

# Artículo Juntas Polyset en Colombia

## Desarrollo e Innovación en Juntas de Dilatación para Puentes: Experiencia de Implementación del Sistema Polyset en Colombia

### Resumen

En los últimos seis años, Colombia ha implementado un sistema innovador de juntas de dilatación basado en concreto elastomérico. Esta solución tecnológica integra tres componentes esenciales: bloques de transición o guarda cantos en concreto elastomérico, sellos elásticos de última generación y concreto de ultra alto desempeño (UHPC) para las bases. La implementación ha logrado mejoras significativas en el desempeño estructural, reducción notable en costos de mantenimiento y optimización sustancial del nivel de servicio en las vías concesionadas.

### Introducción

Las juntas de dilatación son componentes esenciales en la infraestructura de puentes, diseñadas para gestionar los movimientos estructurales y preservar la integridad funcional. En Colombia, el grupo Imexcon Latam ha implementado una solución tecnológica innovadora que integra juntas Polyset de concreto elastomérico con bases de apoyo en concreto de ultra alto desempeño (UHPC). Esta combinación representa un avance significativo en el sector, pues ofrece un rendimiento superior manteniendo una relación costo-beneficio comparable a las soluciones tradicionales. El sistema ha demostrado resolver eficazmente los desafíos técnicos y de mantenimiento de las juntas de dilatación, que históricamente han sido la principal fuente de reclamaciones por garantía en proyectos viales.

### Desafíos críticos: Comprendiendo el deterioro de las juntas de dilatación

Las juntas de dilatación en puentes son un componente crítico que, aunque representan menos del 0,5% del costo total de la estructura, generan la mayor cantidad de reclamaciones por garantía y afectan significativamente el nivel de servicio en la infraestructura vial. Según el Sistema de Mantenimiento de Puentes de Colombia (SIPUCOL), el 70% de las estructuras de la red vial a cargo de la nación, muestran deficiencias en sus juntas. La persistencia de estos problemas entre inspecciones sucesivas demuestra que las intervenciones y protocolos de mantenimiento convencionales no son efectivos.

La Agencia Nacional de Infraestructura (ANI) ha establecido criterios técnicos rigurosos para las vías concesionadas, implementando una política de cero tolerancia a defectos en las juntas de dilatación, basada en parámetros de seguridad vial y nivel de servicio. Este marco normativo exige implementar soluciones tecnológicas avanzadas que superen el desempeño de los sistemas tradicionales y garanticen el cumplimiento de los nuevos estándares de calidad.

El deterioro constante de las juntas de dilatación se debe a varios factores técnicos y operativos. Aunque influyen las deficiencias en conocimiento técnico, la limitada experiencia en instalación y las fallas en mantenimiento, nuestros estudios revelan que el factor crítico es la selección inadecuada de materiales para los componentes que soportan las mayores cargas dinámicas en la estructura.

La selección de materiales exige entender completamente las condiciones operativas. Las juntas soportan las cargas vehiculares más intensas de la estructura, con un incremento del 70% por efectos dinámicos según las normas técnicas. El desafío principal no es la magnitud de estas cargas, sino su naturaleza cíclica que causa fatiga en los materiales. Las normas exigen que estos elementos absorban desplazamientos por efectos reológicos, térmicos y fuerzas vehiculares (centrífugas y de frenado), mientras mantienen una impermeabilización completa para proteger la estructura.

Estas exigentes condiciones de desempeño y resistencia se agravan por la infiltración de agua y el efecto de bombeo hidráulico, fenómenos que deterioran considerablemente tanto los componentes de las juntas como el pavimento adyacente, siendo especialmente problemático en zonas de alta pluviosidad.

### **El punto crítico: Guardacantos como elemento esencial en la protección estructural**

Los bloques de transición o guardacantos son los elementos que presentan el mayor índice de fallas y reclamaciones por garantía. Su función principal es proteger el pavimento contra las discontinuidades e impactos generados por cargas dinámicas vehiculares. El pavimento no está diseñado para resistir estos efectos de borde, por lo que los guardacantos funcionan como elementos de protección y transición entre el pavimento y los componentes flexibles que permiten los desplazamientos del puente en las juntas. Esta configuración los expone a elevadas exigencias mecánicas y ciclos de fatiga. Tradicionalmente, estos elementos se han fabricado con materiales cementicios, cuyo mecanismo de disipación energética se basa principalmente en la fricción interna y, en menor medida, en la deformación del material.

Este mecanismo de disipación energética por fricción interna evoluciona gradualmente hacia un proceso degenerativo. El deterioro comienza con la formación de microfisuras que, bajo cargas cíclicas, se desarrollan hasta convertirse en fisuras estructurales, lo que resulta en la pérdida de sección efectiva de los bloques. Como consecuencia, el pavimento queda expuesto, lo que compromete la integridad de las zonas de transición con las juntas. El deterioro se acelera considerablemente por el efecto hidrodinámico de bombeo, donde la presión de las cargas vehiculares impulsa agua a través de las fisuras, acelerando la degradación tanto de los bloques como de los componentes adyacentes de la junta y el pavimento..

### **La solución: Optimización en la selección de materiales para mejor desempeño estructural**

Para abordar el deterioro recurrente en los guardacantos o bloques de transición, se implementó en Colombia una solución tecnológica de concretos elastoméricos, desarrollada por la empresa PolySet (Estados Unidos). Esta innovación consiste en un concreto de poliuretano modificado que combina dos elementos principales: una resina de poliuretano y un endurecedor de curado rápido, los cuales se mezclan con arena de cuarzo de alta resistencia a la abrasión para formar el compuesto PlyKrete.

Este material, denominado concreto elastomérico, muestra propiedades mecánicas excepcionales gracias a su matriz polimérica. Al combinarse con arena seleccionada, genera un compuesto que alcanza resistencias a compresión equivalentes a las de un concreto convencional (3000-3500 PSI), mientras mantiene características de flexibilidad y resistencia a fatiga similares a las de un pavimento (resistencia al impacto de  $\pm 1$  ft-lb bajo prueba de caída de bola de 7 pies-lb y 1650 PSI a tracción). **Su principal ventaja radica en el mecanismo de disipación energética: mientras los materiales cementicios tradicionales dependen principalmente de la fricción interna, el concreto elastomérico absorbe el impacto mediante deformación elástica controlada, lo que resulta en una vida útil significativamente mayor bajo condiciones de carga dinámica.**

Sus propiedades mecánicas —flexibilidad, resistencia a la fatiga, vibraciones y abrasión—, junto con su excelente adherencia a sustratos de concreto y pavimento, y su durabilidad ante rayos UV, hacen de este material una solución óptima para los bloques de transición sometidos a cargas dinámicas de alta magnitud y frecuencia.

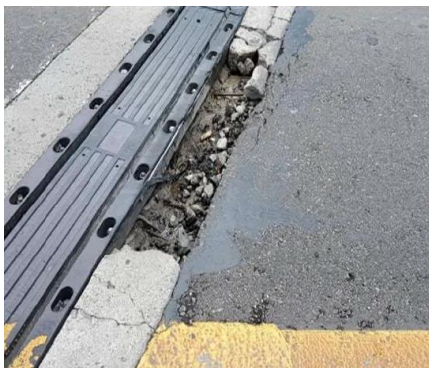
### **Validación de desempeño: Junta piloto en corredor troncal de Transmilenio**

El sistema de transporte masivo Transmilenio en Bogotá constituye un caso crítico para evaluar juntas de dilatación. Sus buses biarticulados, que transportan hasta 250 pasajeros, generan cargas mecánicas excepcionales al circular por carriles exclusivos cada 12 a 30 segundos en horas pico. Esta operación concentra los impactos en zonas específicas del pavimento, y en los puentes, la combinación de altas velocidades y cargas repetitivas produce demandas estructurales hasta 10 veces mayores que las de una vía primaria convencional. Estas condiciones extremas crean un escenario ideal para comparar el desempeño entre bloques de transición fabricados con concretos elastoméricos y materiales cementicios tradicionales.

### **Evaluación del desempeño: Instalación en junta con cambios de pendiente vertical**

Se implementó un proyecto piloto en la junta del puente sobre la avenida 68 en el corredor de la avenida Américas (costado oriental) bajo condiciones críticas. Esta ubicación estratégica era ideal para evaluar el sistema, pues presentaba un historial de deterioro acelerado que requería intervenciones semestrales. El sitio enfrentaba dos desafíos técnicos principales: una compleja transición vertical geométrica entre el alineamiento horizontal de la troncal y la pendiente del acceso al puente, lo que generaba altas cargas dinámicas; y la exposición al régimen pluviométrico bimodal de Bogotá. Las dos temporadas anuales de lluvia evidenciaron una correlación directa con los ciclos de deterioro de la junta, demostrando que el factor hídrico acelera la degradación estructural.

Las imágenes a continuación muestran el deterioro estructural en los bloques de transición de las juntas. Estos elementos se construyeron con concreto reforzado de alta resistencia, complementado con un sistema de refuerzo tradicional de flejes y barras longitudinales de acero.



Daño en bloque de transición de entrada, centrado en las llantas del carril exclusivo



Daño en bloque de concreto con barras de refuerzo pasivo

Para evaluar el desempeño, se implementó un protocolo experimental comparativo que incluyó la reinstalación de la junta modular existente. Se instalaron nuevos bloques de transición en la zona de entrada y en el área deteriorada del bloque de salida (sector derecho de la imagen). Como control experimental, se mantuvo un bloque de transición fabricado con concreto reforzado convencional, permitiendo así comparar el comportamiento temporal del sistema.



Comportamiento 3 meses después de la instalación



Comportamiento 1 año después con daños en bloque de concreto

El análisis fotográfico revela un deterioro estructural significativo tras doce meses de servicio, pese al uso de concreto de alta resistencia con refuerzo convencional. El bloque de salida en el sector izquierdo exhibe daños considerables, tanto en su estructura como en el pavimento adyacente. Estas fallas requieren reparaciones que interrumpen la operación del sistema BRT, generando costos indirectos que superan la inversión inicial. Es notable que este deterioro ocurra en una zona de menor exigencia en comparación con los bloques de entrada, que reciben directamente el impacto de los buses biarticulados. Estos resultados confirman la necesidad de implementar materiales con propiedades elásticas en los bloques de transición. El sistema continúa bajo monitoreo, y se proyecta rehabilitar el bloque afectado con concreto elastomérico.

Los resultados experimentales evidencian las limitaciones de los materiales cementicios convencionales en esta aplicación, ya que su mecanismo de disipación energética por fricción interna es insuficiente. La evidencia demuestra que los materiales con propiedades elastoméricas, particularmente el concreto PlyKrete de Polyset y tecnologías afines, proporcionan un desempeño superior en los bloques de transición. Esta superioridad se atribuye a sus características viscoelásticas y su capacidad mejorada de absorción de impacto, lo que prolonga significativamente la vida útil del sistema.

### **Implementación y resultados en Colombia: Seis años de innovación y mejora continua**

La implementación de juntas Polyset en Colombia se ha extendido a más de 5.000 metros lineales desde 2018, demostrando un rendimiento técnico sobresaliente. El sistema está compuesto por los siguientes elementos fundamentales:

- **Bloques de concreto elastomérico (Ply Krete):** Sistema estructural avanzado que utiliza deformación elástica controlada para disipar energía de impacto. Su efectividad se ha comprobado mediante pruebas de campo en el corredor de Transmilenio de las Américas con Avenida 68 en Bogotá, donde ha mantenido su integridad estructural bajo cargas cíclicas intensas.
- **Sistema de adhesión:** La interfaz de adherencia, que combina Ply Primer LV y Ply Bonder, es esencial para la integridad estructural del sistema y ha mostrado un desempeño excepcional, especialmente en condiciones de alta pluviosidad.

El sistema ha demostrado excelentes resultados en la instalación de juntas modulares que manejan grandes movimientos. Las siguientes fotos muestran su funcionamiento y durabilidad:

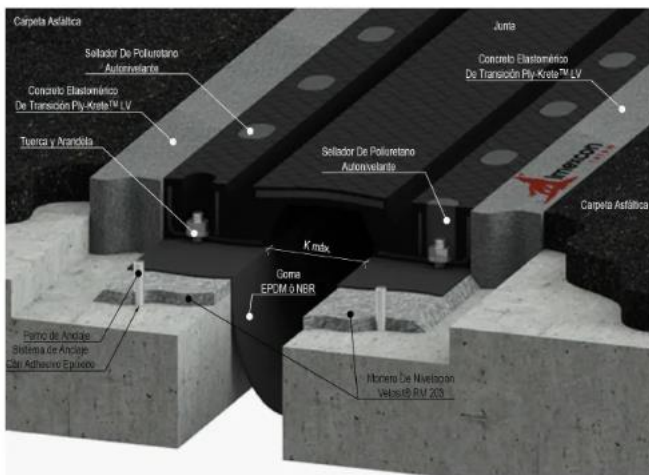


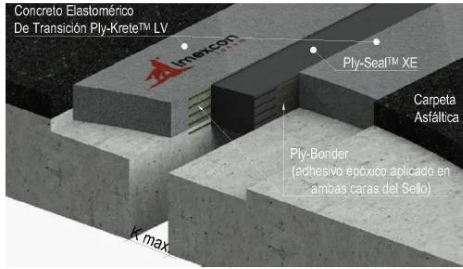
Fig. Vista 3D general materiales y componentes de instalación junta convencionales instaladas con sistema Ply Krete de Polysset.



Imagen 13. Junta modular instalada con el sistema Ply krete en el proyecto 4G Villavicencio Yopal para el concesionario Covorient.

Para juntas con movimientos de hasta 120 mm ( $\pm 60$  mm) y aperturas menores a 12 centímetros, Polysset desarrolló una solución técnica que integra el sello de celda cerrada PlySeal como alternativa al bloque de caucho convencional. La transición de módulos tradicionales de caucho y acero hacia este sistema de sello flexible optimiza significativamente los costos del proyecto: si bien los bloques de transición elastoméricos son más costosos que los tradicionales, esto se equilibra con el menor costo del sello PlySeal frente a los módulos de junta convencionales, permitiendo tener una junta de alto desempeño al costo de una solución convencional. El sistema asegura la impermeabilidad de la junta y ofrece gran versatilidad geométrica, permitiendo ajustes dimensionales tanto en ancho como en alineación, como se muestra en la documentación fotográfica siguiente.





Descripción de sistema de juntas PolySet para pequeños desplazamientos, bloques elastomericos más sello flexible de celta cerrada PlySeal

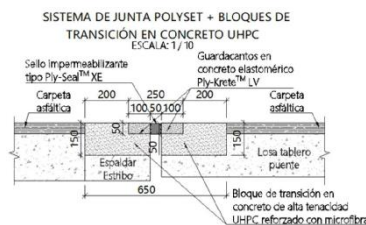
Ejemplos de instalación en ampliaciones con cambio de de dirección, ventaja que permite el sello flexible PlySeal.

- Sello elástico (Ply Seal):** El sistema incorpora un componente elastomérico con propiedades mecánicas excepcionales que permite deformaciones multidireccionales: hasta 100% en esfuerzo cortante, 60% en compresión y 30% en tracción. Este elemento asegura la impermeabilidad del sistema incluso en condiciones ambientales adversas, como precipitaciones intensas y exposición prolongada a radiación ultravioleta.

Este sistema de junta, diseñado para aperturas de hasta 12 centímetros, ha mostrado excelentes resultados tanto en estructuras nuevas como en ampliaciones de puentes existentes, según evidencian las aplicaciones documentadas. En estructuras preexistentes, las propiedades viscoelásticas del sistema facilitan una adaptación óptima a las irregularidades superficiales de la base. Sin embargo, es importante aclarar que el sistema no está diseñado para reforzar estructuralmente la losa de base que sirve como apoyo a la junta.

### Rehabilitación integral de bases: Un desafío crítico en puentes existentes

Durante los proyectos en Colombia, se identificó la necesidad crítica de implementar una solución integral para rehabilitar puentes existentes, enfocándose en la intervención de la base y la creación de un soporte estructural óptimo para los sistemas de junta. Como respuesta, se desarrolló una metodología innovadora que utiliza concreto de ultra alto desempeño (UHPC, por sus siglas en inglés), la cual ha mostrado resultados sobresalientes. Esta solución integral permite a concesionarios y entidades gubernamentales resolver, en una sola intervención, el deterioro en los bordes de las losas y el espaldar de los estribos, junto con la renovación de las juntas. El resultado es una solución técnicamente sólida y económicamente viable, que se distingue por su alto rendimiento y bajos costos de mantenimiento.



Solución con bases en concreto de ultra alto desempeño UHPC y juntas con sello flexible y gurada-cantos en concreto elastomeric

Sistema de junta tipo PolySet con base en UHPC en rehabilitación de puente con más de 20 años de edad.

- **Concreto de Ultra Alto Desempeño (UHPC):** Este material de avanzada tecnología, un concreto fibro-reforzado con propiedades mecánicas y durabilidad excepcionales, constituye un componente fundamental en la optimización del sistema mediante su implementación en las siguientes aplicaciones críticas:
  - Rehabilitación y reforzamiento estructural de bases deterioradas, proporcionando una superficie de apoyo con características mecánicas óptimas para la instalación de sistemas de junta.
  - Reforzamiento integral de los bordes de losa, mitigando los fenómenos de degradación estructural asociados a la exposición ambiental y las solicitaciones mecánicas cíclicas inherentes a la operación del puente.
  - Reducción de aperturas: La implementación de elementos estructurales en UHPC facilita la reducción controlada de la apertura posterior a la manifestación de los fenómenos de retracción y flujo plástico del puente. Esta modificación geométrica resulta en un sistema de junta más pequeña, concordante con los requerimientos cinemáticos de una estructura que ha alcanzado su estado de equilibrio reológico, maximizando la eficiencia operativa y económica del sistema.
  - Rehabilitación integral del pavimento adyacente, garantizando una transición geométrica y mecánicamente optimizada hacia el sistema de junta.

### **Reducción de aperturas en juntas: Una estrategia integral para la reducción de costos y mejora del mantenimiento**

Los costos operativos y de mantenimiento pueden optimizarse mediante la reducción estratégica de las aperturas en las juntas de dilatación. Los estudios muestran que los fenómenos reológicos asociados a la retracción por secado del concreto alcanzan su equilibrio después de tres años. En los siguientes diez años, se completan los fenómenos de acortamiento elástico, lo que causa una contracción de los vanos del puente y aumenta la dimensión de la apertura. Sin embargo, en esta etapa de la vida útil, los requerimientos cinemáticos se limitan principalmente a los desplazamientos por fuerzas de frenado, efectos centrífugos y dilatación térmica, lo que permite reducir significativamente la magnitud de la apertura. La combinación de UHPC y juntas tipo PolySet ha demostrado ser especialmente efectiva en este proceso de optimización, como se muestra en el siguiente ejemplo.



Estado inicial de la junta a reparar



Tamaño de la apertura a saltar



Preparación de la formaleta para negativos de junta tipo PolySet



Mezclado de micro fibras estructurales  $f_y=2850\text{MPa}$ , en un cuantía de  $156\text{kg/m}^3$



Fundida o vaciado del UHPC en bloques de nivelación y menzulas para reducir la apertura



Bloque fundido en UHPC



Desmoldaje de los bloques en UHPC



Intalación de junta tipo PolySet, sobre bases en UHPC

### Concreto de ultra alto desempeño: Innovación en el control de fisuración y resistencia a la fatiga

El concreto de ultra alto desempeño reforzado con fibras (UHPRFC) exhibe propiedades mecánicas excepcionales que lo hacen ideal para aplicaciones estructurales en bases. Sin embargo, su uso directo como guarda-cantos requiere consideraciones especiales debido a las limitaciones inherentes de su naturaleza cementicia. A pesar de sus destacadas características mecánicas, la falta de datos sobre su



comportamiento a largo plazo y sus mecanismos de disipación de energía por fricción interna indican que se necesita una evaluación más detallada.

Actualmente, se desarrolla una investigación experimental en el corredor Ibagué-Honda, específicamente en el puente Sabandija, para evaluar cuantitativamente la durabilidad y el comportamiento a largo plazo del material. La evidencia empírica disponible sugiere que la combinación del UHPFRC con el sistema de juntas PolySet representa la alternativa más eficiente en términos de desempeño estructural y costo-beneficio en el mercado actual. A continuación, se presenta una caracterización gráfica del comportamiento a flexión del UHPFRC.

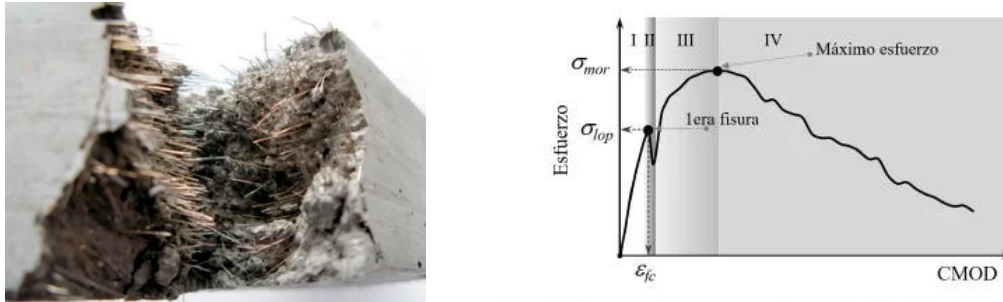


Fig. 4.1 Esquema del comportamiento a flexión típico del UHPFRC.

Fibras de refuerzo interno del UHPC

La Figura 4.1 presenta una representación esquemática del comportamiento mecánico del concreto de ultra alto desempeño reforzado con fibras (UHPFRC) bajo cargas de flexión. El diagrama muestra la notable capacidad del material para mejorar su eficiencia estructural en estado fisurado, gracias a las fibras metálicas que actúan como mecanismo de refuerzo interno.

### Etapas del Comportamiento a Flexión

- **Fase I: Comportamiento Elástico Pre-Fisuración**
  - El UHPFRC mantiene una respuesta lineal-elástica hasta alcanzar el esfuerzo de primera fisura ( $\sigma_{top}$ ).
  - La deformación  $\varepsilon_{fc}$  marca el punto donde se forma la primera fisura y el material comienza su comportamiento no lineal.
- **Fase II: Formación de la Primera Fisura**
  - Al alcanzar el esfuerzo  $\sigma_{top}$ , se forma la primera fisura. Las fibras metálicas se activan en este punto, evitando la pérdida súbita de capacidad típica de concretos convencionales.
- **Fase III: Comportamiento Post-Fisuración**
  - El UHPFRC incrementa su capacidad de carga gracias al puenteo de fisuras que proporcionan las fibras.
  - El esfuerzo máximo alcanzado ( $\sigma_{mor}$ , Módulo de Ruptura) supera significativamente al de concretos convencionales.
  - Las fibras controlan efectivamente la apertura y propagación de fisuras, manteniendo la cohesión del material.
- **Fase IV: Resistencia Residual y Descarga Controlada**
  - Después del esfuerzo máximo, el material experimenta una descarga gradual. Las fibras continúan resistiendo cargas, aportando alta tenacidad y resistencia residual.
  - Aunque la abertura de fisura (CMOD) aumenta, el UHPFRC mantiene su capacidad de soportar cargas gracias a las fibras, demostrando excelente disipación de energía.

## Comportamiento mejorado del concreto UHPC en estado fisurado

- **Contribución de las Fibras:** Después de la primera fisura, las fibras controlan eficazmente el comportamiento post-fisuración, permitiendo que el material soporte cargas y mejore su ductilidad.
- **Mayor Desempeño en Estado Fisurado:** El UHPC supera a los concretos tradicionales en estado fisurado, pues las fibras no solo previenen fallas catastróficas, sino que garantizan un funcionamiento eficiente bajo cargas crecientes.
- **Alta Durabilidad y Resistencia Residual:** Las fibras mantienen un refuerzo continuo incluso al aumentar la abertura de las fisuras, lo que asegura un comportamiento controlado y extiende la vida útil de la estructura.

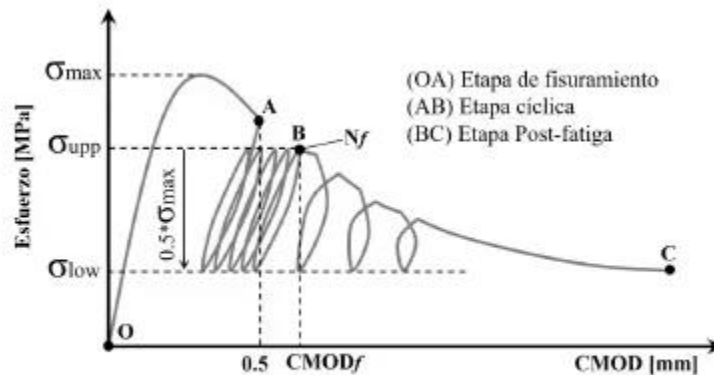


Fig. 4.3 Representación esquemática de la prueba a fatiga.

La Figura 4.3 ilustra el comportamiento mecánico del concreto de ultra alto desempeño reforzado con fibras (UHPFRC) bajo condiciones de fatiga. El diagrama muestra las fases de carga y evidencia cómo las fibras metálicas controlan la propagación de fisuras durante el ensayo. Esta característica produce una notable resistencia residual, crucial para aplicaciones estructurales de alta demanda como los bloques de nivelación de las juntas.

### Caracterización del comportamiento bajo fatiga

- **Etapa de Fisuramiento (OA):** Representa el incremento inicial de carga hasta la formación de la primera fisura (punto A), donde el esfuerzo alcanza un valor máximo ( $\sigma_{max}$ ). El material muestra un comportamiento elástico hasta el inicio de la fisuración, con una apertura inicial medida por  $CMOD_f$  (Crack Mouth Opening Displacement).
- **Etapa Cíclica (AB):** Se aplican cargas cíclicas entre un esfuerzo mínimo ( $\sigma_{low}$ ) y máximo ( $\sigma_{upp}$ ). Las fibras metálicas en el UHPFRC controlan la apertura y propagación de fisuras, manteniendo la capacidad estructural durante los ciclos. El número de ciclos hasta la falla se denomina  $N_f$ .
- **Etapa Post-Fatiga (BC):** Después de la etapa cíclica, el material entra en la fase de post-fatiga, donde la fisura se propaga hasta la falla en el punto C. La capacidad portante disminuye gradualmente por el colapso de la red de fibras que contenía las fisuras.

### Características superiores del comportamiento mecánico del UHPC

- **Resistencia a Fatiga:** El material demuestra una alta capacidad para resistir ciclos de carga antes de la falla, lo que resulta en una excelente durabilidad estructural.

- **Contribución de las Fibras:** Las fibras metálicas controlan la apertura de fisuras y proporcionan refuerzo en la etapa post-fisuración, mejorando la tenacidad y resistencia residual del UHPFRC.

Esta representación gráfica muestra el comportamiento superior del UHPFRC bajo fatiga, donde las fibras metálicas mejoran el desempeño post-fisuración y permiten que el material soporte numerosos ciclos de carga sin degradarse significativamente. Esto lo hace ideal para aplicaciones estructurales bajo esfuerzos cíclicos, como pavimentos y tableros de puentes, validando su idoneidad para usos estructurales exigentes.

### Implicaciones del concreto de ultra alto desempeño reforzado con fibras en el diseño y mantenimiento de juntas

Las propiedades mecánicas excepcionales del Concreto de Ultra Alto Desempeño Reforzado con Fibras (UHPFRC) bajo fatiga son fundamentales para optimizar el diseño y mantenimiento de los sistemas de soporte para juntas de dilatación en puentes.

- **Diseño bloques de nivelación en juntas:** Permite usar UHPFRC en aplicaciones de alto tráfico con mayor confiabilidad a largo plazo.
- **Mantenimiento reducido:** El mejor control de fisuración bajo cargas cíclicas reduce las necesidades de mantenimiento y reparación.

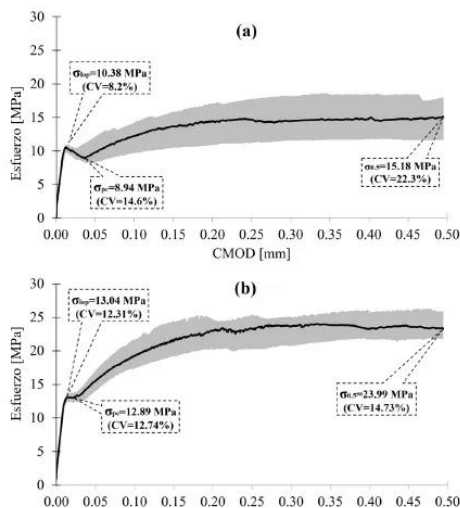


Fig. 4.7 Curva media de pre-fisuramiento para las mezclas UHPFRC-A (a) y UHPFRC-T (b).

### Caracterización del comportamiento a flexión del concreto reforzado con fibras UHPC

La Figura 4.7 muestra un análisis comparativo del comportamiento flexural de dos variantes del UHPFRC: una mezcla autonivelante (UHPFRC-A) y una tixotrópica (UHPFRC-T), evaluando su respuesta mecánica antes y después de la fisuración. Este estudio experimental es esencial para caracterizar cuantitativamente la efectividad de los mecanismos de control de fisuración del UHPFRC:

- **Rol de las fibras metálicas:** En ambas mezclas, las fibras controlan la propagación de fisuras y mejoran la resistencia post-fisuración, confirmando la eficacia de las fibras en el UHPFRC.
- **Desempeño superior de la mezcla tixotrópica:** La UHPFRC-T muestra un rendimiento excepcional, alcanzando una resistencia inicial a la fisura de 13.04 MPa sin caídas significativas posteriores. Esto revela una distribución y orientación óptima de las fibras, confirmando su importancia en el control de fisuración.
- **Comportamiento post-fisuración:** La capacidad del UHPFRC-T para mantener o incrementar su capacidad portante después de la fisuración inicial confirma su excelente resistencia residual y comportamiento bajo fatiga.
- **Implicaciones para aplicaciones estructurales:** Este comportamiento demuestra la idoneidad del UHPFRC para aplicaciones estructurales críticas, especialmente bajo cargas cíclicas y en ambientes agresivos.

Estos resultados validan nuestros criterios de aceptación para fisuras en UHPFRC, demostrando que el material mantiene su integridad estructural y desempeño incluso después de la fisuración inicial, gracias a las fibras metálicas.

## Referencias

- Vacca, A. (2022). "Comportamiento a flexión y fatiga de concreto de ultra alto desempeño reforzado con fibras de acero"

## Puente Opón: Referente de innovación y durabilidad bajo cargas extremas

El puente Opón, ubicado en uno de los principales corredores logísticos de Colombia entre la capital y los puertos del Atlántico, es un caso ejemplar en la implementación del sistema de juntas de dilatación. Esta infraestructura crítica soporta uno de los mayores índices de tráfico pesado del país, lo que permite validar la durabilidad y eficiencia de las juntas instaladas bajo condiciones extremas.

La intervención estructural requirió una solución integral que incluyó: (1) rehabilitación de los elementos base de las juntas, (2) reforzamiento estructural de los bordes del tablero, (3) ampliación estratégica del área de intervención para tratar la fisuración del pavimento adyacente, y (4) instalación del sistema de junta Polyset sobre una base de Concreto de Ultra Alto Desempeño (UHPC). Las siguientes fotografías muestran el estado inicial de las juntas antes de la intervención.



Daño en bloque de concreto y pérdida de sello



Daño en bloque de concreto y pavimento adyacente



Daño en el bloque de transición por degradación del material

El proceso de reparación se desarrolló en los siguientes pasos:

- El proceso de rehabilitación inicia con la remoción sistemática de la junta existente, preservando el acero de refuerzo de la aplicación previa para garantizar una adecuada integración estructural con la nueva intervención.



Cuadrilla del grupo Imexcon realizando labores de demolición

Implementación del sistema de encofrado para la construcción de bloques de transición en concreto, garantizando las dimensiones específicas requeridas para la posterior instalación de los bloques elastoméricos del sistema de junta Plykrete.



Instalación de formaleta para dejar elementos monolíticos de UHPC sobre los que se instale la junta tipo Polyset.



Se instala una obra falsa para dejar los negativos en el concreto UHPC de las bases, para instalar los bloques de concreto elastomeric y el sello flexible de celda cerrada.

La implementación del Concreto de Ultra Alto Desempeño (UHPC) se realiza mediante vaciado in situ para reforzar las bases deterioradas, previo a la instalación del sistema de junta Polyset. La composición del UHPC para bloques de nivelación incorpora fibras metálicas en una dosificación del 2% (156 kg/m<sup>3</sup>), alcanzando una densidad de 40 millones de filamentos por metro cúbico.





Fundida de bloques de nivelación en UHPC



Fundida de bloques de nivelación en UHPC, mezcla con reología de mini Slup de 18cm de diámetro.

La instalación de los bloques elastoméricos Plykrete se realiza mediante fundición in situ, permitiendo una adaptación precisa al perfil geométrico de la vía. Este método optimiza el nivel de servicio y reduce la contaminación acústica. Posteriormente, se instala el sistema de sellado Ply Seal, completando la integración del sistema de junta.



Instalación y fundida de concreto elastomérico PlyKrete de color Negro



Protección de cinta para no manchar el UHPC con el concreto elastomérico PlyKrete

- La instalación del sello de junta Ply Seal utiliza un proceso de precompresión al 30%, permitiendo una capacidad de absorción de deformación en tracción de hasta 60%. Considerando la capacidad inherente a tracción del material del 30%, el sistema logra una capacidad total de deformación del 100% respecto a las dimensiones originales del sello, tanto vertical como transversalmente. Esta característica hace al sistema especialmente adecuado para estructuras con geometrías complejas, como puentes curvos, elementos con sesgos pronunciados o estructuras con aisladores sísmicos que experimentan desplazamientos significativos perpendiculares a la junta.



Instalación de sello impermeable y flexible Ply Seal



El sello se instala pre-comprimido o a presión, preferiblemente con el tablero frío ya que el puente está recogido con el mayor tamaño de apertura.

- Implementación por fases: La construcción del puente se ejecuta secuencialmente por medias calzadas debido a las restricciones geométricas del corredor unidireccional. Para preservar la integridad estructural, se implementa un sistema de sellado flexible tipo PlySeal en la junta fría del eje longitudinal del tablero entre las etapas constructivas. Esta solución es especialmente relevante en corredores con altas solicitaciones vehiculares, donde los vehículos pesados inducen deformaciones significativas que podrían causar fisuras en la interfaz de la junta fría. El sistema de sellado elástico gestiona eficientemente estas deformaciones, garantizando la durabilidad e impermeabilidad de la junta constructiva.



Junta terminada con sistema desarrollado por grupo Imexcon Latam., con bases en concreto de ultra alto desempeño UHPC y junta en concreto elastomérico y sello flexible tipo Polyset

En el marco de este proyecto, se investiga experimentalmente el reforzamiento del concreto de ultra alto desempeño mediante membranas bidireccionales de láminas HDPE anti-fractura en la zona basal de los bloques de nivelación en UHPC. Esta metodología mejora significativamente las propiedades mecánicas del UHPC, especialmente bajo solicitaciones extremas como cargas extra-dimensionadas, concentración de esfuerzos en ejes vehiculares sobrecargados, o distribuciones de carga no convencionales por configuraciones de neumáticos con menor área de contacto.

La investigación y desarrollo de este sistema busca responder a las exigentes solicitaciones estructurales, condiciones ambientales y composición heterogénea del tráfico en los principales corredores de carga del país. El desarrollo industrial y logístico actual requiere transportar cargas que frecuentemente exceden las especificaciones de diseño vigentes. Por ello, es imperativo desarrollar soluciones técnicas que gestionen estas solicitaciones extraordinarias sin comprometer la integridad estructural, manteniendo la viabilidad económica de las intervenciones.



Reforzamiento de membrana anti fractura



Instalación de concreto fibro-reforzado estructural UHPC



Bloques de nivelación con membrana anti-fractura y concreto de ultra alto desempeño UHPC

### **Innovación y eficiencia: Un modelo de negocio que integra tecnología y servicio en la infraestructura vial latinoamericana**

La implementación de tecnologías innovadoras en Colombia ha sido posible gracias al modelo de negocio integral desarrollado por el grupo Imexcon Latam, que optimiza la eficiencia operativa y la estructura de costos. Este modelo se basa en tres entidades especializadas: Imexcon Ingeniería SPI, enfocada en desarrollo técnico y diseño de soluciones; Imexcon Latinoamérica, responsable de la gestión logística e implementación de sistemas de juntas; y Bieton AS, dedicada a la manufactura local de concreto de ultra alto desempeño (UHPC). Esta integración vertical ha optimizado procesos y eliminado intermediarios, permitiendo introducir sistemas avanzados al mercado latinoamericano con una relación costo-beneficio favorable.

Sin embargo, la competitividad en precios es solo un aspecto de la modernización del sector. La transformación integral ha requerido modelos de servicio innovadores que ofrezcan soluciones completas. Este enfoque centraliza servicios críticos —diagnóstico técnico, ingeniería especializada, suministro de materiales, implementación tecnológica, garantías y soporte técnico— en una única entidad coordinadora. Así, Imexcon Latam proporciona un sistema integral garantizado desde la especificación técnica hasta la operación final.

La innovación tecnológica conlleva cierta incertidumbre, por lo que las garantías son fundamentales para facilitar la adopción de nuevas tecnologías. Esto es especialmente relevante en sistemas de juntas

que, pese a su eficacia comprobada globalmente, requieren adaptación específica a las condiciones de la infraestructura latinoamericana.

Por ello, el sistema ofrece un esquema de garantías sin precedentes: una cobertura integral de 5 años en dos fases. Durante los primeros dos años, la empresa asume total responsabilidad sobre materiales e instalación. En los años 3 a 5, se implementa un programa de mantenimiento preventivo, garantizando que los costos no superarán el 10% de la longitud anual instalada. Después del año 5, las juntas pasan a responsabilidad del propietario, con opción de continuar el mantenimiento como servicio adicional. Este índice representa una mejora significativa frente a sistemas convencionales, que suelen requerir intervenciones mayores o completa reinstalación de las juntas en períodos similares.

La sinergia entre innovación tecnológica, consultoría especializada, optimización logística, manufactura local y servicios integrales con garantías sólidas está transformando el sector. Esta convergencia permite implementar soluciones de nivel internacional a costos competitivos en Latinoamérica, demostrando la viabilidad de combinar tecnología avanzada con sostenibilidad económica.

### **Optimización de la vida útil: Estrategias de mantenimiento y rehabilitación**

La implementación de sistemas de juntas en proyectos de rehabilitación en Colombia ha generado valiosas experiencias. A través de intervenciones en puentes existentes a rehabilitar, se ha desarrollado un proceso sistemático para optimizar la tecnología de juntas en el contexto latinoamericano.

Colombia se ha convertido en un centro de innovación gracias a sus características distintivas: alto nivel de formación en ingeniería, diversidad climática, intensas cargas vehiculares, infraestructura en diversos estados de conservación, reciente ingreso a la OCDE y desarrollo de nuevos proyectos viales. En este contexto, Imexcon Latam, junto con concesionarios viales innovadores, ha implementado proyectos piloto estratégicos para desarrollar soluciones definitivas. Los principales hallazgos son:

- Los bloques de transición con concretos elastoméricos optimizan significativamente el ciclo de vida y reducen costos operativos. La incorporación de concretos UHPC en la base proporciona una solución estructural integral, permitiendo implementar infraestructura de alto rendimiento con menores costos de mantenimiento. Esta configuración responde efectivamente a las exigencias del comercio internacional, especialmente en países OCDE como Colombia y Chile.
- El uso de materiales elastoméricos y UHPC requiere una nueva perspectiva que trasciende los parámetros del concreto convencional. Esta transformación exige participación activa de todos los actores, superando la visión tradicional de las juntas como elementos secundarios. Su importancia es evidente en las concesiones privadas actuales, donde el ciclo de vida y costos operativos son tan relevantes como la inversión inicial.
- La implementación de estas soluciones innovadoras es fundamental para la infraestructura vial latinoamericana. Con base en la evidencia técnica y resultados en Colombia, invitamos a la comunidad de ingeniería chilena a evaluar estos sistemas, considerando las similitudes en condiciones geográficas y requerimientos estructurales entre ambos países.

## Resultados y perspectivas: Una propuesta integral para Latinoamérica

La implementación del sistema Polyset en Colombia ha mostrado resultados sobresalientes en durabilidad, eficiencia y viabilidad económica. Su aplicación en proyectos complejos —concesiones Ibagué-Honda, Villavicencio-Yopal, y puentes en Santander de Quilichao-Popayán y Villavicencio-Guamal— ha generado conocimientos técnicos aplicables regionalmente. La validación empírica en condiciones extremas ha optimizado su desempeño. La integración de tecnologías avanzadas — concretos elastoméricos, UHPC, membranas bidireccionales, sistemas epóxicos y sellos elásticos— **complementada con la experiencias y aprendizajes validados de mantenimiento y rehabilitación**, establece un precedente técnico sólido para su implementación regional.

El modelo de negocio de Imexcon Latam, basado en integración vertical y optimización de procesos, demuestra la viabilidad de implementar alta tecnología a costos competitivos en Latinoamérica. Este enfoque integral, respaldado por garantías sólidas y mantenimiento preventivo eficiente, establece un nuevo estándar en infraestructura vial, facilitando la adopción de tecnologías innovadoras en la región.



Oscar Ricardo Patiño Vargas  
Gerente General Grupo Imexcon Colombia  
opatino@imexconlatam.com  
(+57) 314 7867460