planteamiento que se muestra en la Figura 10.

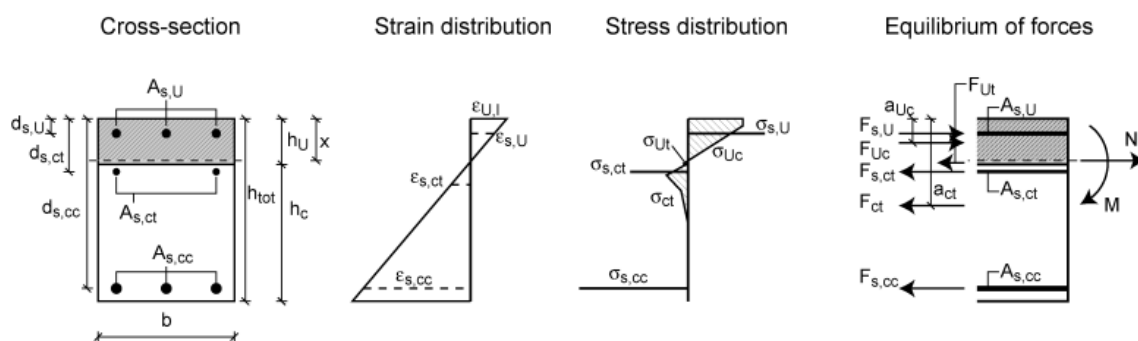


Figura 10. Análisis Detallado: Verificación a Momento Positivo en Flexión (Katrin, 2004).

3.5 CONDICIONES Y CUIDADOS DE APLICACIÓN

El UHPC requiere de una serie de cuidados en producción, colocación y curado adicionales al concreto convencional, por lo tanto, a continuación, se presentan las consideraciones relacionadas con la producción del UHPC.

3.5.1 MEZCLADO

Los concretos avanzados, y entiéndase por esto concretos de ultra altas prestaciones, al tener una matriz cementicia compuesta por fracciones granulométricas que llegan a tamaños de nanómetros y además al ser materiales fibro reforzados, bien sea con micro o macro fibra, requieren de condiciones específicas para su mezclado, es decir, este no se puede realizar de manera manual, ni tampoco con una mezcladora convencional o “trompo”, no es relativo a la potencia o a las revoluciones con las que se mezcle sino que se deben tener otras consideraciones. Como se mencionó anteriormente, las materias primas que componen los concretos de ultra altas prestaciones configuran una matriz muy consolidada que “amarra” cada uno de los componentes, he ahí una de las principales causas de sus altas resistencias a la compresión y a la permeabilidad; Lo recomendado por fabricantes de este material como la concretera Argos, es que este proceso se realice en una mezcladora planetaria la cual al tener aspas que giran de manera uniforme propicia una disposición más uniforme de todos los componentes lo cual garantiza la homogeneidad en la mezcla, por otro lado también sugiere que la secuencia de disposición de los materiales dentro de la mezcladora sea, primero 50% del material seco, entiéndase materiales cementantes y fibras, seguido del 70% de la fracción líquida de la mezcla, entiéndase agua y los aditivos a usar (Superplastificantes, acelerante o incluso de aire), posterior a esto el 50% restante de los materiales secos y finalmente el 30% restante de los líquidos de la mezcla; esto como tal no está soportado en una base teórica, es resultado del aprendizaje interno a partir de las experiencias que han tenido los ingenieros y científicos del centro de innovación de Argos.

3.5.2 COLOCACIÓN

Al ser materiales que desde el diseño de su mezcla se deben tener muchas consideraciones, la temperatura y la humedad del ambiente serán variables a considerar desde el almacenamiento de las materias primas hasta el momento en que se esté vertiendo el material para la fundición de los elementos, cuando se transporta en una mixer se debe tener cuidado

de no sobre mezclar ya que esto podría causar el deterioro de partículas como el humo de sílice que en general tienen una forma esférica bien definida, o de las fibras que podrían romperse y perder su longitud nominal causando así un impacto directo en la resistencia del material, por otro lado una mezcla excesiva también podría generar calores de exudación que no solo afectarían al material, sino directamente su colocación ya que empezaría un proceso de fraguado temprano y además también podría dañar el equipo que se está usando. Este tipo de concretos se caracteriza por ser una mezcla muy fluida, esto debido a los aditivos usados, por lo cual se debe ser riguroso en la elección y posicionamiento de la formaleta a usar, esta debe ser totalmente hermética ya que a la menor fisura, las fracciones granulométricas más pequeñas comenzarían a salirse y por más pequeña que parezca la pérdida, esto seguramente generaría primero una segregación de los materiales al interior de la formaleta y sumado a esto una deficiencia en la relación a/mc que tendrá el material dadas las pérdidas de agua que acarrearía la salida de estas fracciones granulométricas que arrastran consigo cantidades significativas de agua.

3.5.3 CURADO

Como bien se sabe, el curado de cualquier clase de concreto es un proceso fundamental en el desarrollo de la resistencia de diseño, no es diferente para los concretos de ultra altas prestaciones e incluso tiene una relevancia más significativa en la medida de que como se mencionó anteriormente, la matriz cementicia al estar compuesta de diferentes materiales cementantes de tamaños inferiores a lo usual, también supone una área superficial mayor ya que al ser más pequeñas, habrán más partículas por humectar y las pérdidas de agua por exudación representarían una disminución relevante en la obtención de las resistencias esperadas, es por esto que además de los aditivos ya mencionados, dentro del curado de elementos fabricados con este tipo de concretos se usan aditivos curadores que previenen la pérdida de agua por exudación y además propician la correcta distribución de esta en la matriz cementicia garantizando así una completa hidratación de todas las partículas, por otro lado a pesar de hacer uso de este tipo de aditivos se deben promover las buenas prácticas en el curado, procurando mantener los elementos húmedos o sellados con algún material externo.

3.6 APLICACIONES

Al ser materiales relativamente nuevos, su uso y aplicación no están debidamente regulado en muchos territorios, sin embargo, conociendo la gama de propiedades que tienen estos materiales, su demanda ha ido creciendo considerablemente en la actualidad. En el caso específico del UHPC su uso ha marcado un hito en la construcción de puentes, ya que permite reducir las secciones de las dovelas, vigas de carga y en general de toda la superestructura. Además, junto al uso de técnicas de pretensado, postensado e incluso diferentes configuraciones de acero de refuerzo longitudinal, se logra luces entre apoyos más grandes, comparado con soluciones que emplean concretos convencionales que pueden ser más costosas e ineficientes. Por otro lado, en el caso del UHPFRC, solo existen guías realizadas de forma empírica, por tal razón su uso ha estado limitado a estructuras o elementos específicos y a la academia, sin embargo, al tener una elevada eficiencia en sus propiedades mecánicas puede este extenderse a aplicaciones en donde se aprovecha al máximo sus ventajas

frente al uso de materiales convencionales. A continuación, se relacionan algunos casos de aplicación:

3.6.1 PUENTES VEHICULARES

Las propiedades avanzadas de los concretos UHPC permiten el desarrollo de nuevas superestructuras de puentes con tramos más largos, profundidades menos profundas y mayor durabilidad, logrando así importantes avances en el sector de puentes. Una de las principales razones es la eliminación de refuerzos secundarios y reducción de primarios, lo cual mitiga los problemas de corrosión al largo plazo. Otro de los beneficios es a que debido a la alta tensión de compresión final se puede permitir un aumento de los niveles de pretensado, obteniendo estructuras más avanzadas. (ACI, 2018)

3.6.2 PUENTE PEATONAL

El primer puente peatonal/ciclista con concreto UHPC fue construido en Sherbrooke, OC, Canadá en 1997. El puente está conformado por una armadura de espacio abierto con una extensión de 60m. Los acordes superior e inferior del puente fueron fundidos con un concreto con resistencia a la compresión de 200MPa. El peso propio del puente es aproximadamente de 80% menor que un puente similar fundido con concreto convencional, la reducción del peso resultó es una disminución del 10% del costo.



Figura 11 Sherbrooke Pedestrian Bridge (photo courtesy) (ACI, 2018)

3.6.3 ACTUALIZACIÓN SÍSMICA

Investigaciones recientes han demostrado que el concreto UHPC se puede utilizar para la modernización sísmica de columnas. La actualización con UHPC de empalmes de barras de refuerzo insuficientes que encuentran típicamente en columnas de pilares de puentes más antiguas, de esta forma se reduce la longitud de empalme de la barra de refuerzo y eliminar el despalillado y el pandeo longitudinal de la barra. Otra aplicación relacionada con sismo resistencia sísmica es el uso del concreto UHPC combinado con barras de refuerzo de acero en dos camisas de columna para mejorar la capacidad de deriva de muelles de concreto existente para acomodar desplazamientos de licuefacción.

3.6.4 REHABILITACIÓN DE PAVIMENTOS

El UHPC se ha utilizado en la rehabilitación de diferentes estructuras como: capas de protección delgadas no reforzadas, reforzadas herméticas al agua y capas estructurales reforzadas en cubiertas de puentes. La densidad del UHPC permite la eliminación de la impermeabilización separada, además se utiliza para mejorar el rendimiento mecánico y durabilidad de la estructura. El fortalecimiento de las losas generalmente consiste en aumentos en la capacidad de flexión, específicamente en zonas con momento negativos, el aumento en la capacidad de corte de punzonado o ambos, este fortalecimiento puede realizarse con o sin barras de refuerzo adicionales. Estudios y aplicaciones en campo demostraron que la desvinculación entre el concreto existente y el UHPC generalmente no es una preocupación cuando se utilizan métodos adecuados de preparación de superficie. El UHPC puede corregir una pendiente de hasta el 10% (ACI, 2018)

3.6.5 AMBIENTES AGRESIVOS

En general se consideran ambientes agresivos para el concreto todos aquellos donde las condiciones perjudiquen o afecten de alguna manera las reacciones o compuestos del concreto bien sea en su estado fluido o endurecido. Se pueden resumir en algunos grupos principales los cuales son: Acción de los Sulfatos, podría decirse que es una de las de mayor cuidado ya que sus efectos no se verán de manera inmediata puesto que los sulfatos reaccionan con los aluminatos presentes en la pasta cementicia generando la denominada Etringita, la cual se cristaliza en tres diferentes fases y es en extremo expansiva, alcanzando hasta un 250% del volumen original; se sabe que la reacción primaria se causa en el estado fluido del concreto, su cristalización es la segunda etapa y por último la fase expansiva sucede cuando ya se ha endurecido el concreto, generando así tensiones internas que naturalmente se traducen en fisuraciones y desprendimientos superficiales que dañan no solo estéticamente a los elementos sino que también pueden comprometer su estabilidad y rendimiento. Además, se tiene también la Acción de sales de magnesio y amonio, las cuales también afectan al concreto en su etapa fluida y el problema es que reemplazan iones de Ca^{2+} con iones de Mg^{2+} o iones de amonio (Los cuales son aún peores que los primeros) lo cual disuelve la portlandita y en la fase endurecida provoca la descalcificación del concreto. La carbonatación de las estructuras de concreto se causa producto del ataque de ácidos que ambientalmente están presentes en la lluvia como el óxido de azufre, o en el aire como el dióxido de carbono, los cuales reaccionan con los componentes básicos del concreto como lo son el hidróxido de calcio o compuestos hidratados del cemento y la reacción de neutralización (o carbonatación) produce sales y agua que afectan de manera directa la pasta cementicia y deterioran el conglomerado de agregados cambiando sus propiedades físico químicas lo cual se traduce en una lenta modificación de su estructura que hace variar su resistencia mecánica y química, además es importante resaltar que este fenómeno es muy habitual en ambientes urbanos por lo cual será de gran importancia en el desarrollo de este estudio. Por otro lado, las estructuras de concreto que se vean sometidas a ambientes acuíferos, bien sean aguas subterráneas, aguas superficiales (Limpias, residuales o de mar) se van a ver afectadas por el fenómeno de lixiviación, el cual además de sumarse a los posibles efectos de los componentes que pueda tener el agua, provoca la erosión y socavación de la sección de los elementos en concreto

producto del roce continuo de un flujo de agua el cual paulatinamente arrastra partículas y disminuye la capacidad portante y la resistencia de los elementos en concreto. Por último, una de las reacciones más agresivas que puede sufrir el concreto, es la reacción álcali-agregado la cual ocurre cuando hay una mala selección de los agregados usados en el concreto ya que estos tienen incluidas arcillas expansivas que cuando el concreto se encuentra en la fase de curado y fraguado, reaccionan con el agua y por la reacción exotérmica, producen grandes fisuras en el concreto que debilitan su resistencia mecánica y química. (San Juan B., 2001)

Si algo tienen en común los anteriores ataques químicos es que todos son capaces de afectar a un elemento estructural en la medida en que más profundo puedan penetrar su sección, o bien entre más profundo se produzca la reacción, es por este motivo por el cual los concretos avanzados proveen una solución a estos problemas, al tener una matriz tan poco permeable y una porosidad baja, sumado al hecho de que las fibras bien sean sintéticas o metálicas impiden la proliferación de corrosión al ser un medio discontinuo.

3.6.6 PREFABRICADOS PARA MARQUESINAS Y CASCARONES.

Ya que por diseño los concretos avanzados tienen que ser muy fluidos, y al tener estas condiciones particulares de disposición, las cuales se deben tener muy bien controladas, se hace más sencilla la construcción de elementos prefabricados en un taller donde a diferencia de la obra, se pueden controlar mejor muchas más variables; por otro lado, las grandes propiedades mecánicas de estos materiales proveen un adicional en la construcción de elementos esbeltos y delgados como las marquesinas y cascarones, siendo en extremo adecuados para fabricar elementos muy finos y con curvaturas que permitan su sustentación.

4 PATOLOGÍAS

Una patología son los daños o defectos que puede presentar los diferentes elementos de una estructura debido a una serie de procesos o fenómenos que atacan la durabilidad; estos daños pueden presentarse en cualquiera de las etapas constructivas de una estructura y pueden clasificarse como: daños por diseño, daños por construcción y daños durante el funcionamiento (Ministerio de Transporte Nacional de Vías., Universidad Nacional de Colombia, 2006).

4.1 DAÑOS POR DISEÑO

Son aquellos daños presentes debido a errores en la concepción del diseño teniendo diferentes causas entre las cuales se puede encontrar: Ausencia de cálculos o errores en los mismos, deficientes avalúos de cargas y condiciones de servicio, ausencia o falta de procesos constructivos, errores en la disposición de los elementos, juntas, entre otros (Ministerio de Transporte Nacional de Vías., Universidad Nacional de Colombia, 2006). A continuación, se describe algunas de las patologías que tienen origen en diseños deficientes:

4.2 FISURAS

Las fisuras son producto de los esfuerzos que actúan sobre los diferentes elementos, resultando común encontrar fisuras debido a las condiciones de servicio en elementos de concreto reforzado, no obstante, si el ancho de fisura supera 0.5 mm es considerado una

patología. Durante una jornada de inspección de un elemento si se presentan fisuras estas deben describirse considerando las dimensiones que se relacionan a continuación: espesor (debe medirse empleando un fisurómetro), longitud, dirección de la fisura y distancia entre estas (Ministerio de Transporte Nacional de Vías., Universidad Nacional de Colombia, 2006).

En el Manual para la Inspección Visual de Puentes y Pontones del Invia (Ministerio de Transporte Nacional de Vías., Universidad Nacional de Colombia, 2006), se relaciona la Tabla 1 Guía para ancho admisible de fisuras en estructuras de concreto reforzado bajo cargas de servicio. , y sirve para tener un orden de magnitud sobre el ancho de fisuras admisibles en un elemento que está sometido a cargas de servicio.

| CONDICIÓN DE EXPOSICIÓN | ANCHO DE FISURA ADMISIBLE (mm) |
|--|--------------------------------|
| Aire seco o membrana protectora | 0.40 |
| Ambiente húmedo (aire húmedo, suelo) | 0.30 |
| Productos Químicos descongelantes | 0.20 |
| Humedecimiento y secado de agua de mar | 0.15 |
| Estructuras para retención de agua, excluyendo tuberías sin presión. | 0.10 |
| Elementos de concreto preesforzado | 0.10 |

Tabla 1 Guía para ancho admisible de fisuras en estructuras de concreto reforzado bajo cargas de servicio. (Ministerio de Transporte Nacional de Vías., Universidad Nacional de Colombia, 2006)

Las fisuras en elementos estructurales pueden presentarse por varias razones, por ejemplo, estructuras que fueron diseñadas bajo la filosofía de estados límites, pueden soportar esfuerzos mayores al de fluencia pero claramente las deformaciones causadas, al ser plásticas dejan una marca inequívoca, fisuras que en los peores casos podrían llegar incluso hasta el refuerzo del elemento; por otro lado, si en obra no se propician las buenas prácticas al momento de curar el concreto puede llegar a generar una segregación en los materiales generando una capa superficial débil en los elementos y así generar fisuras o la llamada “piel de cocodrilo”, que también se encuentran presentes en pavimentos tanto hidráulicos como asfálticos, sometidos a grandes cambios de temperaturas a lo largo del día, además del paso de tráfico constante. El ancho, profundidad y locación de las fisuras determinará qué acciones se deben tomar al respecto, ya que como se mencionó anteriormente pueden ser tan peligrosas como las que llegan al refuerzo o atraviesan la sección completa, o pueden ser superficiales que no afecten la integridad estructural del elemento pero que si puedan dar pie a otros problemas como ataques de cloruros o reacciones como la alkali-silice.

Por otra parte, las fisuras se presentarán siguiendo determinados patrones según sea el tipo de esfuerzos que las originan tal como se describe a continuación:

- Fisuras por flexión: este tipo de fisuras en losas o vigas se presentan en la cara inferior de los elementos y se localizan en la parte central de la luz; el ancho de la fisura es

un índice del nivel de esfuerzo al que está sometido el elemento, así fisuras con anchos marcados indican excesos de carga o falta de refuerzo longitudinal (Ministerio de Transporte Nacional de Vías., Universidad Nacional de Colombia, 2006).

- Fisuras por cortante: son generadas por esfuerzos de corte; generalmente se observan con una orientación en un ángulo de 45° respecto a la dirección del refuerzo principal, son oblicuas con ancho variable y se presentan de forma paralela con una separación máxima correspondiente a la separación del refuerzo colocado por corte. Frecuentemente, este tipo de fisuras se ubican en zonas próximas al apoyo o en el centro de la luz cuando actúan cargas puntuales o hay pocos estribos (Ministerio de Transporte Nacional de Vías., Universidad Nacional de Colombia, 2006).
- Fisuras por torsión: se presentan en las caras de los elementos y son producidas por esfuerzos de torsión, son similares a las fisuras producidas por esfuerzos cortantes, tienden a seguir líneas a 45° con la diferencia que siguen un patrón de espiral o de tipo helicoidal que atraviesan toda la sección del elemento. La presencia de este tipo de fisuras son un indicador de falta de refuerzo o disposición inadecuada (Ministerio de Transporte Nacional de Vías., Universidad Nacional de Colombia, 2006).

4.3 APLASTAMIENTO LOCAL

Este tipo de daños tienden a fracturar la sección en donde se presenta concentración de cargas como zonas de apoyo de elementos simplemente apoyados o zonas de anclaje del presfuerzo de torones y cables. La presencia de esta patología es señal de una transición inadecuada de los sistemas de amortiguamiento en las zonas de apoyo. Por otra parte, estos daños deben reportarse por número de elementos afectados (Ministerio de Transporte Nacional de Vías., Universidad Nacional de Colombia, 2006). Un ejemplo de esta patología se muestra en la Figura 12



Figura 12 Patología por aplastamiento en el pedestal. Puente Cañada Profunda, Nariño. (Ministerio de Transporte Nacional de Vías., Universidad Nacional de Colombia, 2006)

4.4 ASENTAMIENTO

Los asentamientos son una patología que se presentan en todas las estructuras que construyen, sin excepción, esto se debe al peso propio de las mismas y en ocasiones a

deficientes diseños de la cimentación. Los asentamientos totales y diferenciales en los puentes se deben calcular considerando la función de la calidad de la superficie de la carretera. Por otra parte, los puntos críticos de un puente al sufrir asentamientos no deseados son en las uniones entre vanos fijos y de enlace, y los terraplenes de aproximación. Otro tipo de asentamiento que se presentan en los puentes son en las losas aproximación vehiculares.

Este tipo de patología debe cuantificarse por número de elementos afectados y pueden identificarse con la presencia de fisura (Ministerio de Transporte Nacional de Vías., Universidad Nacional de Colombia, 2006)s en la parte superior o inferior de vigas adyacentes a las pilas de un puente, deflexiones y fracturas en los apoyos. Las fisuras generadas por asentamiento tienden a tener una orientación vertical con poca inclinación, su ancho y longitud es variable (Ministerio de Transporte Nacional de Vías., Universidad Nacional de Colombia, 2006).

4.5 VOLCAMIENTO

Es un daño que se presentan en elementos mal dimensionados, con diseños deficientes en la cimentación y/o estructura, también puede producirse como consecuencia de patologías de socavación y/o asentamientos diferenciales o por efecto de sismos, explosiones, entre otros eventos fortuitos. Por otra parte, esta patología durante una inspección visual debe reportarse enumerando los elementos de la estructura donde se evidencie, señalándose en esquemas y describiéndose las condiciones encontradas y si es posible la causa que lo origino (Ministerio de Transporte Nacional de Vías., Universidad Nacional de Colombia, 2006).

4.6 DAÑOS POR CONSTRUCCIÓN

Son daños que se originan debido al uso de materiales con deficiente calidad, inadecuadas practicas durante la fabricación, trasporte, colocación y curado del concreto. Además, pueden ser causas las siguientes: inadecuada interpretación y/o seguimiento de los planos, fallas de las formaletas, procesos constructivos errados, entre otros (Ministerio de Transporte Nacional de Vías., Universidad Nacional de Colombia, 2006). A continuación, se detallan algunas de las patologías que pueden evidenciarse como consecuencia de errores cometidos durante la etapa constructiva de la estructura:

4.7 RECUBRIMIENTO INADECUADO (RE) Y EXPOSICIÓN DEL ACERO DE REFUERZO (EXA)

Es una patología que se presenta debido a un deficiente proceso constructivo en el cual no se garantiza un recubrimiento adecuado al refuerzo teniendo en cuenta la función que desempeña el elemento en el sistema estructural o las condiciones atmosféricas a las que estará sometido durante su vida útil. Como consecuencia, este daño afecta la durabilidad de la estructura y su capacidad portante, ya que, al quedar expuesto el acero de refuerzo al ambiente se generan problemas de corrosión (Ministerio de Transporte Nacional de Vías., Universidad Nacional de Colombia, 2006). Frecuentemente, este tipo de patologías suelen observarse como se muestra en la Figura 13.



Figura 13 Patología Estructural Exposición de Refuerzo en el Puente Q. Las Ánimas. (Ministerio de Transporte Nacional de Vías., Universidad Nacional de Colombia, 2006)

Según el Manual para la inspección visual de puentes y pontones, este tipo de patología debe registrarse en función del área afectada (m²).

4.8 CONSTRUCCIÓN INADECUADA DE JUNTAS FRIAS

Es un tipo de patología generado por deficientes procesos constructivos al momento de vaciar un concreto sobre una capa ya existente, es decir, se presenta cuando se vacían concretos en diferentes etapas y no se garantiza un correcto tratamiento de la junta permitiendo el ingreso de agentes externos como son: sulfatos, cloruros, carbonatos, entre otros, los cuales afectan la durabilidad de la estructura producto de ataques al concreto o al acero de refuerzo. Este daño debe medirse por metro lineal, registrando la longitud con mayor daño que se presente en el elemento al cual se esté evaluando su estado (Ministerio de Transporte Nacional de Vías., Universidad Nacional de Colombia, 2006).

En campo este daño puede observarse como se muestra en la Figura 14.



Figura 14 Junta fría con vaciado inadecuado sobre concretos existentes (Ministerio de Transporte Nacional de Vías., Universidad Nacional de Colombia, 2006)

4.9 DAÑOS DURANTE EL FUNCIONAMIENTO

Son patologías que se presentan durante la vida útil de la estructura producidas por diferentes acciones que pueden ser físicas, mecánicas, químicas o biológicas. Los daños derivados del funcionamiento de la estructura pueden ser producidos por incremento de cargas superando las contempladas durante el diseño, eventos fortuitos como accidentes, explosiones, sismos, entre otros. También pueden generarse debido a la exposición a condiciones atmosféricas severas, uso indebido o inadecuado mantenimiento (Ministerio de Transporte Nacional de Vías., Universidad Nacional de Colombia, 2006). A continuación, se detallan algunas patologías que pueden presentarse durante el funcionamiento de las estructuras:

4.10 EFLORESCENCIA/OXIDO

Se presenta durante la vida útil de la estructura, es una patología de tipo químico, frecuente en concretos, ladrillos, piedras entre otros materiales que permiten la percolación del agua de manera continua o en superficies sometidas a procesos intercalados de humedecimiento y secado, como consecuencia las sales solubles en el agua se cristalizan y se depositan fuera del concreto siendo visibles como manchas blancas en la superficie de los elementos que sufren este tipo de lesión, ver Figura 15. Dentro de los efectos generados por esta patología se tiene una afectación estética de la estructura, aumento de permeabilidad y porosidad, daños que no comprometen la durabilidad de los elementos, no obstante, acrecienta la posibilidad de que otro tipo de patologías más nocivas se presenten. En campañas de evaluación del estado de la estructura, la eflorescencia debe cuantificarse en función del área afectada (Ministerio de Transporte Nacional de Vías., Universidad Nacional de Colombia, 2006).



Figura 15 Eflorescencia en el Estribo del Puente del Río Meldar (Ministerio de Transporte Nacional de Vías., Universidad Nacional de Colombia, 2006)

4.11 CARBONATACIÓN

Es un daño ocasionado por la exposición del concreto al aire o el suelo, debido a que estos agentes contienen dióxido de carbono (CO_2) que se filtran a través de los poros y reaccionan con los componentes alcalinos del concreto $\text{Ca}(\text{OH})_2$, generando carbonato de calcio (CaCO_3) y la reducción del pH del hormigón; este hecho tiene como consecuencia la disminución de la protección pasiva de la armadura desencadenando corrosión en el acero de refuerzo y el deterioro del elemento. Es un daño que avanza lentamente de forma continua hacia el interior de la superficie expuesta, esto si se tienen condiciones de humedad relativa del medio bajas (menor a 40 %), por el contrario, si el contenido de humedad es intermedio avanzará rápidamente. Por otra parte, la existencia de esta patología puede suponerse si se evidencia eflorescencias y depósitos por lixiviación del carbonato de calcio, en cuyo caso se recomienda realizar un regata o extracción de un núcleo de concreto con posterior limpieza, luego se debe rociar una solución de fenolftaleína y proceder al ensayo de tracción directa, terminada la prueba se debe analizar el color del concreto; las zonas sin color corresponden a zonas carbonatadas y las áreas de color violeta corresponden a regiones que no han sido afectadas por esta patología. Durante una inspección visual, una cuantificación inicial de este daño debe realizarse por metro cuadrado de área afectada (Ministerio de Transporte Nacional de Vías., Universidad Nacional de Colombia, 2006).

4.12 CORROSIÓN DE LA ARMADURA

Es un daño ocasionado por diferentes factores entre los cuales se tiene: deficiente recubrimiento del acero de refuerzo, exposición a ambientes húmedos o salinos, presencia de procesos de carbonatación, concretos con bajos pH, localización de la armadura, entre otros factores que favorecen se presenten procesos electroquímicos causando la corrosión del acero. Esta patología puede reconocerse al observar elementos estructurales con fisuras paralelas a la dirección del refuerzo, descascaramiento, desprendimiento del recubrimiento, expansión del acero de refuerzo, baja adherencia entre el concreto y el acero de refuerzo, reducción de la sección transversal del acero y/o manchas de óxido si el elemento se encuentra sometido a ambientes con altos contenidos de humedad. Por otra parte, el reporte de esta patología se realiza dependiendo de los daños observados; si se registran fisuras debe cuantificarse por metro lineal, y en el caso de observarse manchas debe precisarse por unidad de área (Ministerio de Transporte Nacional de Vías., Universidad Nacional de Colombia, 2006). En la Figura 16 se muestra una viga que presenta corrosión en su armadura; en este caso pudo reconocerse debido al óxido presente en la superficie.



Figura 16 Manchas de óxido en superficie de concreto. (Ministerio de Transporte Nacional de Vías., Universidad Nacional de Colombia, 2006)

4.13 SOCAVACIÓN.

La socavación es el fenómeno de arrastre del cauce del río, entiéndase el lecho y las orillas, causado por el flujo de agua constante que erosiona esta superficie; cuando por ejemplo, un río cambia de dirección, en la orilla externa de esta curva el material es transportado debido a las corrientes súbitas que se generan por el cambio de dirección y el amplio radio de curvatura, mientras que en la orilla interna, por el contrario se asientan materiales sedimentarios producto de las bajas velocidades debido al corto radio. Así, se puede evidenciar que la socavación es un fenómeno netamente hidráulico que consecuentemente se ve influenciado por el cauce del afluente, lo cual implica que la anterior no es la única causa de socavación, esta se conoce como socavación natural o general, mientras que en casos tales como un estrechamiento o reducción de la sección del río, también se observara socavación en los bordes de esta nuevamente debido a las corrientes generadas por la perturbación del flujo. Todo lo anterior, es solo un preludeo para llegar a la socavación que más compete al estudio de este trabajo, ya que la denominada socavación local es producto del posicionamiento de un determinado obstáculo en el flujo, que para efectos prácticos, en este caso es la cimentación de un puente, alrededor de las pilas y estribos que soportan la super estructura de un puente, las condiciones hidráulicas del flujo cambian lo cual va erosionando sistemáticamente el suelo que soporta estos elementos que a su vez soportan el puente, muchos académicos han determinado ciertas configuraciones geométricas que disminuyen o neutralizan en cierta medida el actuar del agua en el suelo de fundación, sin embargo es innegable que este fenómeno sigue ocurriendo ya que esta también condicionado por muchos más factores ajenos a la geometría de la cimentación, como lo son las condiciones climatológicas e hidrológicas aguas arriba que regulan el caudal que transporta el afluente, la pendiente del lecho del afluente o la misma composición mineralógica del suelo de fundación.

4.14 IMPACTO O COLISIÓN DE INFRAESTRUCTURA DE PUENTES

Se considera impacto al golpe o golpeteo continuo o no (San Juan B., 2001) al cual una estructura al estar a la intemperie está expuesta a una inmensidad de posibles situaciones que la podrían perjudicar; La energía necesaria para dañar un elemento de concreto, con acero configurado de cualquier manera es más que considerable, es decir se está hablando de choques automovilísticos de altas velocidades, explosivos de alto calibre o eventos de liberación de energía singulares, sin embargo, el tema es que pueden existir y que estructuralmente pueden afectar o no la integridad de los elementos. Bajo cualquier escenario es difícil, dentro del diseño, considerar estos eventos ya que son fortuitos y específicos, claro que, si se tiene la necesidad y claridad frente a esto, el caso de barreras de contención o estructuras de pavimento que estén sometidas a caídas de objetos, se deben tomar acciones de prevención

4.15 ABRASIÓN

Es el desgaste de la superficie del concreto debido a cargas continuas, se pueden presentar por la fricción y frotamiento presentes en la superestructura de los puentes, en la capa de rodadura de las vías y en los pisos industriales, por la erosión presentada debido a los materiales abrasivos y cavitación, estas últimas se pueden manifestar en los estribos y pilas de los puentes, sobre cuerpos de agua o en tanques. (Betancur Villegas & Chavarro Gutiérrez, 2018). Esta patología ataca principalmente la durabilidad de los elementos de concreto provocando así nuevas condiciones.

5 MÉTODOS DE INTERVENCIÓN A ESTRUCTURAS PARA REMEDIAR LAS PATOLOGÍAS

Con objeto de definir el método más apropiada para remediar una patología es necesario investigar y analizar los diferentes procedimientos utilizados en obras de rehabilitación, por lo anterior, durante el desarrollo de esta sección se presentan algunas técnicas de intervención ante diferentes daños en el concreto:

5.1 TRATAMIENTO PARA PATOLOGÍA DE EFLORESCENCIA

Debido a que esta patología es causada por el contacto del agua con el concreto (para el material de estudio) la intervención para mitigar los daños y corregirla consiste en realizar limpieza sobre el elemento o superficie afectada, para esto se pueden efectuar una inyección de agua a presión y pasar un cepillo, otra alternativa es emplear algún limpiador específico. Posterior a la limpieza, debe permitirse que la superficie seque e implementar alguna protección que favorezca la impermeabilización en caso de que no se pueda suprimir la humedad o infiltración del agua, para esto es frecuente emplear morteros de reparación y sellar con alguna técnica constructiva de impermeabilización como uso de pintura antihumedad o con capacidad anti moho (Blatem, 2018).

5.2 TRATAMIENTO DE PATOLOGÍA DE FISURACIÓN

La selección del tratamiento de las fisuras está condicionada por una serie de factores entre los cuales esta: su naturaleza (vivas o muertas), geometría (anchura y profundidad) y

solicitaciones a las que será sometida la estructura. Como procedimiento general, las fisuras que se prevé presenten movimiento deben inyectarse, mientras que las demás debe optarse por realizar un sellado. En lo que respecta al sellado, el primer paso consiste en el cajeado de la fisura, posteriormente, se limpia, se verifica que el concreto en las inmediaciones este sano y seco para garantizar buena adherencia con el nuevo material, por último, se procede a inyectar una masilla elástica que penetre dentro de la fisura o aplicar una banda elástica que puentee la misma. Por otra parte, la inyección de la fisura debe ejecutarse una vez este limpia, garantizada esta condición se debe ubicar los inyectores, se realiza un sellado y ahí si se realiza la inyección con resinas epoxi las cuales deben garantizar adherencia, la menor retracción posible y un endurecimiento acelerado. (Garcia-.)

5.3 TRATAMIENTO DE LA PATOLOGÍA DE CORROSIÓN

Cuando una estructura presenta corrosión ya sea producto de fisuraciones o perdidas de recubrimiento, una forma de intervenirlas consiste en eliminar el hormigón afectado empleando medios mecánicos como picado o cepillado, buscando eliminar partículas sueltas, suciedades, materiales adheridos, entre otros, el material a quitar debe ser como mínimo a una profundidad de 2 o 3 cm. Luego, se realiza inyección de chorro de arena con el fin de garantizar que la superficie quede limpia. Una vez la superficie este limpia y seca, se procede a pasivar la estructura, para tal fin pueden emplearse pastas de cemento modificadas con polímeros, resinas epoxi, entre otros materiales, que permitan proporcionar una capa que impida infiltraciones de agentes externos que propicien nuevamente corrosión. Por otra parte, cuando la corrosión haya afectado el refuerzo de la estructura deberá reemplazarse de manera que no se atente contra la capacidad mecánica (Garcia-.).

Un daño producido por corrosión es la pérdida de sección, en cuyo caso es necesario recuperarla, para esto se disponen del uso de técnicas de hormigón proyectado o morteros de reparación como pueden ser morteros hidráulicos poliméricos termoestables (morteros epoxi, mortero de resina poliéster), morteros hidráulicos y hormigones hidráulico, el uso de estos materiales se aborda en 3.7.4. Un factor de éxito en las intervenciones de este tipo esta dado por la adherencia entre el concreto existente y el nuevo material (mortero o concreto), efecto que puede conseguirse con una película de imprimación. Finalmente, para concluir con la intervención es necesario que se proteja la superficie reparada mediante el uso de pinturas de protección. (Garcia-.)

5.4 RECUBRIMIENTO INADECUADO Y EXPOSICIÓN DEL ACERO DE REFUERZO

Para realizar una intervención por este tipo de patología primero debe evaluarse que no se presente corrosión del acero de refuerzo, posteriormente se debe intervenir realizando una reposición o aumento de la sección empleando un material cuyas características mecánicas y físicas sean adecuadas para proteger la armadura y resistir a las causas que originaron el problema (mismo procedimiento que en 3.7.3). En la ejecución de una reparación cuyo fin sea recuperar o aumentar la sección, normalmente se usan morteros y hormigones hidráulicos, morteros hidráulicos poliméricos y/o morteros poliméricos termoestables (Garcia-.).

El uso de hormigones en estas aplicaciones de reparación de patologías (corrosión, recubrimiento inadecuado y exposición del acero de refuerzo) está limitado por el tamaño de agregado y el espesor, estableciendo como adecuado su uso cuando el espesor es mayor a 3 veces el tamaño máximo del agregado. Por otra parte, tanto para el mortero como el concreto se recomienda emplear relaciones de agua/ cemento bajas. Así mismo, el uso de estos materiales debe incluir la colocación de una película de imprimación previa, que garanticen exista adhesión con el concreto existente (García-).

Por su parte, los morteros poliméricos debido a la adición de los polímeros sobresalen con respecto a los anteriores debido a que estos proporcionan características como: mejor adherencia, mayor compacidad y aumento de la resistencia a tracción y flexión. En contraste con lo anterior, los morteros poliméricos termoestables cuentan con importantes propiedades y pueden ser de dos tipos: los morteros epoxi y morteros de resina de poliéster; en el caso de los primeros sus propiedades mecánicas permiten tiempos cortos en desarrollarse, sin embargo, requiere de una película de imprimación, no deben someterse a altas temperaturas y su uso está restringido a volúmenes más pequeños comparado con morteros hidráulicos sin olvidar que, su costo es más elevado. En lo concerniente a los morteros de resina de poliéster no requieren de una imprimación de la superficie y son de rapidísimo secado (García-).

5.5 REPOSICIÓN DE SECCIÓN POR DAÑOS DISTINTOS A LA CORROSIÓN

Las patologías en unas estructuras diferentes a la corrosión como, por ejemplo: impactos, erosión, socavación, entre otras, las cuales demanden una reparación de la sección (al igual que en 3.7.4) son intervenidas siguiendo la metodología mencionada en 3.7.3 con la única diferencia que el volumen a intervenir va a depender del tamaño de los daños y frecuentemente el refuerzo no requiere ser intervenido. En general, cuando haya lugar a una recuperación o aumento de sección se tiene como método de ejecución los siguientes (García-):

- Encofrado convencional y fundida (normal o mediante bombeo).
- Aplicación a mano en capas sucesivas, mediante llana.
- Concreto pre-pack: consiste en colocar primero el agregado para posteriormente realizar la inyección de mortero.
- Dry-pack: concretos o morteros depositados y consolidados por presión.

Adicionalmente, cuando el volumen de sección demanda grandes cantidades de concreto o morteros se emplea concreto o morteros proyectados, que consiste en la colocación del material median lanzado a presión, para lo cual se tiene dos alternativas: la primera consiste en una proyección por vía seca en la que se mezclan todos los componentes del material exceptuando el agua, estos se conducen por la manguera y a la salida de la boquilla se añade el agua, y un segundo método conocido como la proyección por vía húmeda en la que se realiza la totalidad de la mezcla antes de conducirse por la manguera a presión. Este último método, tiende a utilizarse en mayor proporción debido a que no genera partículas de agregados dispersos y la dosificación es conocida. Es importante mencionar algunas consideraciones relacionadas a esta técnica de colocación del concreto y del mortero, las

cuales se mencionan a continuación: el agregado debe tener un tamaño menor a 10 mm, se requiere mayores relaciones de agregado/cemento debido a que se genera un rebote que reduce esta relación (frecuentemente se usan relaciones de 4 para una vez se haya efectuado su colocación estas se encuentran en un rango de 2 a 3), el empleo de fibras de acero disminuye el rebote y mejora el desempeño mecánico del material colocado, si se requieren volúmenes significativos el material debe colocarse en diferentes capas con espesores menores a 25 mm, entre otras. (García-).

5.6 TRATAMIENTO DE LA PATOLOGÍA DE ABRASIÓN

La abrasión está directamente relacionada con la resistencia del concreto, por lo tanto, se debe garantizar una resistencia a la compresión adecuada bajo diferentes medios que sean posibles. Aplicar una graduación de agregado fino y agregado grueso óptima permitiendo así maximizar la trabajabilidad y minimizar el agua necesaria. Utilizar aditivos que reduzcan el contenido de agua, permitiendo así una mezcla dosificada que elimina la exudación. Realizar un curado en los 7 días próximos cuando es utilizado un cemento tipo I y un mayor tiempo si se utilizan cementos con desarrollo de resistencia retardado.

5.7 MÉTODOS PARA LA REHABILITACIÓN DE CARRETERAS.

Para hablar de métodos de rehabilitación de pavimentos, sea cual sea la metodología y los procesos escogidos (a excepción de la reconstrucción), siempre se debe tener la superficie a intervenir adecuada y debidamente preparada, sino se realizan estos tratamientos previos la nueva estructura podría reflejar los mismos problemas que se presentaban inicialmente o no cumplir con los requisitos normativos. Las actividades que en general constituyen esta fase de la rehabilitación, son el sellado de fisuras bien sea con materiales bituminosos, cementantes o epóxicas; también el parcheo y bacheo cuya principal diferencia radica en que el bacheo incluye la capa asfáltica y las capas granulares, mientras que el parcheo solo la capa granular, y se refieren a intervenciones en lugares puntuales de la estructura donde se evidencia deterioro, problemas de humedad, de materiales o de construcción; Por otro lado, el fresado es la molienda o la escarificación de la superficie del pavimento que se realiza con el motivo de retirar abultamientos, baches, excesos de material u otras imperfecciones que se podrían presentar en el perfil longitudinal o transversal de la estructura; por último cabe mencionar que los anteriores son los procedimientos usados normalmente, no quiere decir que no existan otras actividades que se puedan realizar y esto solo estará bajo el criterio del ingeniero a cargo y de las condiciones en las cuales se encuentre la estructura. Entrando en materia, los principales métodos para la rehabilitación son:

5.8 RESTAURACIÓN

Esta metodología interviene en específicos problemas funcionales de la estructura de pavimento asfáltico como por ejemplo impermeabilizar la superficie, mejorar la fricción superficial, sellar áreas fisuradas, reducir el ruido de rodadura o mejorar el aspecto de la calzada entre otras. En general, una intervención de restauración de un pavimento permite una mejora en la experiencia del usuario al transitar por la calzada. (INVIAS, 2008)

5.9 REFUERZO

Por lejos el método más usado en la rehabilitación de pavimentos, el refuerzo con una sobre capa provee una amplia gama de soluciones que vienen desde solventar patologías que se mencionaba anteriormente como irregularidades o imperfecciones en la capa de rodadura, como también llega a servir para aumentar la capacidad portante de la estructura aumentando así la carga que puede soportar, sin embargo es una metodología que se tiene que seleccionar con cuidado debido a que hay muchos factores que influyen directamente en su falla y es deber del ingeniero como diseñador prever estas situaciones y así proveer la mejor solución para el caso de estudio en específico. Las principales causas por las que una rehabilitación con una sobre capa de refuerzo no funciona son: la inadecuada selección de este método como tratamiento de rehabilitación, la mala escogencia del tipo de sobre capa, un espesor insuficiente de la sobre capa, fallas en el diseño o elaboración de la mezcla, deficiente preparación y reparación de las áreas previamente afectadas, la no consideración del fenómeno de reflexión de fisuras, malas prácticas en el proceso constructivo. (INVIAS, 2008)

5.10 RECICLADO

Es el nuevo uso que se le da a un material que ya cumplió con los objetivos establecidos en su diseño, el cual posterior a determinados tratamientos se puede reutilizar para construir una nueva capa bien sea en la misma carretera o en otra. Existen dos categorías principalmente, el reciclado en planta en caliente y el reciclado in situ, que comprende los procesos tanto de reciclado superficial en caliente como los reciclados en frío en el mismo lugar de la obra. La elección de una alternativa u otra dependerá más de las condiciones sociales, económicas y ambientales en las cuales se desarrolle el proyecto ya que en general no se evidencian beneficios mayores por parte de alguno de los métodos ya listados. (INVIAS, 2008)

5.11 RECONSTRUCCIÓN

Según lo estipulado en la Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras, la reconstrucción de una carretera se refiere a la remoción y el reemplazo parcial o total de la estructura de pavimento existente conservando la explanada y el alineamiento originales, dentro de todos los métodos considerados anteriormente es la opción que más energía requiere en la medida que se necesita mucha más mano de obra y maquinaria para realizar la intervención, solo se debe considerar cuando la estructura se encuentre agotada, no tiene índices de vida residual o un elevado deterioro superficial. (INVIAS, 2008)

6 DETERMINACIÓN PUENTE A ESTUDIAR

La infraestructura en Colombia es desarrollada o promovida por entidades estatales a nivel distrital, municipal o nacional. Para obtener información necesaria acerca del estado o intervenciones que se hayan realizado a puentes, se realizó la debida gestión frente al Instituto Nacional de Vías (INVIAS), para consultar información acerca de puentes de la red nacional de carreteras y al Instituto Distrital de desarrollo Urbano (IDU) para consultar información acerca de puentes en la ciudad de Bogotá. A continuación, se presenta un listado con puentes

seleccionados de la base de datos del Sistema electrónico para la contratación pública (SECOP I), los cuales podrán ser objeto de estudio para este trabajo:

6.1.1 PUENTES INVIAS

A continuación, se presenta un listado de los puentes candidatos, tomados de la base de datos del SECOP I, que fueron consultados en el INVIAS

| PUENTE | UBICACIÓN | ACTIVIDADES | INFORMACIÓN | ESTUDIOS POR CONTRATISTA | DETALLE DEL PROCESO |
|-------------------------------|--|---|---|--|-------------------------------------|
| PUENTE CARLOS LLERAS RESTREPO | PUERTO LÓPEZ-PUERTO GAITÁN | Limpieza y pintura de la estructura metálica, atención a la placa de piso, sello de fisuras, cambio de juntas de dilatación, fresado y reposición de la carpeta asfáltica y obras de protección hidráulica de las pilas | Grupo de Puentes de la Subdirección de la Red Nacional de Carreteras (SIPUCOL) | Levantamiento de los elementos de la superestructura, revisar y diseñar los refuerzos de los diferentes elementos estructurales. | LP-DO-SRN-046-2014 (Liquidado) |
| PUENTE LA LIBERTAD | Vía BARBOSA-TUNJA, Ubicado en Santander. | Demolición y construcción de losa en concreto reforzado, Reforzamiento estructural de la superestructura, Mantenimiento y pintura general de barandas metálicas, Señalización y demarcación. | Informe realizado en la actualización del SIPUCOL 2012 producto de los: ESTUDIOS DE INSPECCIÓN E INVENTARIO DE PUENTES DE LA RED NACIONAL DE CARRETERAS | Evaluación y diagnóstico de la estructura | LP-DO-SRN-015-2015 (Liquidado) |
| PUENTE PESCADERO | Carretera san gil-Bucaramanga | Demolición de estructuras en concreto reforzado, Excavaciones varias en material común seco, Excavaciones varias en material común bajo agua, Relleno para estructuras, Concreto clase G, Bolsacretos, Gaviones, Reposición de recubrimiento concreto (Incluye la limpieza superficial e imprimación con adherente epóxico Epotoc o similar, aplicación de capas de 1,0 cm de mortero acrílico de reparación Hardtop No. 0.2 sm o similar), Apoyo elastomérico, Pintura para baranda metálica, Geotextil y Señalización | Grupo de Puentes de la Subdirección de la Red Nacional de Carreteras (SIPUCOL) | Diagnóstico de los casos y cálculos estructurales de las obras que se requieran para garantizar estabilidad de la estructura del puente. | LP-SGT-SRN-PRE-012-2013 (Liquidado) |

Tabla 2 Lista de Posibles Puentes de INVIAS a considerar

En la entidad INVÍAS existe una base de datos denominada SIPUCOL (Sistema de administración de puentes de Colombia.), en donde se encuentra información referente a los puentes de la red nacional de carreteras. Consultando esta fuente, se encontró el diagnóstico

de algunos puentes ubicados en diferentes departamentos de Colombia, algunos de estos fueron seleccionados como candidatos debido a que presentaban diferentes patologías como deterioró de la superficie de rodadura, acero expuesto en elementos estructurales, entre otras. Los datos de dichos puentes se muestran en la Tabla 3 y al igual que los puentes nombrados en la Tabla 2, se solicitó información ante el INVIAS.

| SDC/INV o código de Informe SIPUCOL | Nombre del puente | Regional | RUTA | Carretera | No del registro Sipucol |
|-------------------------------------|-------------------|--------------|--|---|-------------------------|
| 04-6209-044.00 | La libertad | 4- Boyacá | Turbo-Orocué | Barbosa -Tunja | 10044 |
| 04-5503-001.00 | Chiticuy | 4- Boyacá | Santafé de Bogotá-Puerto Santander | Duitama-La Palmera | 333 |
| 08-1203-002.00 | Los Rastrojos | 08-Cauca | 1203-La Lupa-Santiago-Bolívar | La Lupa-Santiago-Bolívar | 5573 |
| 08-1203-004.00 | El Pepinal | 08-Cauca | 1203-La Lupa-Santiago-Bolívar | La Lupa-Santiago-Bolívar | 5564 |
| 08-1203-005.00 | Quebrada el Rodeo | 08-Cauca | | La Lupa-Bolívar-Santiago | 5563 |
| 20-2901B-004.00 | San Felipe | 20-Quindío | 2901b Armenia-Montenegro-Quimbaya-Alcalá | Armenia-Montenegro-Quimbaya-Alcalá | |
| 13-4902-002.00 | El Marquesote | 13-Guajira | | La Paz-San Juan del Cesar-Buenavista-Tomarrazón | 8801 |
| 20-4003-003.00 | La María | 20-Quindío | 4003 Armenia-Ibagué | Armenia-Ibagué | |
| 21-2507-005.00 | Tusas | 21-Risaralda | 2507-Cerritos-Cauya | Cerritos-Cauya | |

Tabla 3. Lista de Posibles Puentes a partir de Información Recopilada en el SIPUCOL

6.1.2 PUENTES IDU

A continuación, se presenta un listado de los puentes candidatos, tomados de la base de datos del SECOP I, que fueron consultados en el IDU.

| ENTIDAD: | IDU | PROCESO: | IDU-LP-SGI-017-2021 (Adjudicado) | | |
|--|---------|----------|--|---|--|
| PUENTE | ENTIDAD | ESTADO | PATOLOGÍA | CONCLUSIÓN | ACTIVIDADES |
| AV. CARRERA 28 POR AV. CIUDAD DE QUITO | IDU | BUENO | Suciedad, Material orgánico, rastros de humedad, fisuras sobre las columnas y estribos debidas a corrosión del acero de refuerzo producto de la carbonatación, fisuras por cortante en las vigas (no son indicio de falla estructural), daños por pérdida de material con aceros a la vista. | Buena calidad del concreto, algunos problemas localizados de aceros a la vista y corrosión del acero de refuerzo, no hay deflexiones ni fisuras que denoten fallas estructurales, no hay asentamientos. | Reparación y reemplazo de Juntas • Reparación de Anclajes y resanes. • Retiro de Material vegetal • Mantenimiento Rutinario, Sellado, Pintura. • Limpieza por hidrolavado • Instalación de Junta elástica expansiva. • Anclajes con gel epóxico. • Aplicación de mortero de reparación • Concreto de baja retracción para reparación y resanes |

| ENTIDAD: | IDU | PROCESO: | IDU-LP-SGI-017-2021 (Adjudicado) | | |
|--|---------|---|---|------------|--|
| PUENTE | ENTIDAD | ESTADO | PATOLOGÍA | CONCLUSIÓN | ACTIVIDADES |
| AV. SAN FRANCISCO DE MIRANDA POR AV. CIUDAD DE QUITO | IDU | Buenas condiciones de estabilidad, pero hay lesiones que afectan su durabilidad, además debe actualizarse a la normativa. | Fisuras de manera vertical sobre la zona inferior de las pilas posiblemente por contaminación de origen biológico sobre el concreto a nivel inferior, es posible que existan procesos de corrosión en esas zonas. Además, se evidencia Fisuración sobre la viga cajón característicos de esfuerzos cortantes c, lo que a su vez permite el ingreso de agentes agresivos del ambiente que disminuyen la durabilidad de la estructura, por cuanto se recomienda su inyección y actualización a normativa vigente. | | Reparación de las grietas. • Limpieza por hidro lavado. • Reparación de anclajes. • Remoción de escombros e Hidro lavado. • Reparación de soldadura. • Mantenimiento limpieza de material contaminante • Concreto de baja retracción para reparación • Reparación de fisuras y Pintura • Anclajes con gel epóxico • Aplicación de recubrimiento de tipo cementicio |
| AVENIDA CIUDAD DE QUITO POR AVENIDA PASEO DE LOS LIBERTADORES | IDU | Actualización por normativa y restauración | Corrosión del acero de refuerzo, en la zona superior de una de las pilas, debida principalmente a filtraciones desde la junta, aunque la pérdida de sección en muy baja. Pérdida de carpeta de rodadura con lesiones tipo "ojo de pescado". Reemplazar juntas de dilatación. | | • Limpieza por hidro lavado • Instalación de Junta elástica. • Recubrimientos de tipo cementicio • Reparación de fisuras y Pintura. |
| AV. ALEJANDRO OBREGÓN (AV. CALLE 92) POR AV. PASEO DE LOS LIBERTADORES (CURVO) | IDU | No se observan lesiones que puedan afectar su estabilidad, pero si algunas que afecta su durabilidad, requiere su actualización a los requerimientos de la normativa vigente, y la rehabilitación | Daños en la carpeta asfáltica en la curva de conexión sobre la carrera 30, con grietas tipo piel de cocodrilo sobre la carpeta, desgaste y exposición del agregado grueso de la carpeta. | | Reparación y reemplazo de Juntas • Limpieza por hidrolavado |

| ENTIDAD: | IDU | PROCESO: | IDU-LP-SGI-017-2021 (Adjudicado) | | |
|---|---------|--|--|---|--|
| PUENTE | ENTIDAD | ESTADO | PATOLOGÍA | CONCLUSIÓN | ACTIVIDADES |
| | | n para prolongar la vida útil de los materiales constitutivos. | | | |
| AV. RODRIGO LARA BONILLA (AV. CALLE 127) POR AV. PASEO DE LOS LIBERTADORES. | IDU | No se observan lesiones que puedan afectar su estabilidad, pero si algunas que afectan su durabilidad, está cumpliendo sus funciones adecuadamente, pero requiere su actualización a los requerimientos de la normativa vigente, y la rehabilitación para prolongar la vida útil de los materiales constitutivos | Proceso de corrosión del acero de refuerzo en la zona inferior de algunas de las pilas, la expansión del acero ha generado esfuerzos de tracción interna sobre el concreto generando desprendimiento del concreto y grietas sobre el elemento. Las vigas exteriores sobre la calzada mixta, presentan desprendimientos de concreto por colisiones, no se observa acero expuesto. | Realizar una limpieza general con chorro agua a presión y la aplicación de un recubrimiento acrílico sobre las vigas y la placa y, un recubrimiento de tipo cementicio sobre los estribos para proteger y elevar la durabilidad de estos elementos. | <ul style="list-style-type: none"> • Limpieza por hidrolavado • Instalación de Junta elástica • Instalación de anclajes con gel epóxico • Aplicación de mortero de reparación • Aplicación de pintura y recubrimiento acrílico • Limpieza de material contaminante • Reparación con concreto de baja retracción • Reparación de Andenes • Instalación de anclajes • Limpieza de Biocapas |

Tabla 4 Lista de Posibles puentes del IDU a evaluar

6.2 SELECCIÓN DEL PUENTE

La información descrita en el numeral (4) fue utilizada para seleccionar el puente a rehabilitar. Sin embargo, esta no es suficiente para justificar una rehabilitación con concretos avanzados. Una vez analizada la información preliminar y pública dispuesta en el sistema (SICUCOL), se determinó que se debe priorizar el puente La Libertad, debido a las patologías expuestas en el diagnóstico analizado y que pueden ser tratadas utilizando concretos avanzados, a continuación, se presentan las patologías expuestas el informe mencionado, las cuales fueron registrados por medio de una visita realizada en el 2012: (SiPuCol, 2012)

- Superficie del puente: la superficie del puente se encuentra desgastada, con fisuras transversales, pérdida del material en algunas zonas y, agregado y acero expuesto.



Figura 17 Superficie del Puente la Libertad (SiPuCol, 2012)

- Estribos: el estribo #1 presenta acero expuesto en la parte inferior izquierda y una fisura vertical en toda la altura del estribo de 0.20mm de espesor. El estribo #2 presenta una fisura vertical que va desde la zona de apoyos hacia la parte inferior, con una longitud de 1.30m y un espesor de 0.10mm. También se observa una zona de 1.00m² con pérdida del concreto y acero expuesto ya con corrosión. Debido al espesor de las fisuras no es posible inyectarlas, por lo que se recomienda hacer un seguimiento. Se debe realizar limpieza y mantenimiento rutinario. Daño en concreto. / acero expuesto.



Figura 18 Estribo #2 Puente La Libertad. (SiPuCol, 2012)



Figura 19 Estribo #1 Puente La Libertad (SiPuCol, 2012)

- Losa: en la losa de los voladizos se observan manchas de humedad debido al escurrimiento de agua de la superficie, adicionalmente presenta fisuras transversales. Entre las vigas 1 y 2, 2 y 3, 3 y 4 de la luz #3 se observan zonas con pérdida del concreto y acero expuesto, además se presentan fisuras en forma de malla. Se debe realizar limpieza y mantenimiento rutinario. Debido al espesor de las fisuras no es posible inyectarlas, por lo que se recomienda hacer un seguimiento. Daño en concreto. / acero expuesto



Figura 20 Losa Puente la Libertad. (SiPuCol, 2012)

- Vigas/Largueros/Diafragmas: las vigas de la luz #3 se encuentran deterioradas, algunas presentan zonas con pérdida del concreto y acero expuesto. Se debe reparar el concreto del arco #2, el cual presenta pérdida del concreto con acero expuesto en una pequeña área en la parte inferior. Se debe realizar limpieza y mantenimiento rutinario. Daño en concreto. / acero expuesto.



Figura 21 Vigas/Largueros/Diafragmas Puente la Libertad. (SiPuCol, 2012)

En la información recibida por la entidad INVIAS se da a conocer una nueva visita de campo (2014) en la que se realizó una inspección con mayor exhaustividad, en esta se encontró que el puente La Libertad requería con mayor urgencia de la pensaba un proceso de rehabilitación.

- Losa: presenta un alto grado de deterioro y en la cual se han hecho ya varias reparaciones puntuales, estas presentan fisuras y grietas, así mismo la losa presentó alto desgaste superficial y grietas que en cualquier momento pueden ocasionar huecos en la losa.
- Juntas: presentan daños generales ocasionados por la desintegración del concreto adyacente de la junta donde estas se encuentran ancladas, así como el desprendimiento de las partes metálicas de las mismas.
- Estribos: como se había mencionado antes, se realizaron exploraciones que expusieron el acero y en esta nueva visita se encontró que los huecos de exploración no fueron rellanados con mortero, por lo que el acero presenta corrosión y pérdida de sección al estar expuesto a los agentes atmosféricos. Así mismo, los cajones de los arcos se encuentran cubiertos, por lo que al presentarse crecientes se acumula agua dentro de éstos aumentando la carga muerta sobre la estructura y estos presentan grietas internas.

- Vigas: presentan pérdida de concreto, tal vez por la exploración realizada anteriormente y no cubierta provocando corrosión en el acero y pérdida de sección del mismo.
- Puentes peatonales: en el margen de izquierda presenta vibración excesiva lo que produce sensación de inseguridad a los usuarios que a diario lo utilizan, así mismo ya generó desprendimiento del concreto en el apoyo. En el margen de la derecha del río lo que puede poner en riesgo de colapso la estructura, así mismo el puente requiere de mantenimiento de sus barandas.

7 PUENTE LA LIBERTAD

El puente la Libertad es un puente vehicular construido en concreto reforzado, tiene un ancho total de 10.30 m, una longitud de 70.15 m y un galibo de 9.20 m; consta de una losa, 4 vigas de sección rectangular y 4 arcos articulados en sus bases. Paralelo a este puente fue construido un puente peatonal, el cual está conformado por una viga cajón metálica, se encuentra simplemente apoyada sobre los estribos y pilas intermedias de concreto reforzado.

La estructura del puente consta de 3 luces con longitudes variables, la primera luz tiene una longitud de 5 m, una luz principal de 52.1 m apoyada en 4 arcos de concreto reforzado, por último, se tiene una luz de 10.35m (véase Figura 22). Por otra parte, la losa del puente tiene una altura en el centro de la luz de 19 cm y un espesor variable en el voladizo de 15 a 24 cm.

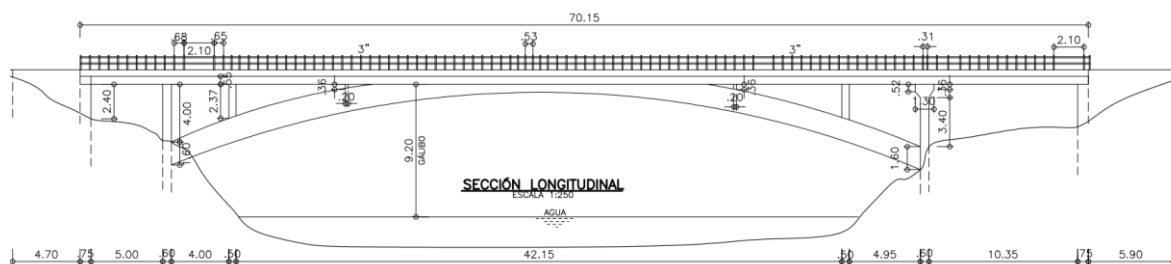


Figura 22. Sección Longitudinal del Puente la Libertad.

La sección transversal del puente se muestra en la Figura 23.

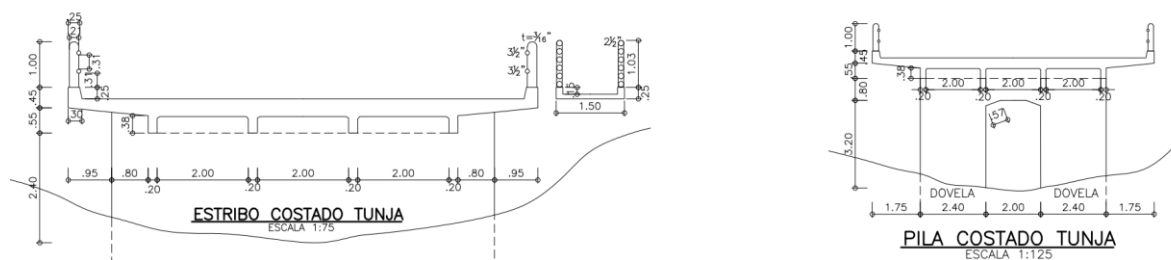


Figura 23. Sección Transversal del Puente la Libertad.

7.1 Materiales

Según datos recopilados de los planos de una intervención realizada a la estructura en la que se amplió la losa y se modificó los voladizos, se encontró que, el concreto existente del puente tiene una resistencia a la compresión ($f'c$) de 21 MPa. La resistencia fue verificada a partir de ensayos de laboratorio realizados en núcleos de concreto extraídos, en los cuales se obtuvo como resultado que la resistencia a la compresión de la placa central en promedio es de 22.5 MPa y en el voladizo de 38.8 MPa.

Por otra parte, se dedujo que el refuerzo corresponde a acero liso grado 36, cuya resistencia a la fluencia es de 2400 kg/cm². El refuerzo transversal de la placa, corresponde a barras de ½" de diámetro separadas cada 20 cm y un refuerzo transversal con barras 3/8" de diámetro, las cuales tienen una separación de 20 cm.

8 PROVEEDORES CONSULTADOS

La información requerida para el planteamiento de la alternativa de rehabilitación fue consultada con los proveedores de materiales y suministros y equipos de construcción de obras que operan en el territorio nacional de Colombia. Estos son: Toxement, Sika, Argos, Sten.

9 APLICACIONES DE CONCRETO UHPC PARA REFORZAR LOSAS DE PUENTES

EL UHPC ha sido utilizado como metodología de rehabilitación de elementos estructurales de puentes en múltiples ocasiones, permitiendo así la modernización y proliferación de empresas especializadas en este tipo de rehabilitaciones, como es el caso de la contratista norteamericana UHPC Solutions, esta empresa se ha dedicado a la rehabilitación de infraestructura con UHPC, especialmente de puentes, además han construido equipos especializados en la implementación de UHPC. Con objeto de realizar una justificación del UHPC como capa de rodadura y reconstrucción de la losa del Puente La Libertad, a continuación, se expondrán diferentes proyectos de rehabilitación de losa y capa de rodadura en puentes:

9.1 Puente conmemorativo de Delaware (DMB)

El Delaware Memorial Bridge (DMB) es un puente colgante de acero gemelo con una longitud de 3281m y un espacio libre por debajo de 53.035m. El puente posee un tráfico medio diario de 80.000 vehículos y es un enlace de transporte crucial en el noroeste de los Estados Unidos que conecta los estados de Delaware y Nueva Jersey. El DMB es la estructura vehicular fija más al sur sobre el río Delaware, después de 60 años de servicio continuo, una evaluación de la "condición de la plataforma" de la estructura en dirección norte determinó que la rehabilitación adecuada de la plataforma existente mejoraría significativamente la vida útil del puente. Se consideró varias opciones de reparación, como el reemplazo completo de la plataforma, superposiciones de UHPC u otros materiales de superposición tradicionales, como el hormigón modificado con látex (LMC) o el hormigón de polímero epoxi (EPC).

Un análisis del costo del ciclo de vida de las diversas técnicas de reparación que comparó los costos de construcción iniciales con los costos del ciclo de vida a largo plazo concluyó que los beneficios de una superposición de UHPC superaban las reparaciones de superposición tradicionales o un reemplazo completo de la plataforma. El estado del tablero existente, con una delaminación y deterioro combinados de aproximadamente un 25%. Se decidió realizar un proyecto piloto para validar técnicas de instalación de la industria y métodos de construcción, incluida la gestión del control del tráfico y la capacidad de conducción de una superposición de UHPC. Se realizó un proyecto piloto UHPC en dos de los cuatro carriles en dos secciones diferentes del puente en dirección norte y los cuatro carriles en una tercera sección. Esto abarcó áreas en la plataforma del puente que representan los tramos de suspensión, armadura y viga. Usando dos plantas móviles de dosificación en el sitio y una pavimentadora de UHPC Thin Lift, el equipo del proyecto pudo demostrar que se pueden instalar 82.3m de UHPC con un ancho de 7.82m y una profundidad de hasta 10.16cm en un turno de ocho horas. Esta pavimentadora de elevación delgada autopropulsada recientemente desarrollada es capaz de pavimentar pendientes pronunciadas y carriles con coronas de hasta 9.14m de ancho. Sus rangos de frecuencia de vibración variables y monitorizados aseguran una correcta consolidación de UHPC incluso con pendientes superiores al 10%. Para lograr una gran manejabilidad y suavidad, la superficie UHPC terminada se esmeriló y acanaló con diamante. En total, hasta la fecha, este tiempo de instalación eficiente es un nuevo récord para la industria de UHPC de EEUU. Los comentarios y las experiencias colectivas de todos los miembros del equipo del proyecto fortalecieron la confianza de que este proyecto piloto puede ampliarse fácilmente para una preservación a gran escala exitosa e incluso más económica de la cubierta de la estructura en dirección norte en los próximos años.

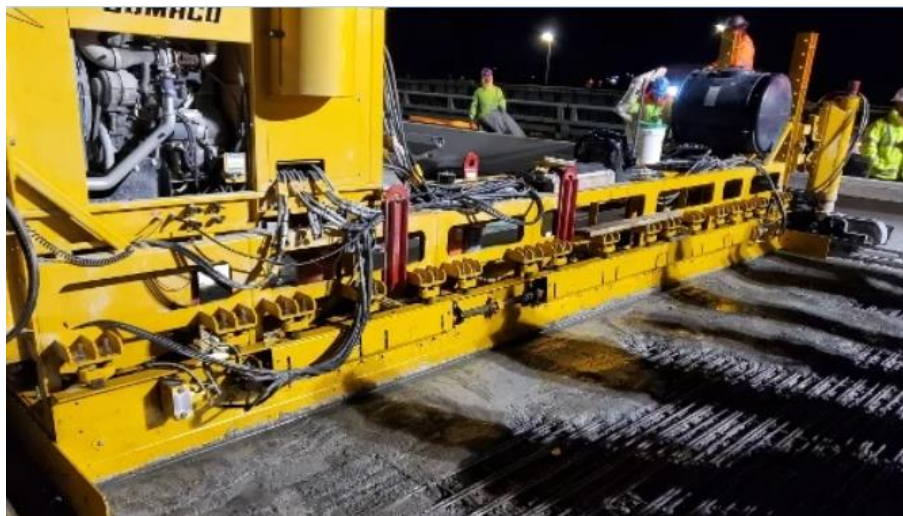


Figura 24 Pavimentadora de UHPC Thin Lift usada en el DMB. (UHPC Solutions North America, 2022)



Figura 25 Superficie de capa de rodadura DMB. (UHPC Solutions North America, 2022)

9.2 Bruckner Expressway sobre St. Ann's Aveniu

La Autopista Bruckner es una autopista de 11265.4m de largo en el distrito del Bronx en la ciudad de Nueva York que pasa por las carreteras interestatales I-278 e I-95 y conecta varias autopistas importantes, incluidas Bronx River Parkway, Cross Bronx Expressway, Whitestone Expressway y la ruta verde del río Hutchinson. Su tráfico diario promedio anual (AADT) es de 115,000 vehículos por día en la sección I-278 de seis carriles y aproximadamente 155,000 vehículos por día en la sección I-95 de ocho carriles. Para prolongar la vida útil de la Autopista y reducir la necesidad de futuros proyectos de mantenimiento, el Departamento de Transporte de Nueva York (NYSDOT) otorgó un proyecto de \$204 millones para rehabilitar una sección de 804.67m de la Autopista Bruckner, 6 rampas de conexión entre East 141st Street, el cruce con Major Deegan Expressway y el puente Robert F. Kennedy en el Bronx.

Durante la escarificación de la plataforma en agosto de 2020, el NYDOT notó un gran vacío debajo de la losa de acceso y vigas en T dañadas con una capacidad estructural reducida. Esto se debió a un desprendimiento accidental en la rampa que cruza St. Ann's Avenue. Estos hallazgos inesperados requirieron un método de reparación rápido para abordar y restaurar la integridad estructural de las vigas en T dañadas, mientras el tráfico permanecía abierto con carriles reducidos. Se determinó que un método de reparación tradicional con una nueva capa de barras de refuerzo para la continuidad estructural requería demasiado tiempo y era demasiado complejo. El método elegido para restaurar la integridad estructural de las vigas en T dañadas de la rampa de St. Ann's Avenue fue una reparación de emergencia de superposición de ultra alto rendimiento.

Se produjeron e instalaron 10.70m³ de UHPC en 9 días usando dos etapas. Un carril de tráfico siempre tenía que permanecer abierto durante la construcción para garantizar un flujo continuo. La superficie del concreto existente ya estaba preparada y escarificada del proyecto de reparación programado originalmente. Antes de colocar el material UHPC, la superficie de concreto existente se humedeció para lograr una condición de superficie seca saturada

(SSD). Dado que este puente solo consta de dos carriles con tráfico de movimiento rápido, el material de recubrimiento UHPC se combinó con dos mezcladores de alto cizallamiento debajo del puente. El material de recubrimiento de UHPC recién mezclado con un 3,25 % de fibras de acero se elevó por medio de una cubeta de hormigón con una grúa móvil hasta la parte superior de la plataforma del puente, donde se transportó al equipo de enrasado neumático con buggies móviles. Se instaló una superposición de UHPC de 5.08cm con el equipo de enrasado neumático debido al acceso estrecho y angosto del sitio de construcción. Para evitar cualquier deshidratación o posible agrietamiento por contracción de la superposición de UHPC recién pavimentada, se aplicaron compuestos de curado y lonas de plástico. Después de dos días de curado, el revestimiento de UHPC alcanzó la resistencia mínima requerida de 96.52MPa para permitir el esmerilado y ranurado de la superficie. El tráfico se invirtió en la superposición de UHPC recién instalada para la instalación de la segunda etapa, que se completó dentro de los cuatro días posteriores a la instalación de la superposición de la tapa uno. Finalmente, la superficie superpuesta de la segunda etapa se esmeriló con diamante y se acanaló para cumplir con los requisitos de suavidad y micro textura de la superficie de la carretera.



Figura 26 Exposición de acero en Brucke Expressway sobre St. Ann's Avenue. (UHPC Solutions North America, 2022)



Figura 27 Regla vibradora utilizada en Brucke Expressway sobre St. Ann's Avenue. (UHPC Solutions North America, 2022)

9.3 NJ159 WB sobre río Passaic

El departamento de transporte de nueva Jersey (NJDOT) decidió realizar un proyecto de investigación de superposición de UHPC en 2020 para comprender mejor el uso del material, las técnicas de instalación, los métodos de construcción y el rendimiento. El puente NJ 159 WB sobre el río Passaic fue una de las tres estructuras de puente que se rehabilitarán como parte del Contrato A (Norte) del proyecto de investigación de superposición UHPC por parte del NJDOT. Este puente recto de 4 tramos, que consta de vigas en I de concreto pretensado y una plataforma de concreto armado, se construyó originalmente en 1939 y tiene capacidad para unos 11 700 vehículos por día (ADT) que cruzan el río Passaic. El impacto de los camiones y las sales de deshielo ha provocado el deterioro del tablero del puente existente. Dado que la estructura restante todavía estaba en buenas condiciones, una superposición de UHPC expuesta fue la solución de conservación ideal para respaldar la vida útil mejorada y evitar futuras reparaciones de mantenimiento.

Se seleccionó una superposición de UHPC expuesta de 6.99cm para instalarla en dos fases mientras se mantenía el tráfico en un carril reducido. La superposición de UHPC se instaló con equipos de pavimentación de UHPC Thin Lift diseñados específicamente para el mercado de conservación de puentes de América del Norte. Se instaló un total de 53.44m³ de UHPC en dos tapas en octubre de 2020. Después de retirar la capa de asfalto de 6.99cm existente, se escarificó aproximadamente 1.27cm de la plataforma de concreto existente mediante hidro demolición. Se sabe que esta técnica de preparación de la superficie del hormigón proporciona una adherencia superior del UHPC al hormigón existente. Antes de instalar la superposición de UHPC, la superficie de concreto existente se humedeció para lograr una condición de superficie seca saturada (SSD).

Se mezcló in situ un material UHPC tixotrópico con un 3,25 % de fibras de acero mediante dos mezcladoras de alto cizallamiento y se transportó en buggies hasta el equipo de pavimentación Thin Lift. Cada tapa requirió aproximadamente 27.52m³ de UHPC y se instaló fácilmente en 6 horas. En promedio, la superposición de UHPC tenía un espesor de

6.99cm con una pendiente del 2 % y una pendiente transversal de hasta el 4 %. Para evitar cualquier deshidratación o posible agrietamiento por contracción de la superposición de UHPC recién pavimentada, se aplicó un compuesto de curado y una lona de plástico. Después de dos días de curado, la superposición de UHPC alcanzó la resistencia mínima requerida de 82.73 MPa. Esta resistencia mínima fue necesaria para permitir la transición del tráfico al UHPC recién instalado para la Fase 2 del proyecto, así como para comenzar el esmerilado y ranurado con diamante de todo el revestimiento de UHPC después de completar la Fase 2. Esmerilado y ranurado con diamante del revestimiento de UHPC proporciona una superficie de rodadura con una textura muy suave que es muy similar a una plataforma de hormigón recién construida. En total, Preservar la plataforma del puente NJ 159 WB con una capa de UHPC expuesta proporcionará al NDOT una plataforma de puente duradera que podría extender la vida útil de esta estructura por otros 50 años.



Figura 28 Puente NJ 159 WB sobre río Passaic.



Figura 29 Capa de rodadura del Puente NJ159 WB sobre el río Passaic

9.4 VIADUCTO CHILLON

El viaducto Chillon está localizado en Suiza, tiene una longitud de 2120 m de largo, comunica por carretera la costa de los lagos de Ginebra con las montañas Cantón de Wallis, su construcción se remonta a finales de los años 1960 y en 1969 fue abierto al tráfico, está compuesto por dos puentes paralelos de concreto reforzado (cada uno en una dirección) los cuales diariamente están sometidos a un flujo de aproximadamente 50.000 vehículos. Debido a reacciones álcali-agregado y en consecuencia a la posible reducción de la resistencia del concreto existente que podría presentarse, las losas de los puentes fueron reforzadas con la colocación de una capa de 40 mm de espesor construida en concreto de ultra alto desempeño reforzado con fibras y con barras de acero(UHPFRC-R), siendo esta la técnica más eficiente debido a que se protege el concreto existente del ingreso de agua y se incrementan la resistencia última y rigidez de la losa, así mismo esta técnica resulta efectiva en términos de costos de construcción y de costos de usuario al reducir el tiempo requerido para la reparación. A pesar de que la reacción álcali-agregado se encontraba en etapa temprana fue necesario implementar esta intervención pues con el paso del tiempo este tipo de daños reduce la resistencia del concreto a compresión, lo cual afecta el desempeño de la estructura para resistir cargas de servicio futuras y disminuye el nivel de seguridad ante estados límites últimos (Brühwiler, y otros, 2015).

La selección de esta tecnología de concreto se debe a su baja permeabilidad que ofrece protección a la losa contra el agua, disminuyendo así la tasa de reacción álcali-agregado. Adicionalmente, gracias a las excelentes propiedades del UHPFRC su implementación proporciona un refuerzo de tracción externo a la losa, incrementa la resistencia a flexión y cortante, y extiende su vida útil a la fatiga. Finalmente, esta técnica de rehabilitación incrementa la eficiencia en términos de duración y costo, trayendo innumerables beneficios con su implementación (Brühwiler, y otros, 2015).

9.4.1 REFORZAMIENTO DE LOSAS DE CONCRETO CON UHPFRC

El UHPFRC es usado para reforzamiento de estructuras sometidas a condiciones ambientales severas como ambientes marinos y a solicitaciones altas de cargas mecánicas; aplicaciones que permiten explotar sus sobresalientes propiedades en términos de durabilidad y resistencia. Lo anterior, conduce a elementos estructurales compuestos en donde se combina concreto reforzado convencional con UHPFRC, así mismo, en muchas ocasiones resulta necesario que adicional al UHPFRC se deban incorporar barras de acero de refuerzo, con lo que se consigue aumentar la rigidez y eficiencia estructural de los elementos manteniendo secciones compactas, un esquema de esta propuesta se muestra en la Figura 30 (Brühwiler, y otros, 2015).

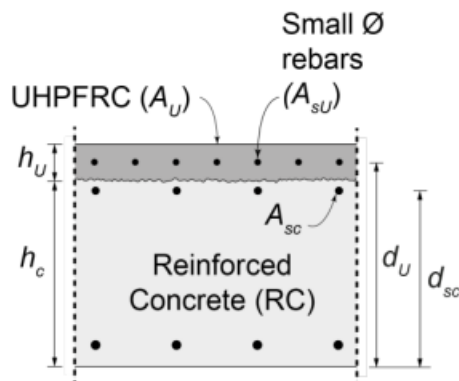


Figura 30. Secciones de elementos estructurales compuestas, como resultado de procesos de rehabilitación con UHPFRC.

La combinación de estos dos materiales para la rehabilitación del viaducto Chillón es producto de extensas investigaciones y actividades desarrollados en Suiza en los últimos 15 años, incluidas numerosas aplicaciones de menor tamaño, en las que a partir de ensayos en elementos compuestos a gran escala se ha buscado determinar el comportamiento estructural de secciones de vigas y losas conformadas por concreto reforzado y UHPFRC-R, desarrollando modelos analíticos los cuales permiten calcular la resistencia a la flexión, cortante, entre otros. Estos modelos analíticos fueron empleados para diseñar el reforzamiento en el Viaducto Chillón, partiendo de que las deformaciones son compatibles en la sección compuesta, por ende, el UHPFRC-R alcanza su máxima resistencia a tensión cuando las barras de acero están en fluencia y el UHPFRC ha finalizado su fase de endurecimiento por deformación (Brühwiler, y otros, 2015).

El UHPFRC empleado en la rehabilitación del Viaducto Chillón presenta la curva esfuerzo deformación que se muestra en la Figura 31.

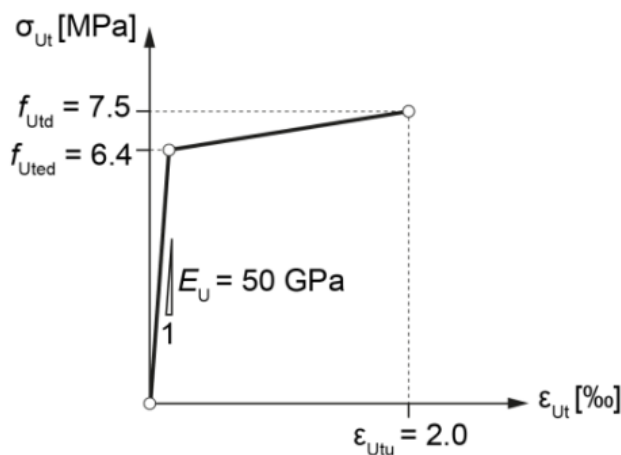


Figura 31. Comportamiento a Tensión del UHPFRC (Brühwiler, y otros, 2015).

La sección resultante del proceso de rehabilitación al que fue sometido el viaducto Chillón se muestran en la Figura 32, el espesor total de la losa es de 180 mm, la cual mantiene el

reforzamiento transversal realizado en su construcción y que consiste en barras de acero de 16 mm de diámetro, espaciadas cada 125 mm y localizadas a 152 mm desde la cara inferior del concreto. Con la intervención, se tiene una capa en UHPFRC con un espesor de 40 mm, reforzada transversalmente con barras de acero de diámetro de 12 mm, espaciadas cada 125 mm y con un recubrimiento del refuerzo de 16 mm medido desde la cara superior de la losa hasta el centro de las barras (Brühwiler, y otros, 2015).

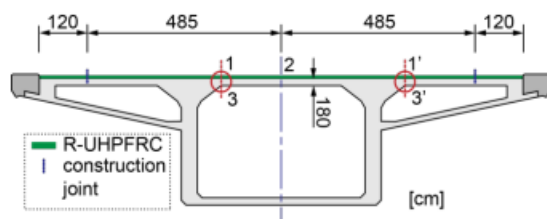


Figura 32. Corte Transversal del Viaductos Chillón, Sistema de Losa (Brühwiler, y otros, 2015).

Como medida adicional en el reforzamiento de la losa se colocó refuerzo longitudinal, situación que aumentó el espesor de capa de UHPFRC a 50 mm. Esta condición de refuerzo fue aplicada a cada lado de las pilas extendiéndose una longitud igual a 1/8 del vano, las demás zonas fueron reforzados como se indicó inicialmente (Brühwiler, y otros, 2015).

9.4.2 RESISTENCIA A LA FLEXIÓN EN ESTADO LIMITE ÚLTIMO

La resistencia a flexión transversal de la losa de sección compuesta fue calculada realizando un análisis de sección plana mostrado en Figura 33 (a). Este planteamiento, se realiza partiendo de un comportamiento monolítico cuando la sección alcanza la resistencia máxima a flexión (Brühwiler, y otros, 2015).

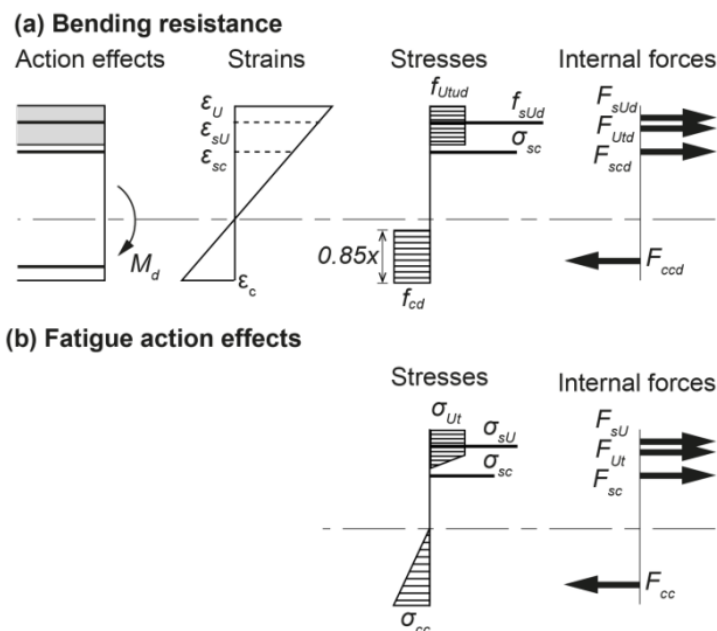


Figura 33. Análisis de Sección Plana. a) Resistencia a Flexión a momento negativo, b) Efectos de Acción de fatiga. (Brühwiler, y otros, 2015).

En la rehabilitación del viaducto Chillon, la superficie del concreto existente fue preparada mediante chorro de agua a alta presión y fue humectada antes de vaciar la capa de UHPFRC, lo anterior debido a que se tiene evidencia experimental que ha mostrado que superficies sometidas a una buena preparación previo a la colocación del UHPFRC presentan buen comportamiento cuando son sometidas a flexión pura y, no producen desvinculación entre la sección de hormigón y la capa de UHPFRC (Brühwiler, y otros, 2015).

9.4.3 RESISTENCIA A CORTANTE EN ESTADO LIMITE ÚLTIMO

Al colocar la capa de UHPFRC se tiene como efecto el retraso de la aparición de las grietas inclinadas que se producen como consecuencia de sobreesfuerzos por cortante en la sección de hormigón. Así mismo, para muchas configuraciones geométricas, la capa de UHPFRC modifica el modo de falla de cortante por deformación a un modo de falla de flexión dúctil, y los casos donde se conserva el modo de falla de cortante corresponde a configuraciones muy específicas (Brühwiler, y otros, 2015).

El cálculo de la resistencia a cortante para los viaductos Chillon fue hecho a partir de la contribución del concreto reforzado y el UHPFRC-R, en donde el aporte del UHPFRC está dado por una función de su resistencia a flexión en doble curvatura a lo largo de la zona conocida como fisura intermedia inducida por desvinculación o ICD (por sus siglas en inglés) y, la contribución del concreto reforzado depende de su resistencia a compresión y el ángulo de inclinación de la fisura por cortante. Del análisis realizado para la rehabilitación, encontraron que el UHPFRC aporta un 33% de la resistencia a cortante total de la sección compuesta. Por otra parte, obtuvieron que con la colocación de la capa de UHPFRC se incrementó un 20% la resistencia a cortante comparada con la sección sin reparar (nuevamente asumiendo en el análisis de la sección propuesta una reducción de la resistencia a compresión del concreto reforzado del 50% como consecuencia de la reacción álcali-agregado) (Brühwiler, y otros, 2015).

9.4.4 RESISTENCIA A LA FATIGA

Esta verificación es realizada para garantizar que las tensiones en los materiales debido a la fatiga sean menores al límite de resistencia. Para el caso de la sección compuesta utilizada en la rehabilitación del viaducto Chillon, tuvo que verificarse que el UHPFRC y las barras de acero no sobrepasan el límite de fatiga a tensión y que, por su parte, el concreto no exceda los límites de fatiga en compresión. Así mismo, en el análisis de rehabilitación se planteó que las tensiones en la losa producidas por fatiga permanecen elásticas (véase Figura 33 (b)). En específico, para el caso de estudio encontraron que la tensión máxima en el hormigón debido a la acción de fatiga está por debajo del límite de fatiga en compresión, lo anterior asumiendo un 50% menos en la resistencia del hormigón a causa de la reacción álcali-agregado (Brühwiler, y otros, 2015).

9.4.5 VALIDACIÓN EMPLEANDO ANÁLISIS NUMÉRICOS Y ENSAYOS

El diseño de la losa reforzada con UHPFRC-R en el Viaductos Chillon fue revisado empleando Análisis de Elementos Finitos No-lineales (NLFEA por sus siglas en inglés) y con campañas experimentales. Por una parte, se empleó NLFEA para determinar el estado

de los esfuerzos a tensión en el UHPFRC debido a los efectos dependientes del tiempo a una edad temprana, los cuales son producidos por el calor de hidratación del cemento, deformaciones generadas por pérdida de humedad y retracción del concreto (Shrinkage) y, deformaciones por fluencia bajo carga axial permanente (Creep). Los esfuerzos de tensión se acumulan en el sistema monolítico debido a las limitaciones en la deformación de la capa de UHPFRC-R y el concreto reforzado, este incremento se presenta hasta aproximadamente 80 días cuando los efectos por creep son representativos y reducen estas tensiones incorporadas (Brühwiler, y otros, 2015).

Un segundo uso del Análisis de Elementos Finitos No-lineales estuvo enfocado en determinar las deformaciones en la losa reforzada como consecuencia de la concentración de altas cargas en las ruedas. Con este estudio se determinó los requerimientos a tensión de UHPFRC y se verificó el comportamiento estructural de la losa reforzada (Brühwiler, y otros, 2015). Adicional a los análisis numéricos mencionados, se realizaron experimentos en los elementos representativos de la losa del Viaducto Chillón, con los cuales se confirmó el incremento en la resistencia última de la losa reforzada (Brühwiler, y otros, 2015).

9.4.6 MÉTODO CONSTRUCTIVO

La rehabilitación del Viaducto Chillón tuvo lugar en los veranos del 2014 y 2015, reparando un puente en cada uno. La intervención se extendió por un periodo de alrededor 30 días hábiles, en su ejecución se empleó una máquina especial desarrollada por el contratista a partir de una pavimentadora, la cual permitió la colocación de UHPFRC en estado fresco (véase Figura 34). Esta maquinaria tiene la capacidad de extender el concreto de acuerdo con la variación en los anchos y espesores requeridos, además tiene incorporada una regla vibratoria para proporcionar un material regular a lo largo de toda la capa. El material es vertido en un elemento de la pavimentadora con la ayuda de volquetas, proporcionando UHPFRC en estado fresco de forma permanente para su colocación (Brühwiler, y otros, 2015).



Figura 34. Máquina Empleada en la Colocación del UHPFRC (Brühwiler, y otros, 2015).

El UHPFRC empleado es autocompactante y presenta un comportamiento tixotrópico debido a que es colocado en pendientes de hasta 7%. Como control para garantizar la calidad de la

capa de UHPFRC resultante se realizaron ensayos a la mezcla para verificar las propiedades mecánicas requeridas, así mismo, se realizaron ensayos al material in situ con el fin de ajustar la máquina de vaciado dependiendo de las pendientes requeridas. Finalmente, se efectuaron ensayos durante la colocación del UHPFRC. Por otra parte, se implementaron mediciones no destructivas que confirmaron la consistencia en la función y mostraron una leve orientación preferencial de las fibras en dirección del vaciado de la mezcla (Brühwiler, y otros, 2015).

Adicional a la capa de UHPFRC colocada, se instaló una superficie de 8 cm de espesor de pavimento asfáltico, teniendo como finalidad proporcionar un acabado idóneo para el tránsito de vehículos. La alternativa de rehabilitación realizada tuvo un costo global de 230 CHF/m², siendo un valor considerablemente menor al precio estimado para un método de refuerzo convencional con concreto reforzado o con láminas de fibras de carbón. Otro aspecto que evidencia las ventajas de la alternativa de rehabilitación realizada es la reducción del tiempo de intervención comparado con tecnologías convencionales (Brühwiler, y otros, 2015).

9.4.7 RESULTADOS DE PROCESO DE REHABILITACIÓN EN PUENTE

CHILLON.

Con la colocación de una capa de UHPFRC en la losa del viaducto Chillon se consiguió aumentar la resistencia última de la losa en flexión y a cortante, aun asumiendo una reducción de la resistencia del concreto reforzado producto de la reacción álcali-agregado. Así mismo, se incrementó la resistencia a fatiga de la losa permitiendo resistir futuras solicitaciones de carga producidas por un aumento en el número de vehículos o de la carga por eje. Adicional, se proporcionó protección a la losa evitando el ingreso de agua y limitando el desarrollo posterior de reacciones álcali-agregado. Por otra parte, además de los beneficios técnicos se evidencia una reducción en los costos de rehabilitación y en el tiempo de intervención gracias a la implementación de la máquina especializada en el vaciado de UHPFRC (Brühwiler, y otros, 2015).

10 REHABILITACIÓN 2015

En el año 2015 se realizó un proceso de rehabilitación en el Puente La Libertad, el cual consistió en; la reconstrucción de la losa del puente, aplicación de una nueva capa de rodadura en pavimento flexible MDC-19, reforzamiento y recubrimiento de superficie de vigas y estribos con fibra de carbono, entre otras actividades. Dentro del contrato 1040 de 2015 las actividades ejecutadas los costos unitarios y totales de cada una de ellas, tal como radican en las actas de obra finales son:

| ITEM | DESCRIPCIÓN | UNIDAD | CANT. | VALOR UNITARIO | VALOR TOTAL |
|------|---|--------|--------|----------------|------------------|
| 1 | DEMOLICIÓN DE ESTRUCTURAS | M3 | 0,00 | \$ 116.000,00 | \$ - |
| 2 | IMPRIMACIÓN CON SIKADUR O SIMILAR | M2 | 717,71 | \$ 42.000,00 | \$ 30.143.820,00 |
| 3 | RIEGO DE IMPRIMACIÓN CON EMULSIÓN ASFÁLTICA CRL - 0 | M2 | 848,16 | \$ 2.500,00 | \$ 2.120.400,00 |
| 4 | MEZCLA DENSA EN CALIENTE PARA BACHEO MSC-25 (INCLUYE CEMENTO ASFÁLTICO) | M3 | 0,00 | \$ 663.800,00 | \$ - |
| 5 | CONCRETO CLASE C RESISTENCIA 28 MPA | M3 | 0,00 | \$ 762.000,00 | \$ - |

| ITEM | DESCRIPCIÓN | UNIDAD | CANT. | VALOR UNITARIO | VALOR TOTAL |
|------|--|--------|----------|-----------------------|-------------------|
| 6 | CONCRETO CLASE D RESISTENCIA 21 MPA | M3 | 0,00 | \$ 519.000,00 | \$ - |
| 7 | ACERO DE REFUERZO Fy 420 MPA | KG | 17486,00 | \$ 4.000,00 | \$ 69.944.000,00 |
| 8 | ACERO DE PREESFUERZO | TF-M | 0,00 | \$ 1.200,00 | \$ - |
| 9 | APOYO ELASTOMERICO | U | 0,00 | \$ 479.000,00 | \$ - |
| 10 | JUNTA ELASTOMERICA M60 | ML | 40,00 | \$ 1.921.000,00 | \$ 76.840.000,00 |
| 11 | FABRICACION ESTRUCTURA METALICA | KG | 0,00 | \$ 7.500,00 | \$ - |
| 12 | TRANSPORTE DE LA ESTRUCTURA METALICA | KG | 0,00 | \$ 380,00 | \$ - |
| 13 | MONTAJE Y PINTURA DE LA ESTRUCTURA METALICA | KG | 0,00 | \$ 6.900,00 | \$ - |
| 14 | LIMPIEZA Y PINTURA DE LA BARANDA METALICA CON CHORRO DE ARENA (SANDBLASTING) | M2 | 0,00 | \$ 83.000,00 | \$ - |
| 15 | CUNETAS DE CONCRETO VACIADA IN SITU; INCLUYE LA CONFORMACIÓN DE LA SUPERFICIE DE APOYO | M3 | 0,00 | \$ 722.000,00 | \$ - |
| 16 | LINEA DE DEMARCACION CON PINTURA EN FRIO | ML | 0,00 | \$ 1.000,00 | \$ - |
| 17 | MARCA VIAL CON PINTURA EN FRIO | M2 | 0,00 | \$ 12.500,00 | \$ - |
| 18 | SEÑAL VERTICAL DE TRANSITO TIPO I (75cmX75cm) | U | 0,00 | \$ 262.600,00 | \$ - |
| | ITEMS NO PREVISTOS | | | | |
| 19 | DEMOLICION DE LOSA EXISTENTE PARA REPARACIÓN | M2 | 680,91 | \$ 138.812,00 | \$ 94.518.478,92 |
| 20 | CONCRETO CLASE A (350kg/cm2 o 5000 PSI) | M3 | 81,65 | \$ 1.407.410,00 | \$ 114.915.026,50 |
| 21 | SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE PUERTOS DE INYECCIÓN EN ADHESIVO EPÓXICO | ML | 37,25 | \$ 147.911,00 | \$ 5.509.684,75 |
| 22 | SUMINISTRO E INYECCIÓN DE RESINA EPOXICA PARA SELLO DE FISURAS | KG | 26,00 | \$ 261.757,00 | \$ 6.805.682,00 |
| 23 | LIMPIEZA DE ACERO DE REFUERZO Y APLICADOR DE INHIBIDOR DE CORROSIÓN | ML | 0,00 | \$ 33.138,00 | \$ - |
| 24 | RETIRO DE JUNTAS METÁLICAS EXISTENTES | ML | 40,80 | \$ 301.792,00 | \$ 12.313.113,60 |
| 25 | CONCRETO PARA JUNTAS DE BAJA RETRACCIÓN | M2 | 3,92 | \$ 3.328.992,00 | \$ 13.049.648,64 |
| 26 | GATEO DE VIGAS Y TABLERO PARA CAMBIO E APOYOS DE NEOPRENO | U | 0,00 | \$ 2.071.443,00 | \$ - |
| 27 | MEZCLA DENSA EN CALIENTE TIPO MDC - 19 | M3 | 35,56 | \$ 793.467,00 | \$ 28.215.686,52 |
| 28 | SUMINISTRO Y COLOCACION DE FIBRA DE CARBONO EN PLATINA | ML | 338,71 | \$ 460.257,00 | \$ 155.893.648,47 |
| 29 | SUMINISTRO Y COLOCACION DE FIBRA DE CARBONO EN MANTO | M2 | 114,55 | \$ 801.790,00 | \$ 91.845.044,50 |
| 30 | PERFORACIONES Y ANCLAJE DE CONECTORES CON EPOXICO D = 1/4" LONG. =39 CM | U | 11519,00 | \$ 14.818,00 | \$ 170.688.542,00 |
| 31 | CUADRILLA DE PALETEROS DIURNA | U | 86,00 | \$ 228.147,00 | \$ 19.620.642,00 |
| 32 | CUADRILLA DE PALETEROS DIURNA DOM Y FEST | U | 24,00 | \$ 557.692,00 | \$ 13.384.608,00 |
| 33 | CUADRILLA PALETEROS NOCTURNA | U | 86,00 | \$ 451.223,00 | \$ 38.805.178,00 |
| 34 | CUADRILLA DE PALETEROS NOCTURNA DOM Y FEST | U | 24,00 | \$ 679.370,00 | \$ 16.304.880,00 |
| | | | | VALOR BASICO DE OBRAS | \$ 960.918.083,90 |
| | | | | % AIU | 30,5% |

| ITEM | DESCRIPCIÓN | UNIDAD | CANT. | VALOR UNITARIO | VALOR TOTAL |
|------|-------------|--------|-------|---|---------------------|
| | | | | VALOR TOTAL AJUSTES CAUSADOS | \$ 17.657.898,75 |
| | | | | VALOR TOTAL BASICO OBRA + AJUSTES | \$ 978.575.982,65 |
| | | | | IVA OBRAS | \$ 5.890.685,00 |
| | | | | IVA AJUSTES | \$ 108.247,00 |
| | | | | IVA OBRA + AJUSTES | \$ 5.998.932,00 |
| | | | | VALOR TOTAL OBRAS + AJUSTES (IVA INCLUIDO) | \$ 984.574.914,65 |
| | | | | VALOR BASICO DIAGNOSTICO ESTRUCTURAL E HIDRAULICO | \$ 34.848.800,00 |
| | | | | VALOR IVA DIAGNOSTICO ESTRUCTURAL E HIDRAULICA | \$ 5.575.808,00 |
| | | | | VALOR TOTAL DIAGNOSTICO ESTRUCTURAL E HIDRAULICO (IVA INCLUIDO) | \$ 40.424.608,00 |
| | | | | VALOR BASICO OBRAS + AJUSTES Y DIAGNOSTICO ESTRUCTURAL E HIDRAULICO | \$ 1.013.424.782,65 |
| | | | | VALOR IVA OBRAS + AJUSTES Y DIAGNOSTICO ESTRUCTURAL E HIDRAULICO | \$ 11.574.740,00 |
| | | | | VALOR TOTAL OBRA EJECUTADA + AJUSTES + DIAGNOSTICO ESTRUCTURAL E HIDRAULICO | \$ 1.024.999.522,65 |

Tabla 5 Presupuesto de proyecto de rehabilitación a Puente La Libertad. Fuente: CONSORCIO MEJIAS INGENIEROS y Erick Jose Castillo CURIEX

En la Tabla 5 se puede evidenciar que el valor de la rehabilitación del Puente La Libertad al 2015 tuvo un costo de \$1.024.999.522,25, en el que se incluye los diferentes diagnósticos realizados con el fin de determinar el estado actual del puente y definir las actividades que debían ejecutarse con el objeto de rehabilitar el puente. Así mismo, se evidencia que las actividades contractuales cambiaron sustancialmente, situación que se atribuye a los resultados de la evaluación del puente.

A continuación, se presentan imágenes del proceso de rehabilitación:

Armado de acero de refuerzo e implementación de plan de manejo de tránsito (PMT):



Figura 35 Proceso de rehabilitación Puente La Libertad 1. Fuente: Google Maps

Escarificación y refuerzo de losa:

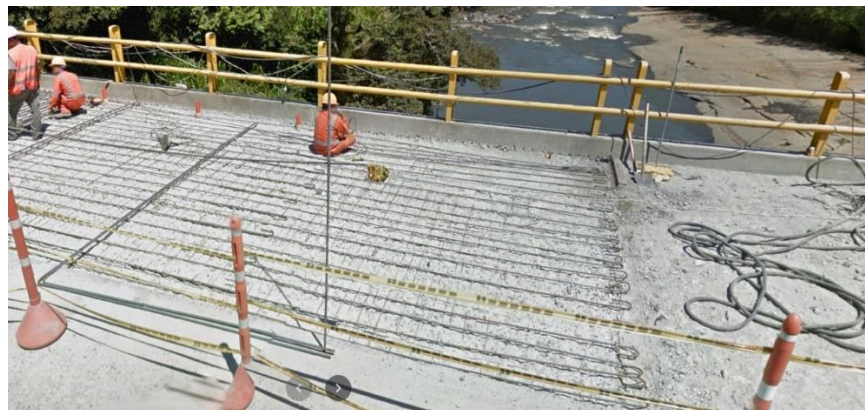


Figura 36 Proceso de rehabilitación Puente La Libertad 2. Fuente: Google Maps

Demolición de superficie de losa con compresor de martillo y punta pala:



Figura 37 Proceso de rehabilitación Puente La Libertad 3. Fuente: Google Maps

Campamento de obra:



Figura 38 Proceso de rehabilitación Puente La Libertad 4. Fuente: Google Maps

11 PROPUESTA

La propuesta planteada en el presente documento, tiene como fin evidenciar la posibilidad de implementar concretos avanzados a los proyectos de rehabilitación realizados en

Colombia, ya que, con su uso se alarga la vida útil del puente gracias a que se emplean materiales con mejores propiedades en términos de durabilidad y resistencia; condición que resulta provechosa especialmente a largo plazo debido a que se alarga el periodo de tiempo en que se requieren nuevos procesos de rehabilitación. Además, con el uso de estas tecnologías en materiales se puede dar paso a nuevos procesos que minimicen el tiempo requerido en las intervenciones y los costos generados. A continuación, se desarrolla la alternativa planteada:

11.1 MEZCLA DE UHPC

La mezcla de UHPC autocompactable utilizada en el presente documento para la propuesta de rehabilitación del puente la Libertad fue tomada del trabajo de grado “PLACAS DE CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPEÑO (UHPC) COMO SOLUCIÓN PARA PISOS EN ESTACIONES DE TRANSMILENIO (Reyes Suárez & Camargo Jimenez , 2016)” de la Pontificia Universidad Javeriana y está compuesta por los siguientes materiales: cemento, arena silícea, humo de sílice, carbonato de calcio, reductor de agua del alto rango y fibra metálicas. La relación agua/cemento es inferior a 0.28, lo anterior siguiendo las recomendaciones de la Federal Highway Administración en el 2013. A continuación, se describe las especificaciones de cada uno de los materiales:

- Cemento: diámetro medio de partículas de 8 μm , fabricado por Argos en la planta de Río claro, en el municipio de San Luis ubicado en el departamento de Antioquia.
- Arena silícea: se empleó la arena Medios S1, proviene de la planta MINAGAR del municipio de Zipaquirá, Cundinamarca.
- Humo de sílice: fue utilizado un humo de sílice EUCON MSA comercializado por TOXEMENT. Este agregado incrementa la resistencia y durabilidad de la mezcla.
- Carbonato de calcio: se empleó Betocarb 15-CG natural blanco y de alta pureza. Al ser agregado a la mezcla optimiza la relación agua-cemento, mejora la estética del concreto terminado y reduce las emisiones de CO₂.
- Reductor de agua de alto rango: Se añadió High Range Water Reductor (HRWR).
- Fibras metálicas: se emplearon fibras metálicas con recubrimiento de cobre para prevenir la oxidación, diámetro de 0.2mm, longitud de 13 mm y densidad de 7650 kg/m³.

11.1.1 EQUIPOS

Para realizar la mezcla, caracterizarla y evaluarla se emplean como mínimo los siguientes equipos:

11.1.1.1 Equipos de fabricación

- Balanza: se emplea en la dosificación de la mezcla
- Mezcladora planetaria:
- Mesa vibratoria

11.1.1.2 Equipos para ensayo en fresco

Son ensayos realizados con el fin de determinar la consistencia y flujo de la mezcla, para este fin se emplean los siguientes equipos:

- Mesa de flujo, mini slump: se emplea para realizar ensayos de manejabilidad
- Máquina universal: se realiza el ensayo de resistencia a cortantes en vigas
- Máquina Ibertest 1500: ensayos de resistencia a compresión en cilindros y determinación de módulo elástico
- Instron 5900:
- Actuador: analizar comportamiento ante cargas dinámicas
- Marco de reacción: montaje

11.1.1.3 Instrumentación

- Deformímetro: medir desplazamientos lineales
- Bandas extensométricas: son sensores de deformación

11.1.2 DOSIFICACIÓN DE MEZCLA

La mezcla presentada en el trabajo de grado mencionado en 10.1 fue planteada por el grupo de investigación Argos-Colciencias-Universidad Javeriana, y tiene la siguiente dosificación (véase Tabla 6) :

Tabla 6. Mezcla de UHPC Propuesta para la Rehabilitación del Puente la Libertad. Adaptada de (Reyes Suárez & Camargo Jimenez , 2016).

| Material | Cantidad (Kg) |
|---------------------|---------------|
| Cemento | 740 |
| Carbonato de Calcio | 310 |
| Humo de sílice | 210 |
| Arena | 690,39 |
| Agua | 236,148 |
| Aditivo | 29,925 |
| Fibra | 153 |

Es importante mencionar que, aunque la mezcla fue pensada para la elaboración de elementos prefabricados será propuesta para la construcción de una capa que hará parte de la sección de losa del Puente la libertad, así mismo, será planteada como sobrecarpeta en donde es primordial verificar su comportamiento tixotrópico, ya que, la superficie resultante debe tener una pendiente mínima que cumpla con las especificaciones del CCP-14.

11.1.3 PROCESO DE MEZCLA

El proceso de mezcla que llevaron a cabo durante la etapa de experimentación de (Reyes Suárez & Camargo Jimenez , 2016) consistió: primero se combinaron los materiales secos (cemento, humo de sílice, arena silíceo), posteriormente se agrega un porcentaje de agua suficiente para hidratar los secos, luego, se disuelve el aditivo HRWR en la proporción de agua faltante y para finalizar se mezcla todo en la DOMAT (Planetaria).

11.1.4 CARACTERIZACIÓN DEL CONCRETO RESULTANTE

A partir de la mezcla resultante, los autores de (Reyes Suárez & Camargo Jimenez , 2016) realizaron ensayos de resistencia a la compresión, modulo elástico, resistencia a la flexión, resistencia a cortante y comportamiento ante cargas cíclicas; caracterizando así la mezcla de UHPC con las siguientes propiedades mecánicas:

- Resistencia a la compresión: el ensayo fue realizado empleando la norma ASTM C339-14 y elaborado transcurridos 28 días después de haber fabricado la mezcla; en total fallaron 10 cilindros encontrado como valor promedio de resistencia a la compresión 125.28 MPa.
- Modulo elástico: a partir del ensayo de 5 probetas con base a lo especificado en la norma ASTM C469-14 determinaron un valor mínimo de módulo de elasticidad del UHPC de 48.046 MPa.
- Resistencia a flexión: siguiendo la norma ASTM C78-10 ensayaron 10 probetas tipo viga, como resultado encontraron un valor promedio de resistencia a la flexión de 22.49 MPa.
- Resistencia a primera fluencia: establecieron para el UHPC un valor igual a 7 MPa calculado a partir de los resultados de 10 ensayos de resistencia a flexión.
- Curva esfuerzo esfuerzo-deformación para tensión y compresión: la obtuvieron a partir de los resultados en los ensayos de compresión, modulo elástico y resistencia a flexión en vigas (véase Figura 39).

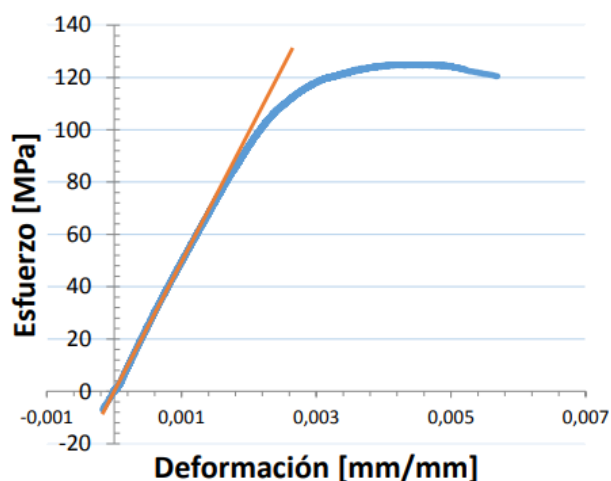


Figura 39. Curva Esfuerzo vs Deformación de la Mezcla de UHPC Propuesta en la Rehabilitación del Puente La Libertad.

De la Figura 39 se establece la deformación unitaria a primera fluencia es de 180 μ s. Así mismo, se evidencia valores de resistencia a tensión de 7 MPa y resistencia a la compresión de 125 MPa.

- Resistencia a cortante: a partir de 3 ensayos desarrollados bajo los estándares de la norma japonesa de concreto JSCE-90, determinaron una resistencia a cortante

promedio de 23 MPa. Adicionalmente, a partir de los resultados construyeron la curva esfuerzo cortante vs Desplazamiento que se muestra en Figura 40, en donde se puede evidenciar el comportamiento dúctil del UHPC después de fallar.

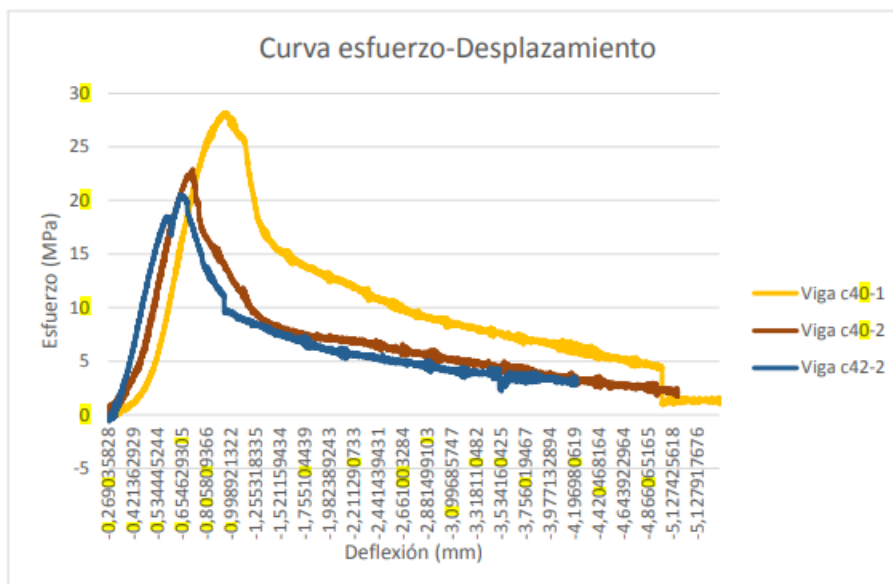


Figura 40. Esfuerzo Cortante vs Desplazamiento del UHPC Propuesta para la Rehabilitación del Puente La Libertad (Reyes Suárez & Camargo Jimenez, 2016).

11.2 REHABILITACIÓN DE LOSA

Previo a plantear una alternativa, se solicitó información acerca del análisis y diseño estructurales realizado para la rehabilitación y adecuación del Puente la libertad ejecutada en el año 2015. En este estudio se realizó una actualización de las cargas de acuerdo con la Norma Colombiana de Diseño de Puentes (CCP-14), se extrajeron núcleos para caracterizar el concreto existente, se determinaron las características del acero en la losa con base a observaciones realizadas en las zonas donde el refuerzo estaba expuesto y se definieron los momentos de diseño (véase Tabla 12).

Partiendo de lo anterior y con objeto de rehabilitar el puente la libertad, se consideró que debe colocarse un espesor de capa de UHPFRC de 70 mm, el cual se mantiene respecto a la rehabilitación que se llevó a cabo en el año 2015 debido a que debe garantizarse el recubrimiento mínimo del acero de refuerzo de 50 mm y asumiendo que se colocaran barras de ½” se tiene un espesor de 62.7 mm, por ende, no se justifica reducir el espesor. Es importante mencionar que, el espesor de la capa de UHPFRC planteado fue verificado a flexión ante las solicitaciones de carga para las cuales se diseñó en la última rehabilitación (véase ANEXO 1. CÁLCULOS DE LA SECCIÓN DE LOSA).

11.3 JUSTIFICACIÓN ESPESOR CAPA DE RODADURA

La capa de rodadura de un puente es usualmente de pavimento flexible debido a su costo y propiedades que garantizan una superficie de rodamiento adecuada para el tránsito al que estará sometido un puente. Por otra parte, el diseño de una capa de rodamiento debe incluir una evaluación de los siguiente:

- Ductilidad y resistencias suficientes para acomodar la expansión y contracción y deformaciones impuestas sin sufrir fisuración ni desprendimiento.
- Resistencia a la fatiga suficiente para soportar los esfuerzos flexionales debidos a la acción compuesta entre la superficie de rodamiento y la placa de tablero
- Durabilidad suficiente para resistir la formación de baches, desplazamientos y desgaste
- Impermeabilidad al agua y a los combustibles y fluidos que utilizan los motores de los vehículos
- Resistencia al deterioro provocado por sales y anticongelantes
- Resistencia al envejecimiento y al deterioro provocado por la radiación.

Lo anterior, las propiedades del UHPC, resultante de la dosificación expuesta en 11.1.2, cumplen con todos los requerimientos de diseño expuesto anteriormente, por lo tanto, en términos de resistencia, impermeabilidad y ductilidad el UHPC utilizado puede ser utilizado como capa de rodadura en la alternativa del Puente La Libertad.

Con el objeto de justificar un espesor de capa de rodadura para la alternativa planteada se procedió analizar proyectos de rehabilitación similares a la alternativa planteada, donde la capa de rodadura de puentes fuera rehabilitada con pavimento rígido UHPC, para este ejercicio se determinó que la variable de mayor importancia es el tráfico promedio diario a los cuales están sometidos los puentes. A continuación, se expone una tabla resumen del ejercicio mencionado:

| Puente | Sección de losa rehabilitada | | Tráfico medio diario (veh) | Espesor capa de rodadura (cm) | Fibras de acero (%) |
|--|------------------------------|-------------|----------------------------|-------------------------------|---------------------|
| | Largo (m) | Ancho (m) | | | |
| Puente The Laporte Road Bridge | 30.5 | 8.53 | Baja | 3.8 | nd |
| Puente Conmemorativo de Delaware | 304.8 | 7.82 | 80,000 | 10.16 | 3.25 |
| Brucke Expressway sobre St. Ann's Aveniu | 804.67 | nd | 155,000 | 5.08 | 3.25 |
| NJ159 WB sobre río Passaic | nd | 2.44 - 9.14 | 11,700 | 6.99 | 3.25 |
| Puente La Libertad | 70.15 | 10.13 | 6,281 | X | X |

Tabla 7 Comparación proyectos de rehabilitación con capa de rodadura en UHPC

Como se puede observar el espesor de capa de rodadura con UHPC, en los proyectos analizados, varía entre 3.8cm a 10.16. Es importante mencionar que como se explica en 9.1, 9.2 y 9.3 otros elementos de los puentes también fueron rehabilitados con UHPC, por lo tanto, se utilizaron espesores menores. Finalmente, el Puente The Laporte Road Bridge se puede considerar como el puente con mayor similitud en términos de TPD ya que, a pesar de ser de

menor longitud de largo este posee un TPD bajo el cual es similar al Puente La Libertad, por lo tanto, el espesor de capa de rodadura seleccionado para la alternativa a plantear es de 3.8cm.

11.4 PROCESO CONSTRUCTIVO.

El proceso constructivo que se expone a continuación fue realizado siguiendo las actividades ejecutadas por la firma Mejía Ingenieros en el año 2015 en la rehabilitación del puente La Libertad, se realizó sustitución de algunas actividades con el fin de ser alineadas con los objetivos planteados en este trabajo, modificando los materiales a usar y equipos necesarios dentro del desarrollo de algunas de ellas. Es importante mencionar que, no fue necesario realizar cambios en todas pero si se tuvieron en cuenta para así poder realizar un comparativo apropiado entre las dos alternativas, además se trajeron todos los precios unitarios de cada actividad a realizar a valor presente con el mismo fin. A continuación, se expone la secuencia del proceso constructivo contemplado en nuestra propuesta:

1. Demolición de pavimentos rígidos.
2. Imprimación con EPOTOC L.
3. Suministro e instalación de puertos de inyección en adhesivos epóxico.
4. Suministro e inyección de PROTECTOP GRIS para sello de fisuras.
5. Perforaciones y anclaje conectores con epóxico.
6. Retiro de juntas metálicas existentes.
7. Vertimiento de la capa de rodadura en UHPC – Mezcla in situ.
8. Relleno de juntas con concreto de baja retracción.
9. Suministro y colocación de fibra de carbono en platina.
10. Suministro y colocación de fibra de carbono en manto.

***Nota:** EPOTOC L es una soldadura epóxica de dos componentes, ideal para adherir concreto nuevo o fresco a concreto viejo o endurecido, cuenta con un prolongado tiempo de colocación. De manera similar, PROTECTOP es una resina epóxica compuesta por la parte A y la parte B que se deben mezclar antes de aplicarla, es usado como sellante y recubrimiento protector en diferentes tipos de estructuras dado su fino acabado y lo fácil que es su limpieza.*

11.5 ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS (APUS).

Como se mencionó anteriormente, se propone cambiar algunas de las actividades realizadas en la intervención del 2015, en específico: se retiró el riego de imprimación con emulsión asfáltica CRL-0 y se implementó riego de imprimación con EPOTOC L, este propicia la adherencia entre concreto endurecido o viejo y concreto fresco, ya que, no será una capa asfáltica sino una capa de concreto UHPC en estado fresco. Por otro lado, se propone sustituir la capa de rodadura con mezcla asfáltica en caliente MDC-19 por una sobre carpeta de UHPC, y el uso de concreto de 5000 Psi por UHPC para la reconstrucción de la losa. El metro cubico de la mezcla considerada con objeto de la propuesta de rehabilitación, tiene un costo según precios del 2016 de:

| MATERIALES PARA METRO CÚBICO DE UHPC | | | | |
|--------------------------------------|--------|--------------|-------------|------------------------|
| ARTÍCULO | UNIDAD | V/UNIDAD | RENDIMIENTO | SUBTOTAL |
| Cemento | Kg | \$ 390.00 | 740 | \$ 288,600.00 |
| Carbonato | Kg | \$ 220.00 | 310 | \$ 68,200.00 |
| Humo de sílice | Kg | \$ 2,300.00 | 210 | \$ 483,000.00 |
| Arena | Kg | \$ 200.00 | 690.39 | \$ 138,078.00 |
| Agua | Kg | \$ 6.00 | 236.148 | \$ 1,416.89 |
| Aditivo | kg | \$ 11,000.00 | 29.925 | \$ 329,175.00 |
| Fibra | kg | \$ 13,000.00 | 153 | \$ 1,989,000.00 |
| SUBTOTAL MATERIALES | | | | \$ 3,297,469.89 |

Tabla 8 Análisis de precio unitario de la producción de un metro cúbico de UHPC. (Reyes Suárez & Camargo Jimenez , 2016)

Los valores presentados en la tabla anterior fueron traídos a precios del 2022 con el fin de poder realizar una comparación con el costo del concreto empleado en la Rehabilitación del Puente La Libertad en el 2015; esto se hizo empleando la inflación anual según cifras del DANE y aplicando la fórmula de interés compuesto. Los precios encontrados se muestran en la Tabla 9:

| MATERIALES PARA METRO CUBICO DE UHPC | | | | |
|--------------------------------------|--------|-----------|-------------|------------------------|
| ARTICULO | UNIDAD | V/UNIDAD | RENDIMIENTO | SUBTOTAL |
| Cemento | Kg | \$ 493 | 740 | \$ 364.830,75 |
| Carbonato | Kg | \$ 278 | 310 | \$ 86.214,33 |
| Humo de sílice | Kg | \$ 2.908 | 210 | \$ 610.579,53 |
| Arena | Kg | \$ 253 | 690,39 | \$ 174.549,90 |
| Agua | Kg | \$ 8 | 236,148 | \$ 1.791,14 |
| Aditivo | Kg | \$ 13.906 | 29,925 | \$ 416.123,22 |
| Fibra | Kg | \$ 16.434 | 153 | \$ 2.514.374,07 |
| SUB TOTAL | | | | \$ 4.168.462,94 |

Tabla 9. Costo de un Metro de UHPC según Precios 2022. Adaptación de (Reyes Suárez & Camargo Jimenez , 2016).

Como se puede observar, el costo por metro cúbico de UHPC es en extremo superior al metro cúbico de un concreto convencional, dependiendo de factores como; si es realizado in situ o es premezclado, la distancia de ubicación entre concretera y obra, el tráfico de la ciudad, entre otros. Dada su relativa novedad en la industria, los costos de producción de un concreto avanzado en Colombia aún son elevados, por lo que está práctica solo se justifica en aplicaciones que tienen por objeto la investigación. Por otro lado, es importante mencionar que el insumo que encarece sustancialmente el metro cúbico de este material son las fibras, debido a que son materiales que no están presentes en la industria y mercado colombiano.

Con el fin de evaluar los costos que genera la producción y fundida del UHPC se realiza un análisis de precios unitarios (APUS) partiendo del diseño de mezcla propuesta en la Tabla 8.

| DESCRIPCIÓN | GRUPO DE AJUSTE | UNIDAD | CANTIDAD | | | |
|--|--------------------|-----------------|------------------|-----------------|--------------|-----------------|
| FUNDIDA DE LA CAPA DE RODADURA EN UHPC - MEZCLA IN SITU | | m3 | | | | |
| I. EQUIPO | | | | | | |
| DESCRIPCIÓN | TIPO | TARIFA/H ORA | RENDIMIENTO | Vr. UNITARIO | | |
| Mezcladora planetaria | Concreto y mortero | \$ 150.000,00 | 0,100 | \$ 15.000,00 | | |
| Cargador (BOOGIE) potencia en el volante 125 hp, clasificación de rpm del motor 2300 | | \$ 146.786,48 | 0,100 | \$ 14.678,65 | | |
| Formaleta metálica para pavimento en concreto hidráulico (m) | Concreto y mortero | \$ 891,59 | 1,000 | \$ 891,59 | | |
| Regla vibratoria de concreto, de longitud de 3 a 5 m, potencia de 6 a 9 HP | Concreto y mortero | \$ 8.296,10 | 0,500 | \$ 16.592,20 | | |
| HERRAMIENTA MENOR (%) | | | 5% | \$ 395,44 | | |
| SUBTOTAL \$ | | | | \$ 47.557,88 | | |
| II. MATERIALES | | | | | | |
| DESCRIPCIÓN | UNIDAD | CANTIDAD | PRECIO UNIT. | Vr. UNITARIO | | |
| Cemento | KG | 740,000 | \$ 493,00 | \$ 364.820,00 | | |
| Agua | KG | 236,148 | \$ 8,00 | \$ 1.889,18 | | |
| Humo de sílice EUCON MSA | KG | 210,000 | \$ 2.908,00 | \$ 610.680,00 | | |
| Carbonato de calcio | KG | 310,000 | \$ 278,00 | \$ 86.180,00 | | |
| Arena | KG | 690,390 | \$ 253,00 | \$ 174.668,67 | | |
| Aditivo | KG | 29,925 | \$ 13.906,00 | \$ 416.137,05 | | |
| Fibra | KG | 153,000 | \$ 16.434,00 | \$ 2.514.402,00 | | |
| SUBTOTAL \$ | | | | \$ 4.168.776,90 | | |
| III. TRANSPORTES | | | | | | |
| DESCRIPCIÓN | UNIDAD | CANTIDAD (1) | DISTANCIA (2) | (1) * (2) | TARIFA | Vr. UNITARIO |
| Transporte de cemento y arena (Deposito) | Ton-km | 1,430 | 30,000 | 42,912 | \$ 1.021,46 | \$ 43.832,38 |
| Transporte de MCS, aditivos y fibras | Ton-km | 0,703 | 30,000 | 21,088 | \$ 1.021,46 | \$ 21.540,19 |
| Carrotanque de agua(1000 Galones) | Gal-km | 1,000 | 30,000 | 30,000 | \$ 74.045,20 | \$ 2.221.355,97 |
| SUBTOTAL \$ | | | | | | \$ 2.286.728,54 |

| IV. MANO DE OBRA | | | | | |
|--|---------------|------------------|---------------|-------------|---------------------|
| DESCRIPCIÓN | JORNAL | PRESTACIONES (%) | JR. TOTAL | RENDIMIENTO | Vr. UNITARIO |
| Obrero (6) | \$ 200.000,00 | 185 | \$ 370.000,00 | 80,00 | \$ 4.625,00 |
| Oficial | \$ 56.666,67 | 185 | \$ 104.833,33 | 80,00 | \$ 1.310,42 |
| Rastrilleros (2) | \$ 85.333,33 | 185 | \$ 157.866,67 | 80,00 | \$ 1.973,33 |
| | | | | | \$ 7.908,75 |
| TOTAL, COSTO DIRECTO \$ | | | | | \$ 6.510.972,07 |
| V. COSTOS INDIRECTOS | | | | | |
| DESCRIPCIÓN | Porcentaje | Valor Total | | | |
| ADMINISTRACION | 20,5% | \$ 1.334.749,28 | | | |
| IMPREVISTOS | 5% | \$ 325.548,60 | | | |
| UTILIDAD | 5% | \$ 325.548,60 | | | |
| SUBTOTAL \$ | | | | | \$ 1.985.846,48 |
| Precio Unitario Total Aproximado al Peso \$ | | | | | \$ 8.496.819 |

Tabla 10 APU Fundido de capa de rodadura en UHPC. Fuente: Autoridad Propia

De esta manera, resalta que para la alternativa planteada el precio unitario de fundir un metro cúbico de UHPC es de \$8'496.819 a 2022.

11.6 COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS

Previo a realizar una comparación, se trajo el valor de las actividades realizadas en el 2015 a valor presente, encontrando:

| ITEM | DESCRIPCIÓN | UNIDAD | CANT. | VALOR UNITARIO | VALOR TOTAL |
|------|---|--------|----------|-----------------|------------------|
| 1 | DEMOLICIÓN DE ESTRUCTURAS | M3 | 0,00 | \$ 155.072,03 | \$ - |
| 2 | IMPRIMACIÓN CON SIKADUR O SIMILAR | M2 | 717,71 | \$ 56.146,77 | \$ 40.297.097,89 |
| 3 | RIEGO DE IMPRIMACIÓN CON EMULSIÓN ASFALTICA CRL - 0 | M2 | 848,16 | \$ 3.342,07 | \$ 2.834.609,76 |
| 4 | MEZCLA Densa EN CALIENTE PARA BACHEO MSC-25 (INCLUYE CEMENTO ASFALTICO) | M3 | 0,00 | \$ 887.386,32 | \$ - |
| 5 | CONCRETO CLASE C RESISTENCIA 28 MPA | M3 | 0,00 | \$ 1.018.662,82 | \$ - |
| 6 | CONCRETO CLASE D RESISTENCIA 21 MPA | M3 | 0,00 | \$ 693.813,65 | \$ - |
| 7 | ACERO DE REFUERZO Fy 420 MPA | KG | 17486,00 | \$ 5.347,31 | \$ 93.503.086,69 |
| 8 | ACERO DE PREEFUERZO | TF-M | 0,00 | \$ 1.604,19 | \$ - |

| ITEM | DESCRIPCIÓN | UNIDAD | CANT. | VALOR UNITARIO | VALOR TOTAL |
|------|---|--------|----------|-----------------------------------|---------------------|
| 9 | APOYO ELASTOMERICO | U | 0,00 | \$ 640.340,54 | \$ - |
| 10 | JUNTA ELASTOMERICA M60 | ML | 40,00 | \$ 2.568.046,29 | \$ 102.721.851,50 |
| 11 | FABRICACION ESTRUCTURA METALICA | KG | 0,00 | \$ 10.026,21 | \$ - |
| 12 | TRANSPORTE DE LA ESTRUCTURA METALICA | KG | 0,00 | \$ 507,99 | \$ - |
| 13 | MONTAJE Y PINTURA DE LA ESTRUCTURA METALICA | KG | 0,00 | \$ 9.224,11 | \$ - |
| 14 | LIMPIEZA Y PINTURA DE LA BARANDA METALICA CON CHORRO DE ARENA (SANDBLASTING) | M2 | 0,00 | \$ 110.956,71 | \$ - |
| 15 | CUNETA DE CONCRETO VACIADA IN SITU; INCLUYE LA CONFORMACIÓN DE LA SUPERFICIE DE APOYO | M3 | 0,00 | \$ 965.189,70 | \$ - |
| 16 | LINEA DE DEMARCACION CON PINTURA EN FRIO | ML | 0,00 | \$ 1.336,83 | \$ - |
| 17 | MARCA VIAL CON PINTURA EN FRIO | M2 | 0,00 | \$ 16.710,35 | \$ - |
| 18 | SEÑAL VERTICAL DE TRANSITO TIPO I (75cmX75cm) | U | 0,00 | \$ 351.050,99 | \$ - |
| | ITEMS NO PREVISTOS | | 0,00 | \$ - | \$ - |
| 19 | DEMOLICION DE LOSA EXISTENTE PARA REPARACIÓN | M2 | 680,91 | \$ 185.567,75 | \$ 126.354.934,35 |
| 20 | CONCRETO CLASE A (350kg/cm2 o 5000 PSI) | M3 | 81,65 | \$ 1.881.464,88 | \$ 153.621.607,07 |
| 21 | SUMINISTRO E INSTALACIÓN DE PUERTOS DE INYECCIÓN EN ADHESIVO EPÓXICO | ML | 37,25 | \$ 197.731,54 | \$ 7.365.499,98 |
| 22 | SUMINISTRO E INYECCIÓN DE RESINA EPOXICA PARA SELLO DE FISURAS | KG | 26,00 | \$ 349.924,05 | \$ 9.098.025,19 |
| 23 | LIMPIEZA DE ACERO DE REFUERZO Y APLICADOR DE INHIBIDOR DE CORROSIÓN | ML | 0,00 | \$ 44.299,80 | \$ - |
| 24 | RETIRO DE JUNTAS METÁLICAS EXISTENTES | ML | 40,80 | \$ 403.443,95 | \$ 16.460.513,10 |
| 25 | CONCRETO PARA JUNTAS DE BAJA RETRACCIÓN | M2 | 3,92 | \$ 4.450.289,20 | \$ 17.445.133,65 |
| 26 | GATEO DE VIGAS Y TABLERO PARA CAMBIO E APOYOS DE NEOPRENO | U | 0,00 | \$ 2.769.162,68 | \$ - |
| 27 | MEZCLA DENSA EN CALIENTE TIPO MDC - 19 | M3 | 35,56 | \$ 1.060.728,78 | \$ 37.719.515,37 |
| 28 | SUMINISTRO Y COLOCACION DE FIBRA DE CARBONO EN PLATINA | ML | 338,71 | \$ 615.284,37 | \$ 208.402.969,91 |
| 29 | SUMINISTRO Y COLOCACION DE FIBRA DE CARBONO EN MANTO | M2 | 114,55 | \$ 1.071.855,20 | \$ 122.781.012,78 |
| 30 | PERFORACIONES Y ANCLAJE DE CONECTORES CON EPOXICO D = 1/4" LONG. =39 CM | U | 11519,00 | \$ 19.809,11 | \$ 228.181.195,52 |
| 31 | CUADRILLA DE PALETEROS DIURNA | U | 86,00 | \$ 304.993,26 | \$ 26.229.420,53 |
| 32 | CUADRILLA DE PALETEROS DIURNA DOM Y FEST | U | 24,00 | \$ 745.538,19 | \$ 17.892.916,65 |
| 33 | CUADRILLA PALETEROS NOCTURNA | U | 86,00 | \$ 603.207,47 | \$ 51.875.842,42 |
| 34 | CUADRILLA DE PALETEROS NOCTURNA DOM Y FEST | U | 24,00 | \$ 908.200,73 | \$ 21.796.817,57 |
| | | | | VALOR BASICO DE OBRAS | \$ 1.284.582.049,94 |
| | | | | % AIU | 30,5% |
| | | | | VALOR TOTAL AJUSTES CAUSADOS | \$ 23.605.570,71 |
| | | | | VALOR TOTAL BASICO OBRA + AJUSTES | \$ 1.308.187.620,65 |
| | | | | IVA OBRAS | \$ 7.874.831,73 |
| | | | | IVA AJUSTES | \$ 144.707,60 |

| ITEM | DESCRIPCIÓN | UNIDAD | CANT. | VALOR UNITARIO | VALOR TOTAL |
|------|-------------|--------|-------|----------------|---|
| | | | | | IVA OBRA + AJUSTES \$ 8.019.539,33 |
| | | | | | VALOR TOTAL OBRAS + AJUSTES (IVA INCLUIDO) \$ 1.316.207.159,98 |
| | | | | | VALOR BASICO DIAGNOSTICO ESTRUCTURAL E HIDRAULICO \$ 46.586.846,15 |
| | | | | | VALOR IVA DIAGNOSTICO ESTRUCTURAL E HIDRAULICA \$ 7.453.895,38 |
| | | | | | VALOR TOTAL DIAGNOSTICO ESTRUCTURAL E HIDRAULICO (IVA INCLUIDO) \$ 54.040.741,54 |
| | | | | | VALOR BASICO OBRAS + AJUSTES Y DIAGNOSTICO ESTRUCTURAL E HIDRAULICO \$ 1.354.774.466,80 |
| | | | | | VALOR IVA OBRAS + AJUSTES Y DIAGNOSTICO ESTRUCTURAL E HIDRAULICO \$ 15.473.434,71 |
| | | | | | VALOR TOTAL OBRA EJECUTADA + AJUSTES + DIAGNOSTICO ESTRUCTURAL E HIDRAULICO \$ 1.370.247.901,51 |

Tabla 11. Valor de la Rehabilitación de L Puente La Libertad según Precios del 2022.

Al comparar el valor unitario de la actividad “CONCRETO CLASE A (350 kg/cm² o 5000 PSI)” con la “FUNDICIÓN DE 1 M3 DE UHPC - MEZCLA IN SITU” se evidencia que existe una diferencia sustancial en el costo de \$6’615.354,12. Si se tienen en cuenta únicamente aspectos económicos, la alternativa planteada no es viable, no obstante, se debe evaluar otros aspectos como futuras rehabilitaciones y/o modernización de la industria concretera.

Por otra parte, si se compara el valor unitario de la actividad “MEZCLA DENSA EN CALIENTE TIPO MDC-19” con la “FUNDICIÓN DE 1 M3 DE UHPC - MEZCLA IN SITU”, nuevamente se observa que el uso de concretos UHPC está en desventaja ya que, la diferencia en costos es de \$7’436.090,22.

12 CONCLUSIONES

- La dependencia de información de identidades públicas generó demoras importantes en el planteamiento de la alternativa.
- El tiempo de respuesta en las Entidades Gubernamentales no está estandarizado, y en términos prácticos, se excedió el tiempo de consulta de información que estaba programado en el cronograma planteado por el equipo de trabajo, ocho semanas.
- Por medio de consultas técnicas a especialistas de puentes se determinó que existe restricciones técnicas para el uso de UHPFRC en la rehabilitación de puentes debido a las diferencias entre el módulo de elasticidad entre el concreto existente y el UHPFRC, limitando su aplicación en la reparación de patologías. Por lo anterior, el uso del UHPFRC puede emplearse en la reparación de elementos que requieren intervenciones a lo largo de todo el elemento y deben descartarse aquellas que sean localizadas en pequeñas zonas.
- Debido a la carencia de maquinaria y experiencia en la implementación de UHPFRC como alternativa de rehabilitación los costos y tiempos generados en su uso son más elevados frente a alternativas convencionales.
- Aspectos relacionados con la durabilidad y las excelentes propiedades mecánicas del UHPFRC son los que favorecen el uso de esta tecnología, los cuales aumentan los periodos de futuras rehabilitaciones.

- Impulsar el uso de UHPFRC en proyectos piloto para así promover el desarrollo de la industria en este sentido, adquiriendo nuevas tecnologías y maquinaria para acelerar los procesos de implementación. Además de la creación de una normativa que regule el uso de estos materiales en el territorio nacional.
- La dosificación de la mezcla de UHPFRC empleada en la alternativa de rehabilitación no presenta un buen desempeño en términos de deformación por tensión, debido a que no desarrolla un comportamiento de endurecimiento por deformación, provocando que la capa de UHPFRC no aporte en la resistencia a momento negativo y positivo en flexión.
- En la curva de esfuerzo por tensión en función de la deformación de la mezcla utilizada en la alternativa (Figura 39) comparada con la curva de la mezcla utilizada en la rehabilitación del Viaducto Chillón (Figura 31), se puede observar una diferencia sustancial en el comportamiento que presenta el UHPFRC una vez se alcanza la fluencia. Por lo tanto, una mejora en la resistencia a tensión de la mezcla se consigue adicionado fibras, las cuales garantizan un comportamiento dúctil permitiendo altas deformaciones ante esfuerzos a tensión.
- En la alternativa de rehabilitación propuesta se establece un espesor de tablero en el Puente La Libertad de 7cm, cumpliendo con las sollicitaciones de carga y con el recubrimiento mínimo del refuerzo.
- El espesor de la capa de rodadura de la alternativa fue definido con base a proyectos de rehabilitación similares, utilizando como variable determinante el tráfico promedio diario (TPD), por lo tanto, se escogió un espesor de 3.8cm, el cual garantiza las propiedades requeridas de una capa de rodadura en tablero de puente.
- En pavimentos rígidos es indispensable realizar un procedimiento de esmerilado para garantizar una adherencia óptima entre los neumáticos de los vehículos y la superficie de rodamiento.

13 REFERENCIAS

- Abellán García, J., & Guzmán Guzmán, J. S. (2021). *Random forest-based optimization of UHPFRC under ductility*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito,.
- Abellan, J. T. (2018). *Influencia del exponente de Fuller, la relación agua conglomerante y el contenido en policarboxilato en concretos de muy altas prestaciones*. Havana.
- Abellán, J., Torres, N., Núñez, A., & Fernández, J. (2018). *CONCRETOS DE MUY ALTAS PRESTACIONES REFORZADOS CON FIBRAS: ESTADO DEL ARTE, APLICACIONES Y POSIBILIDADES EN EL MERCADO LATINOAMERICANO*. Lima.
- Abellan-garcia, J. (2021). *Una revisión del desarrollo de dosificaciones de UHPC en Colombia*.
- Abellán-garcía, J. G.-g.-d.-g. (2021). *Experimental validation of Artificial Intelligence model for the energy absorption capacity of UHPFRC*.

- ACI. (2018). *Ultra-High-Performance Concrete: An Emerging Technology Report*.
- Betancur Villegas , M., & Chavarro Guitiérrez , H. (2018). *Patologías generadas por la incidencia de factores antrópicos en el puente vehicular de la calle 92 con Autopista Norte, sentido Norte-Sur en Bogotá* . 2018: Universidad Católica de Colombia .
- Blatem, P. (06 de Junio de 2018). *Eflorescencias: qué son y cómo se pueden prevenir y tratar*. Obtenido de Blatem pinturas: <https://www.blatem.com/es/actualidad/noticias/eflorescencias-que-son-y-como-se-pueden-prevenir-y-tratar>
- Brühwiler, E., Bastien-Masse, M., Mühlberg, H., Houriet, B., Fleury, B., Cuennet, S., . . . Maurer, M. (2015). *Strengthening the Chillon viaducts deck slabs with reinforced UHPFRC*. Ginebra, Suiza .
- García, J. A. (2020). *Comparison of artificial intelligence and multivariate regression in modeling the flexural behavior of UHPFRC*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- García-, F. R. (s.f.). *Rehabilitación de estructuras de Hormigón: técnicas y sistemas* .
- Guzmán, J. J. (2020). *Simulación mediante modelos predictivos del comportamiento a*. Bogotá: Escuela Colombiana de ingeniería Julio Garavito. Obtenido de Escuela Colombiana de ingeniería Julio Garavito: <https://repositorio.escuelaing.edu.co/bitstream/handle/001/1298/Ortega%20Guzm%c3%a1n%20Juan%20Jos%c3%a9%20del%20Carmen-2020.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Guzmán, J. S. (2020). *Predicción del comportamiento a*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- INVIAS. (2008). *Guía metodológica para el diseño de obras de rehabilitación de pavimentos asfálticos de carreteras*.
- Jaramillo-murcia, D. T.-c. (2020). *Propiedades Mecánicas y de Durabilidad de Concretos de Ultra Altas Prestaciones (UHPC), con Diferentes Materiales Suplementarios*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Katrin, H. (2004). *STRUCTURAL BEHAVIOUR OF ELEMENTS COMBINING ULTRA-HIGH PERFORMANCE FIBRE REINFORCED CONCRETES (UHPFRC) AND REINFORCED CONCRETE*. Lausanne, EPFL.
- Ministerio de Transporte Nacional de Vías., Universidad Nacional de Colombia. (2006). *Manual para la inspección visual de puentes y pontones*. Bogotá.
- Munévar, C. I. (2020). *Proceso constructivo de la rehabilitación de pavimentos*. Bogotá: Escuela Colombiana de ingeniería Julio Garavito.

- Reyes Suárez, M. M., & Camargo Jimenez, J. (2016). *PLACAS DE CONCRETO DE ULTRA ALTO DESEMPEÑO (UHPC) COMO SOLUCIÓN PARA PISOS EN ESTACIONES DE TRANSMILENIO*. Bogotá.
- San Juan B., C. B. (2001). Acción de los agentes químicos y físicos sobre el concreto. *imcyc*, 45.
- SiPuCol. (2012). *Informe de inspeccion principal- (SDC/INV 04-6209-044.00 La Libertad)*.
- Sousa, J., Buttignol, T., & Bittencourt, T. (2017). Ultra High-Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC): a review of material properties and design procedures. *IBRACON DE ESTRUTURAS E MATERIAIS*, 10(4), 957-971.
- UHPC Solutions North America. (2022). *UHPC Solutions*. Recuperado el 03 de Mayo de 2022, de <https://www.uhpcolutions.com/case-studies>
- Universidad del Cauca. (1991). *Medidas para la proteccion de puentes: capitulo 7 socavación en puentes*. Cali.
- Xiugui, S., Jianhua, H., Yu, L., & Guoping, H. (2022). *Effects of Stiffener Type on Fatigue Resistance of Steel-UHPC Composite Bridge Decks*. Hunan: Hindawi Advances in Civil Engineering.

14 ANEXOS

14.1 ANEXO 1. CÁLCULOS DE LA SECCIÓN DE LOSA

A continuación, se presenta una descripción de los cálculos realizados para

14.1.1 MOMEMNTO NEGATIVO

Con el fin de calcular la cuantía de acero que debe colocarse en la capa de UHPFRC en el Puesto la Libertad, se realizó un análisis de sección plana teniendo en cuenta el planteamiento realizado en el Viaducto Chillon para el cálculo del momento negativo que resiste la losa (véase a), Figura 33). A partir de lo anterior, son definidas para el análisis las siguientes fuerzas:

$$F_{sUd} = A_{su} * f_{yu} \quad [1]$$

En donde:

A_{su} : refuerzo en la capa de UHPFRC.

f_{yu} : resistencia a la fluencia del acero de refuerzo en la capa de UHPFRC.

F_{sUd} : Fuerza resistente a tracción debida al acero de refuerzo suministrado en la capa de UHPFRC.

$$F_{sCd} = A_{sc} * f_{yc} \quad [2]$$

En donde:

A_{sc} : refuerzo en el concreto existente.

f_{yc} : resistencia a la fluencia del acero de refuerzo en la capa de concreto existente.

F_{sCd} : Fuerza resistente a tracción debida al acero de refuerzo colocado en la capa de concreto existente.

$$F_{ccd} = 0.85 * f'c * x * b \quad [3]$$

En donde:

x: altura del bloque de compresiones.

f'c: resistencia a la compresión del concreto.

F_{ccd}: Fuerza resistente a compresión del concreto.

b: ancho de la sección

$$F_{Utd} = 0.65 * f'u * h_u * b \quad [4]$$

En donde:

h_u: altura de la capa de UHPFRC.

f'u: resistencia a la tracción del UHPFRC.

F_{Utd}: Fuerza resistente a tensión de la capa de UHPFRC.

Nota: el factor 0.65, se obtiene de asumir un bloque de tensiones rectangular cuya altura (a) respecto al espesor de la capa de UHPFRC guarda una relación igual a:

$$\frac{a}{h_u} = 0.65 \quad [6]$$

Esta relación se supone a partir de realizar una analogía con el concreto reforzado, en donde se establece que la altura del bloque de compresiones respecto a la longitud de la zona del elemento que está sometida a compresión es igual a un factor β_1 , el cual depende de la resistencia del concreto a compresión y cuyo valor mínimo es de 0.65 cuando la resistencia es considerable (como es el caso del UHPFRC).

$$\frac{a}{c} = \beta_1$$

14.1.1.1 ANÁLISIS

Inicialmente, se realizó el equilibrio de fuerzas en la sección compuesta que se plantea como alternativa de rehabilitación (véase Figura 30), en donde se debe cumplir que, la sumatoria de fuerzas sea igual a cero:

$$\sum F = 0 \quad [7]$$

$$F_{ccd} - F_{sUd} - F_{scd} - F_{Utd} = 0 \quad [8]$$

Reemplazando [1], [2], [3] y [4] en [8] se llega a:

$$0.85 * f'c * x * b - A_{su} * f_{yu} - A_{sc} * f_{yc} - 0.65 * f'u * h_u * b = 0 \quad [9]$$

De [9] se tiene como incógnitas a x y A_{su}, despejando A_{su} se llega a la siguiente expresión:

$$A_{su} = \frac{0.85 * f'c * x * b - A_{sc} * f_{yc} - 0.65 * f'u * h_u * b}{f_{yu}} \quad [10]$$

Posteriormente, se calcula el momento resistente a partir de un análisis de momento par, dado que se cumple que las fuerzas internas a compresión y tensión son iguales y actúan en sentido contrario. Siguiendo con lo mencionado anteriormente, se debe encontrar el punto donde actúa cada una de las resultantes (a tensión y compresión):

- La fuerza en compresión (F_{ccd}) actúa a una distancia de:

$$c' = c - \frac{x}{2} \quad [11]$$

En donde:

c' : distancia desde el eje neutro al punto de acción de la fuerza a compresión.

c : distancia del eje neutro a la última fibra en compresión.

Es importante mencionar que, la relación entre c y x está dada por la siguiente expresión:

$$x = 0.85 * c \quad [12]$$

Recordando que β_1 para este caso es igual a 0.85, ya que la zona a compresión en momento negativo está ubicada en el concreto existente, cuyo esfuerzo de fluencia es de 21 MPa.

Para encontrar la línea de acción de la fuerza resultante a tracción debe calcularse el centroide:

$$\bar{y} = \frac{\sum F_i * y_i}{F} \quad [13]$$

Donde:

y_i : es la distancia desde el punto de referencia (en este caso el eje neutro) al punto donde actúa la fuerza f_i .

F : resultante de las fuerzas.

\bar{y} : centroide o punto donde actúa la fuerza resultante

Aplicando [13] teniendo en cuenta la Figura 33, se llega a:

$$\bar{y} = \frac{F_{scd} * (d_{sc} - c) + F_{Utd} * \left(h_T - c - \frac{0.65 * h_u}{2} \right) + F_{sUd} * (d_U - c)}{F_{sd} + F_{Utd} + F_{sUd}} \quad [14]$$

Una vez encontrado el punto de acción de las fuerzas a tensión y compresión, se calcula el momento resistente (MR) el cual viene dado por la siguiente expresión:

$$M_R = (A_{su} * f_{yu} + A_{sc} * f_{yc} + 0.65 * f'_{cu} * h_u * b) * (c' + \bar{y}) \quad [15]$$

Por otra parte, se conoce que el momento resistente (sección 3,4,1,3) debe cumplir:

$$M_R = 1.5 M_u \quad [16]$$

En donde:

1.5 es el factor parcial del UHPFRC.

M_u : es el momento último calculado a partir de las solicitaciones de carga.

Reemplazando [16] en [15] se llega a:

$$1.5 M_u = (A_{su} * f_{yu} + A_{sc} * f_{yc} + 0.65 * f'_{cu} * h_u * b) * (c' + \bar{y}) \quad [18]$$

Resolviendo [18] se encuentra la cuantía de acero (A_{su}) que debe colocarse en la capa de UHPFRC. Es importante mencionar que, este procedimiento debe realizarse con ayuda de un software, en donde debe emplearse las expresiones [16], [14], [11] y [10] para que la ecuación tenga solución.

Finalmente, se debe verificar las deformaciones partiendo de su comportamiento lineal a lo largo de la sección (véase a), Figura 33), en donde se cumple:

$$\frac{\varepsilon_{cc}}{c} = \frac{\varepsilon_{sc}}{d_{sc} - c} = \frac{\varepsilon_{su}}{d_u - c} = \frac{\varepsilon_u}{H_t - c} \quad [19]$$

Se supone que ε_{cc} es igual a 0.003, luego se verificara que las deformaciones ε_{su} y ε_{sc} sean mayores que 0.005 y que ε_u sea menor a la deformación máxima a tensión que soporta el UHPFRC antes de la rotura; para la mezcla propuesta de UHPFRC el valor límite de ε_u es de 0.0002 (véase Figura 39) . Con las condiciones anteriores se garantiza que se presentara una falla dúctil.

14.1.2 MOMENTO POSITIVO

Se realiza la verificación a momento positivo en la sección del Puente la Libertad teniendo en cuenta la alternativa de rehabilitación sugerida (véase Figura 30), para esto se emplea un análisis detallado de las fuerzas internas que actúan en la sección siguiendo el planteamiento de Figura 10. Las fuerzas a considerar en el análisis son las siguientes:

$$F'_{uc} = 0.65 * x_u * b * f'_{cu} \quad [20]$$

En donde:

F'_{uc} : Fuerza resistente del UHPFRC en compresión.

x_u : altura del bloque de compresiones del UHPFRC.

f'_{cu} : resistencia a la compresión del UHPFRC.

Es importante anotar que al igual que en la verificación a momento negativo, el 0.65 surge de realizar una analogía con el análisis de fuerzas internas en secciones de concreto reforzado.

$$F_{cc} = A_{cc} * f_{yc} \quad [21]$$

En donde:

F_{cc} : Fuerza resistente a tracción del acero de refuerzo colocado en la cara inferior del elemento.

A_{sc} : acero de refuerzo a momento positivo (cara inferior del elemento).
 f_{yc} : resistencia a la fluencia del acero (cara inferior del elemento).

$$F_{Ut} = 0.65 * \left(h_u - \frac{x_u}{0.65} \right) * b * f'_U \quad [22]$$

En donde:

h_u : espesor de la capa de UHPFRC.

f'_U : resistencia a la tracción del UHPFRC.

F_{Ut} : Fuerza resistente del UHPFRC en tracción.

Dentro del análisis se considera las fuerzas [1] y [2] definidas anteriormente.

14.1.2.1 ANÁLISIS

Para verificar si la sección presenta un buen comportamiento ante solicitaciones a momento positivo, debe garantizarse el equilibrio en las fuerzas internas. Siguiendo el planteamiento de la Figura 10 se tiene que, el aporte en tensión a momento negativo es generado por el espesor de la capa de UHPFRC que forma parte de la zona de tracción y el acero de refuerzo colocado tanto en la capa de UHPFRC como en el concreto. En lo referente a las fuerzas en compresión se tiene la producida por la profundidad de la capa de UHPFRC que está sometida a compresión.

Teniendo en cuenta la composición de fuerzas descritas anteriormente y que la sumatoria de fuerzas debe ser igual a cero para que exista equilibrio, se llega a la siguiente expresión:

$$F'_{Uc} - F_{cc} - F_{Ut} - F_{sUd} - F_{scd} = 0 \quad [23]$$

Reemplazando [1], [2], [20],[21] y [22] en [23] se tiene como incógnita a X_u :

$$0.65 * x_u * b * f'_{cu} - A_{cc} * f_{yc} - 0.65 * \left(h_u - \frac{x_u}{0.65} \right) * b * f'_U - A_{su} * f_{yu} - A_{sc} * f_{yc} = 0 \quad [24]$$

Despejando X_u se debe verificar que las zonas a compresión y tensión se comporten como se muestran en la Figura 10. Posteriormente, se debe comprobar que el momento resistente de la sección sea menor al momento último, recordando que el momento resistente es calculado empleando el concepto de momento par. A partir de lo anterior, se define como primer paso calcular el punto de acción de la fuerza resultante a tensión (\bar{y}) en función de la ubicación del eje neutro:

$$\bar{y} = \frac{F_{Ut} * \frac{\left(h_u - \frac{x_u}{0.65} \right) * 0.65}{2} + F_{cc} * \left(d_{cc} - \frac{x_u}{0.65} \right) + F_{scd} * \left(d_{sc} - \frac{x_u}{0.65} \right) + F_{sUd} * \left(d_u - \frac{x_u}{0.65} \right)}{F_{Ut} + F_{cc} + F_{sc} + F_{sUd}} \quad [25]$$

Seguidamente, se establece el punto donde actúa la fuerza a tensión respecto al eje neutro:

$$c_f = h_u - \frac{x_u}{0.65} - \frac{x_u}{2} \quad [26]$$

Luego, el momento resistente esta dado por la siguiente expresión:

$$M_R = (\ddot{y} + c_f) * 0.65 * x_U * b * f'_{cU} \quad [27]$$

En caso de que el momento resistente sea menor al momento último, se debe aumentar el refuerzo a momento negativo o aumentar el espesor de la capa de UHPFRC.

Finalmente, debe corroborarse que las deformaciones no excedan la resistencia del material en donde nuevamente se tiene en cuenta su comportamiento lineal, por ende, se cumple:

$$\frac{\varepsilon_{Uc}}{c} = \frac{\varepsilon_{sc}}{d_{sc} - c} = \frac{\varepsilon_{su}}{d_u - c} = \frac{\varepsilon_u}{(h_u - c) * 0.65} = \frac{\varepsilon_{cc}}{d_{cc} - c} \quad [28]$$

Se supone que ε_{Uc} en la falla es igual a 0.005, no obstante, se aprecia que para un valor de esfuerzo de $0.65 f'_{cU}$ no se llega a la rotura y que el valor de deformación máxima adoptado está por el lado de la seguridad (véase Figura 41), luego es una suposición razonable. Por otro lado, se debe verificar que las deformaciones ε_{su} , ε_{cc} y ε_{sc} sean mayores que 0.005 y, que ε_u sea menor a 0.0002 (véase Figura 39). Con las condiciones anteriores se garantiza que se presentara una falla dúctil.

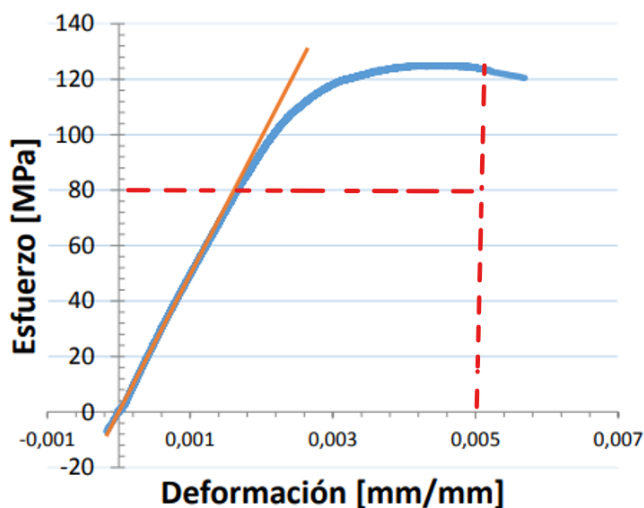


Figura 41. Deformación Máxima del UHPFRC.

14.1.3 VERIFICACIONES PUENTE LA LIBERTAD

A partir de la solicitud de información adelantada ante el INVIAS, se logró acceder al diagnóstico estructural del Puente la Libertad, en el cual se presenta el análisis desarrollado para la rehabilitación y adecuación del puente en mención. En el informe presentado por la

consultoría encargada del diagnóstico se muestran los momentos resultantes producto de un análisis de las sollicitaciones de cargas a las que está sometido el puente, siguiendo las especificaciones de la Norma Colombiana de Diseño de Puentes (CCP-14), dichos momentos se tuvieron en cuenta para el análisis estructural de la sección que es objeto de propuesta como rehabilitación (véase Tabla 12).

| CARGA | M voladizo (KN*m/m) | LUCES INFERIORES | |
|-----------|------------------------|------------------------|---------------------------|
| | | M positivo (KN*m/m) | M negativo (KN*m/m) |
| DC | 12,26 | 2,92 | 0,53 |
| DW | 1,91 | 0,5 | 0,31 |
| CV | 61,86 | 22,46 | 19,58 |
| IM | 20,41 | 7,41 | 6,46 |
| Mu diseño | 162,18 | 56,68 | 46,69 |

Tabla 12. Momentos de Diseño. Fuente: Diagnostico estructural, JG CONSULTORIA Y PROYECTOS SAS.

Realizando el análisis mostrado en la sección 14.1.1, se establece que la capa de UHPFRC no aporta en la resistencia a tracción en momento negativo a flexión debido a que la mezcla de UHPFRC analizada no cumple con el criterio de que la deformación unitaria (ϵ_u) en tensión sea menor que la deformación máxima soportada por el material antes de fallar (0.0002). Partiendo del resultado anterior, el acero de refuerzo seleccionada para la alternativa en la capa de UHPFRC se muestra en la Tabla 13 y corresponde a la columna “SIN APORTE DEL UHPFRC A TENSION”.

| Ubicación | Mu | REHABILITACIÓN | | | SIN APORTE DEL UHPFRC A TENSION | | | CON APORTE DE UHPFRC A TENSION | | |
|-----------|--------|---------------------------|-------|---------|------------------------------------|-------|---------|-----------------------------------|-------|---------|
| | | Asu (mm ²) | S (m) | #Barras | Asu (mm ²) | S (m) | #Barras | Asu (mm ²) | S (m) | #Barras |
| - | 46,69 | 756,38 | 0,171 | 61,0 | 729,40 | 0,177 | 58,0 | - | - | - |
| Voladizo | 162,18 | 2133,22 | 0,06 | 172,0 | 2940,16 | 0,044 | 233,0 | 2183,42 | 0,059 | 173,0 |

Tabla 13. Comparación del Refuerzo en la Capa de UHPFRC. Fuente: Propia.

En lo referente a la verificación a momento positivo en flexión, se desarrolló el análisis indicado en la sección 14.1.2, en donde nuevamente se encontró que debe despreciarse el aporte a tensión de la capa de UHPFRC que está en la zona de tensión debido a que se excede la deformación unitaria máxima que resiste el material antes de la rotura. Como resultado del análisis, se encontró que el momento resistente de la sección planteada con objeto de rehabilitación corresponde al mostrado en la Tabla 14, columna “SIN APORTE DEL UHPFRC”.

| MOMENTO POSITIVO | CON APORTE DEL UHPFRC | SIN APORTE DEL UHPFRC |
|------------------|-----------------------|-----------------------|
| Mu (KN*m/m) | 56,68 | 56,68 |
| Mr(KN*m/m) | 66,30 | 61,27 |

Tabla 14. Verificación a Momento Positivo. Fuente: Propia.

Es importante mencionar que, los análisis realizados anteriormente parten de asumir que la losa del Puente La Libertad esta reforzada a momento positivo y negativo, con un recubrimiento de 35 mm y 70 mm, respectivamente. Adicionalmente, se adoptó un recubrimiento del acero en la capa de UHPFRC de 50 mm.