

12^o Congreso Iberoamericano de Pavimentos de Concreto

MAYO 10 AL 13 DE 2023 - Barranquilla, Colombia
Centro de Convenciones Blue Gardens

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO



Cortesía: Diego Jaramillo

Organizan:



Nota legal:

- Las informaciones y conceptos expresados en esta conferencia tienen el propósito de divulgar e informar de manera general sobre los temas relacionados con el concreto, NO son asesoría para una obra en particular.
- PROCEMCO NO es ni pretende ser asesor de proyectos específicos. Cualquier duda con relación a una obra determinada debe ser consultada por el interesado con los respectivos diseñadores e interventores de la misma.
- El uso que se haga de la información y conceptos aquí expresados no implica responsabilidad alguna para PROCEMCO ni para el conferencista; debe ser utilizada por personas idóneas bajo su responsabilidad y criterio.
- Esta información no sustituye las funciones y obligaciones de las personas contractualmente responsables de la concepción, ejecución y vigilancia de los respectivos proyectos.
- PROCEMCO no asume ningún tipo de responsabilidad por la información que divulguen los patrocinadores y por tanto cualquier reclamación relacionada con la calidad, idoneidad y seguridad de los bienes y servicios ofrecidos deben ser atendidos por cada anunciante.

12^o Congreso Iberoamericano de Pavimentos de Concreto

MAYO 10 AL 13 DE 2023 - Barranquilla, Colombia
Centro de Convenciones Blue Gardens

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

Organizan:



Whitetopping con espesores de 4 cm: uso de UHPC

JOAQUÍN ABELLÁN-GARCÍA
JUAN S. CARVAJAL-MUÑOZ
UNIVERSIDAD DEL NORTE
COLOMBIA





Introducción al concreto de ultra altas prestaciones (UHPC)

- Definición y evolución histórica.
- Principales aplicaciones
- Características y propiedades principales
- Caracterización a nivel de laboratorio
- Optimización de mezclas

Aplicación en ingeniería de pavimentos

- Rehabilitación de pavimentos (el concepto de whitetopping)
- ¿Qué características del UHPC que lo hacen apto?
- Casos de estudio globales
- ¿Cuál es la situación de Colombia?
- Trabajo de investigación Uninorte
 - Enfoque (laboratorio versus campo)
 - Principales temas
 - Resultados esperados
- Conclusiones



LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

This international standard was developed in accordance with internationally recognized principles on standardization established in the Decision on Principles for the Development of International Standards, Guides and Recommendations issued by the World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee.



Designation: C1856/C1856M - 17

Standard Practice for Fabricating and Testing Specimens of Ultra-High Performance Concrete¹

This standard is issued under the fixed designation C1856/C1856M; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This practice covers procedures for fabricating and testing specimens in the laboratory and the field using a representative sample of ultra-high performance concrete (UHPC), for the purpose of determining the properties of the material. This practice is applicable to UHPC with a specified compressive strength of at least 120 MPa (17 000 psi), with nominal maximum size aggregate of less than 5 mm (3/16 in.) and a flow between 200 and 250 mm (8 and 10 in.) as measured by the modified flow table test described in Section 6.

1.2 The values stated in either SI units or inch-pound units are to be regarded separately as standard. The values stated in each system may not be exact equivalents; therefore, each system shall be used independently of the other. Combining values from the two systems may result in non-conformance with the standard.

1.3 If required results obtained from another standard are not reported in the same system of units as used by this standard, it is permitted to convert those results using the conversion factors found in the SI Quick Reference Guide (1).²

1.4 The rest of this standard references notes and footnotes that provide explanatory material. These notes and footnotes (including those in tables and figures) shall not be considered as requirements of this standard.

1.5 This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appropriate safety and health practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use. [WARNING—Fresh hydraulic cementitious mixtures are caustic and may cause chemical burns to exposed skin and tissue upon prolonged exposure.³ Hand protection should be worn when handling UHPC.]

¹ This practice is under the jurisdiction of ASTM Committee C09 on Concrete and Concrete Aggregates and is the direct responsibility of Subcommittee C09.01 on Testing for Strength.

² Current edition approved May 15, 2017. Published June 2017. DOI: 10.1520/C1856-17.

³ The Institute members in parentheses refer to the list of references at the end of this standard.

⁴ See section on Safety Precautions, Manual of Aggregates and Concrete Testing, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 04.02.

1.6 This international standard was developed in accordance with internationally recognized principles on standardization established in the Decision on Principles for the Development of International Standards, Guides and Recommendations issued by the World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee.

2. Referenced Documents

- 2.1 ASTM Standards:⁴
 - C131/C131M Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field
 - C39/C39M Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens
 - C242/C242M Test Method for Obtaining and Testing Dried, Cores, and Sawed Beams of Concrete
 - C125 Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates
 - C152/C152M Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete
 - C191 Test Methods for Time of Setting of Hydraulic Cement by Vicat Needle
 - C192/C192M Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory
 - C219 Terminology Relating to Hydraulic Cement
 - C230/C230M Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement
 - C348/C348M Practice for Preparation and Conditioning of Cast, Dried, or Sawed Specimens of Hydraulic-Cement Mortar and Concrete Used for Length Change Measurements
 - C469/C469M Test Method for Static Modulus of Elasticity and Poisson's Ratio of Concrete in Compression
 - C512/C512M Test Method for Creep of Concrete in Compression
 - C666/C666M Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing
 - C944/C944M Test Method for Abrasion Resistance of Concrete or Mortar Surfaces by the Rotating-Curt Method

⁴ For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For Annual Book of ASTM Standards volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

Definición UHPC

ASTM C1856/C1856M - 17: concreto de resistencia a **compresión** superior a los **120 MPa** con exigencias en cuanto a durabilidad, tenacidad y ductilidad.

Las siguientes características son comunes a los UHPC:

- Resistencia a **tracción** entre **6 - 12 MPa**
- **Relación a/b** inferior a 0.25, y usualmente **entre 0.14 y 0.20**
- Alto contenido en cemento y adiciones minerales, **debidamente empacados**, proporcionando **muy baja porosidad** a la mezcla.
- **Alta durabilidad**
- **Ausencia de agregado grueso**
- **Fibras** para asegurar un comportamiento dúctil



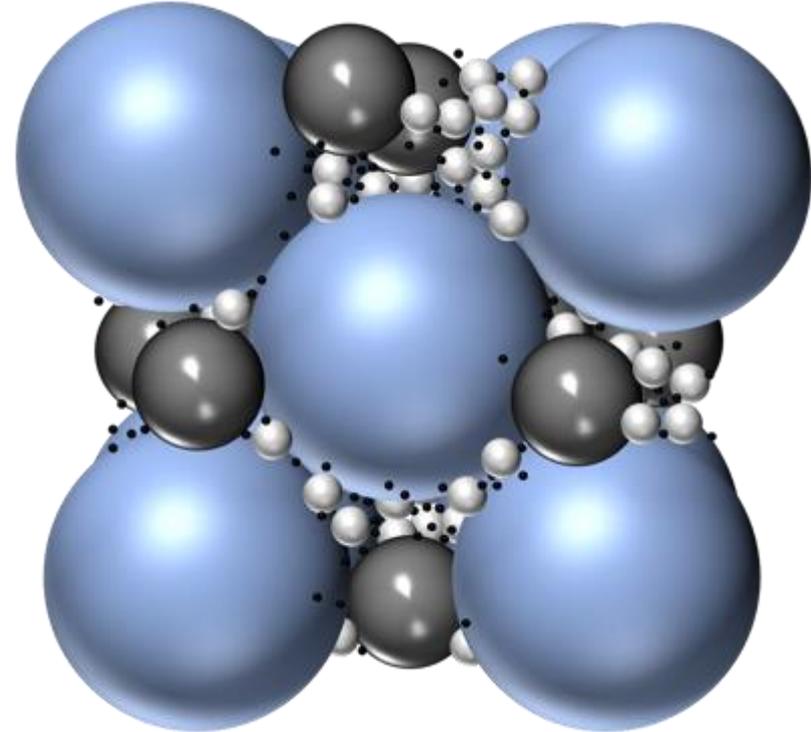
Definición UHPC

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

La **microestructura mejorada** y la **homogeneidad** son características de los **UHPC** y **son el fundamento de sus excelentes propiedades**, tanto **mecánicas** como de **durabilidad**.

Causas de la microestructura mejorada:

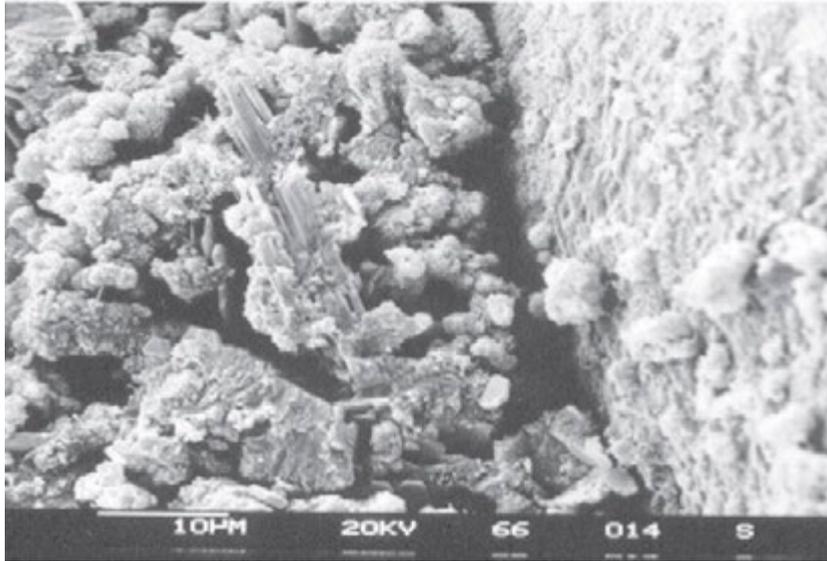
- Elevada **densidad de empaquetamiento** de la matriz.
- **Reacciones puzolánicas. $CH + SH \rightarrow C-S-H$**
- **Mejora de la ITZ** entre pasta - agregado y/o pasta - fibra
- **Baja relación agua – binder (w/b)**





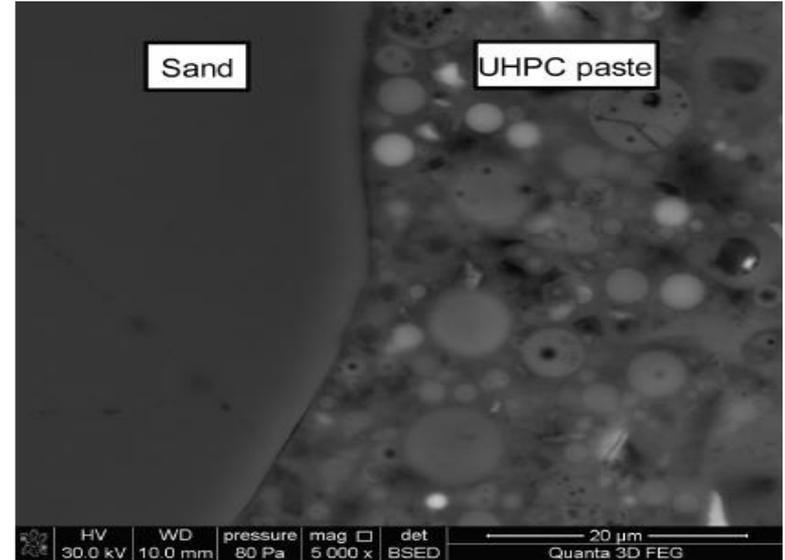
Microestructura mejorada

Zona de transición intersticial (ITZ).



ITZ pasta - agregado en concreto convencional

(Shi et al, 2015)



ITZ pasta - agregado en UHPC

(Gu et al, 2015)



ASPECTOS POSITIVOS

- Tipologías estructurales nuevas.
- Secciones más esbeltas. Menor empleo de material.
- Mayor durabilidad. Mayor vida útil.
- Mejor acabado estético.
- Reducción plazos de ejecución.
- Capacidad de absorción de energía a tracción directa

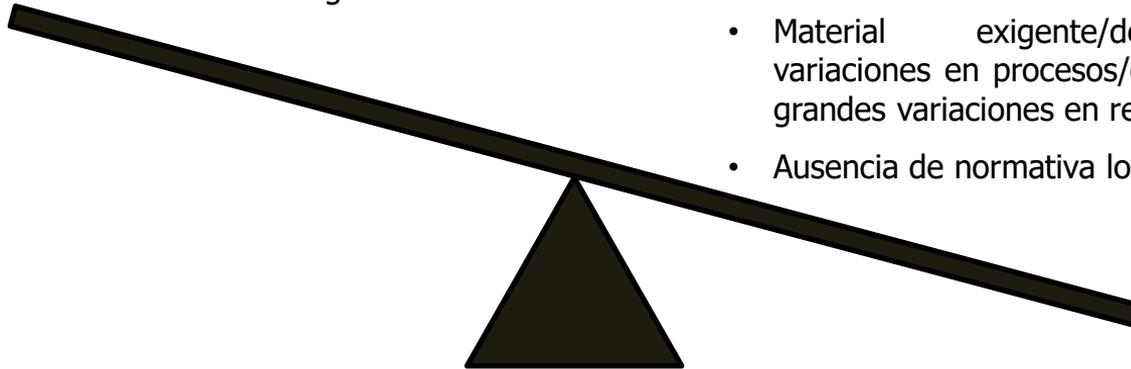
Una dosificación típica tiene entre 800-1000
kg/m³



Elevada huella de carbono

ASPECTOS NEGATIVOS

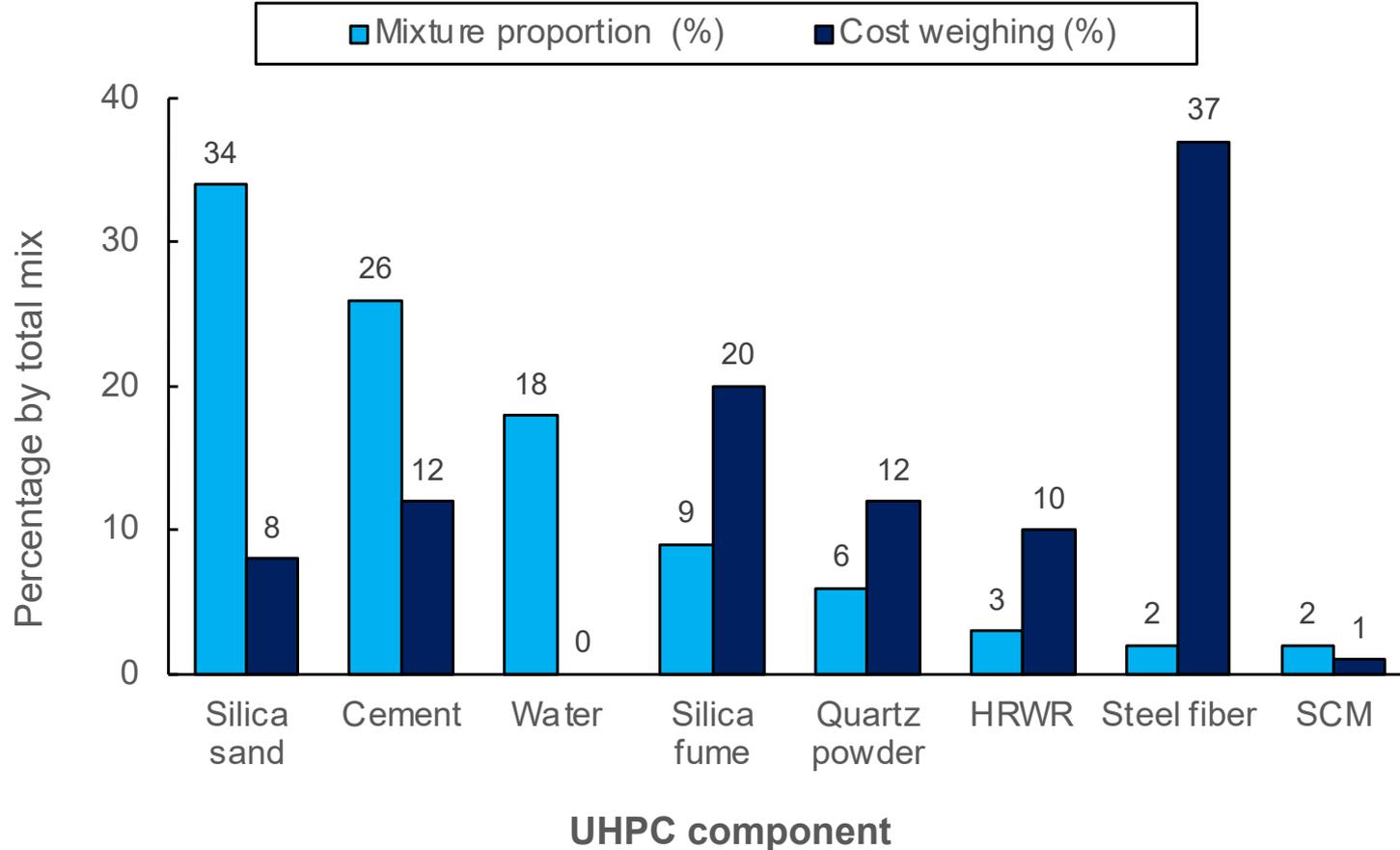
- Requisitos de calidad/compatibilidad de componentes.
- Mayor consumo de cemento por m³.
- Mayor costo por m³.
- Material exigente/delicado. Pequeñas variaciones en procesos/componentes provocan grandes variaciones en respuesta final.
- Ausencia de normativa local.





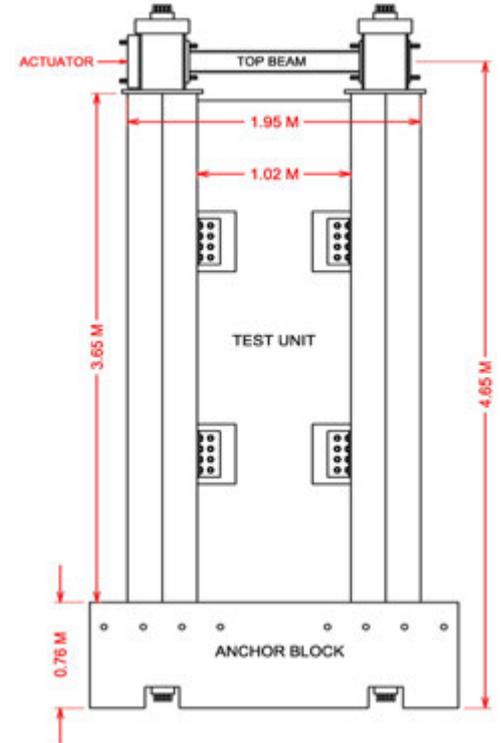
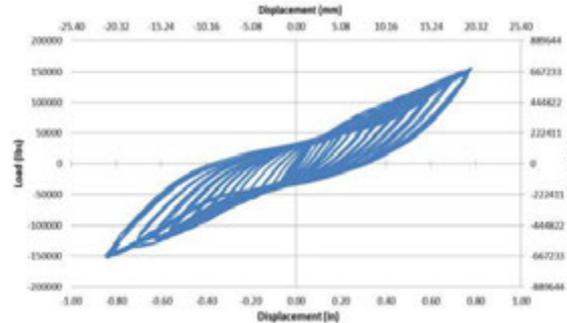
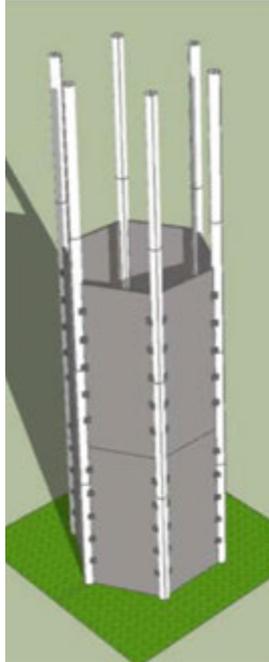
Costos UHPC

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO





TIPOLOGÍAS Y ESTRUCTURAS TÍPICAS DEL ACERO



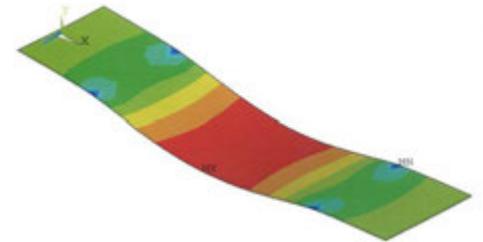
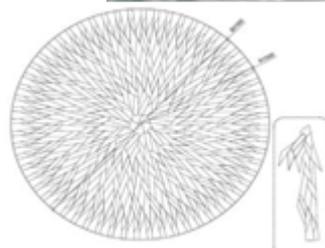
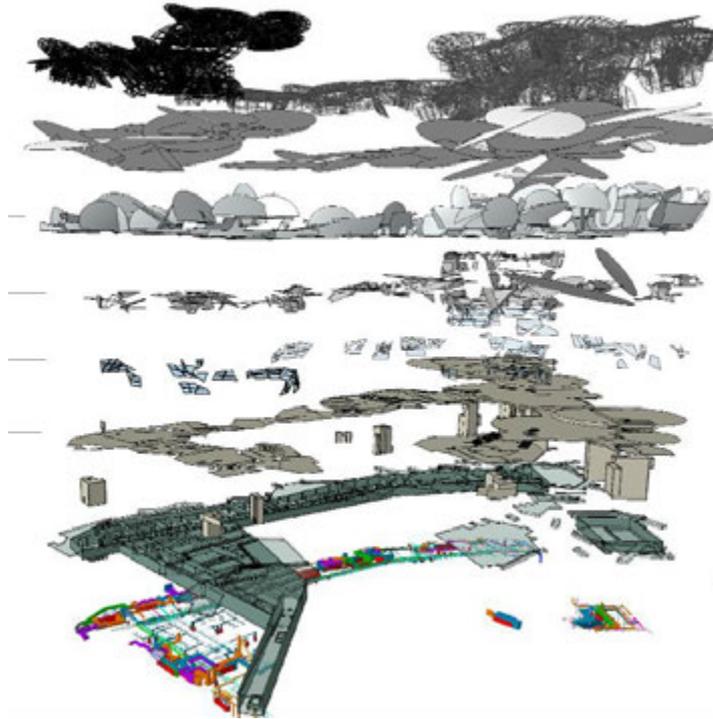
(S. Sritharan y G.M. Schmittz, 2013)



Aplicaciones UHPC

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

ARQUITECTURA



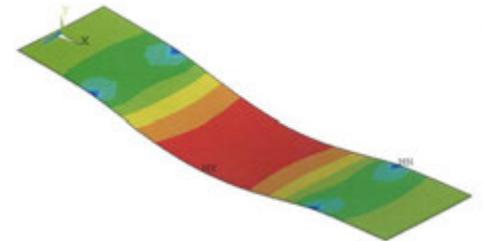
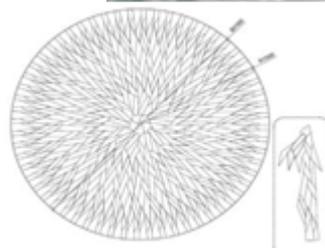
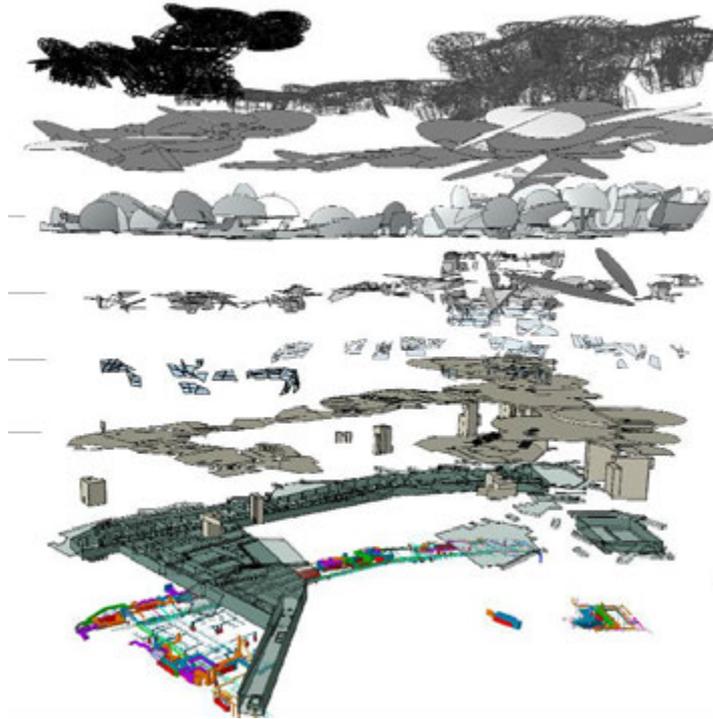
(F. Menétrey, 2013)



Aplicaciones UHPC

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

ARQUITECTURA



(F. Menétrey, 2013)



ARQUITECTURA



(J. Resplendino y F. Toutlemonde , 2013)



PUENTES VEHICULARES (SISTEMA ABC DE CONSTRUCCIÓN)



(E. Camacho, 2013)



PREFABRICADOS

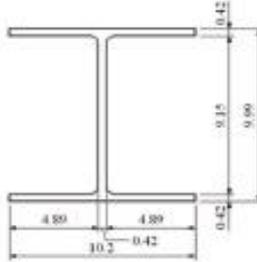


(E. Camacho, 2013)

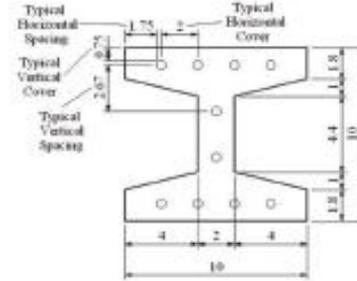


PILOTES HINCADOS

*All dimensions in inches



(a) HP 10 x 57



(b) UHPC tapered H-shape



(c)



(d)



(e)

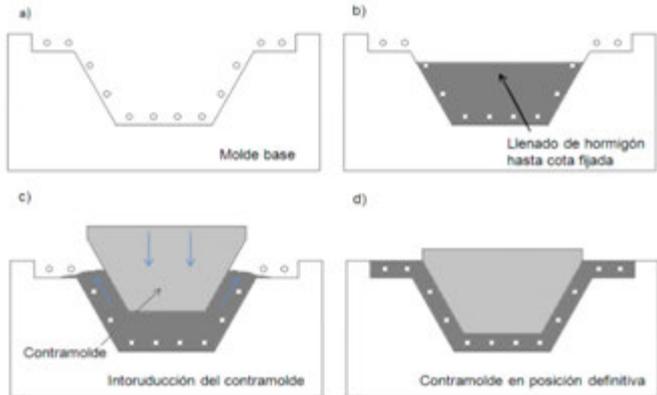


(Coll et al. 2020)

(ACI 239R-18. 2018)



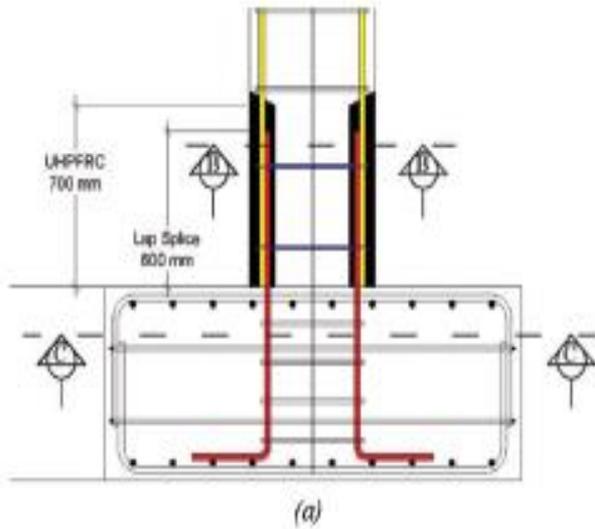
TABLESTACAS



Fuente: Coll et al. 2020



MEJORAMIENTO SÍSMICO DE ESTRUCTURAS EXISTENTES





Aplicaciones UHPC

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

MOBILIARIO URBANO

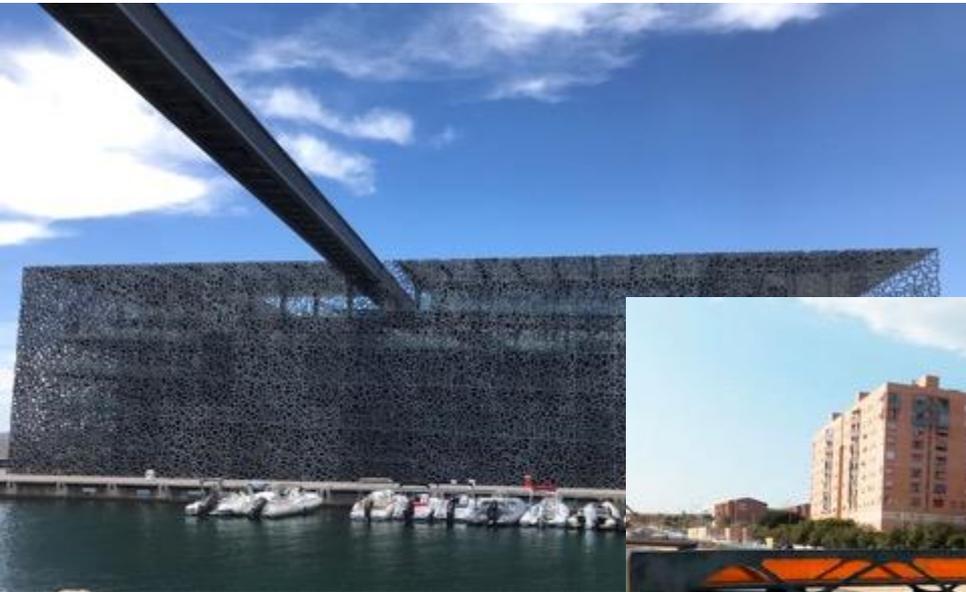




Aplicaciones UHPC

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

PUENTES PEATONALES



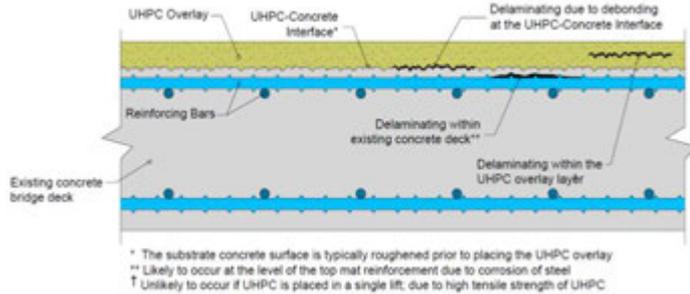
(H. Coll, 2013)

PUENTES





SOBRECARPETAS



(Z.H. Haber y B. Graybeal, 2018)



Materiales cementantes suplementarios



Humo de sílice



Ceniza volante



GGBFS



EASF



RHA



Metacaolín



LP



Micro-LP



Harina de
Cuarzo



FC3R



Harina de
vidrio



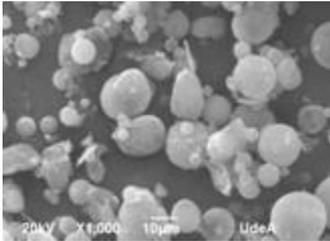
Polvo de
vidrio



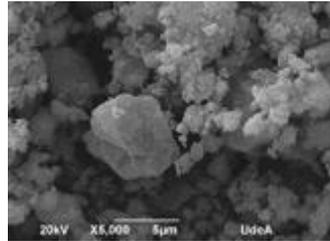
Caracterización a escala de laboratorio

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

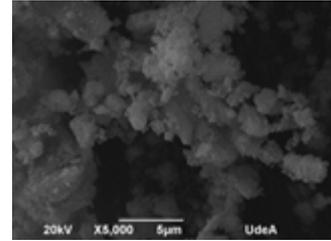
SEM



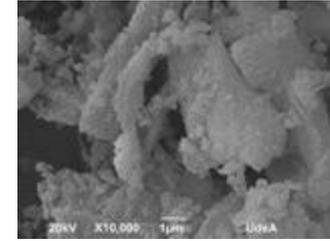
Ceniza volante



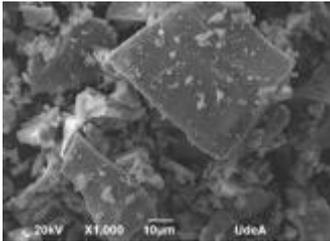
GGBFS



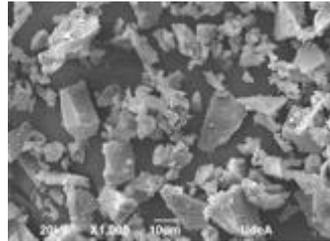
EASF



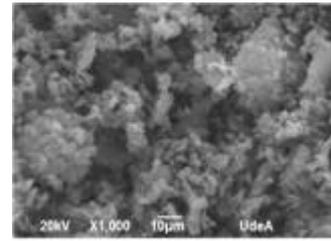
RHA



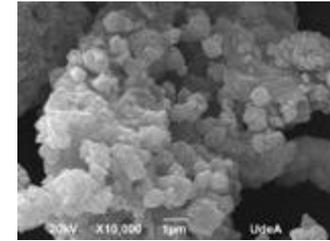
Harina de vidrio



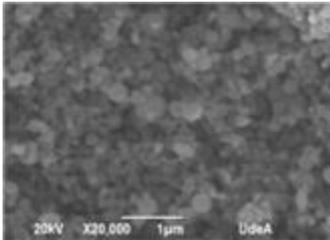
Polvo de vidrio



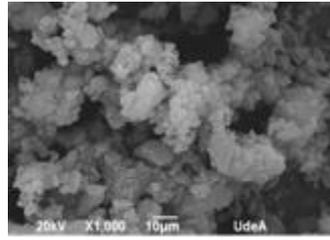
Metacaolín



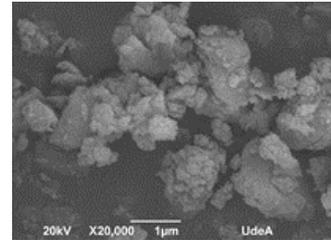
FC3R



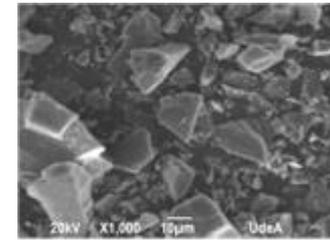
Humo de sílice



LP



Micro-LP



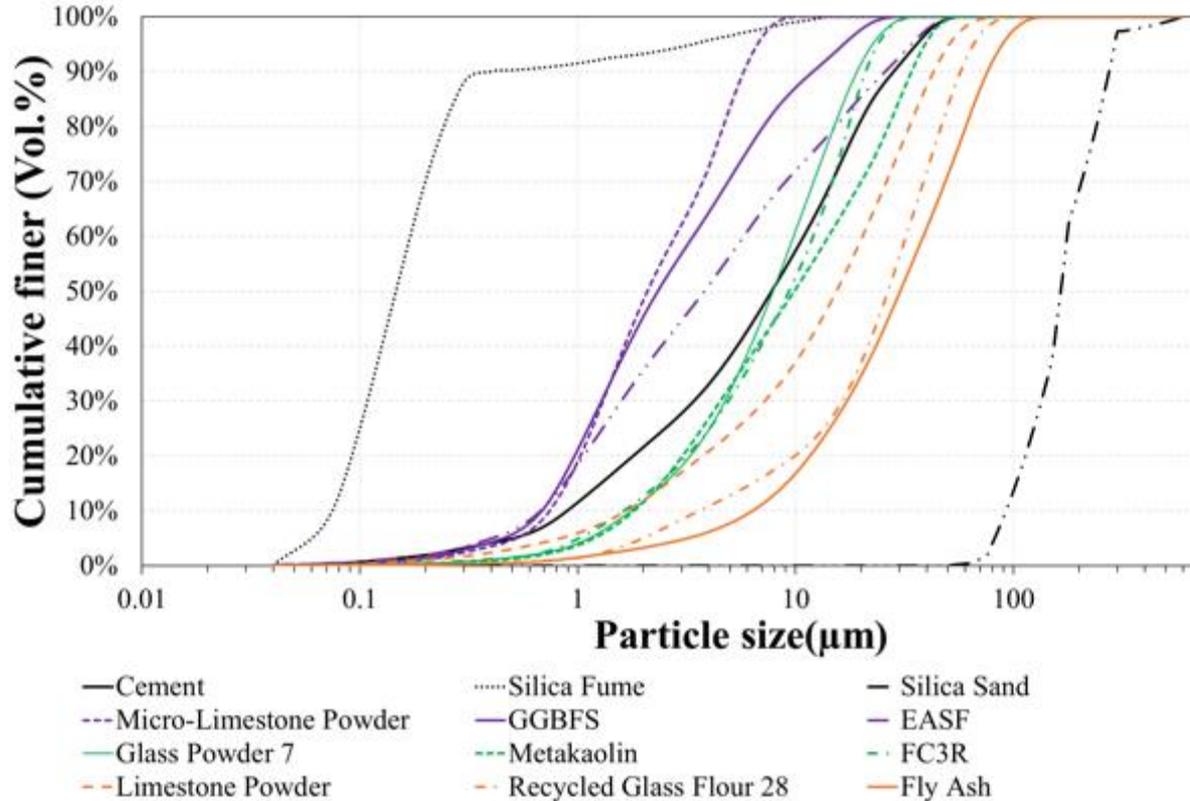
Harina de Cuarzo



Caracterización a escala de laboratorio

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

Granulometría





Caracterización a escala de laboratorio

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

Propiedades físicas y químicas

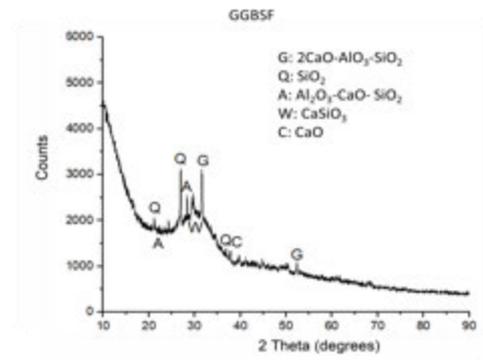
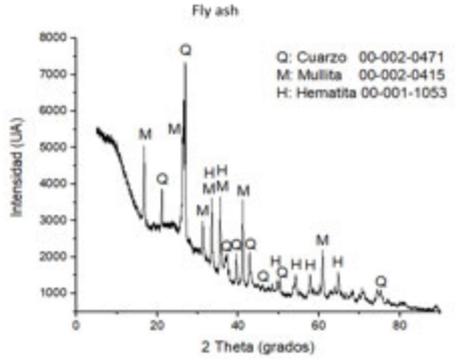
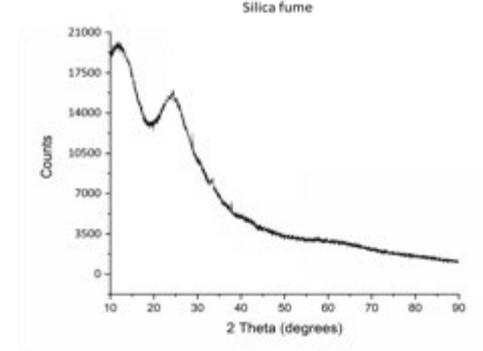
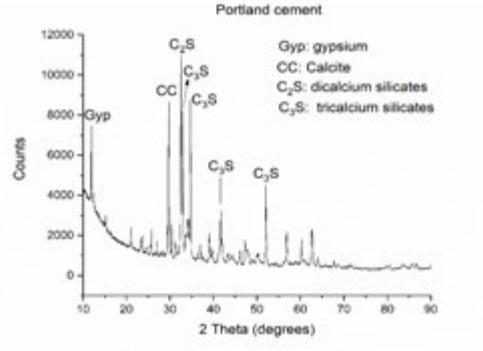
| | C | SF | FA | GGBSF | EASF | GP | GF | RHA | FC3R | MK | LP | Micro-LP | QP | SS |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|----------|-------|-------|
| Densidad específica, gr/cm ³ | 3.15 | 2.20 | 2.32 | 2.95 | 3.15 | 2.55 | 2.55 | 2.16 | 2.76 | 2.66 | 2.73 | 2.73 | 2.65 | 2.65 |
| LOI, % | 2.58 | 0.60 | 12.54 | 0.00 | 4.67 | 0.80 | 1.00 | 4.82 | 10.61 | 2.21 | 42.41 | 42.21 | 0.19 | 0.20 |
| d ₅₀ , μm | 8 | 0.15 | 30 | 2.4 | 2.1 | 7 | 28 | 7.5 | 9.5 | 10 | 15 | 2.1 | 10 | 165 |
| SiO ₂ , % | 19.42 | 92.29 | 50.09 | 36.93 | 21.7 | 75.47 | 72.89 | 88.59 | 39.61 | 52.17 | 0.90 | 0.90 | 95.80 | 99.80 |
| Al ₂ O ₃ , % | 4.00 | 0.59 | 22.26 | 16.45 | 6.20 | 1.09 | 1.67 | 0.31 | 42.47 | 39.11 | 0.10 | 0.10 | 0.11 | 0.14 |
| CaO, % | 64.42 | 3.89 | 2.19 | 33.78 | 33.13 | 9.02 | 9.73 | 0.74 | 2.85 | 0.78 | 55.51 | 55.71 | 0.38 | 0.17 |
| MgO, % | 1.52 | 0.26 | 0.53 | 3.91 | 10.60 | 1.97 | 2.08 | 0.66 | 0.07 | 0.19 | 0.70 | 0.70 | 0.20 | 0.01 |
| SO ₃ , % | 1.93 | 0.07 | 0.03 | 2.51 | 1.14 | 0.00 | 0.01 | 0.26 | 0.62 | 0.22 | 0.10 | 0.10 | 0.52 | - |
| Na ₂ O, % | 0.19 | 0.31 | 0.31 | 0.39 | 0.1 | 11.65 | 12.54 | 0.26 | 0.61 | 0.24 | 0.03 | 0.03 | 0.25 | - |
| K ₂ O, % | 0.39 | 0.54 | 0.99 | 0.40 | 0.03 | 0.75 | 0.76 | 2.46 | 0.06 | 0.20 | 0.01 | 0.00 | 3.49 | 0.05 |
| TiO ₂ , % | 0.38 | 0.01 | 1.05 | 0.57 | 0.42 | 0.04 | 0.04 | 0.02 | 0.67 | 1.48 | 0.00 | 0.00 | 0.25 | - |
| Mn ₂ O ₄ , % | 0.05 | 0.01 | 0.01 | 3.41 | 1.98 | 0.01 | 0.01 | 0.21 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 0.01 | 0.01 | - |
| Fe ₂ O ₃ , % | 3.61 | 0.24 | 9.33 | 1.24 | 18.92 | 0.79 | 0.81 | 0.29 | 0.69 | 1.07 | 0.05 | 0.05 | 0.09 | 0.04 |



Caracterización a escala de laboratorio

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

Difracción por rayos-X



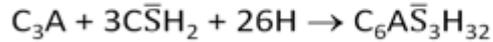


Caracterización a escala de laboratorio

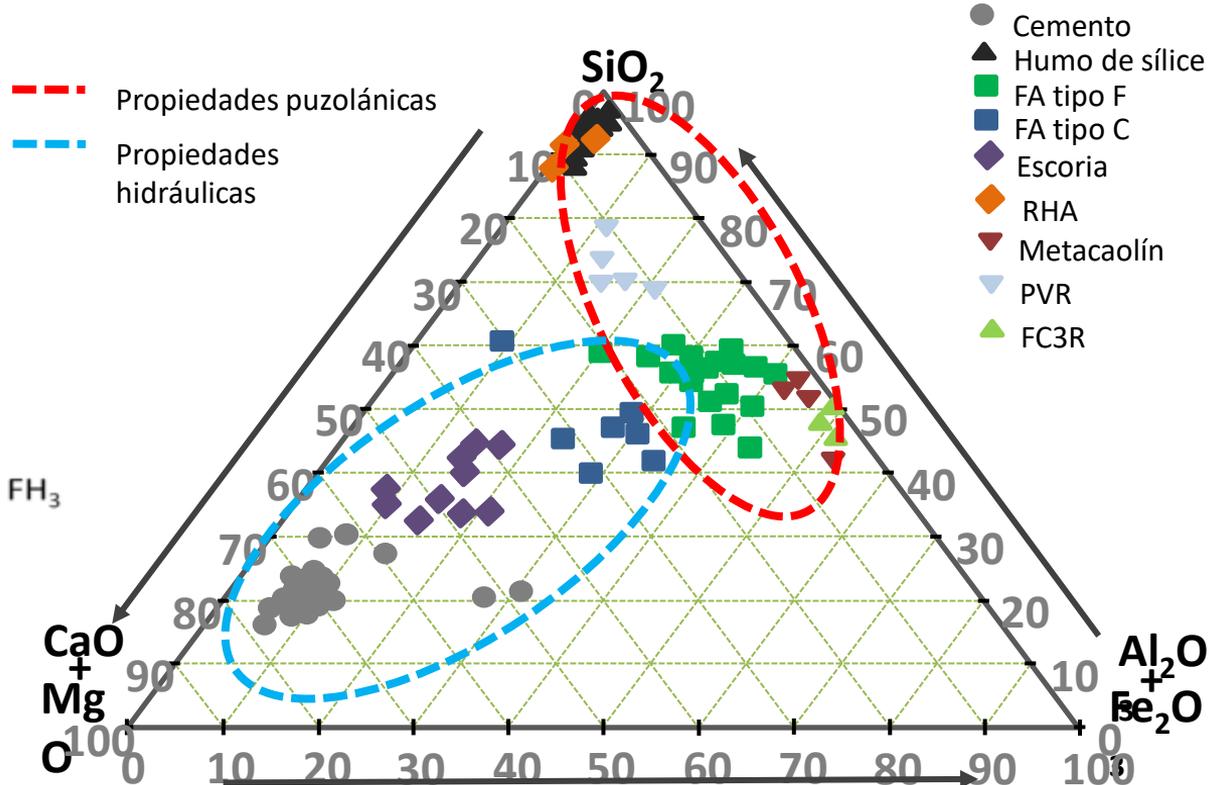
LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

Propiedades de los insumos

Reacción hidráulica:



Reacción puzolánica:

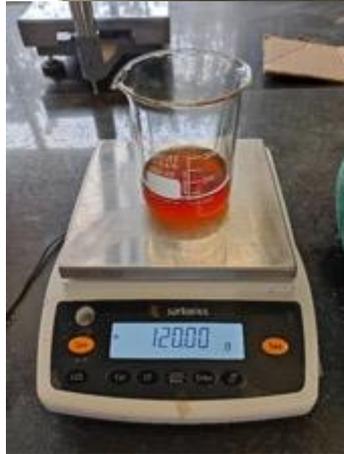




Optimización de mezclas

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

Campaña experimental. Selección del cemento y superplastificante



ASTM C1403



Optimización de mezclas

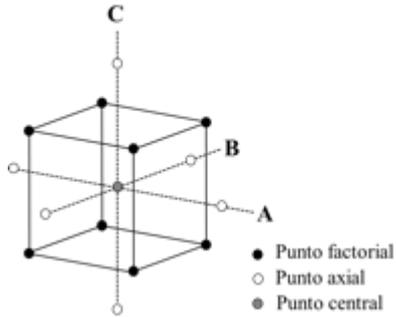
LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

Diseño Central Compuesto (mezclas sin fibras)

Factor A: Cemento kg/m³

Factor B: w/b

Factor C: % HRWR



Resto de componentes ajustados a la curva de A&A_{mod} (q=0.264)

Respuestas analizadas

Flujo estático

Resistencias a compresión (1, 7 y 28 días)

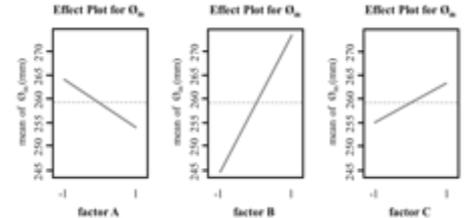
| N | Codificadas | | | Reales | | |
|----|-------------|----------|----------|----------|----------|-----------|
| | Cemento | w/b | HRWR | Cemento | w/b | HRWR |
| 1 | -1 | -1 | -1 | 600 | 0.16 | 0.02 |
| 2 | 1 | -1 | -1 | 650 | 0.16 | 0.02 |
| 3 | -1 | 1 | -1 | 600 | 0.17 | 0.02 |
| 4 | 1 | 1 | -1 | 650 | 0.17 | 0.02 |
| 5 | -1 | -1 | 1 | 600 | 0.16 | 0.024 |
| 6 | 1 | -1 | 1 | 650 | 0.16 | 0.024 |
| 7 | -1 | 1 | 1 | 600 | 0.17 | 0.024 |
| 8 | 1 | 1 | 1 | 650 | 0.17 | 0.024 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 625 | 0.165 | 0.022 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 625 | 0.165 | 0.022 |
| 11 | -1.78885 | 0 | 0 | 580.2786 | 0.165 | 0.022 |
| 12 | 1.788854 | 0 | 0 | 669.7214 | 0.165 | 0.022 |
| 13 | 0 | -1.78885 | 0 | 625 | 0.156056 | 0.022 |
| 14 | 0 | 1.788854 | 0 | 625 | 0.173944 | 0.022 |
| 15 | 0 | 0 | -1.78885 | 625 | 0.165 | 0.0184223 |
| 16 | 0 | 0 | 1.788854 | 625 | 0.165 | 0.0255777 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 625 | 0.165 | 0.022 |
| 18 | 0 | 0 | 0 | 625 | 0.165 | 0.022 |

1) Realizar las pruebas

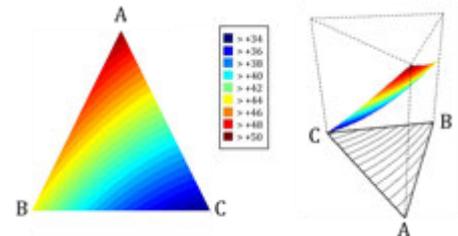
2) Ajustar los modelos de regresión polinómica para cada variable respuesta

$$Y = a_0 + \sum a_i x_i + \sum a_{ii} x_i^2 + \sum a_{ij} x_i x_j$$

3) Dibujar los gráficos de efectos principales



4) Dibujar los gráficos RSM





Optimización de mezclas

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVO (G. Derringer y R. Suich, 1980)

$$D = (d_1^{r_1} \times d_2^{r_2} \times d_3^{r_3} \times \dots \times d_n^{r_n})^{1/\sum r_i} = \left[\prod_{i=1}^n d_i^{r_i} \right]^{1/\sum r_i}$$

$$d = \begin{cases} 1 & Y_i \geq U \\ \left[\frac{Y_i - L}{U - L} \right]^{wt_i} & L < Y_i < U \\ 0 & Y_i \leq L \end{cases} \quad \text{Maximizar}$$

$$d = \begin{cases} 0 & Y_i \geq U \\ \left[\frac{U - Y_i}{U - L} \right]^{wt_i} & L < Y_i < U \\ 1 & Y_i \leq L \end{cases} \quad \text{Minimizar}$$

$$d = \begin{cases} 0 & Y_i \leq L \\ 1 & L < Y_i < U \\ 0 & Y_i \geq U \end{cases} \quad \text{Mantener en rango}$$

Optimización UHPC sin fibras

| Responses and variables | Lower | Upper | Criteria | |
|-----------------------------|-------|-------|----------|------------|
| | | | Goal | Importance |
| ϕ_m (mm) | 240 | 260 | In range | 5 |
| R28 (MPa) | 150 | 165 | Maximum | 5 |
| Cement (Kg/m ³) | 550 | 650 | Minimum | 5 |

```

Console Terminal Jobs
~/Desktop/00 FHE/000 TESIS/00 Tesis Final/08 Presentacion/01 R/DoE2/ >
> optimum( DoE2)
composite (overall) desirability: 0.675
coded -0.149 -0.149 1.7889
real 621.273 0.164 0.0256
Responses      R28  Flujo  CEM
Desirabilities 0.554 0.965 0.575
>
    
```



Optimización de mezclas

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

Campaña experimental



ASTM C109



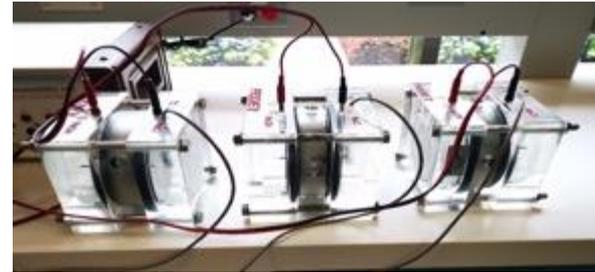
ASTM C1437



Evaluación del desempeño

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

Campaña experimental



ASTM C1202



ASTM C39



ASTM C1260



Evaluación del desempeño

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

Campaña experimental



ASTM
C597



BS 1881-
208



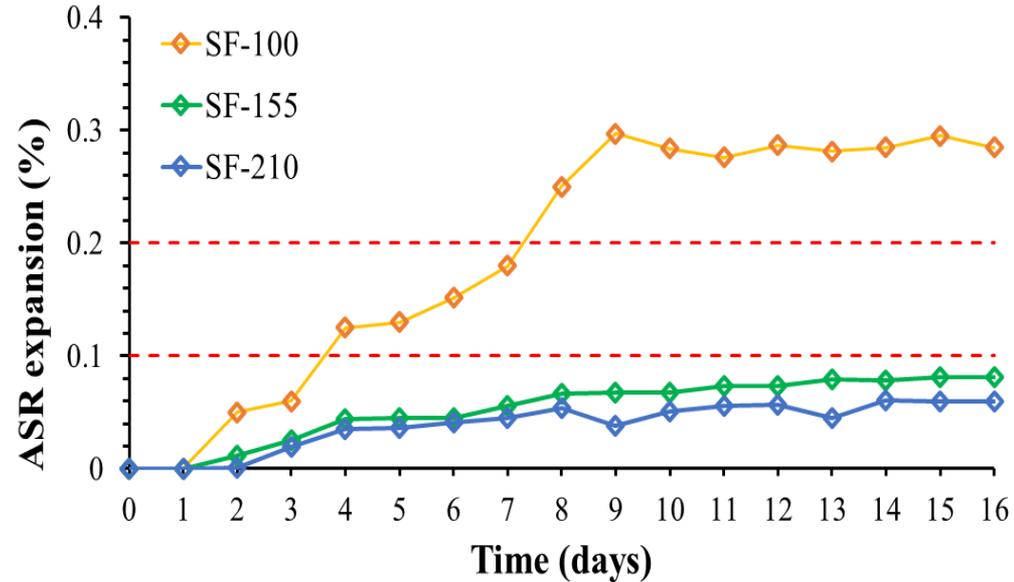
ASTM
C596



Evaluación del desempeño

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

Campaña experimental. Selección del contenido de humo de sílice para evitar la expansión ASR



Expansión ASR (ASTMC 1260) para diferentes contenidos de humo de sílice



Factores relevantes del refuerzo de fibras:

- ✓ Esbeltez de la(s) fibra(s) – l_f/d_f
- ✓ Forma de la(s) fibra(s)
- ✓ Resistencia de la(s) fibra(s)
- ✓ Dosificación volumétrica – $V_f(\%)$
- ✓ Factor fibra – χ_f

- En sistemas mono fibra

$$X_f = V_f \times l_f / d_f$$

- En sistemas híbridos

$$X_f = \sum_{i=1}^n V_{fi} \times l_{fi} / d_{fi}$$



(Abellán-García et al. 2020)



Evaluación del desempeño

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

Campaña experimental. Tracción directa (efecto de las fibras)

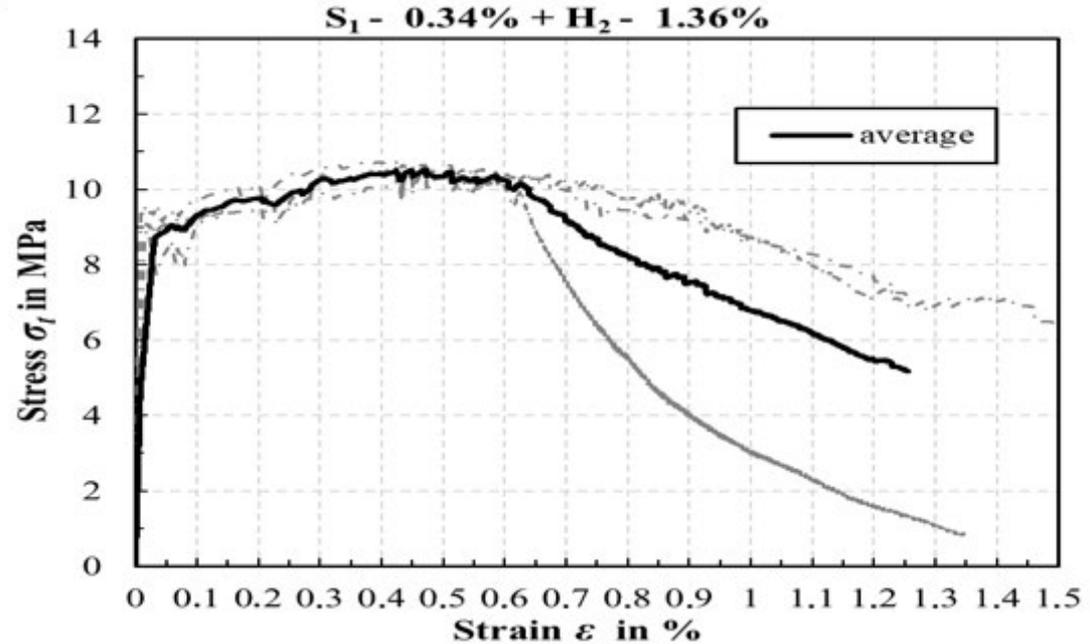




Evaluación del desempeño

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

Campaña experimental. Tracción directa (efecto de las fibras)



Comportamiento a tracción directa del UHPFRC



Introducción al concreto de ultra altas prestaciones (UHPC)

- Definición y evolución histórica.
- Principales aplicaciones
- Características y propiedades principales
- Caracterización a nivel de laboratorio
- Optimización de mezclas

Aplicación en ingeniería de pavimentos

- Rehabilitación de pavimentos (el concepto de whitetopping)
- ¿Qué características del UHPC que lo hacen apto?
- Casos de estudio globales
- ¿Cuál es la situación de Colombia?
- Trabajo de investigación Uninorte
 - Enfoque (laboratorio versus campo)
 - Principales temas
 - Resultados esperados
- Conclusiones



Rehabilitación de pavimentos asfálticos

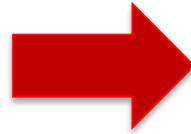
LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO



https://es.123rf.com/photo_69766886_da%C3%B1os-en-carretera-en-jap%C3%B3n-asfalto-asfaltado-agrietado-con-baches-y-parches.html



https://es.123rf.com/photo_18427467_baches-problem%C3%A1ticas-en-las-carreteras-locales.html



Cuando las condiciones de un pavimento asfáltico lo requieren, se hace necesaria la rehabilitación parcial o total



¿En qué casos aplica cada una?

Rehabilitación parcial vs total



https://es.123rf.com/photo_35035309_baches-reparados-con-un-asfalto-negro.html



https://es.123rf.com/photo_143376911_maquinaria-de-construcci%C3%B3n-y-trabajadores-colocando-nuevo-pavimento-de-asfalto.html?vti=odm3bezdj4xmblliw-1-42



¿Cómo reparamos los pavimentos flexibles tradicionalmente?

Existen múltiples posibilidades, cuya selección dependerá de varios aspectos



- Reparación puntual o parcheo
- Sellado de grietas
- Recubrimiento o capa de sello
- Fresado y relleno (overlay)



- Tamaño y ubicación del área a reparar
- Presupuesto disponible para reparaciones
- Voluntad política
- Nivel de deterioro del pavimento
 - ¿Es leve?
 - ¿Es moderado?
 - ¿Es severo?



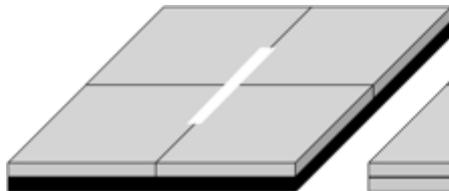


¿Qué alternativas existen?

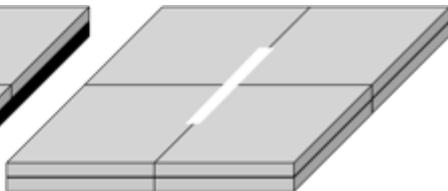
La reparación de un pavimento con daño leve a moderado también puede llevarse a cabo con una nueva capa de concreto.



**Carpeta blanca o
Whitotopping**



Overlay de concreto sobre
pavimento flexible (Whitotopping)



Overlay de concreto sobre
pavimento rígido

Sin embargo, no es una opción nueva



En los Estados Unidos de América se desarrolla desde inicios del siglo XX

- Precisamente, la primera intervención mediante WT se dio en Terre Haute, Indiana en 1918 (Hutchinson, 1982)
- En 1953 se aplicó WT en Dye Road, Michigan
- El uso moderno inició en 1960 debido a la necesidad de pavimentos durables (cargas de camiones y volumen vehicular)



Rehabilitación de pavimentos asfálticos

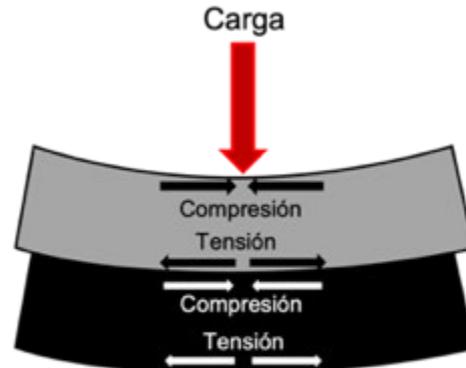
LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

¿Qué es el Whitetopping?

- Es una estrategia de rehabilitación de pavimentos flexibles.
- Se emplea para rehabilitar pavimentos con daño leve a moderado.
 - No puede haber compromiso estructural.



Capas adheridas



Capas no adheridas

Existen varios tipos de WT

- **Convencional (CWT):** se refiere a capas de **200 mm o más (8 pulgadas)** para cuyo diseño no se contempla la adherencia con la capa inferior.
- **Delgado (TWT):** capas de espesores comprendidos entre **100 y 200 mm (4 – 8 pulgadas)** en las que se puede considerar la adherencia con la capa asfáltica subyacente.
- **Ultra Delgado (UWT):** capas de **hasta 100 mm (4 pulgadas)** cuyo desempeño depende de la buena adherencia con el pavimento flexible

(Cruz, Romero J., 2016; Castro *et al.*, 2019).



¿Por qué emplear Whitetopping?

En USA, se ha probado su gran versatilidad y durabilidad para proyectos de diversa escala.

- Alrededor del 71% de las *overlays* son del tipo concreto sobre asfalto (WT), mientras que el 21% restante de concreto sobre concreto (Fick et al., 2021)
- En Europa y Asia se presenta una situación similar.
- En Latinoamérica avanza de forma lenta pero incremental (Rasmussen, & Rozycki, 2004; Mateos et al., 2015).



**DURABILIDAD Y POCO
MANTENIMIENTO**



¿Cuál es la situación de Colombia?

La malla vial de Colombia está compuesta mayoritariamente por pavimentos flexibles (FEDESARROLLO).

- 8% de la red nacional es pavimento rígido (incluyendo urbanas)
- 31% de vías urbanas en pavimento rígido
- Barranquilla es un caso particular > Más del 80% de vías urbanas en pavimento rígido

Las inversiones de vías 4G y 5G cercanas a 50 billones de pesos (La República, 2022)

El artículo 500 del INVIAS regula la construcción de pavimentos de concreto.

Se busca principalmente:

- Calidad
- Valor
- Desempeño
- **Durabilidad**



¿Qué hace al UHPC un candidato para WT?

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

Alta resistencia a la compresión que pueda alcanzar y superar valores de 150 MPa (21,800 psi),

Alta resistencia a la flexión le permite resistir fractura y otros tipos de daño típico en los pavimentos.

Baja permeabilidad del UHPC

El rápido asentamiento y el curado rápido

Se pueden construir secciones delgadas y ultradelgadas

Es un **material de alta durabilidad** para el que se espera reducciones en la frecuencia de reparaciones y reemplazos.

Desde la perspectiva de sostenibilidad ambiental, **el UHPC es un material que representa una alternativa sostenible**

Aspectos funcionales, de seguridad y de comodidad del usuario,

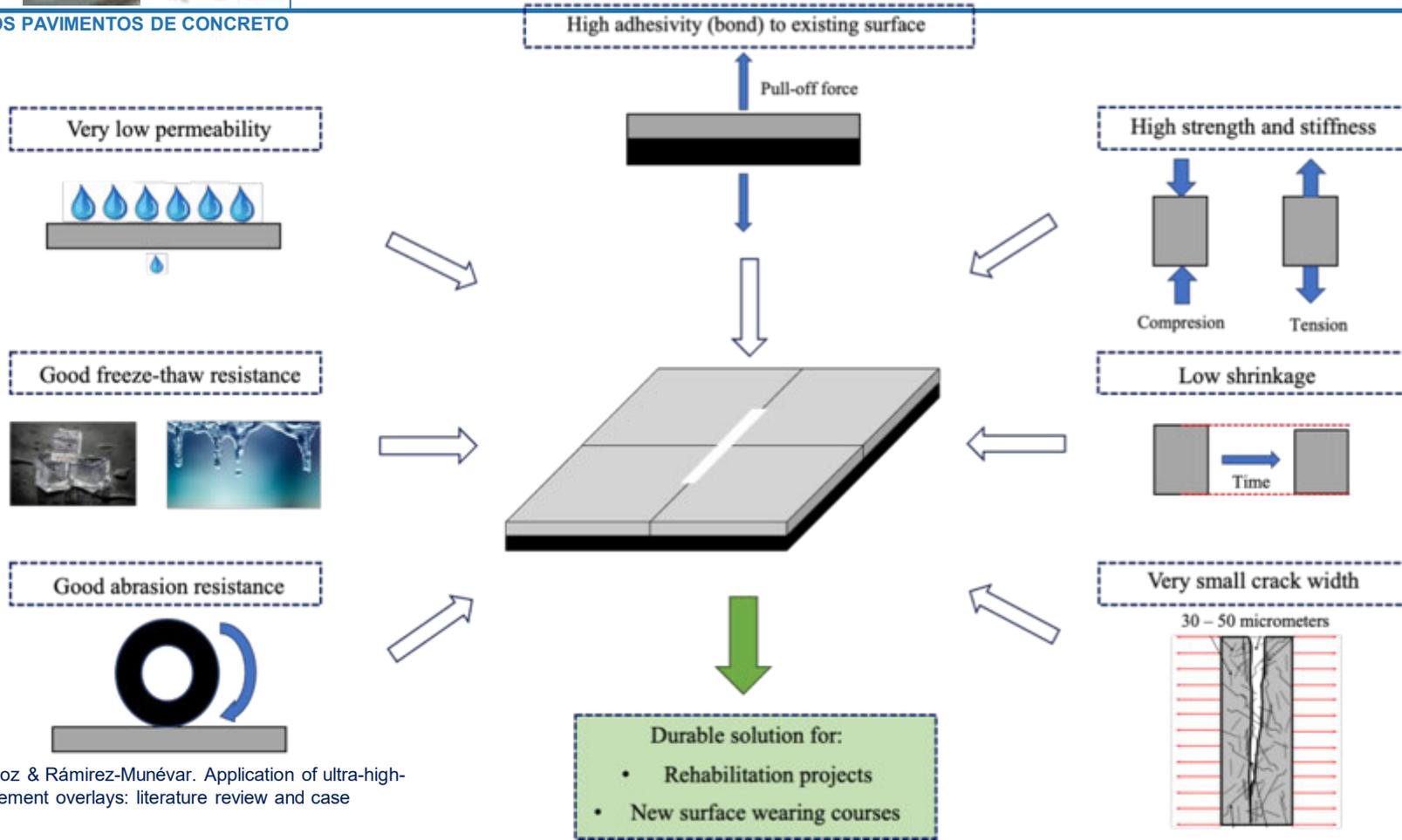
Alto empaquetamiento de partículas **una mejor respuesta mecánica, estabilidad de la mezcla y durabilidad** en comparación con concretos convencionales.

En función de la concentración de fibras y del diseño de mezcla de UHPC, **se puede ajustar la tixotropía según la aplicación.**



¿Qué hace al UHPC un candidato para WT?

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

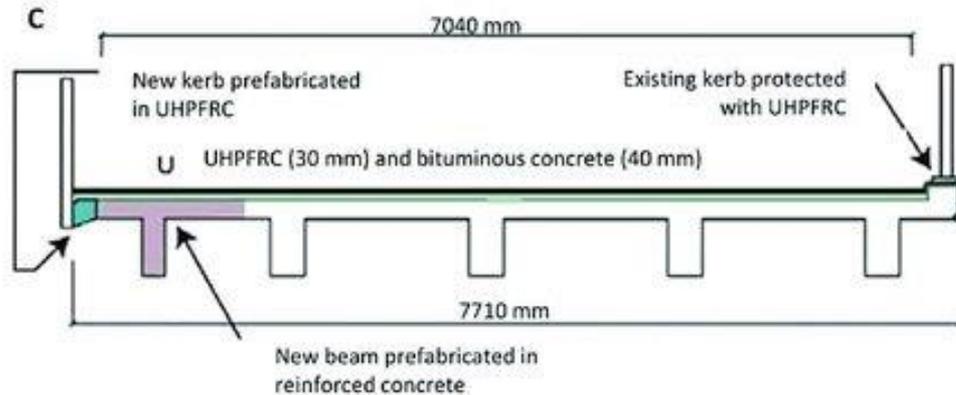




Casos de estudio de UHPC como Overlay

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

Suiza. La Morge River



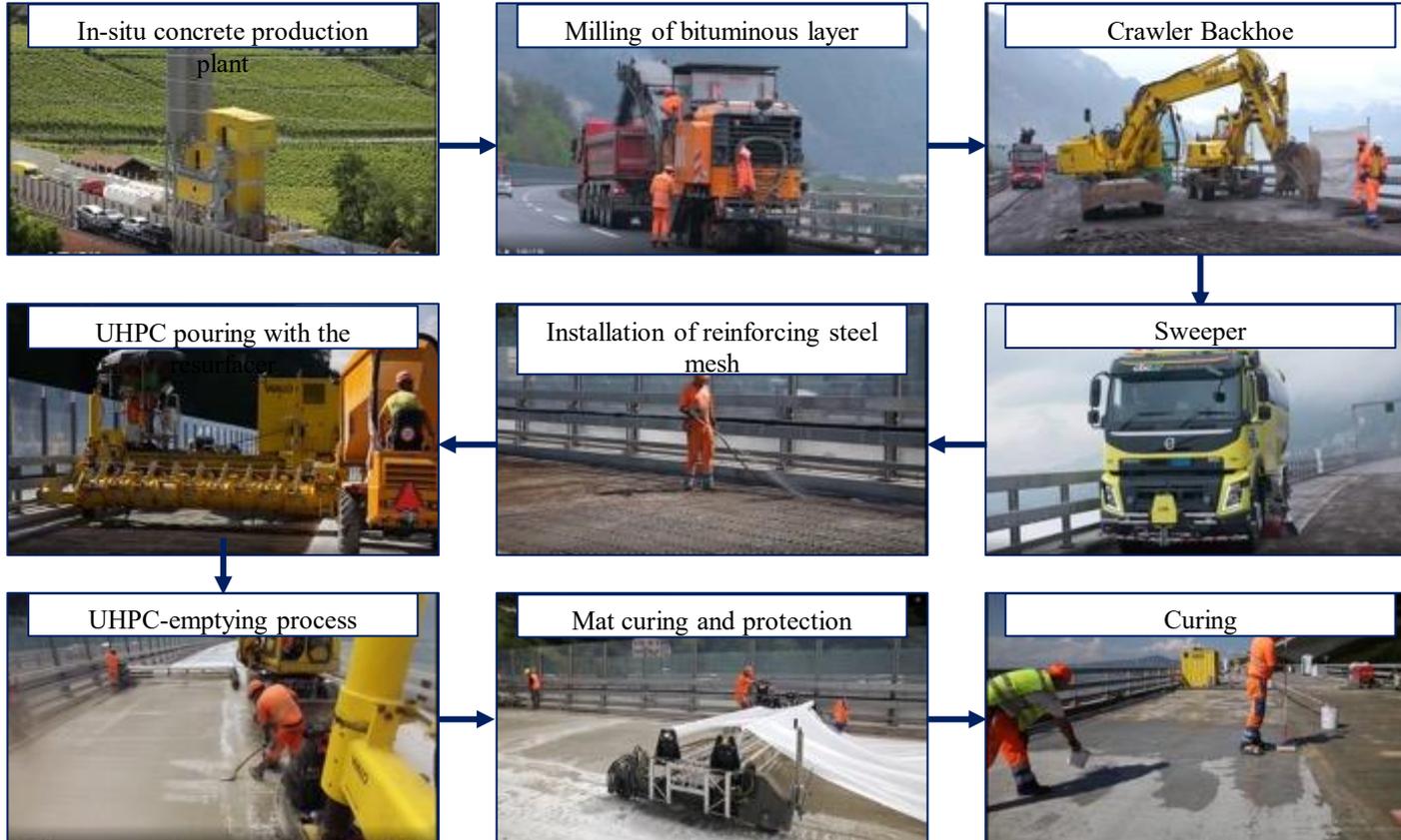
- La primera aplicación de UHPC se reportó para el Puente sobre el río La Morge en Suiza.
- La cubierta del puente y los bordillos gravemente dañados se reemplazaron con UHPC.
- No se observaron grietas en el bordillo de UHPC prefabricado después de 1 año de su aplicación.



Casos de estudio de UHPC como Overlay

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

Suiza. Viaducto de Chillon



- Año 2018
- Proyecto de rehabilitación
- Espesor de losa 45 mm
- UHPC con fibras metálicas



Casos de estudio de UHPC como Overlay

Estados Unidos de América. Mud Creek Bridge

Aspect of the Surface prior rehabilitation



- Año 2016. Proyecto de rehabilitación
- Espesor de losa 38 mm
- UHPC con fibras metálicas



Roughening of the surface



Placing of UHPC with a screed



One lane of UHPC fully casted



Surface grinding



Surface grooving



Close-up of the final overlay surface



Finalization of the overlay



Casos de estudio de UHPC como Overlay

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

Estados Unidos de América. Laporte Bridge



Aspect of the Surface prior rehabilitation

- Año 2016. Proyecto de rehabilitación.
- Concreto existente
- Espesor de losa 38 mm
- UHPC con fibras metálicas



Roughening of the surface



Placing of UHPC with a screed



One lane of UHPC fully casted



Final view of the overlay



Casos de estudio de UHPC como Overlay

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

Estados Unidos de América. Bridge over Floyd River



Specialized machine performing hydrodemolition



Removing debris with a wheel loader backhoe



On-site plant for the manufacture of the UHPC



Unloading from UHPC to backhoe loader



Final view of the overlay



Unloading of the UHPC to the resurfacer



Material transfer to the paver

- Año 2018. Proyecto de rehabilitación
- Espesor de losa 45 mm
- UHPC con fibras metálicas



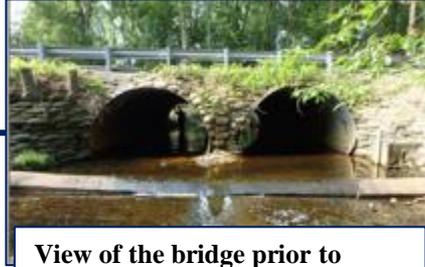
Casos de estudio de UHPC como Overlay

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

Estados Unidos de América. Blackbird Station Road

Abellán-García; Carvajal-Muñoz & Ramírez-Munévar. (2023). C&BM. Under review

- Año 2017. Proyecto de reconstrucción
- Espesor de losa 25 mm
- UHPC con fibras metálicas



View of the bridge prior to rehabilitation



Structural bridge elements in place



Placing of UHPC deck overlay



Placing UHPC in box beam connections



Final view of the overlay surface



View of the bridge after reconstruction



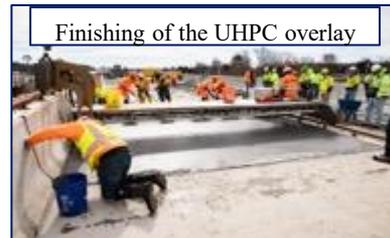
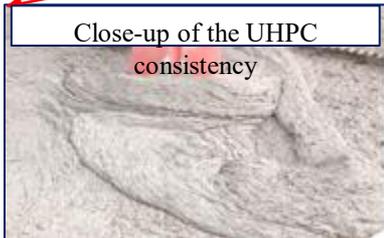
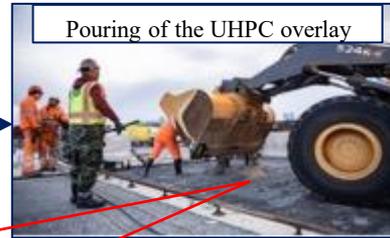
Close-up of the final overlay surface



Casos de estudio de UHPC como Overlay

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

Estados Unidos de América. Little Heaven



- Año 2019. Proyecto de rehabilitación
- Espesor de loza 45 - 74 mm
- UHPC con fibras metálicas



Casos de estudio de UHPC como Overlay

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

Estados Unidos de América. Proyectos Piloto de New Jersey

| Código del proyecto | Nombre | Condado | Location in New Jersey |
|---------------------------------|------------------------------------|------------|-------------------------|
| NJ 57 | Over Hances Brook in Mansfield | Warren | North Part (Contract A) |
| NJ 159 WB | Over Passaic River in Montville | Morris | North Part (Contract A) |
| I-295 NB & US 130 NB | Over Newark Turnpike in Kearny | Hudson | South Part (Contract B) |
| I-280 WB | Over Mantua Creek in West Deptford | Gloucester | South Part (Contract B) |

- Año 2021. Proyecto de rehabilitación
- Espesor de loza 38 mm (1.5 in)
- UHPC con fibras metálicas



Casos de estudio de UHPC como Overlay

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

Asia. Proyectos en China

| Año | Nombre | Ubicación |
|------|-----------------------|------------------------|
| 2011 | Zhaoqing Mafang | Provincia de Guangdong |
| 2014 | Buddha Chen | Provincia de Guangdong |
| 2015 | Dong Ting Lake Second | Provincia de Hunan |
| 2015 | Tong Hui | Beijing |
| 2015 | Hai, He | Tianjing |
| 2016 | Rong Jiang | Provincia de Guangdong |

- Año 2011. Proyecto de rehabilitación
- Puente construido en 1984
- 920 m de longitud
- Espesor UHPC 50 mm



Zhaoqing Mafang

Abdal et al. 2023



Proceso constructivo

¿Es más difícil de construir que un pavimento rígido convencional?

Buenas noticias....No existe diferencia significativa.

- Se emplean los mismos procedimientos.
- Las formaletas y equipos son los mismos.
- El control de calidad es similar.



https://es.123rf.com/photo_143389219_trabajador-que-trabaja-para-pavimento-de-hormig%C3%B3n-para-suelo-en-construcci%C3%B3n.html?vti=nljq999xzav74z9vqsn-1-57



https://es.123rf.com/photo_176130895_una-pavimentadora-de-hormig%C3%B3n-de-alto-rendimiento-en-un-nuevo-sitio-de-construcci%C3%B3n-de-carreteras-en.html?vti=nb76zraqj7lsw9vtnu-1-59



Proceso constructivo

¿Es más difícil de construir que un pavimento rígido convencional?

Sin embargo, debe tenerse especial cuidado con:

- La preparación de la capa asfáltica subyacente al WT a fin de que:
 - exista uniformidad en la superficie y
 - la adherencia sea apropiada, en especial para aplicaciones de TWT y UWT.
- Reparación de sistemas de drenaje en algunos casos.
- Puede requerirse fresado superficial.
 - Hidro demolición (hydromiling)
 - Pulido diamantado (diamond grinding)
 - Escarificado (scarification)





Propiedades Esperadas del UHPC

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

Propiedades del UHPC reportadas por la FHWA para aplicaciones en sobrecarpetas de rehabilitación de pavimentos existentes

| Overlay Type | Overlay Thickness, inches (mm) | Cost*, \$/ft ² (\$/m ²) |
|---|--------------------------------|--|
| HPC | 1–5 (25–127) | 17–25 (183–269) |
| Low slump concrete | 1.5–4 (38–102) | 13–19 (140–204) |
| LMC | 1–5 (25–127) | 18–39 (193–419) |
| Asphalt with a membrane | 1.5–4 (38–102) | 3–8 (32–86) |
| Polymer-based | 0.13–6 (3–152) | 10–17 (107–183) |
| Non-proprietary UHPC | 1–2 (25–52) | 3–6 (32–64) |
| Proprietary UHPC | 1–2 (25–52) | 9–18 (97–184) |
| Rehabilitation of the Chillon | | |
| Viaduct (Switzerland) using a Proprietary UHPC Overlay | 1.6 (40) | 20 (215) |
| Bridge deck replacement | Not applicable | 43–53 (462–570) |



Propiedades Esperadas del UHPC

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

Propiedades del UHPC reportadas por la FHWA para aplicaciones en sobrecarpetas para rehabilitación de pavimentos existentes

| Material characteristic | Average result |
|--|--|
| Density | 155 lb/ft ³ (2 480 kg/m ³) |
| Compressive strength (ASTM C39; 28-day strength) | 24 ksi (165 MPa) |
| Modulus of elasticity (ASTM C469; 28-day modulus) | 7,000 ksi (48 GPa) |
| Direct tension cracking strength (uniaxial tension with multiple cracking) | 1.2 ksi (8.5 MPa) |
| Split cylinder cracking strength (ASTM C496) | 1.3 ksi (9.0 MPa) |
| Prism flexural cracking strength (ASTM C1018; 12 in (305-mm)) span) | 1.3 ksi (9.0 MPa) |
| Tensile strain capacity before crack localization and fiber debonding | >0.003 |
| Long-term creep coefficient (ASTM C512; 11.2 (77 MPa) load) | 0.78 |
| Long-term shrinkage (ASTM C157; initial reading after set) | 555 microstrain |
| Total shrinkage (embedded vibrating wire gage) | 790 microstrain |
| Coefficient of thermal expansion (AASHTO TP60-00) | 8.2×10^{-6} in/in/°F (14.7×10^{-6} mm/mm/°C) |
| Chloride ion penetrability (ASTM C1202; 28-day test) | 360 coulombs |
| Chloride ion penetrability (AASHTO T259; 0.5-in (12.7-mm) depth) | <0.10 lb/yd ³ (<0.06 kg/m ³) |
| Scaling resistance (ASTM C672) | No scaling |
| Abrasion resistance (ASTM C944 2x weight; ground surface) | 0.026 oz. (0.73 g) lost |
| Freeze-thaw resistance (ASTM C666A; 600 cycles) | RDM = 99 percent |
| Alkali-silica (ASTM C1260; 28-day test) | Innocuous |



Nuestro enfoque de investigación

Nuestro equipo de investigación adelanta esfuerzos enmarcados en los siguientes aspectos:



Lograr mezclas de UHPC optimizadas de alto desempeño con alta durabilidad esperada.



Estudiar la viabilidad de UWT con espesores de hasta 40 mm (aprox. 1.6 pulg) con materiales disponibles en el mercado colombiano.



Analizar los componentes financieros y ambientales asociados a la producción de las mezclas.

Optimización multiobjetivo
Empleo de materiales cementicios suplementarios



Producir mezclas tixotrópicas aptas para trabajos con pendientes.



Investigar la adhesión entre capas (UHPC - asfalto)



Estudiar la resistencia mecánica de las mezclas de UHPC en términos de:

Resistencia a flexión
Resistencia a compresión
Tracción directa (efecto de refuerzo de fibras)



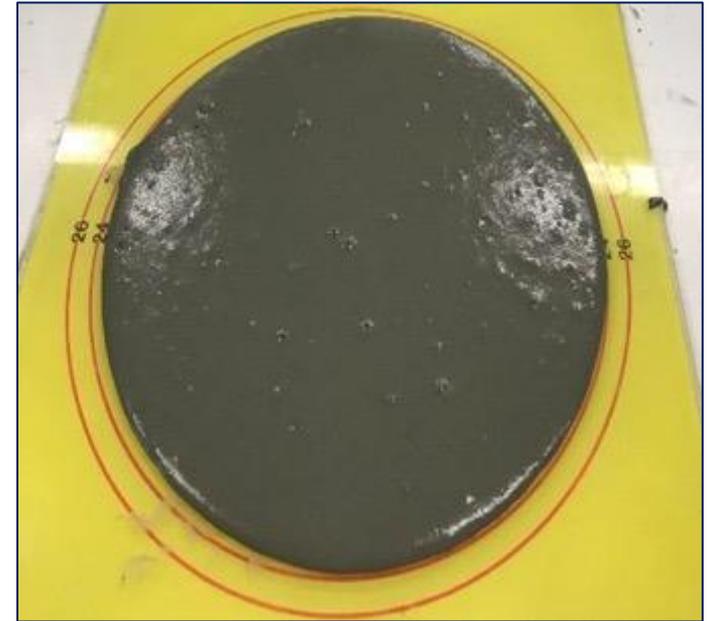
¿Qué resultados hemos obtenido?

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

Mezclas tixotrópicas



Versus mezclas autocompactantes



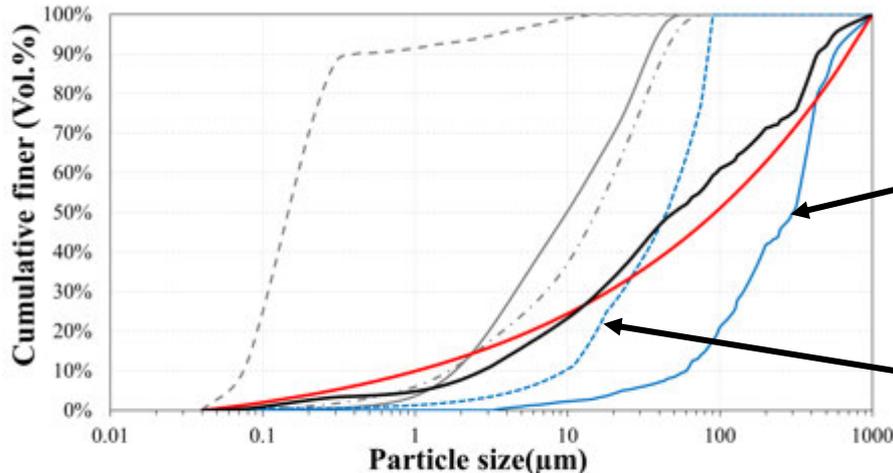


¿Qué resultados hemos obtenido?

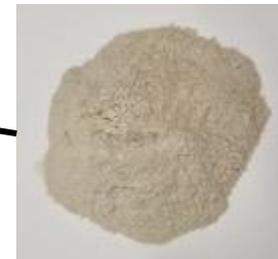
LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

Alta resistencia a la compresión. Mezclas con 52% de vidrio reciclado

| Cemento | SF | GP | CBNTO | Agua | HRWR | Arena (GA) |
|---------|-----|-----|-------|-------|------|------------|
| 718 | 155 | 216 | 138 | 164.5 | 20.5 | 1048 |



¡ 52% en peso de vidrio reciclado para 124 MPa!



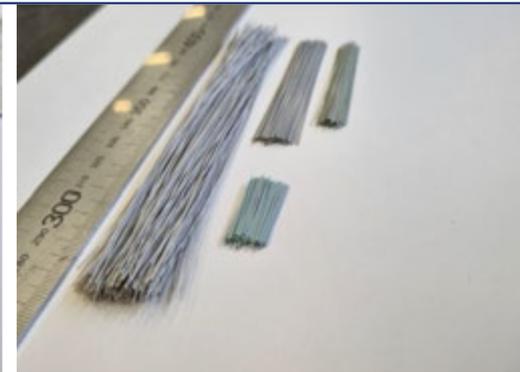


¿Qué resultados hemos obtenido?

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

Propiedades físicas de las fibras PE (recicladas)

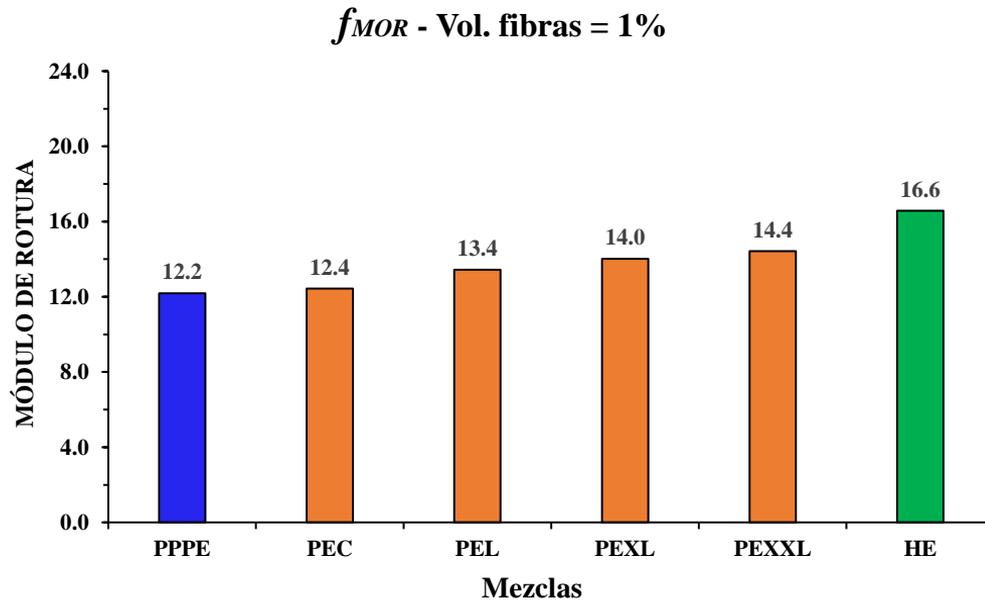
| Propiedad | Especificación |
|---|-----------------------|
| Referencia comercial | Macrofibras 3D |
| Material | Polietileno reciclado |
| Textura | Lisa |
| Sección transversal | Circular |
| Presentación | Grupo |
| PE de longitud (l_f) 140 mm (PEXXL) | |
| Diámetro (d_f) | 380 μ m |
| Esbeltez (l_f/d_f) | 368 |
| Resistencia a la tensión | 128 MPa |
| PE de longitud (l_f) 60 mm (PEXL) | |
| Diámetro (d_f) | 380 μ m |
| Esbeltez (l_f/d_f) | 158 |
| Resistencia a la tensión | 128 MPa |
| PE de longitud (l_f) 40 mm (PEL) | |
| Diámetro (d_f) | 380 μ m |
| Esbeltez (l_f/d_f) | 105 |
| Resistencia a la tensión | 128 MPa |
| PE de longitud (l_f) 20 mm (PEC) | |
| Diámetro (d_f) | 300 μ m |
| Esbeltez (l_f/d_f) | 66 |
| Resistencia a la tensión | 162 MPa |





¿Qué resultados hemos obtenido?

Alta resistencia a la flexión. Mezclas con 52% de vidrio reciclado



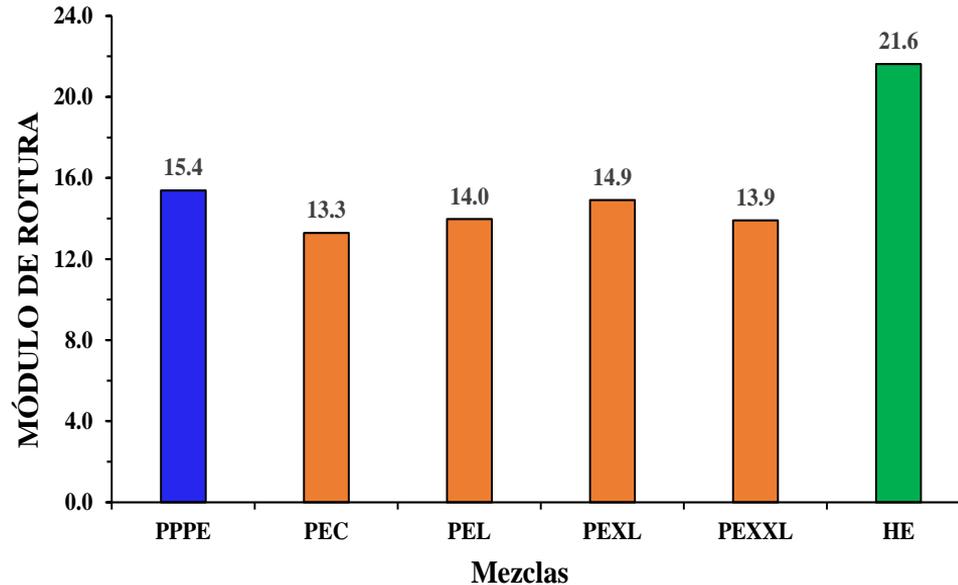


¿Qué resultados hemos obtenido?

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

Alta resistencia a la flexión. Mezclas con 52% de vidrio reciclado

f_{MOR} - Vol. fibras = 2%



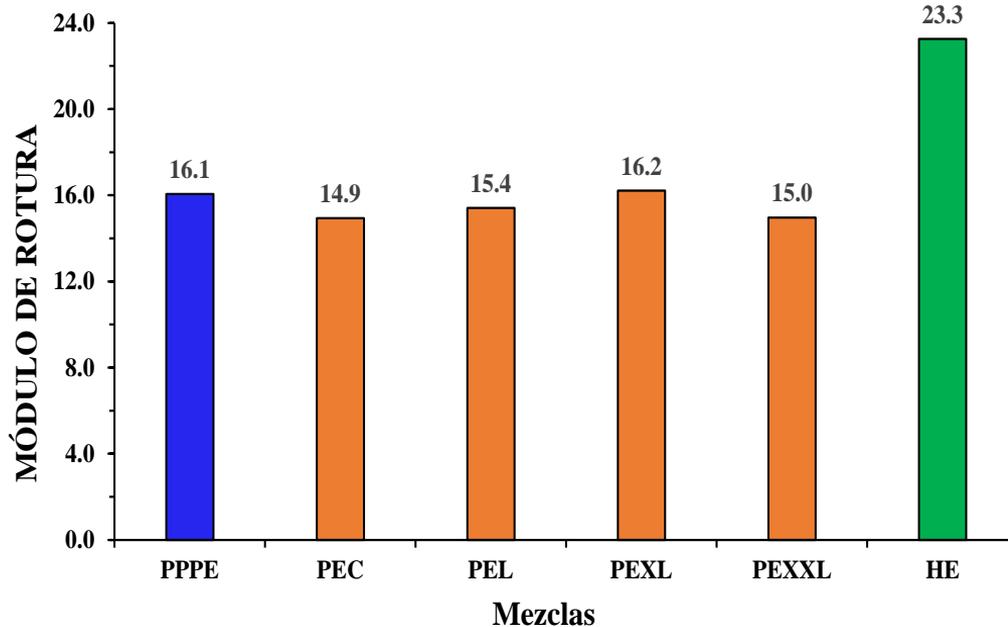


¿Qué resultados hemos obtenido?

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

Alta resistencia a la flexión. Mezclas con 52% de vidrio reciclado

f_{MOR} - Vol. fibras = 3%



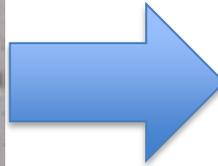


¿Qué pasos siguen?

Estudios de adherencia entre capas (en curso)

ASTM D7234-12

0.5 kN/s



a) Pull-out test process



b) The UHPC interface after pull-out test

Lu et al. 2021



¿Qué pasos siguen?

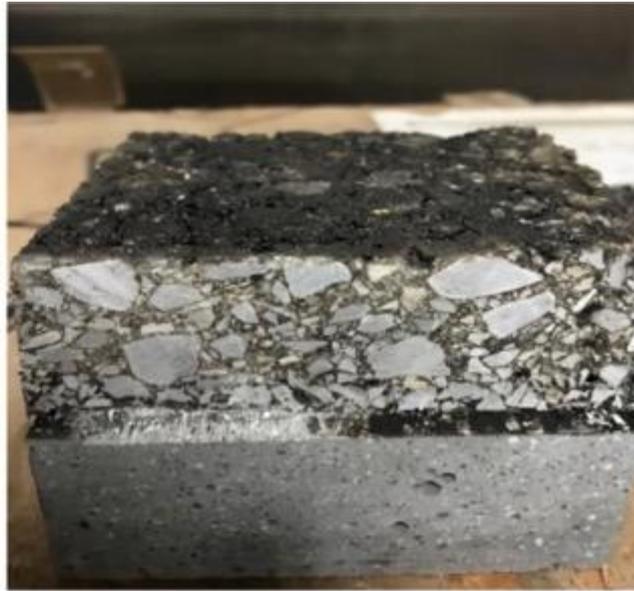
LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

Estudios de adherencia entre capas (en curso)



a) Shear test process

Lu et al. 2021



b) The UHPC interface after shear test

ASTM C882/C882M-13

1 kN/s

Uso de DIC



¿Qué pasos siguen?



Estudio de la vida en fatiga para

Mezcla UHPC
Solución bicapa

Presentaciones orales



Construcción de un tramo de prueba en pavimento con daño moderado.

Varias condiciones ambientales
Seguimiento

Cursos, seminarios, talleres



Formulación de especificaciones para uso de UHPC como WT.

Interacción con entidades públicas y privadas

Academia

Gubernamentales



Publicaciones científicas internacionales

Actualmente 1 artículo publicado (C&BM) – Contracción del UHPC
2 artículos sometidos en revisión por pares. Revisión de literatura y experimentales

Aunar esfuerzos para la investigación a escala real del UHPC como sobrecarpeta



❑ Material con varios niveles de aportes a la sostenibilidad:

- ❖ Menores cantidades de cemento \implies Menor huella de carbono
- ❖ Posibilidad de incorporar residuos industriales/urbanos en su composición
- ❖ Baja porosidad \implies Elevada durabilidad \implies Larga vida útil de las aplicaciones
- ❖ Mayor resistencia mecánica \implies Ahorro de material necesario

❑ Numerosas aplicaciones a nivel nacional e internacional:

- ❖ Mobiliario urbano
- ❖ Elementos arquitectónicos de elevado valor estético
- ❖ Construcción de infraestructuras
- ❖ Rehabilitación de infraestructuras



Conclusiones

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

Aplicaciones en whitetopping ultra- delgados:



Alto potencial para uso de UHPC en **proyectos nuevos y rehabilitación** de la red vial nacional.



Durabilidad para espesores bajos validados internacionalmente (40 mm o menos)



Las investigaciones sugieren beneficios de importancia y aplicación.



Conservación de la red vial nacional y expansión de ésta (proyectos 4G y 5G) con los más altos estándares de calidad, seguridad y durabilidad



Incorporación de materiales reciclados (**sostenibilidad ambiental**)



Permitirá mejorar las condiciones de comunicación y transporte de bienes y servicios a través de una red duradera, segura, sostenible y estética.



Gracias a nuestro equipo de trabajo

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO



12^o Congreso Iberoamericano de Pavimentos de Concreto

MAYO 10 AL 13 DE 2023 - Barranquilla, Colombia
Centro de Convenciones Blue Gardens

LA NUEVA REALIDAD DE LOS PAVIMENTOS DE CONCRETO

Organizan:



GRACIAS POR SU ATENCIÓN

QUEDAMOS ATENTOS A SUS
PREGUNTAS/COMENTARIOS

jabellan@uninorte.edu.co

jscarvajal@uninorte.edu.co

