

CONCRETO LATINOAMÉRICA

VOLUMEN VII | NÚMERO 5 | MAYO 2026

Premios 2025 al Cemento de Escoria en Concreto Sostenible

Catorce proyectos fueron distinguidos por el uso excepcional de cemento de escoria en construcciones de concreto



El presente número de la Revista Digital Concreto Latinoamérica es un esfuerzo de los Capítulos o Secciones del American Concrete Institute (ACI) en Latinoamérica, para poner al alcance de sus miembros y afiliados los contenidos que el ACI International publica en su revista Concrete International en inglés.

Representantes de los Capítulos ACI de Latinoamérica:

Argentina

Dr. Raúl Bertero

Colombia

Dra. Nancy Torres Castellanos
Dr. Fabián Augusto Lamus Báez

Costa Rica

Ing. Minor Murillo Chacón

Ecuador Centro y Sur

Ing. MSc. Santiago Vélez Guayasamín

Guatemala

Ing. Xiomara Sapón Roldán
Ing. Luis Álvarez Valencia

México Noreste

Dr. Alejandro Durán Herrera

México Noroeste

Ing. Raúl Alvarado Barbachano

México Centro y Sur

Mtro. Sergio Valdés Constantino

México Sureste

Mtro. Josseph Eli Mandujano Zavala

República Dominicana

Ing. Piero Roberto Caputo Rodríguez

Perú

Ing. José Luis Gonzales Quezada

Puerto Rico

Ing. Anabel N. Merejildo



En el marco de la entrega de reconocimientos 2025 de la Slag Cement Association (SCA) al uso de cemento de escoria en concreto sostenible, realizada durante la última convención de primavera del American Concrete Institute (ACI) en Rosemont / Chicago, EE. UU., la obra del vertedor de demasías de la presa Sanford Dam, en Sanford, MI, EE. UU., fue galardonada en la categoría de Aplicaciones Innovadoras.

En esta obra se utilizó concreto compactado con rodillo (CCR) para cumplir con un estricto programa de construcción, logrando la colocación de 14,000 m³ de concreto en seis semanas. Se emplearon 160 kg/m³ de material cementante, con una sustitución de hasta el 60 % por cemento de escoria.

Esto permitió reducir el calor de hidratación en el concreto masivo y mantener los gradientes térmicos entre las distintas zonas dentro de los parámetros especificados, sin afectar el tiempo de fraguado y mejorando su durabilidad.

Para mayor información, consulte el artículo 3 de este número de la revista Concreto Latinoamérica.

Los contenidos de los artículos corresponden a la traducción del inglés al español realizada por los Capítulos del ACI en Latinoamérica, y fueron originalmente publicados en la revista Concrete International correspondiente al mes de Mayo de 2026. El Instituto no se hace responsable por las declaraciones u opiniones expresadas en sus publicaciones. Las publicaciones del Instituto no pueden ni pretenden suplantar el entrenamiento técnico individual, responsabilidad o juicio del usuario o de quien provee y presenta la información. Con el propósito de difundir el conocimiento técnico del concreto, se autoriza la difusión de la presente edición a los Capítulos del ACI de habla hispana entre su membresía y grupos de interés, sin embargo, será necesaria la autorización del American Concrete Institute para reproducir total o parcialmente los contenidos de este número salvo que se hagan para uso personal o académico y sin fines comerciales. Todos los materiales originales en inglés, y contenidos en este número de Concreto Latinoamérica en español, están protegidos por las leyes de Derechos de autor y propiedad industrial, tanto nacionales como internacionales.

COMITÉ EDITORIAL

Cualquier asunto relacionado con la publicación contactarse a:
Correo: concretolatam@gmail.com
Tel: +52 81 2146 4907

Presidente del Comité Editorial:

Dr. Alejandro Durán Herrera
Presidente de la Sección Noreste de México del ACI (2024-2026)

Editor en Jefe:

Ing. José Lozano y Ruy Sánchez

Editores Asociados:

Dr. Lucio Guillermo López Yépez
Dra. Margareth Josefina Dugarte Coll
Dr. Francisco René Vázquez Leal
Dr. José Manuel Gutiérrez Moreno
Dr. Francisco David Anguiano Pérez
Dr. Aldo Emelio Landa Gómez

Asesor Técnico:

Dr. Alejandro Durán Herrera

Traducción:

Lic. Iliana M. Garza Gutiérrez

Comité de Artículos Originales

Ing. Xiomara Sapón Roldán
Ing. Thyssen Won Chang

Revisión Editorial:

Lic. Iliana M. Garza Gutiérrez

Administración y Logística:

Lic. Ana Durán Herrera

Dirección Creativa:

MDG. Rosa Otilia Armendariz Solís

Diseño Gráfico:

LDI. Hannia Annett Molina Frías
LDG. Fabiola Nohemi Durán Mata

REVISORES EDITORIALES

En este número, el Comité Editorial agradece la colaboración como Revisores Editoriales a:

Ing. José Lozano y Ruy Sánchez
Dr. José Manuel Gutiérrez Moreno
Lic. Iliana M. Garza Gutiérrez

Dra. Margareth Josefina Dugarte Coll
Dr. Francisco René Vázquez Leal



¡Únete hoy!

Conoce tu capítulo local ACI
300+ Capítulos profesionales y estudiantiles
www.concrete.org



CONTENIDO

1 | **Directivos y miembros de la junta Directiva ACI para 2026-2027**

Anderson para presidente, Schindler para vicepresidente y cuatro directivos

5 | **Novedades en Tecnología El Puente de Arco Enterrado de Concreto Prefabricado Ofrece Alta Durabilidad**

Por Aram Kalousdian

2 | **Rompiendo la Barrera del Idioma**

Los Centros de Recursos del ACI ahora ofrecen programas de Certificación impartidos únicamente en español

Por Andrea Godoy y Victoria Lopez

6 | **Reconsiderando la definición de las propiedades de endurecimiento por deformación unitaria a tensión en los materiales del UHPC para usos estructurales**

Por Manuel Bermudez y Chung-Chan Hung

3 | **Premios 2025 al Cemento de Escoria en Concreto Sostenible**

Catorce proyectos fueron distinguidos por el uso excepcional de cemento de escoria en construcciones de concreto

7 | **Preguntas y Respuestas Perspectivas de ingeniería: Preguntas y Respuestas sobre LC³ y CCIL. Guía práctica para materiales Cementantes de bajo contenido de Clíinker para el Concreto**

4 | **No todo el concreto es igual**

Porqué las mediciones en sitio y las mentalidades importan en la búsqueda de la durabilidad y sostenibilidad.

Por Kari Yuers

Directivos y miembros de la junta Directiva ACI para 2026-2027

Anderson para presidente, Schindler para vicepresidente y cuatro directivos

Según lo elegido por miembros del ACI, **Scott M. Anderson**, FACI, vicepresidente y gerente general de Keystone Structural Concrete (Keystone), Houston, Texas, Estados Unidos, se desempeñará como presidente del ACI en el periodo 2026-2027. Anderson sucede a **María Juenger**, FACI, profesora y titular de la cátedra Ernest Cockrell, Jr. Centennial Chair in Engineering #2 en el Departamento Fariborz Maseeh de Ingeniería Civil, Arquitectura y Ambiental de la Universidad de Texas en Austin, Austin, Texas. El mandato de un año de Juenger como presidenta del ACI y el mandato de dos años de Anderson como vicepresidente del ACI concluyeron al término de la reunión de primavera de 2026 de la Junta Directiva del ACI.

Anton K. Schindler, FACI, profesor Mountain Spirit y director del Highway Research Center en Auburn University, Auburn, Alabama, Estados Unidos, ha sido elegido vicepresidente del ACI. Ocupa el puesto vacante que anteriormente tenía Anderson y comenzó su periodo de dos años como vicepresidente al finalizar la reunión de primavera de 2026 de la Junta Directiva del ACI. **Matthew R. Sherman**, FACI, director de soluciones para clientes en Baker Construction, Arlington, Virginia, Estados Unidos, es el otro vicepresidente actual. Su periodo de dos años comenzó al concluir la Convención de Concreto del ACI – primavera de 2025 y finalizará al concluir la Convención de Concreto del ACI – primavera de 2027.

Cuatro miembros han sido elegidos para formar parte de la Junta Directiva del ACI, cada uno por un periodo de tres años que inició al finalizar la reunión en la convención del ACI de primavera 2026 de la Junta Directiva del ACI. Ellos son:

Matthew P. Adams, FACI, Profesor Asociado de Ingeniería Civil y Ambiental y Codirector del Laboratorio de Materiales y Estructuras en el New Jersey Institute of Technology, Newark, Nueva Jersey, Estados Unidos;

Tara Cavalline, FACI, Profesora en el William State Lee Colleger de Ingeniería, de la Universidad del Carolina del Norte en Charlotte, Carolina del Norte, Estados Unidos.

John J. Myers, FACI, profesor en el Departamento de Ingeniería Civil, Arquitectura y Ambiental en Universidad de Ciencia y Tecnología de Missouri en Rolla, Missouri, Estados Unidos., Rolla, Misuri, Estados Unidos; y

Fouad H. Yazbeck, FACI, fundador de 360 TANGENT Engineering Consultancy, Abu Dabi, Emiratos Árabes Unidos.

Las personas cuyos periodos de tres años están por concluir son: **Oscar R. Antommattei**, FACI, ingeniero principal de concreto en Kiewit Engineering Group Inc., Lone Tree, Colorado, Estados Unidos; **Peter Barlow**, FACI, consultor senior en Barlow Consulting, Seattle, Washington, Estados Unidos; **Arturo Gaytan Covarrubias**, FACI, gerente de innovación y sostenibilidad en Ready-Mix, Cemex México, Ciudad de México, México; y **Carol Hayek**, FACI, directora técnica en CCL USA Inc., Jessup, Maryland, Estados Unidos.

Los miembros de la Junta Directiva del ACI que continuarán en funciones durante 2026-2027 incluyen a:

Michael E. Ahern, principal en Pivot Engineers, Austin, Texas; **Corina-Maria Aldea**, FACI, ingeniera principal de materiales en WSP Canada, Inc., Burlington, Ontario, Canadá; **James H. Hanson**, FACI, jefe del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental y profesor en Rose-Hulman Institute of Technology, Terre Haute, Indiana, Estados Unidos; **Werner K. Hellmer**, FACI, subdirector del Departamento de Edificación del Condado de Clark, Las Vegas, Nevada, Estados Unidos; **Mary Beth D. Hueste**, FACI, jefa del Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental y profesora en Texas A&M University, College Station, Texas; **Kimberly Waggle Kramer**, FACI, profesora y titular de la cátedra G.E. Johnson Construction Science en Kansas State University, Manhattan, Kansas, Estados Unidos; el miembro honorario del ACI **Enrique Pasquel**, gerente general de Control Mix Express, Lima, Perú; y **Xiomara Sapón-Roldán**, FACI, gerente de conocimiento y calidad en el Instituto del Cemento y del Concreto de Guatemala (ICCG), Ciudad de Guatemala, Guatemala.

Con la conclusión del mandato de Juenger como presidenta del ACI, ella asume automáticamente un puesto en la Junta Directiva del ACI como miembro expresidente. Al hacerlo, reemplaza a **Charles K.**

Nmai, presidente del ACI en el periodo 2022-2023, quien dejará de ser uno de los tres expresidentes que forman parte de la Junta Directiva. Juenger trabajará junto con **Antonio Nanni**, presidente del ACI en 2023-2024, y **Michael J. Paul**, presidente del ACI en 2024-2025, conforme a lo estipulado en los estatutos del Instituto.

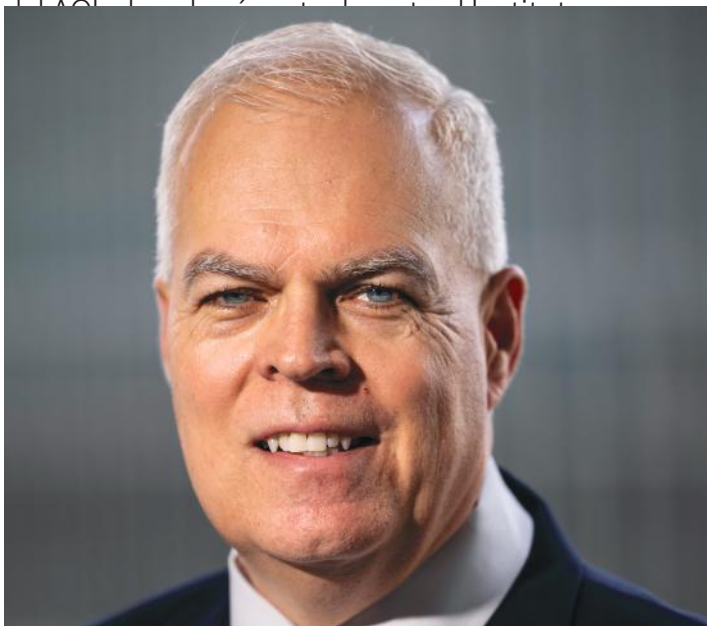
Los nuevos directivos y miembros de la Junta directiva del ACI en 2026-2027 son:

Presidente

Scott M. Anderson, FACI, es vicepresidente y gerente general de Keystone Structural Concrete (Keystone), un contratista de concreto con sede en Houston, Texas. Keystone forma parte de Stewart Holdings Group, un grupo de empresas que ofrece una gama completa de servicios de construcción con concreto en los mercados de Houston, Austin y San Antonio.

Anderson ha supervisado las operaciones de construcción de concreto colado en sitio en estructuras elevadas de Keystone desde 1999.

Anderson fue presidente del Comité Asesor Financiero (FAC) del ACI y miembro de los Comités E703, Prácticas de Construcción de Concreto, y 134, Constructibilidad del Concreto; así como del Comité Conjunto ACI-ASCC 117, Tolerancias. Anteriormente, formó parte del Comité de Enlace de Construcción (CLC) del ACI. Durante su periodo como vicepresidente del ACI, presidió el grupo de trabajo encargado de actualizar el Plan Estratégico del ACI.



Scott M. Anderson

Comité de Nominaciones

Tres miembros del ACI fueron elegidos para formar parte del Comité de Nominaciones de 2026. Ellos son:

- **Eric R. Giannini**, FACI, American Cement Association, Washington, DC, Estados Unidos;
- **Danielle D. Kleinhans**, FACI, Mateenbar Composite Reinforcements, LLC, Charlotte, Carolina del Norte, Estados Unidos; y
- **Jan Olek**, FACI, Purdue University, West Lafayette, Indiana, Estados Unidos.

Estas personas, junto con el segundo expresidente **Michael J. Paul**, la expresidenta inmediata **María Juenger**, el presidente **Scott M. Anderson** y el vicepresidente **Matthew R. Sherman**, conformarán un Comité de Nominaciones de siete miembros. Como segundo expresidente, Paul fungirá como presidente del comité. El Comité de Nominaciones comenzó sus deliberaciones al concluir la reunión de primavera de 2026 de la Junta Directiva del ACI.

Este nuevo comité nominará a los directivos del Instituto para periodos que iniciarán al concluir la Convención de Concreto del ACI – primavera de 2027. El Comité de Nominaciones, elegido anualmente, presenta recomendaciones para los siguientes cargos: presidente, periodo de un año; un vicepresidente, periodo de dos años; cuatro miembros de la Junta Directiva, cada uno con un periodo de tres años; y 10 candidatos para el Comité de Nominaciones.

Ha estado activo en la American Society of Concrete Contractors (ASCC) desde 2003, formando parte de su Junta Directiva desde 2007 y desempeñándose como presidente en el periodo 2015-2016. Presidió el Comité de Educación y Capacitación de la ASCC de 2011 a 2014, durante el cual el comité produjo un video instructivo ampliamente utilizado sobre los fundamentos del acabado del concreto. Anderson también es presidente de la ASCC Education, Research & Development Foundation. En 2018, Concrete Construction lo reconoció como una de las “Personas Más Influyentes en la Construcción con Concreto”. Anderson obtuvo su licenciatura en Ingeniería Civil (BSCE) en la Universidad de Buffalo, Nueva York, y su maestría en la Universidad de Texas en Austin, donde realizó investigación de posgrado sobre las propiedades del concreto. Es ingeniero profesional con licencia en Texas.

Vicepresidente

Anton K. Schindler, FCI, es Profesor Mountain Spirit y director del Highway Research Center en la Universidad de Auburn (AU), en Auburn, Alabama, donde imparte cursos de diseño de concreto reforzado, reparación estructural y materiales de concreto en el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental. Ha formado parte del profesorado de AU durante más de 23 años. Colaboró en la creación del capítulo estudiantil del ACI en AU y se ha desempeñado como asesor académico desde 2014. Schindler fue nombrado Fellow del ACI y de la American Society of Civil Engineers (ASCE) en 2013 y 2019, respectivamente. Recibió el premio ACI Foundation Building the Future en 2025, el ACI Delmar L. Bloem Distinguished Service Award en 2021, el ACI Cedric Willson Lightweight Aggregate Concrete Award en 2017, el Erskine Award del Expanded Shale, Clay and Slate Institute (ESCSI) en 2013, y la medalla ACI Wason por investigación en materiales en 2006 y 2011.

Fue becario Fulbright en Finlandia en 2015 y 2016, donde investigó el desarrollo de infraestructura de concreto durable para el almacenamiento a largo plazo de residuos de combustible nuclear. Schindler es miembro del Comité de Actividades Técnicas (TAC) del ACI, del Comité Asesor Financiero (FAC), del Comité de Premios para Artículos del ACI, y expresidente y miembro actual de los Comités 231, Propiedades del Concreto a Edades Tempranas, y 237, Concreto Autocompactante, así como del Consejo de Becas de la Fundación ACI. También fue miembro de la Junta Directiva del ACI y participó en grupos de trabajo del Comité Ejecutivo sobre Outlook 2040 y el Plan Estratégico del ACI 2025. Es además miembro de ASCE y ASTM International.

Sus áreas de investigación incluyen el concreto estructural, modelado del comportamiento del concreto, comportamiento a edades tempranas de estructuras de concreto, concreto de alto desempeño, durabilidad del concreto, ensayos no destructivos, reparación estructural y producción, ensayo y propiedades del concreto.

Schindler obtuvo su licenciatura (BSE) y título con honores en ingeniería estructural en la Universidad de Pretoria, Sudáfrica, en 1993 y 1996, respectivamente. Tras trabajar casi cuatro años en la industria del diseño estructural, obtuvo su maestría (MSE) y doctorado (PhD) en la Universidad de Texas en Austin en 1999 y 2002. Es ingeniero profesional con licencia en Alabama.



Junta directiva

Matthew P. Adams, FCI es profesor asociado de Ingeniería Civil y Ambiental y Codirector del Laboratorio del Laboratorio de Materiales y Estructuras en el Instituto de Tecnología de New Jersey, en Newark, New Jersey. Sus áreas de investigación incluyen la sostenibilidad, resiliencia y durabilidad a largo plazo de materiales innovadores a base de cemento. También estudia cómo las políticas gubernamentales apoyan o dificultan la adopción de prácticas sostenibles en la construcción. Es presidente del Comité 323 del ACI, Código de Concreto de Bajo Carbono; presidente fundador del Comité S806 del ACI, Actividades para Miembros Jóvenes; expresidente y miembro actual del Comité 555 del ACI, Concreto con Materiales Reciclados; y miembro del Comité de Actividades Técnicas (TAC), del Comité de Promoción y Difusión de Códigos y Normas (CSAO), y del Comité 201 del ACI, Durabilidad del Concreto. Recibió el premio ACI Young Member Award for Professional Achievement en 2015 y fue nombrado Fellow del ACI en 2019.

Además, Adams es presidente del Subcomité C09.61 de ASTM, Ensayos de Resistencia, y es miembro de Out in Science, Technology, Engineering, and Mathematics (oSTEM).

Obtuvo su licenciatura en ingeniería civil en la Universidad de New Hampshire, Durham, NH, Estados Unidos, en 2006, y su maestría y doctorado en ingeniería civil en Oregon State University en 2012 y 2015, respectivamente.



Matthew P. Adams

Tara Cavalline, FACI es profesora en el William States Lee College of Engineering de la University of North Carolina (UNC), en Charlotte, Carolina del Norte. Sus intereses de investigación incluyen el concreto y los materiales cementantes para apoyar infraestructuras durables, sostenibles y resilientes; aseguramiento de la calidad en la construcción; uso de materiales reciclados y subproductos; y gestión de activos. Cavalline forma parte de UNC Charlotte desde 2006 y actualmente es directora del Charlotte Aviation Innovation and Research (AIR) Institute. Antes de incorporarse a la universidad, trabajó como ingeniera consultora en Law Engineering y SKA Consulting Engineers. Cavalline ha estado activa en la Red de Profesores del ACI desde 2009. Fue miembro durante dos periodos del Comité de Actividades Educativas (EAC) y actualmente forma parte del Comité de Enlace de Construcción (CLC). Es presidenta del Comité 555 del ACI, Concreto con Materiales Reciclados, y del Subcomité 201-J, Ataque Químico al Concreto; además de ser miembro de los Comités 121, Sistemas de Aseguramiento de la Calidad del Concreto; 201, Durabilidad del Concreto; y 325, Pavimentos de Concreto. También ha participado en el Comité S801, Competencias Estudiantiles, y asesora el capítulo estudiantil del ACI en UNC Charlotte.

Ha guiado a cinco equipos estudiantiles de UNC Charlotte que lograron posicionarse entre los tres primeros lugares en la Competencia de Construcción del ACI. Asimismo, formó parte de la Junta Directiva del Capítulo Carolina del ACI de 2017 a 2020 y fue co-coordinadora (Tri-Chair) de la Convención de Concreto del ACI – otoño de 2020 en Raleigh, Carolina

del Norte (realizada finalmente de forma virtual).

Entre sus reconocimientos se encuentran el premio Marlin J. Knutson por Logro Técnico de la American Concrete Pavement Association (ACPA) en 2022, el Undergraduate Award in Engineering Teaching Excellence de UNC Charlotte en 2014, y el William States Lee Engineering Scholar Award en 2023. También ha recibido dos premios a mejor artículo en revistas académicas.

Cavalline ha sido una líder activa en el Transportation Research Board (TRB), donde recientemente completó un periodo de tres años como presidenta del Grupo de Infraestructura de Transporte y actualmente preside el Consejo de Actividades Técnicas. También forma parte de los comités ejecutivos de la International Society of Concrete Pavements (ISCP) y del National Concrete Consortium (NC2), y participa activamente en la American Society of Civil Engineers (ASCE).

Obtuvo su licenciatura con honores en ingeniería civil y ambiental y su maestría en ingeniería civil en Universidad Estatal de Pennsylvania, su doctorado en sistemas de infraestructura y medio ambiente fue en UNC Charlotte. Es ingeniera profesional con licencia en cuatro estados de Estados Unidos.



Tara Cavalline

Presidentes de Comités del Consejo – Primavera 2026

Las siguientes personas se desempeñarán como presidentes de los Comités Permanentes del Consejo del ACI:

Christopher J. Robinson, FACI – Comité de Programas de Certificación.

Jonathan M. Kuell – Comité de Actividades de Capítulos.

David G. Tepke, FACI – Comité de Promoción y Difusión de Códigos y Normas.

Michael J. Paul, FACI – Comité de Nominaciones.

Ray R. Hefner – Comité de Enlace de Construcción.

Kimberly Waggle Kramer, FACI – Comité de Actividades Educativas.

Paul J. Tikalsky, FACI – Comité Asesor Financiero.

Charles K. Nmai, FACI – Comité de Honores y Premios

Julissa Hidalgo – Comité de Conferencistas Internacionales.

Shiho Kawashima – Consejo Editorial de la revista *Materials Journal*.

Matthew R. Sherman, FACI – Comité de Membresía.

Charles K. Nmai, FACI – Consejo de Normas.

Sergio F. Brena, FACI – Consejo Editorial de la revista *Structural Journal*.

Elissa Narro Aguirre – Comité de Actividades Estudiantiles y de Jóvenes Profesionales.

Wassim M. Ghannoum, FACI – Comité de Actividades Técnicas.

John J. Myers, FACI es profesor en el Departamento de Ingeniería Civil, Arquitectura y Ambiental (CAEE) de la Universidad de Ciencia y Tecnología de Missouri (Missouri S&T), en Rolla, Misuri, y se desempeña como director del Centro Estatal del Sistema de Transporte de la Universidad de Missouri, el Centro de Innovación del Transporte de Missouri (MCTI). Ha sido miembro activo de numerosos comités del ACI, incluyendo el Comité de Actividades Educativas (EAC); el Comité de Promoción y Difusión de Códigos y Normas (CSAO); los comités S801 (Competencias Estudiantiles, exsecretario), S802 (Métodos de Enseñanza y Materiales Educativos), S803 (Red de Profesores, exsecretario), S804 (Premio Walter P. Moore), S806 (Actividades de Miembros Jóvenes); el Comité

de Premios para Artículos del ACI; y múltiples comités técnicos como 239 (Concreto de Ultra Alto Desempeño), 342 (Evaluación de Puentes de Concreto), 363 (Concreto de Alta Resistencia, exsecretario), 423 (Concreto Presforzado), 440 (Refuerzo con Polímeros Reforzados con Fibra, exsecretario) y 549 (Productos Cementantes Reforzados Delgados y Ferrocemento), entre otros. Ha presidido y copresidido conferencias nacionales e internacionales a lo largo de su carrera y ha organizado más de 100 sesiones técnicas y educativas en otros eventos, muchas de ellas en las Convenciones de Concreto del ACI. Fue nombrado Fellow del ACI en 2007 y recibió el Walter P. Moore, Jr., Faculty Achievement Award en 2006 y el premio ACI Committee Member of the Year en 2009. Sus intereses de investigación incluyen materiales avanzados en ingeniería estructural, su desarrollo, comportamiento, implementación y desempeño a largo plazo, así como el desarrollo de normativas. Esto incluye el desarrollo en laboratorio y su transformación hacia el despliegue y monitoreo en campo, con enfoque en evaluación, renovación y sostenibilidad. Durante más de 30 años, Myers ha estudiado concretos sostenibles avanzados y sistemas compuestos avanzados tanto para reparación como para obra nueva, como investigador principal en proyectos de investigación patrocinados por agencias federales y estatales e industria privada. Cuenta con más de 10 años de experiencia como consultor y es ingeniero profesional con licencia en Missouri, Maryland y Pensilvania.

Ha sido reconocido y ha participado en otras organizaciones, como la American Society of Civil Engineers (ASCE), el Precast/Prestressed Concrete Institute (PCI), The Masonry Society (TMS), el Bridge Engineering Institute (BEI), el Transportation Research Board (TRB), el International Institute for FRP in Construction (IIFC), la International Association of Advanced Materials (IAAM) y la Society of American Military Engineers (SAME). También forma parte del Consejo Editorial de la revista *Sustainability*, con sede en Suiza. Ha asesorado a 59 estudiantes de posgrado de maestría y doctorado y cuenta con más de 430 publicaciones técnicas.



John J. Myers

incluyendo sostenibilidad, concreto masivo, aditivos químicos, concreto con agua de mar, concreto en clima cálido y concreto premezclado, entre otros. También forma parte del Comité de Conferencistas Internacionales y del Subcomité 318-I (Internacional).

Es miembro fundador del capítulo del ACI en el Líbano y presidente fundador del capítulo del ACI-UAE en los Emiratos Árabes Unidos.

Yazbeck fue elegido miembro del Institute of Concrete Technology (ICT) y es miembro de los Comités ASTM C01 - Cemento, y C09 - Concreto y Agregados de Concreto, así como miembro fundador del Capítulo de ASTM International en los Emiratos Árabes Unidos.



Fouad H. Yazbeck

Fouad H. Yazbeck, FACI es fundador de 360 TANGENT Engineering Consultancy, empresa especializada en tecnología del concreto y sostenibilidad en Abu Dabi, Emiratos Árabes Unidos (UAE). Cuenta con 30 años de experiencia en la industria de materiales de construcción, habiendo diseñado, producido y suministrado más de 23 millones de m³ de concreto en ambientes agresivos. En el año 2000 se incorporó a Readymix Abu Dhabi como gerente técnico asistente, ascendiendo a gerente técnico en 2004 y a director técnico (CTO) en 2015. Durante este periodo, desarrolló el departamento técnico hasta convertirlo en un centro de investigación y desarrollo con laboratorios de concreto centrales y satelitales. Posteriormente, en 2017, asumió el cargo de director técnico y comercial de Universal Concrete Products Ltd. Co. (Unimix) LLC, un productor de concreto en Dubái, UAE. Ha presentado su trabajo en múltiples conferencias locales e internacionales y recibió el Innovation Track Award en la Ecocity World Summit 2015 en Abu Dhabi. Yazbeck ha sido miembro del UAE Cement Decarbonisation Delivery Group, del UAE-UK Business Council de la campaña de Descarbonización del Entorno Construido, de la UAE Society of Engineers, de la Beirut Order of Engineers and Architects, y de los comités de Directrices de Concreto y de Vida Útil del Municipio de Dubái. Es ingeniero de materiales certificado por el Municipio de Dubái.

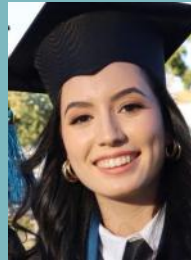
Yazbeck es Fellow del ACI; expresidente y miembro del Comité 234 (Humo de Sílice en el Concreto); y miembro de varios comités técnicos del ACI,

Título original en inglés:

ACI Officers and Board of Direction Members for 2026-2027

Anderson for President, Schindler for Vice President,
and four Directors

La traducción de este artículo correspondió al Capítulo Sureste de México



Traducción:

**Ing. Maria Jesus
Dominguez Ramos**



Revisión Técnica:

**Dr. Joseph Eli
Mandujano Zavala**

02

Rompiendo la Barrera del Idioma

Los Centros de Recursos del ACI ahora ofrecen programas de Certificación impartidos únicamente en español

Por Andrea Godoy y Victoria Lopez

En un paso importante hacia el desarrollo de los trabajadores de la industria, los Centros de Recursos del ACI están ofreciendo ahora sesiones de revisión y exámenes de Certificación para el Técnico ACI en Ensayos de Concreto en Obra Grado I, y el Técnico en Ensayos de Resistencia del Concreto en español. Esta iniciativa brinda a los profesionales hispanohablantes de la industria del concreto un mejor acceso a los programas de capacitación y certificación en los Estados Unidos.

Los Centros de Recursos del ACI impartirán estas sesiones como parte de sus oferta para facilitar la disponibilidad de programas y la planeación y calendarización de los candidatos. Estratégicamente ubicados en el sur de California, Chicago/Medio Oeste y las regiones del Atlántico Medio de los Estados Unidos, cada Centro cuenta con un equipo de profesionales del concreto que trabajan para brindar acceso a los programas de Certificación del ACI a la industria. Las Centros del sur de California y el Medio Oeste cuentan con personal cuya lengua nativa es el español y que dirigirá estas sesiones en cada lugar. Han desarrollado sesiones de revisión en el aula de medio día y de día completo con todas las presentaciones y materiales de apoyo en español.

Qué Está Cambiando

Los siguientes cursos se ofrecen ahora completamente en español, incluyendo presentaciones en el aula, libros de trabajo, sesiones prácticas en el laboratorio, y exámenes escritos y de desempeño:

- Técnico ACI en Ensayos de Concreto en Obra Grado I; y
- Técnico en Ensayos de Resistencia del Concreto.

- El personal de los Centros de Recursos del ACI está desarrollando actualmente los siguientes programas, que también se ofrecerán completamente en español más adelante durante este año:
- Instalador de Anclajes Adheridos; y
- Terminador de apoyo, Terminador y Terminador Avanzado ACI para superficies planas de concreto.



Andrea Godoy imparte una sesión de revisión en el aula para el programa Técnico ACI Ensayos de Concreto en Obra Grado I.

Adicionalmente, se utilizarán en las sesiones de aula videos de capacitación específicos por programa desarrollados por el ACI con locución en español. Varios programas de Certificación del ACI ya incluyen opciones de examen/libro de trabajo en español, incluyendo el Técnico ACI en Ensayos de Concreto en Obra Grado 1, el Técnico en Ensayos de Resistencia del Concreto, el Técnico/Experto ACI en Acabado de Concreto e Instalador de Anclajes Adheridos. Los Centros de Recursos del ACI también ofrecen sesiones de capacitación de 1 día en español para la mayoría de los programas.



Victoria Lopez muestra a un candidato en los procedimientos correctos para el ensayo de resistencia a la flexión en una sesión práctica.

Beneficios para Empleadores y Trabajadores

Las empresas con personal bilingüe pueden capacitar más fácilmente a sus empleados hispanohablantes sin depender únicamente de cursos o traducciones en inglés. Los Centros de Recursos del ACI ofrecen sesiones programadas regularmente, pero también pueden proporcionar sesiones privadas personalizadas. Estas sesiones pueden reducir la confusión y permitir que los individuos hagan preguntas con mayor confianza. Esto también puede contribuir a mejorar la comunicación interna para los empleadores.

Es probable que los técnicos, inspectores y artesanos capacitados en su idioma preferido se desempeñen con mayor confianza, reduciendo errores en el campo y en el laboratorio. Para los individuos, esta nueva opción abre un camino hacia la Certificación del ACI que de otro modo podría ser difícil debido a las barreras del idioma, mejorando el avance profesional.

Por Qué Es Importante

Al ofrecer sesiones de capacitación, certificación y examen en español, el ACI amplía el acceso a los profesionales hispanohablantes en los Estados Unidos que de otro modo podrían verse limitados por las barreras del idioma y la disponibilidad de programas. Cuando el contenido del programa se imparte en la lengua materna del trabajador, los resultados mejoran. Tienen una mejor comprensión de las normas de ensayo, los procedimientos técnicos y los resultados de las pruebas. Todo ello contribuye a una mayor precisión en los ensayos de campo y de laboratorio, y mejora el control de calidad, proporcionando una construcción de concreto de alta calidad.

Muchos Departamentos de Transporte estatales (DOT), contratistas y agencias de ensayo exigen o prefieren enfáticamente al personal con Certificación del ACI. Con opciones en español disponibles, más personas pueden cumplir con estos requisitos.

Algunos candidatos que han pasado por los Centros de Recursos del ACI tienen dificultades en una sesión impartida en inglés. En muchos casos, no sabían que el libro de trabajo y los exámenes del programa están disponibles en español, lo que podría haberles ayudado. Ofrecer la sesión completa en español brinda un apoyo adicional y es un mejor enfoque para que el ACI sirva a esos candidatos y, en última instancia, a la industria de la construcción con concreto.



Andrea Godoy trabaja con un candidato en una sesión práctica de contenido de aire por el método volumétrico.

Las empresas pueden promover una fuerza laboral certificada y bilingüe como parte de sus credenciales de control de calidad y seguridad. Esto también puede ayudar a las empresas a atraer nuevas contrataciones a sus equipos y proporcionar una ventaja competitiva.

Cómo Funciona

1. Inscripción y programación.
2. Curso e instrucción: Las sesiones en español cubren todos los conocimientos requeridos para el programa Técnico ACI en Ensayos de Concreto en Obra Grado I, incluyendo muestreo, ensayo de revenimiento, contenido de aire, peso unitario, rendimiento volumétrico, temperatura, fabricación de especímenes y criterios de aceptación del concreto fresco. Para el programa Técnico en Ensayos de Resistencia del Concreto, las sesiones cubren el cabeceo de cilindros, el uso de almohadillas de cabeceo, la rotura de cilindros y la rotura de vigas.
3. Examen y materiales: Los libros de trabajo y exámenes en español están disponibles. Las Herramientas y Recursos en Español del ACI confirman que el programa incluirá materiales en español.
4. Examen de desempeño y escrito: Los candidatos exitosos completan tanto un examen escrito de opción múltiple como un examen de desempeño (práctico).

Al ofrecer estos programas de Certificación del ACI y sesiones de examen en español a través de los Centros de Recursos del ACI, se está dando un paso significativo hacia la mejora de la accesibilidad, el aumento de los estándares y el apoyo a una fuerza laboral diversa en la industria del concreto. Para técnicos, inspectores y operarios, esta es una oportunidad de obtener la Certificación del ACI en su idioma, ayudando a los individuos, sus empleadores y a la industria del concreto a seguir siempre avanzando.

Seleccionado por los editores para interés del lector.



GI **Germann Instruments**
The Pioneer of Innovative Nondestructive Test Systems for Concrete

ICAR PLUS

El reómetro ICAR Plus es un instrumento portátil y práctico para medir las propiedades fundamentales de flujo del concreto fresco bajo el modelo reológico de Bingham: tensión de fluencia y viscosidad plástica.



Stress Grow Test:
Realiza un ensayo controlado de crecimiento de esfuerzo a velocidad lenta constante, determinando la tensión de fluencia estática a partir del par máximo medido con alta precisión.

Flow Curve Test
Caracteriza la tensión de fluencia dinámica y la viscosidad plástica para una evaluación precisa del comportamiento reológico del material.



Contáctanos



Productos

Andrea Godoy es Asistente de Programas en el Centro de Recursos ACI Chicago/Medio Oeste. Obtuvo su licenciatura en ingeniería civil en la Universidad de Los Andes (ULA) en Mérida, Venezuela. Anteriormente se especializó en procedimientos de ensayos no destructivos (NDT) y equipo relacionado durante más de 5 años, y brindó apoyo técnico, capacitación y asistencia en la ejecución de talleres de NDT. Es bilingüe en inglés y español y posee múltiples Certificaciones del ACI.



Victoria Lopez es Asistente de Programas en el Centro de Recursos ACI del Sur de California. Obtuvo su licenciatura de la Universidad Estatal de California, Chico, CA, EUA, y su título de asociado en administración de la construcción del Norco College, Norco, CA. Tiene amplia experiencia en campo como Técnica en Control de Calidad y como capacitadora principal para nuevos técnicos de campo de concreto en una importante empresa de concreto premezclado. Antes de unirse al ACI, fue Especialista en Servicios Técnicos para una gran operación regional de concreto premezclado en el Sur de California. Es bilingüe en inglés y español y posee múltiples Certificaciones del ACI.



Título original en inglés:
Breaking the Language Barrier
ACI Resource Centers now offer Spanish-led
(only) certification programs

**La traducción de este artículo
correspondió al Capítulo de México
Noroeste**



*Traducción y
Revisión Técnica:*
**Dr. José Manuel
Gutiérrez Moreno**

CONVOCATORIA

CONCRETO LATINOAMÉRICA

¿Publicar tus artículos de investigación
y casos de estudio en nuestra revista?
¡Es muy fácil!

*Descarga la Guía
de Publicación*



¡Escanea para
conocer los
requisitos!

*Llena la Carta
de Solicitud*



¡Escanea para
completar tus
datos!

Una vez lista tu solicitud, fírmala y envíala a la Revista Concreto Latinoamérica a través del correo concretolatam@gmail.com

Tu solicitud y artículo serán evaluados para su publicación.

03

Premios 2025 al Cemento de Escoria en Concreto Sostenible

Catorce proyectos fueron distinguidos por el uso excepcional de cemento de escoria en construcciones de concreto

La Asociación de Cemento de Escoria (SCA, por sus siglas en inglés) anunció a los ganadores de los Premios 2025 al Uso de Cemento de Escoria en Concreto Sostenible durante la Convención del ACI de Primavera 2026 en Rosemont/Chicago, IL, EE. UU.

Catorce proyectos de construcción fueron seleccionados para mostrar las amplias aplicaciones del cemento de escoria y su impacto en la creación de concreto durable y sostenible. Estos ganadores demuestran cómo el cemento de escoria mejora la durabilidad del concreto mientras reduce el carbono incorporado asociado a la producción del mismo.

Para obtener más información sobre el Programa de Premios al Cemento de Escoria en Concreto Sostenible, visite www.slagcement.org

Los ganadores del Premio 2025 al Cemento de Escoria en Concreto Sostenible incluyen:

Premio: Arquitectura Escuela Secundaria Aquilla J. Morgan

Ubicada en Wimauma, Florida, EE. UU., la Escuela Secundaria Aquilla J. Morgan es un proyecto de 176 millones de dólares en un terreno virgen de 35 hectáreas (87 acres). Construida para albergar a más de 3,400 estudiantes, es la escuela secundaria más grande jamás construida en el condado de Hillsborough, el séptimo sistema escolar más grande del país. El campus cuenta con nueve edificios principales, de entre uno y tres pisos, que utilizan una combinación de concreto prefabricado (tilt up) y concreto vertido *in situ*.

Para cumplir con los objetivos estructurales y ambientales del proyecto a gran escala, el equipo priorizó una mezcla de concreto sostenible y con bajas emisiones de carbono. El cemento de escoria fue la herramienta principal utilizada para lograr este objetivo.

Más allá de los beneficios ambientales, la inclusión de cemento de escoria resultó ser una opción económica, reduciendo el costo total del concreto en comparación con las mezclas estándar. Esta eficiencia permitió al distrito concentrar los recursos en las modernas instalaciones de la escuela, incluyendo laboratorios de cocina, talleres automotrices, pistas de deportes electrónicos y estaciones de carga para vehículos eléctricos en todo el campus.

Créditos del proyecto: Propietario, escuelas públicas del condado de Hillsborough; Contratista general, The Beck Group/Envision; Contratista de concreto, VMG Construction, Inc.; Arquitecto, Harvard Jolly | PBK; Ingeniero, Master Consulting Engineers, Inc.; Concreto, Maschmeyer Concrete; y Cemento de escoria, Quikrete Cement.



Secundaria Aquilla J. Morgan

Centro Logístico Gensco

Ubicado en Salem, Oregón, EE. UU., el Centro Logístico Gensco es una instalación de 55 millones de dólares diseñada para dar soporte a las crecientes operaciones de HVAC y fabricación en todo el Pacífico Noroeste de los Estados Unidos. Este proyecto requirió 16,800 m³ (22,000 yd³) de concreto premezclado para crear un centro de distribución confiable y de alta capacidad.

Para los elementos estructurales, incluyendo los paneles prefabricados, columnas y faldones exteriores, el equipo utilizó una combinación de cemento portland-caliza y un 20% de cemento de escoria. Dado que gran parte del trabajo con paneles prefabricados y exteriores se realizó durante los meses más cálidos del verano, el cemento de escoria desempeñó un papel fundamental al retrasar el tiempo de fraguado, lo que permitió un margen de tiempo más manejable para la colocación y un acabado más uniforme.

Al integrar cemento de escoria, RiverBend Materials logró equilibrar las necesidades prácticas de contratistas y terminadores con un claro enfoque en la reducción de la huella de carbono del proyecto. El resultado es un centro logístico duradero y sostenible que cumple con los requisitos de resistencia y estética.

Créditos del proyecto: Propietario, Gensco; Contratista, Perlo Construction, LLC; Arquitecto e Ingeniero estructural, McKenzie Inc.; Concreto, RiverBend Materials, una empresa de CRH; y Cemento de escoria, Ash Grove Cement, una empresa de CRH.

Premio: Durabilidad

Proyecto de rehabilitación de la I-90 de la Autoridad de Autopistas del Estado de Nueva York TAS 24-1 D214944

Ubicado en Victor, Nueva York, EE. UU., este proyecto de la Autoridad de Autopistas del Estado de Nueva York (NYS) ha marcado una transición significativa en la forma en que se construye la infraestructura en el estado. A partir de mayo de 2024, el Departamento de Transporte del Estado de Nueva York abandonó las fórmulas prescriptivas tradicionales y adoptó mezclas diseñadas por desempeño (PEM, por sus siglas en inglés). Este proyecto utilizó las nuevas especificaciones para reemplazar las barreras centrales existentes y realizar reconstrucciones críticas en alcantarillas y muros de puentes.

Al centrarse en características de rendimiento específicas, la mezcla se optimizó para lograr la máxima durabilidad y reducir el impacto ambiental. Al aumentar el uso de materiales cementantes suplementarios (MCS), como el cemento de escoria, el proyecto redujo el contenido total de cemento y disminuyó las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la construcción.

A pesar de las dificultades de la construcción en clima cálido, el concreto mostró una mínima pérdida de revenimiento y no presentó problemas de fraguado instantáneo. La trabajabilidad fue tan alta que la barrera requirió poco trabajo manual después de la extrusión una vez alcanzado el revenimiento deseado.

El producto final generó una apariencia consistente y de alta calidad. El blanco y brillante color del cemento de escoria curado de la barrera proveyó una superficie limpia y de alta visibilidad.

Créditos del proyecto: Propietario, Autoridad de Autopistas del estado de Nueva York; Contratista, Villager Construction, Inc.; Contratista de concreto, Surianello General Concrete Contractors, Inc.; Ingenieros, LaBella Associates; Concreto, Dolomite dba Manitou Concrete; y Cemento de escoria, St Marys Cement.

Puente de la Carretera Estatal 249/ Puerto de Indiana: Reemplazo

Ubicado en Portage, Indiana, EE. UU., el proyecto de reemplazo del puente de la Carretera Estatal 249 en el Puerto de Indiana representa un logro de infraestructura de gran envergadura. Este puente doble de 300 m (1,100 pies) de longitud constituye una arteria vital para la región, y su finalización ha duplicado la capacidad de tráfico de camiones que entran y salen del puerto.

La construcción se realizó directamente sobre cuatro carriles de carretera en funcionamiento y varias vías férreas activas, manteniendo el acceso por carretera al puerto para las operaciones comerciales. El proyecto requirió más de 5,700 m³ (7,400 yd³) de concreto, incluyendo siete cimentaciones de pilares de concreto masivo que requirieron un estricto control térmico.

El uso de cemento de escoria mantuvo la temperatura del concreto por debajo de los 21 °C (70 °F), gestionando eficazmente el calor de hidratación en las grandes cimentaciones de los pilares. Además del control de temperatura, la mezcla reforzada con cemento de escoria proporcionó la durabilidad a largo plazo requerida para los tableros de puentes de 200 mm (8 pulg.) y cumplió con los requisitos de resistencia de 28 MPa (4,000 psi).

Créditos del proyecto: Propietario, Departamento de Transporte de Indiana; Contratista, Superior Construction; Ingeniero, Parsons, Corporación; Concreto, Smith Ready Mix, Inc.; y Cemento de escoria, Ozinga Bros, Inc.



Reemplazo del puente de la carretera estatal 249/Puerto de Indiana

Premio: Concreto de Alto Rendimiento Estacionamiento Azul del Hospital Froedtert

Ubicado en Milwaukee, Wisconsin, EE. UU., el Estacionamiento Azul del Hospital Froedtert es un edificio de cinco pisos que ofrece 2,400 plazas de estacionamiento, diseñado para mejorar la experiencia de pacientes, visitantes y personal. Este diseño incluye un puente peatonal climatizado, estacionamiento accesible cerca de los ascensores y características esenciales de seguridad y sostenibilidad.

El cronograma de construcción dependía del rápido desarrollo de la resistencia de la estructura postensada. El equipo empleó una tasa de sustitución de cemento de escoria optimizada específicamente para alcanzar 21 MPa (3,000 psi) en 20 horas, y se utilizaron medidores de madurez para cronometrar el postensado en diversas condiciones climáticas durante los años de construcción. Esto permitió una secuencia de postensado rápida y uniforme, manteniendo el proyecto dentro del plazo previsto y cumpliendo con el requisito de resistencia a los 28 días de 41 MPa (6,000 psi).

Se utilizó cemento de escoria debido a su consistencia. Incluso con una mezcla compleja de aditivos, que incluía inhibidores de corrosión y modificadores de viscosidad, la mezcla a base de cemento de escoria se mantuvo estable y predecible. Las propiedades tixotrópicas de la mezcla de cemento de escoria también mejoraron la bombeabilidad, lo cual fue esencial para un proyecto que ocasionalmente requería varias etapas de bombeo para alcanzar los niveles superiores. Al reducir la permeabilidad y asegurar una incorporación de aire constante, el cemento de escoria proporcionó la base para una estructura diseñada con una vida útil de 75 años.

Créditos del proyecto: Propietario, Hospital Froedtert; Contratista, CG Schmidt; Arquitecto, EUA – Milwaukee; Ingeniero, Graef; Concreto, Riv/Crete Ready Mix; y Cemento de escoria, St Marys Cement.



Estacionamiento Azul del Hospital Froedtert

Proyecto Heat

Ubicado en Chicago, IL, EE. UU., en el Corredor Industrial North Branch, el Proyecto Heat es un centro logístico de 110 mil m² (1.2 millones de pies cuadrados) con un diseño de dos plantas apiladas que permite el acceso de camiones semirremolque de 16 metros (53 pies) de largo a ambos pisos, maximizando así el espacio en una superficie compacta de 5 hectáreas (11 acres) cerca de la autopista Kennedy.

Para dar vida a este proyecto, se utilizaron más de 56,000 m³ (73,000 yd³) de concreto en una amplia variedad de aplicaciones, desde muelles de carga postensados hasta losas sobre cubiertas metálicas. Se empleó cemento de escoria para proporcionar baja permeabilidad y alta durabilidad.

Los beneficios del cemento de escoria se demostraron durante todo el ciclo de construcción, que se extendió durante todo el año. Incluso durante el riguroso invierno, las mezclas de las cubiertas postensadas cumplieron consistentemente con los requisitos de resistencia inicial, lo que permitió que el proyecto se mantuviera dentro del plazo previsto. Si bien el diseño requería 60 MPa (8,750 psi), las mezclas con cemento de escoria superaron consistentemente los 66 MPa (9,500 psi).

El cemento de escoria ofreció importantes ventajas ambientales, ya que su uso junto con la tecnología CarbonCure y el refuerzo de alta resistencia minimizó la huella de carbono general del proyecto.

Créditos del proyecto: Propietario, Logistics Property company, LLC; Contratista, Walsh Construction; Arquitecto, Ware Malcomb; Ingeniero, DCI Engineers; Concreto, Prairie Materials; y Cemento de escoria, St Marys Cement.

Premio: Infraestructura

McLean Boulevard

Ubicado en Elgin, Illinois, EE. UU., el proyecto de mejoras del McLean Boulevard es una importante modernización de infraestructura, diseñada para transformar una carretera de dos carriles en un corredor de cuatro carriles más seguro y eficiente. Este proyecto también incluyó un islote con paisajismo para reducir los puntos de conflicto vehicular y un acceso de uso compartido de 3 m (10 ft) de ancho que conecta a los residentes con la red regional de senderos.

Para mantener el flujo vehicular en este corredor de alto tránsito durante la construcción, se utilizó una mezcla especializada de cemento de escoria para todo, desde el pavimento principal de baja consistencia y los bordillos mecanizados, hasta las aceras y las entradas de vehículos. El cemento de escoria se seleccionó por su trabajabilidad con bajo revenimiento, lo que proporcionó una mezcla uniforme que permitió ejecutar tres colocaciones consecutivas de más de 840 m³ (1,100 yd³) cada una.

La especificación requería 24 MPa (3,500 psi) a los 14 días, y la mezcla reforzada con cemento de escoria alcanzó o superó esa resistencia en mucho menos tiempo. Este rápido aumento de resistencia permitió abrir el pavimento al tráfico en 2 o 3 días.

El uso de cemento de escoria contribuyó a que el proyecto de McLean Boulevard lograra una consistencia de alto volumen, un rápido aumento de resistencia para un acceso temprano y un acabado duradero que beneficiará a la comunidad durante las próximas décadas.

Créditos del proyecto: Propietario, Departamento de Transporte de Illinois; Contratista, Plote Construction Inc.; Concreto, Elmhurst Chicago Stone Company; y Cemento de escoria Skyway Cement Company.

Premio: Aplicaciones Innovadoras

Parque Eólico Rogue

Ubicado en Patton, Pensilvania, EE. UU., el proyecto del Parque Eólico Rogue es una fuente vital de energía renovable para la región. La construcción en zonas rurales presentó desafíos logísticos únicos, que requirieron la ubicación estratégica de una planta de concreto portátil para gestionar la materia prima necesaria para las enormes cimentaciones.

Controlar el calor de hidratación en tan grandes volúmenes de concreto también fue una preocupación para este proyecto.

Las temperaturas se controlaron programando colocaciones de concreto nocturnas y mezclando el concreto con hielo y un nivel de sustitución de cemento de escoria del 35%. Se utilizaron aditivos reductores de agua de alto rango para garantizar que el concreto se mantuviera bombeable y fácil de colocar. El cemento de escoria también contribuyó a proporcionar la resistencia a los sulfatos necesaria para las condiciones locales del suelo.

Si bien el diseño requería 31 MPa (4,500 psi), la mezcla rica en cemento de escoria proporcionó un promedio de 41 MPa (5,900 psi) durante 7 días y alcanzó más de 56 MPa (8,100 psi) a los 28 días. Al utilizar cemento de escoria para lograr un aumento de resistencia tanto inicial como a largo plazo, se aceleró el cronograma de construcción, garantizando al mismo tiempo que las turbinas eólicas se instalarán sobre cimientos duraderos y sostenibles.

Créditos del proyecto: Propietario, Run Rock Recreation Park; Contratista, White Construction Inc.; Ingeniero, Barr Engineering; Concreto, Grannas Brothers; y Cemento de escoria, Heidelberg Materials.

Vertedor de demasías de la Presa de Sanford

Ubicado en Sanford, Michigan, EE. UU., el Vertedor de demasías de la Presa de Sanford es un gran proyecto de renovación que utilizó concreto compactado con rodillo (CCR) para cumplir con un exigente cronograma de construcción. La estructura, de 370 m (1,200 pies) de longitud, se construyó con una serie de escalones de hasta 7 m (24 pies) de altura, lo que requirió la colocación de aproximadamente 14,000 m³ (18,000 yd³) de concreto en un plazo de 6 semanas.

Con un contenido total de materiales cementantes de 160 kg/m³ (350 lb/yd³), el diseño empleó un 60% de sustitución de cemento por escoria. Esta alta relación de escoria fue una necesidad mecánica para esta aplicación de concreto masivo, ya que redujo eficazmente el calor de hidratación para mantener las diferencias de temperatura entre el núcleo y la superficie dentro de las estrictas especificaciones del proyecto.

La inclusión de cemento de escoria también garantizó que la mezcla cumpliera con el tiempo de fraguado inicial requerido de 24 horas, lo que permitió la velocidad y el proceso de colocación propios del concreto compactado con rodillo (CCR). El sistema integrado de cemento de escoria también proporcionó la resistencia suficiente para garantizar un desagüe duradero y resistente.

Al combinar la eficiencia del CCR con el control térmico del cemento de escoria, el proyecto de la presa de Sanford se completó a tiempo y con altos estándares de ingeniería.

Créditos del proyecto: Propietario, Four Lakes Association; Contratista de concreto, Fisher Contracting Company; Ingeniero, GEI Consultants, y Cemento de escoria, St Marys Cement.



Vertedor de la presa Sanford

Proyecto de Reemplazo del Puente del Puerto de la US 181

Ubicado en Corpus Christi, Texas, EE. UU., el Proyecto de Reemplazo del Puente del Puerto de la US 181 es una obra de infraestructura costera con un presupuesto de 1,300 millones de dólares. Este proyecto está diseñado para ofrecer la máxima resistencia, concebido para soportar el riguroso entorno marino de la Costa del Golfo, incluyendo la exposición constante a sulfatos y cloruros, así como ciclos de humectación y secado.

Para cumplir con estas exigencias extremas, el equipo utilizó más de 32,000 m³ (42,000 yd³) de concreto de alto rendimiento. El cemento de escoria fue un elemento estratégico esencial para esta construcción, integrado en porcentajes de reemplazo de entre el 35 % y el 50 % para pavimentos, elementos estructurales y cimentaciones de los enormes pilones.

Además de reducir el carbono incorporado en las mezclas hasta en un 40 %, el uso de cemento de escoria fue fundamental para gestionar el intenso calor generado durante el curado de los enormes pilones. El cemento de escoria proporcionó temperaturas de hidratación más bajas y prolongó el tiempo de trabajo, mejorando significativamente la bombeabilidad y el acabado. El desarrollo de la resistencia se monitoreó mediante sensores integrados, que verificaron que el concreto cumpliera con los requisitos de resistencia de hasta 48 MPa (7,000 psi).

El cemento de escoria también redujo la permeabilidad del concreto y se proyecta que extenderá la vida útil del puente entre 30 y 50 años; la vida útil total de esta estructura se estima en 170 años.

Créditos del proyecto: Créditos del proyecto: Propietario, Departamento de Transporte de Texas; Contratista, Flatiron/Dragados LLC; Concreto, Texas Concrete Co.; y Cemento de escoria, Texas Lehigh Cement Company y Skyway Cement Company.

Premio: Concreto con Bajas Emisiones de Carbono

Mezcla diseñada con IA por Meta para el Centro de Datos de Rosemount

Ubicado en Rosemount, Minnesota, EE. UU., el Centro de Datos Meta Rosemount combina inteligencia digital de alta tecnología con una construcción industrial robusta. Para cumplir con los objetivos de sostenibilidad de Meta, se utilizó un marco de optimización basado en inteligencia artificial (IA), desarrollado en colaboración con la Universidad de Illinois, para evaluar cientos de mezclas de concreto en tiempo real.

Se seleccionó una mezcla de alto rendimiento con un alto nivel de sustitución de cemento de escoria, lo que resultó en una reducción del 40% en las emisiones de carbono incorporadas en comparación con los estándares regionales. Si bien el proyecto requería 10 MPa (1,500 psi) en 3 días, esta mezcla alcanzó más de 14 MPa (2,000 psi) en 24 horas y casi 48 MPa (7,000 psi) a los 28 días.

El cemento de escoria contribuyó a lograr un asentamiento uniforme de 150 mm (6 pulgadas) y mejoró la cohesión, lo cual fue fundamental para las colocaciones continuas y de alta precisión requeridas para las secciones de losa sobre el terreno del centro de datos.

Créditos del proyecto: Propietario, Meta; Contratista, Mortenson Construction; Arquitecto, Meta; Ingeniero, PASE; Grupo de Investigación, Universidad de Illinois; y Concreto y cemento de escoria, Amrizey Amrize, concreto y cemento de escoria.



Pavimento Exterior de la Terminal de Carga Old Dominion

Ubicada en Tonawanda, Nueva York, EE. UU., al norte de Buffalo, Nueva York, y al sur de las Cataratas del Niágara, la terminal de carga Old Dominion presentó un diseño de pavimento innovador para crear un centro de andén duradero y eficiente. Este proyecto requirió casi 6,700 m³ (8,800 yd³) de concreto para construir una losa exterior de 200 mm (8 pulgadas) capaz de soportar las exigencias constantes y pesadas de una operación de carga de gran envergadura.

Para cumplir con estos requisitos, se utilizó una mezcla de concreto de alto rendimiento de 31 MPa (4,500 psi) con un 15% de cemento de escoria. Al utilizar un cemento compuesto que combinaba cemento Portland-caliza con cemento de escoria molida, el proyecto redujo las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) manteniendo las especificaciones estructurales originales.

Durante un período de 44 semanas, el concreto se colocó con una bomba y reglas láser, y se utilizaron máquinas de curado para garantizar un acabado nivelado y de alta calidad en toda la extensa superficie pavimentada. El uso de cemento de escoria contribuyó a lograr la durabilidad y resistencia necesarias para una superficie industrial de larga duración.

Créditos del proyecto: Propietario, Old Dominion Freight Line; contratista general, Montante Group; Contratista de concreto, Brawdy Construction, Inc.; Mollenkopf Arquitecto, Design Group, LLC; C&S Companies, ingeniero; Concreto, VCNA United Materials, LLC; y Cemento de escoria, St Marys Cemento.

Planta de Producción de Concreto Pasco Ready Mix en Spring Hill

Ubicada en Spring Hill, Florida, EE. UU., la planta de producción de concreto Pasco Ready Mix, Spring Hill exhibe un diseño industrial moderno y respetuoso con el medio ambiente. Desarrollada en un terreno de 2 hectáreas (5 acres), el proyecto prioriza la sostenibilidad mediante sistemas de drenaje natural y la preservación del paisaje existente, a la vez que muestra los productos que la planta fue diseñada para producir.

La planta se construyó con una mezcla 50/50 de cemento Tipo IL y cemento de escoria. Además de sus beneficios ambientales, la mezcla con cemento de escoria se seleccionó por su excelente bombeabilidad y trabajabilidad, lo que permite mantener una consistencia óptima para una colocación eficiente.

Las exigencias estructurales de este sitio fueron enormes. Las bases debían soportar silos de 225 toneladas y resistir el desgaste diario de vehículos y equipos pesados. Gracias al rápido aumento de resistencia que proporciona el cemento de escoria, el equipo pudo instalarse sobre las bases mucho antes de lo previsto. Una vez completada la base, la planta se posicionó pasando cuatro camiones con remolque directamente sobre la losa, eliminando la necesidad de costosos servicios de grúa.

Las mezclas de cemento de escoria en las bases también crean una superficie de trabajo brillante, muy visible y segura.

Créditos del proyecto: Propietario y proveedor de concreto, Pasco Ready Mix, LLC; Contratista, Green Construction & Development, Inc.; Arquitecto, Andreansky & Associates, Inc.; Ingeniero, Environmental Engineering Consultants, Inc.; y Cemento de escoria, Quikrete Cement.

Principio

Ubicada en Andover, Massachusetts, EE. UU., la planta Principio sirve como centro neurálgico de la Unidad de Negocios de Gillette, permitiendo un uso más sostenible, ágil y eficiente de los recursos.

Para cumplir con los altos estándares de rendimiento y medioambientales del proyecto, el cemento de escoria fue un componente fundamental del diseño de la mezcla. El uso de cemento de escoria en niveles de sustitución entre el 35% y el 50% redujo significativamente el potencial de calentamiento global del concreto.

La mezcla enriquecida con cemento de escoria se diseñó para exigencias logísticas extremas, incluyendo la capacidad de ser bombeada a distancias de hasta 150 m (500 pies). Además, proporcionó los tiempos de fraguado precisos necesarios para lograr un acabado ultraplano con exigentes requisitos de F-min, garantizando que el suelo cumpliera con los estándares de un entorno de fabricación de clase mundial.

Además de alcanzar una resistencia a la compresión de 28 MPa (4,000 psi) y una alta durabilidad, el cemento de escoria también proporcionó una estética limpia y brillante que se ajustaba a la visión de los arquitectos e ingenieros.

Equipo del proyecto: Propietario, Procter & Gamble; S&F Contratista, Concrete Contractors Corp.; Ingeniero, Skanska USA Inc.; Fabricante de concreto, J.G. Maclellan Concrete Co. Inc.; y Cemento de escoria, Amrize.

Título original en inglés:
2025 Slag Cement in Sustainable Concrete Awards

Fourteen projects honored for exceptional use of slag cement in concrete construction

La traducción de este artículo correspondió al Capítulo República Dominicana



Traducción:
Ing. Sarah Miranda



Revisión Técnica:
Ing. Piero Caputo

04

No todo el concreto es igual

Porqué las mediciones en sitio y las mentalidades importan en la búsqueda de la durabilidad y sostenibilidad.

por Kari Yuers

Durante la mayor parte del siglo pasado, la colocación del concreto ha operado sobre una base estable de química predecible y prácticas de campo familiares. Las cuadrillas aprendían de la experiencia: observar el revenimiento, evaluar el fraguado por sensación, terminar cuando la superficie “se ve lista”.

Arraigado a través de generaciones, este conocimiento tácito sirvió bien a la industria cuando los diseños de mezcla eran comparativamente simples. Pero mientras que las mejores prácticas para colocar concreto han permanecido iguales, los materiales usados en el concreto han cambiado drásticamente.

El cemento Tipo IL o cemento portland con caliza (PLC) se ha convertido en una piedra angular de la estrategia de descarbonización en la industria del concreto. El cemento Tipo IL reemplaza algunos ingredientes de alto carbono con caliza de bajo carbono. La formulación general se muele más finamente que el cemento portland ordinario (CPO).

Riesgos de una instalación inadecuada

Desde un punto de vista de laboratorio y especificación, el cemento Tipo IL se desempeña como está previsto. En la obra, sin embargo, la finura del material cambia cómo se comporta el cemento en el concreto fresco.

El concreto de hoy, incluyendo las soluciones emergentes recomendadas por el ACI, puede ser difícil de evaluar a simple vista o con el pulgar, que es frecuentemente el caso en muchos sitios de trabajo. La mezcla reacciona con el agua durante una cantidad de tiempo específica, pero siempre cambiante, dependiendo del entorno.



Fig 1: La nebulización temprana es necesaria para mantener la apariencia reflectiva del concreto húmedo. Con la naturaleza cambiante del cemento Tipo IL, los contratistas deben considerar los factores ambientales y mantener las superficies del concreto continuamente húmedas, evitando que el agua se acumule (foto cortesía de Ben Wiese).

El impulso hacia el desempeño sostenible, contenido reducido de cemento y trabajabilidad mejorada, ha producido mezclas que se comportan menos como el concreto tradicional y más como sistemas químicos dinámicos.

Los equipos de campo que asumen una tasa de sangrado (exudación) estándar o una ventana de acabado predecible corren el riesgo de juzgar incorrectamente los tiempos de fraguado por muchos minutos o incluso horas. Ese margen de error puede ser la diferencia entre una superficie impecable y una losa comprometida.

“El cambio ha ocurrido tan lentamente durante los últimos 100 años, y ahora está ocurriendo al ritmo más rápido”, dijo Ben Wiese, Presidente de New Green Umbrella, Inc. “Se ha infiltrado en muchos contratistas de concreto, y las viejas formas de hacer las cosas simplemente ya no funcionan”.

La brecha entre la formulación de laboratorio y la ejecución en obra se está ampliando, no porque las cuadrillas carezcan de habilidad, sino porque los materiales mismos han evolucionado más rápido que muchos protocolos de campo. El resultado es un riesgo operativo creciente: mezclas de alto desempeño colocadas utilizando prácticas anticuadas pueden conducir a acabados comprometidos, incremento en el agrietamiento, durabilidad reducida y vida útil acortada. El acabado es donde el comportamiento del concreto moderno es más visible. La aplicación de allanado, texturizado, nebulización o procesos de endurecimiento deben alinearse precisamente con la evolución química de la losa (Fig. 1).

El acabado temprano es especialmente problemático en mezclas con agua de sangrado reducida, donde la pérdida por evaporación supera las señales visibles de la superficie.

Terminar demasiado tarde puede ser igualmente dañino. Cuando la evaporación excede la retención de humedad impulsada por la hidratación — especialmente en condiciones de viento o baja humedad— la superficie puede:

- Perder humedad crítica necesaria para las reacciones químicas de acabado;
- Comenzar a formar microfisuras por contracción;
- Volverse difícil o imposible de consolidar efectivamente; y
- Requerir un acabado agresivo que puede dañar la capa superficial.

En mezclas modernas que contienen cemento Tipo IL junto con materiales cementantes suplementarios (SCM), estos efectos pueden amplificarse.

Cómo mitigarlo en la obra

Las mezclas de concreto actuales deben ser monitoreadas con precisión al llegar al sitio de trabajo. Las pruebas y mediciones necesitan realizarse temprano y frecuentemente en el proceso, para que las cuadrillas puedan cronometrar todo con precisión basado en las reacciones químicas dentro del material.

Para evitar problemas con la hidratación, trabajabilidad, tiempo de fraguado, contracción y acabado superficial, los contratistas de concreto necesitan información en tiempo real sobre el material mientras lo están colocando. Esto, combinado con condiciones ambientales, como la temperatura, humedad y viento, les permitirá ajustar su cronograma de acabado con precisión.

“No se le permite comenzar el acabado hasta que haya alcanzado el fraguado inicial”, dijo Craig Appelman, Ingeniero de Materiales, Appelman Materials Engineering Ltd.

Appelman recomienda realizar colocaciones de prueba en sitio utilizando placas de 20 × 30 pulgadas (508 × 762 mm) y tomar mediciones regulares para determinar la velocidad a la cual el agua está siendo absorbida dentro de la mezcla.

“No simplemente piense que cualquier mezcla que haya usado antes se comportará de la misma manera que una nueva mezcla,” dijo Appelman.

También es importante hacer notar que las instrucciones pueden no ser suficientemente precisas en la obra. Están basadas en condiciones de laboratorio, que son ambientes controlados y, a menudo, muy diferentes de los entornos donde se coloca el concreto.

Incluso pequeñas desviaciones en la velocidad del viento o la humedad ambiental pueden alterar materialmente la cinética de hidratación, las tasas de evaporación y la preparación superficial para el acabado. Factores clave a considerar en obra:

- El viento acelera el secado superficial, incrementando la probabilidad de agrietamiento por contracción plástica, particularmente en mezclas con capacidad de exudación reducida o bajo contenido de agua;
- La humedad afecta tanto la tasa de evaporación como el comportamiento del agua de exudación. Ambientes de alta humedad pueden expandir las ventanas de acabado, mientras que condiciones de baja humedad pueden acortarlas dramáticamente; y
- La temperatura impacta el fraguado del cemento. En condiciones calientes, las cuadrillas a menudo experimentan pérdida rápida de revenimiento, ventanas de acabado acortadas y un mayor riesgo de contracción plástica, ya que el cemento reacciona más rápido y consume el agua disponible más rápidamente. En clima frío, el mismo sistema fino puede parecer lento.

Esta variabilidad requiere múltiples mediciones en tiempo real para evaluar cómo se está comportando el concreto, de modo que las cuadrillas puedan planificar sus programas de acabado en armonía con los materiales y condiciones (Fig.2).

Cambio de mentalidades para mantenerse al día con la innovación

Los contratistas proactivos y los equipos de control de calidad utilizan instrumentos y procesos que proporcionan datos ambientales y del material en tiempo real, incluyendo:

- Termopares portátiles para concreto;
- Un penetrómetro de bolsillo para estimar el tiempo de fraguado inicial;
- Sensores de humedad relativa y viento;
- Medidores de madurez para predicción de resistencia a edad temprana;
- Calculadoras de tasa de evaporación vinculadas dinámicamente al diseño de mezcla; y
- Medidores de humedad superficial para evaluación de compatibilidad de acabado.



Fig 2: Basándose de mediciones en tiempo real, los contratistas en concreto deben ajustar sus tiempos de fraguado. Aquí, un trabajador atrapa el agua de sangrado en la superficie del concreto bajo una membrana uniforme de un retardante de evaporación de aplicación líquida. Es fundamental aplicar el retardante de evaporación después del enrasado y entre las diferentes operaciones de allanado (foto cortesía de Ben Wiese).

Los desafíos en torno al concreto moderno no son meramente técnicos, también son culturales. Las cuadrillas deben entender no solo el “cómo” de la colocación del concreto, sino el “por qué” detrás del comportamiento de las mezclas modernas.

Esto requiere:

- Protocolos de capacitación actualizados alineados con tecnologías modernas de aditivos;
- Mayor colaboración entre ingenieros de materiales y supervisores de campo;
- Documentación en obra que rastree condiciones ambientales y respuestas de la mezcla; y
- Un cambio hacia ajustes proactivos en lugar de correcciones reactivas.

El objetivo es recalibrar las habilidades tradicionales a las demandas de los materiales de alto desempeño actuales. Los resultados exitosos

ahora dependen de un enfoque disciplinado hacia la medición en sitio, monitoreo vigilante de variables ambientales y toma de decisiones informada sobre el momento del acabado.

El uso de aditivos químicos también puede desempeñar un papel importante. Nuestra industria está enfrentando los desafíos y avanzando rápidamente para innovar, optimizar y proporcionar orientación para asegurar que apoyemos las propiedades necesarias para combatir estos factores ambientales y alcanzar los objetivos de desempeño.

Los contratistas que actualicen regularmente los protocolos de campo y adopten flujos de trabajo basados en datos e informados por la química entregarán mejor desempeño, superficies más durables, menos retrabajos y protección contra responsabilidad en caso de falla del concreto o incluso tragedia.

Aquellos que continúen confiando únicamente en la intuición encontrarán que el concreto moderno, a pesar de todos sus beneficios de ingeniería, puede presentar un desempeño deficiente cuando se malinterpreta.

Seleccionado por el interés del lector por los editores.

NUEVO

EUCOFLOOR RB

EL BLINDAJE PARA JUNTAS INDUSTRIALES

Compañía del grupo

MÁXIMA VELOCIDAD OPERATIVA

Libera al tráfico moderado en solo 3 horas.

INSTALACIÓN EFICIENTE

El producto no requiere imprimación.

RESISTENCIA DE ALTO DESEMPEÑO

Resistencia a la compresión mayor a 85 MPa a los 7 días.

“ LAS JUNTAS YA NO SON UN DETALLE, SON LA DEFENSA DEL PISO. ”

WWW.
EUCOMEX.
COM.MX

SIGUENOS EN REDES

EUCLID CHEMICAL
EUCOMEX
SOMOS UNA COMPAÑÍA RPM

Kari Yuers, FCI, es la Presidenta y Directora Ejecutiva (CEO) de Kryton International Inc., una líder global en aditivos especializados para concreto para durabilidad, impermeabilización y resistencia a la abrasión. Con más de 30 años de liderazgo en la industria, ella transformó a Kryton en una red internacional de manufactura y distribución que abarca 50 países. Ella es la inmediata expresidenta del Comité 212 del ACI, Aditivos Químicos, y presidenta del documento para ACI E4-22, "Aditivos Químicos para Concreto," en el Comité E701 del ACI, Materiales para la Construcción de Concreto. Como miembro Fellow del ACI, ella recibió el primer Premio Internacional de Colaboración ACI Michel Bakhoun 2025 por su liderazgo, orientación y apoyo a las iniciativas internacionales del ACI y por colaborar globalmente en actividades de transferencia de tecnología dirigidas a mejorar la durabilidad y sostenibilidad del concreto. Yuers es Emprendedora del Año de EY y posee una designación Global ESG 2022.



Título original en inglés:
Not All Concrete is the Same

Why on-site measurements and mindsets matter in the pursuit of durability and sustainability

La traducción de este artículo correspondió al Capítulo México Noroeste



Traducción:
**Est. Emiliano
Martínez Villalobos**



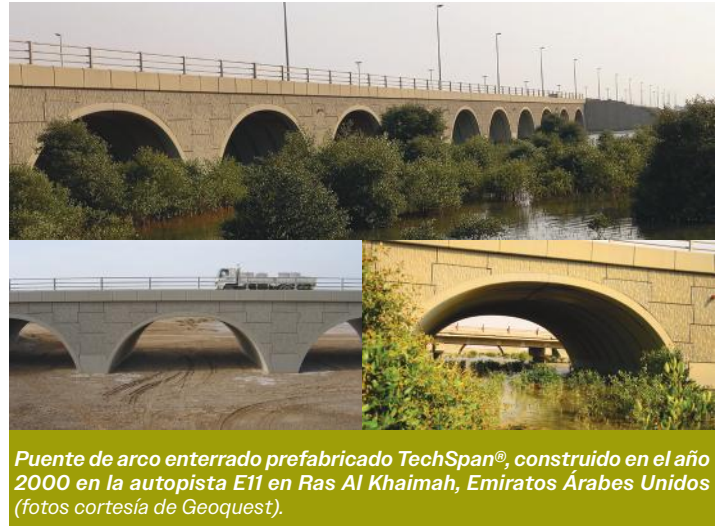
Revisión Técnica:
**Ing. Oscar Ramírez
Arvizu**

El Puente de Arco Enterrado de Concreto Prefabricado Ofrece Alta Durabilidad

Por Aram Kalousdian

Durante un seminario virtual de la Junta de Investigación del Transporte (TRB), Roberto Piacentino, Gerente del Subsegmento de Prefabricados de Geoquest, presentó el sistema TechSpan®. Geoquest diseña y suministra materiales para muros de contención, arcos, barreras acústicas y estructuras relacionadas, incluido el sistema TechSpan. El TechSpan es un conjunto formado por un arco prefabricado de tres articulaciones que se utiliza para construir puentes enterrados con claros de 3 a 30 m (10 a 98 pies) y alturas de arco que varían entre el 30 % y el 70 % del claro. Las unidades prefabricadas que forman los arcos tienen un espesor de 203 a 508 mm (8 a 20 pulgadas).

Los perfiles de los puentes son curvas funiculares y la carga se determina mediante los modelos de suelo de Duncan-Chang o Mohr-Coulomb. El modelo Duncan-Chang es un procedimiento práctico para representar el comportamiento esfuerzo-deformación de los suelos, que es no lineal, dependiente del estado de esfuerzos e inelástico¹. El modelo de Mohr-Coulomb consiste en un comportamiento elástico lineal perfectamente plástico. Los puentes de arco enterrados, se benefician de la protección que ofrece la tierra, lo que reduce los efectos de los cambios de temperatura y las cargas concentradas. Además, el diseño de arco permite ahorrar concreto y acero; no requiere estribos, juntas de dilatación ni apoyos y requiere de un mantenimiento mínimo. Las aplicaciones de este tipo de estructuras abarcan una amplia gama de sectores, incluyendo túneles a cielo abierto para transporte, minería y aplicaciones industriales.



Puente de arco enterrado prefabricado TechSpan®, construido en el año 2000 en la autopista E11 en Ras Al Khaimah, Emiratos Árabes Unidos (fotos cortesía de Geoquest).

Un caso práctico

Piacentino presentó el análisis de un puente construido en el año 2000 en la autopista E11 en Ras Al Khaimah, en los Emiratos Árabes Unidos (EAU). Esta autopista es la principal arteria que conecta seis de los siete emiratos, y el proyecto del puente formó parte de la iniciativa del Ministerio de Obras Públicas para modernizar esta carretera crucial. El puente se construyó en la desembocadura al mar de un wadi, formando un punto bajo natural con un entorno de mareas muy dinámico.

Según un informe de Geoquest, “Este entorno singular, junto con temperaturas superiores a los 50 °C (122 °F), requirió un diseño resistente a las duras condiciones marinas, al calor extremo del verano y a la intensa carga de tráfico”. Dadas las duras condiciones ambientales, el sistema de arco enterrado prefabricado TechSpan resultó idóneo para esta ubicación.

Para garantizar la durabilidad y el rendimiento a largo plazo de la estructura, se priorizaron varios elementos clave de diseño y construcción. La mezcla de concreto se formuló específicamente para aplicaciones marinas, mejorando su impermeabilidad y reduciendo el riesgo de penetración de sustancias químicas que pudieran afectar al acero de refuerzo. El recubrimiento de concreto se incrementó a 76 mm (3 pulg.) en lugar de los 50 mm (2 pulg.) estándar, proporcionando protección adicional al acero de refuerzo; y la forma del arco se optimizó para minimizar los esfuerzos de tensión, especialmente durante la etapa final de carga muerta. Se siguieron estrictas medidas de control de calidad durante el proceso de producción de los elementos prefabricados.

Tras 24 años de servicio, el puente de arco enterrado prefabricado TechSpan fue inspeccionado para evaluar su estado bajo las duras condiciones ambientales. No se observaron grietas, desprendimientos, ni corrosión en el arco ni en los elementos de la pared de tierra mecánicamente estabilizada (MSE) del puente. El informe señaló daños menores en el borde de uno de los elementos del arco, así como grietas o desplazamientos en los selladores de juntas entre varios segmentos. El informe recomendó las siguientes labores de mantenimiento:

- Limpieza con agua a presión para eliminar sedimentos biológicos como algas y caracoles marinos;
- Reparación estética de los daños menores en el borde del elemento final del arco; y
- Retirada y sustitución de los selladores de juntas deteriorados.

Referencias

1. Duncan, J., y Chang, C.Y., "Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils," ("Análisis no lineal de esfuerzos y deformación en suelos"), Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 96, N.º 5, Sept. 1970, Páginas. 1629-1653.

Aram Kalousdian cuenta con varios años de experiencia en periodismo de la construcción. Fue editor y propietario de la revista Michigan Builder and Infrastructure y editor de la revista Michigan Contractor & Builder.

Título original en inglés:

TechSpotlight

Precast Concrete Buried
Bridge Provides Durability

**La traducción de este artículo
correspondió al Capítulo de Ecuador
Centro y Sur**



*Traducción y
Revisión Técnica:*

**Ing. Santiago Vélez
Guayasamín.
MSC DIC.**

¡Nos vemos en este nuevo espacio! ¡Nos vemos en este nuevo espacio!

BIENVENIDO A LA AUTOPISTA DE LA INFORMACIÓN DE CONCRETO EN www.acilatinoamerica.com

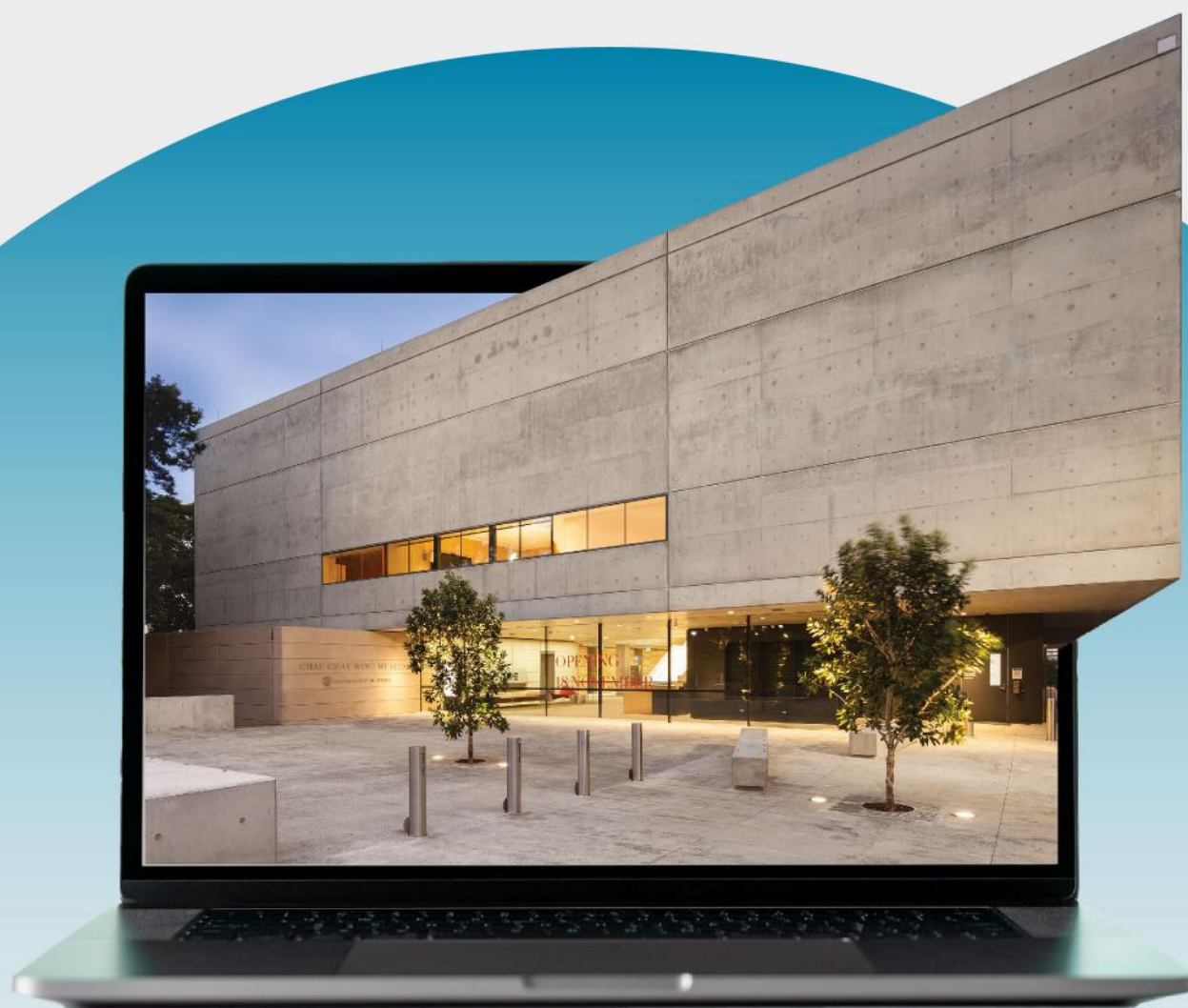
AQUÍ ENCUENTRAS...

PUBLICACIONES PASADAS

DIRECTORIO CAPÍTULOS ACI

NOTICIAS

EVENTOS



¡Nos vemos en este nuevo espacio! ¡Nos vemos en este nuevo espacio! ¡Nos vemos en este nuevo espacio!

Reconsiderando la definición de las propiedades de endurecimiento por deformación unitaria a tensión en los materiales del UHPC para usos estructurales

Por Manuel Bermudez y Chung-Chan Hung

Las propiedades de endurecimiento por deformación unitaria a tensión son características fundamentales del concreto de ultra-alto comportamiento (UHPC, por sus siglas en inglés). En los concretos reforzados con fibras (FRC, por sus siglas en inglés), el comportamiento de endurecimiento por deformación unitaria viene definido por una región elástico-plástica de pseudo-tensión en la curva de esfuerzo-deformación unitaria a tensión de un espécimen. Cuando un espécimen muestra este comportamiento, aparecen grietas estrechas y muy próximas entre sí (esta zona de la curva esfuerzo-deformación a menudo se denomina “zona de agrietamiento múltiple”), seguidas de la ampliación de una grieta única que determina la falla a tensión (un fenómeno mecánico denominado “localización de grietas”).¹ Existen dos enfoques principales para definir el endurecimiento por deformación unitaria en el UHPC. Según un enfoque ampliamente adoptado en la comunidad científica, se considera que un material presenta endurecimiento por deformación si cualquier esfuerzo posterior a la aparición de grietas supera la resistencia al agrietamiento. En un enfoque adoptado en algunas normas internacionales^{2,3}, el endurecimiento por deformación se define mediante un índice de endurecimiento mínimo, es decir, la relación entre la tensión posterior a la grieta y la resistencia al agrietamiento. Sin embargo, los documentos existentes suelen carecer de un método objetivo para determinar la resistencia al agrietamiento. Una base de datos sobre cortante publicada recientemente⁴ ilustra este problema, ya que revela que solo alrededor del 30 % de los estudios sobre vigas de UHPC informan de las propiedades de tensión, y que muchos de esos estudios solo incluyen la resistencia máxima a la tensión. Aunque la norma AASHTO T 397⁵ ofrece una base racional para identificar parámetros clave a partir de ensayos

de tensión uniaxial, su aplicación sigue limitándose en gran medida a las infraestructuras de puentes de UHPC, y aún no se ha convertido en una norma de uso generalizado en aplicaciones más amplias del UHPC. Otros enfoques, como los adoptados por la Asociación Francesa de Normalización en las normas NF P 18-470⁶ y NF P 18-710⁷, y por la Federación Internacional del Concreto Estructural (*fib*) en el Código Modelo de la *fib* 2020⁸, se basan en la resistencia a la tensión residual de secciones transversales reforzadas con fibras, obtenida mediante análisis inverso de especímenes con muescas sometidos a flexión en tres puntos.

El presente artículo pretende tender un puente entre los conceptos clásicos del FRC y la práctica con UHPC para fomentar la presentación coherente de datos sobre la resistencia al agrietamiento y la resistencia a la localización de grietas, con el fin de clasificar el comportamiento de endurecimiento por deformación a la tensión. Los autores se centran exclusivamente en la respuesta a la tensión obtenida mediante carga uniaxial; se excluyen los enfoques basados en la resistencia a la tensión residual a partir de la flexión.

Caracterización del comportamiento a tensión uniaxial

Naaman y Reinhardt⁹ y Naaman¹⁰⁻¹³ han clasificado los FRC en dos tipos, según su comportamiento bajo carga de tensión uniaxial: los que se endurecen con la deformación y los que se ablandan con la deformación. Como se muestra en la Fig. 1, el comportamiento se describe mediante una curva de esfuerzo de tensión frente a la deformación combinada y la abertura de la grieta, que se divide en dos partes delimitadas por el punto de localización de la grieta. En la fase inicial de carga, se considera generalmente que la presencia de fibras en el FRC tiene una influencia insignificante en las respuestas a la carga antes de la aparición de la primera grieta, independientemente de si el FRC presenta un comportamiento de endurecimiento o de ablandamiento por deformación. Esto se debe a que el refuerzo de fibra sólo entra en acción una vez que se forman microgrietas en la matriz del concreto, momento en el que las fibras ejercen una fuerza de arrancamiento, también conocida como la respuesta de puenteo de la fibra.

Como se muestra en la Fig. 1, tanto el comportamiento de la deformación por tensión como el de la abertura de la grieta se definen en el gráfico clásico de los datos del ensayo de tensión. Antes de alcanzar el punto de localización de la grieta, las mediciones de las deformaciones elásticas e inelásticas del espécimen se caracterizan como deformación unitaria. Una vez alcanzado el punto de localización de la grieta, las deformaciones del espécimen representan el ancho específico de una grieta que se ha localizado y ensanchado. La región en la gráfica del ensayo a tensión muestra una pendiente descendente, conocida comúnmente como rama de ablandamiento. Este comportamiento se observa en los materiales del FRC tanto endurecidos como reblandecidos por deformación.

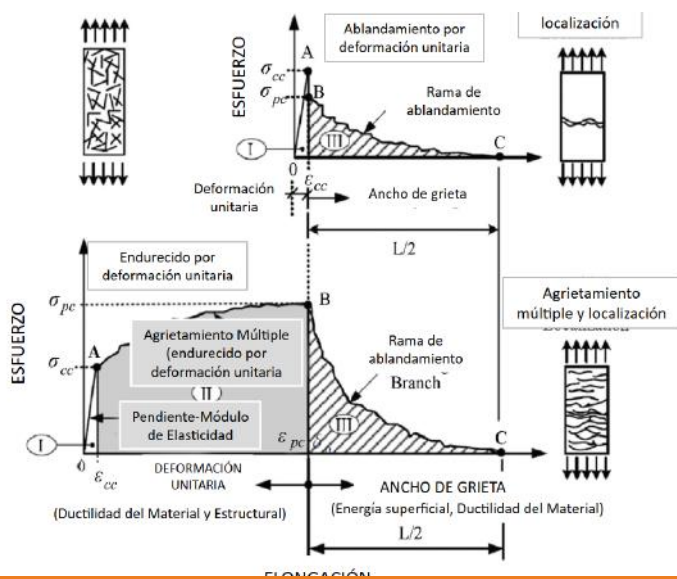


Fig. 1: Resistencia a la tensión típica y curva de deformación/abertura de grietas combinada: (a) compuesto del FRC convencional con deformación unitaria-ablandamiento; y (b) compuesto del FRC o HPFRCC sin deformación unitaria-endurecimiento. (adaptado de Naaman²)

El aquí presentado se centra en la relación esfuerzo-deformación unitaria a tensión hasta el inicio de la rama de ablandamiento, ya que el comportamiento posterior al ablandamiento asociado a la apertura de grietas no se ha considerado de forma explícita en los estados límites de servicio o de resistencia última de las normas de diseño actuales para aplicaciones estructurales del UHPC. Aunque el comportamiento tras el ablandamiento pueda ser relevante para determinadas consideraciones sísmicas, dichos efectos quedan fuera del alcance del presente estudio.

Independientemente de si los materiales del UHPC presentan un comportamiento de endurecimiento o de ablandamiento por deformación, la pendiente de

la respuesta esfuerzo-deformación unitaria tras la aparición de la primera grieta, está influenciada por tres parámetros clave:

- La fracción del volumen de fibra V_f , es decir, el volumen de las fibras relativo a la mezcla de UHPC;
- La relación de aspecto de la fibra L_f/D_f , donde L_f y D_f son la longitud y el diámetro de la fibra, respectivamente; y
- La resistencia de unión en la interfase fibra-matriz τ . Tal y como demostró Naaman^{12,13}, estos parámetros determinan en conjunto la eficacia del mecanismo de puenteo de las fibras, que resulta fundamental para lograr el endurecimiento por deformación (Fig. 2). En particular, la elevada resistencia tras el agrietamiento está relacionada con una fuerte unión entre el refuerzo de fibra y la matriz del UHPC de alta densidad¹⁴.

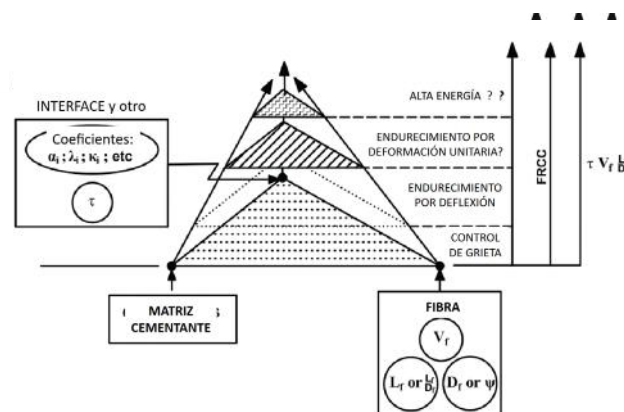


Fig. 2: La relación espacial que ilustra la influencia de las variables independientes, los compuestos, las restricciones y las soluciones en el diseño de FRC (adaptado de Naaman¹³)

El parámetro τ está directamente relacionado con la resistencia al arrancamiento de las fibras y refleja la eficacia con la que el denso empaquetamiento de partículas de la matriz sujeta a las fibras. Esta propiedad puede mejorarse mediante técnicas de anclaje mecánico, como el desbaste de la superficie de la fibra o la modificación de su geometría para aumentar las fuerzas de fricción. Este efecto se consigue mediante el análisis de mezclas compuestas por fibras de diversas formas. Por ejemplo, Wille et al.¹⁵ reportaron valores de τ de 12.7 MPa (1,842.0 psi), 17.6 MPa (2,552.7 psi) y 20.1 MPa (2,915.3 psi) para fibras rectas ($L_f = 13$ mm [0.51 pulg.] y $D_f = 0.20$ mm [0.008 pulg.]), en gancho ($L_f = 30$ mm [1.18 pulg.] y $D_f = 0.38$ mm [0.015 pulg.]) y retorcidas ($L_f = 18$ mm [0.71 pulg.]

y $D_f = 0.30$ mm [0.012 pulg.]), respectivamente. La densificación microestructural local en la zona de transición de la interfase de la matriz también puede contribuir a una interacción eficaz entre la fibra y la matriz. Wille y Naaman¹⁶ señalaron que la optimización de la composición de la matriz del UHPC y la distribución granulométrica casi duplicó la resistencia de adherencia equivalente de las fibras de acero rectas, hasta alcanzar aproximadamente 20 MPa (2.9 ksi). Además, las dimensiones y el volumen de las fibras desempeñan un papel fundamental en el mecanismo de puenteo de las fibras. Las fibras más largas^{17,18} proporcionan una mayor longitud de incrustación en la matriz, lo que mejora la resistencia al arrancamiento, mientras que el diámetro de las fibras influye en el área de la interfase fibra-matriz, lo que afecta directamente a las fuerzas de fricción. Sin embargo, es necesario equilibrar la longitud y el diámetro de las fibras para maximizar la resistencia al arrancamiento y mantener al mismo tiempo una distribución de las fibras aproximadamente isotrópica en tres dimensiones.

Las contribuciones combinadas de las fibras individuales se amplifican a medida que aumenta la V_f , lo que da lugar a una mayor resistencia tras el agrietamiento y a una mayor capacidad de deformación unitaria a tensión, siempre que se mantenga una dispersión adecuada de las fibras y una distribución tridimensional aproximadamente isotrópica de las mismas. A medida que aumenta el contenido de fibra, las interacciones entre las fibras pueden afectar negativamente el flujo en estado fresco, lo que resulta en una orientación preferencial o agrupamiento que puede reducir la eficiencia posterior al agrietamiento. Por consiguiente, la fracción de volumen de fibra debe diseñarse cuidadosamente para garantizar una distribución tridimensional eficiente de la fibra, y la eficiencia de la fibra debe evaluarse mediante maquetas representativas para verificar que tanto la orientación como la dispersión contribuyen a maximizar la resistencia al arrancamiento. Los incrementos irregulares o escalonados en la resistencia a la tensión observados en la región de endurecimiento por deformación con agrietamiento múltiple (Fig. 1(b)) se deben al puenteo secuencial de nuevas microgrietas por parte de las fibras, lo que refleja la activación del mecanismo de detención de grietas a medida que las fibras se acoplan a lo largo de las grietas individuales por tensión.

Determinación de los Puntos Clave en la Curva de Esfuerzo-Deformación a Tensión

Las resistencias al agrietamiento y posterior al mismo son fundamentales para determinar si un material del UHPC tiene propiedades de endurecimiento por deformación. La resistencia posterior al agrietamiento suele ser el valor máximo obtenido tras producirse el agrietamiento. Sin embargo, tal y como han demostrado Haber et al.¹⁹ en la Fig. 3, en la zona de agrietamiento múltiple se pueden observar múltiples picos, especialmente si la curva es pseudoplástica, lo que complica la identificación visual de la resistencia posterior al agrietamiento. El ensayo de tensión uniaxial (también conocido como ensayo de tensión directa [DTT]) para el UHPC, tal y como se especifica en la norma AASHTO T 397, define lo que tradicionalmente se ha denominado resistencia tras el agrietamiento en los estudios sobre FRC^{9,12,13}. Esta resistencia corresponde al esfuerzo de ingeniería en el que se produce la localización de la deformación unitaria. Naaman y Shah²⁰ propusieron caracterizar la resistencia tras el agrietamiento para aplicaciones de diseño que implican respuestas pseudoplásticas planas (Fig. 3) utilizando el punto de la rama descendente en el que el esfuerzo se reduce al 95% del pico máximo de la resistencia a la tensión. En consecuencia, Naaman y Shah²⁰ recomendaron indicar la tensión de diseño y la deformación correspondiente al 95% del pico máximo de resistencia a la tensión como una referencia práctica para la respuesta a la tensión predominante en el régimen posterior al agrietamiento.

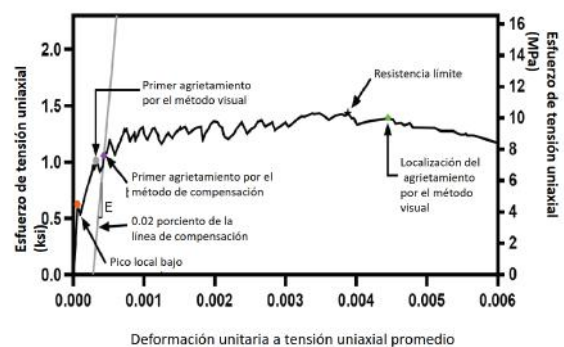


Fig. 3: Curva típica de esfuerzo-deformación unitaria a tensión del UHPC obtenida en un ensayo de tensión uniaxial, en la que se muestran la zona de aparición de las primeras grietas y la zona de localización de las mismas (adaptado de Haber et al.¹⁹).

En la norma AASHTO T 397, la resistencia a la localización de grietas se define como el primer valor de esfuerzo en la curva de esfuerzo-tensión-deformación unitaria a tensión en el que el esfuerzo disminuye de forma continua a medida que aumenta la deformación. Este punto es más fácil de determinar a partir de la curva de esfuerzo-deformación unitaria por tensión y conlleva menos subjetividad que la resistencia tras la aparición de grietas. No obstante, la resistencia a la localización de grietas definida por la norma AASHTO T 397 puede no coincidir siempre con la resistencia máxima tras la aparición de grietas, ya que el esfuerzo puede recuperarse parcialmente sin llegar a alcanzar su punto máximo previo antes de descender de forma constante, tal y como se muestra en la Fig. 3. La resistencia a la localización de grietas de los materiales con endurecimiento por deformación unitaria en la norma AASHTO T 397 no debe ser inferior a la resistencia al agrietamiento efectiva.

En comparación con la resistencia post-agrietamiento, la resistencia al agrietamiento es más difícil de caracterizar y puede resultar más subjetiva que la resistencia a la localización de grietas. La transición de la fase elástica a la de agrietamiento que se observa en la Fig. 3, previa a la zona de agrietamiento múltiple, muestra que se pueden emplear diversos métodos para determinar la resistencia al agrietamiento. Un método consiste en observar visualmente cuándo aparece la primera grieta visible y registrar ese valor de resistencia como la resistencia al agrietamiento. Este método no es adecuado para los materiales del UHPC, ya que presentan múltiples microgrietas y, en un ensayo de tensión uniaxial sobre una muestra prismática, pueden aparecer múltiples grietas en diferentes caras. Además, se incluye la interpretación humana, ya que depende del ancho de la grieta que se pueda detectar a simple vista. Otros métodos visuales, como la correlación de imágenes digitales (DIC, por sus siglas en inglés), podrían ser más precisos; sin embargo, debido a las múltiples caras de la forma prismática utilizada en el ensayo de tensión uniaxial, pueden producirse grietas en caras que las cámaras DIC no pueden captar. Otro método para determinar la resistencia al agrietamiento consiste en identificar la primera no linealidad en la curva esfuerzo-deformación unitaria. La desviación del módulo de la sección del material respecto al módulo inicial en la curva de esfuerzo-deformación unitaria por tensión se considera el inicio de la microfracturación y la

presencia de grietas. Sin embargo, este método puede introducir un grado significativo de subjetividad, ya que pueden producirse picos locales bajos que den lugar a una interpretación errónea de las propiedades de tensión (Fig. 3).

Graybeal y Baby²¹ propusieron un método para determinar la resistencia efectiva al agrietamiento del UHPC, inspirándose en la norma ASTM E8/E8M²². El proceso que proponen comienza por determinar el módulo de elasticidad E a partir del segmento inicial de la curva de esfuerzo-deformación por tensión. Según la norma AASHTO T 397, el valor E debe obtenerse directamente del ensayo de tensión uniaxial, que incluye una precarga de compresión prescrita de entre 3.5 y 7.0 MPa (0.5 y 1.0 ksi) antes de que la carga pase a tensión. Cuando los montajes del ensayo no pueden implementar el protocolo de ensayo establecido en la norma AASHTO T 397, una alternativa consiste en determinar el valor E a partir de ensayos con cilindros realizados según ASTM C1856/C1856M²³. Si no se dispone de datos de medición, E puede estimarse utilizando la fórmula $E = 9100f_c^{0.33}$ en MPa ($E = 2,500f_c^{0.33}$ en ksi)²⁴. A continuación, se genera una línea de desplazamiento con una pendiente igual a E , que comienza en un desplazamiento del 0.02% de deformación. La resistencia efectiva al agrietamiento se identifica entonces como el punto en el que esta línea de desplazamiento se cruza con la curva de tensión-deformación unitaria a tensión. Este método ofrece un enfoque claro y estandarizado para determinar las propiedades de agrietamiento del UHPC²¹. El método de desplazamiento de deformación del 0.02% se adaptó de la norma ASTM E8/E8M y, cuando se aplica a materiales del UHPC con altas fracciones volumétricas de fibra que presentan una respuesta de endurecimiento bilineal, puede clasificar erróneamente al material como de ablandamiento por deformación. Aunque la corrección del 0.02% ofrece un enfoque práctico y estandarizado, no es perfecta, y se necesitan estudios adicionales que analicen las propiedades de tensión del UHPC con altos contenidos de fibra para ajustar esta corrección a dichos materiales.

Como se muestra en la Fig. 3, la determinación tanto de la resistencia al agrietamiento como de la resistencia posterior al agrietamiento es compleja y puede resultar subjetiva. Para conciliar los resultados de los estudios sobre FRC^{9,12,13} con la terminología actual utilizada para caracterizar el endurecimiento por deformación en los materiales del UHPC^{5,19,25}, los autores recomiendan obtener primero la resistencia

al agrietamiento definida como la resistencia efectiva al agrietamiento y, a continuación, determinar la resistencia posterior al agrietamiento como la resistencia a la localización de grietas, ambas según lo establecido en la norma AASHTO T 397²¹.

Propiedades de tensión del UHPC necesarias para aplicaciones estructurales

Muchas normas internacionales de diseño establecen que, para aplicaciones estructurales, solo deben utilizarse mezclas de UHPC con propiedades de endurecimiento por deformación unitaria a tensión. Sin embargo, no todos los materiales del UHPC presentan este comportamiento. El comportamiento de endurecimiento por deformación unitaria a tensión depende de varios parámetros del material, entre ellos V_f , L_f , D_f y τ . Si estos parámetros no se ajustan adecuadamente para garantizar que la resistencia a la localización de grietas supere la resistencia efectiva al agrietamiento, el material del UHPC mostrará un comportamiento de ablandamiento por deformación. Las normas de diseño simplifican la clasificación de las propiedades de tensión de los compuestos del UHPC como endurecibles o ablandables por deformación, al centrarse en el comportamiento observado en el ensayo de tensión uniaxial del compuesto de UHPC, en lugar de basarse en dichos parámetros.

El anexo U de la norma canadiense CSA A23.1:19/CSA A23.2:19² clasifica un material de UHPC como de endurecimiento por deformación unitaria si la resistencia máxima a la tensión y la resistencia al agrietamiento, determinadas ambas en un ensayo de tensión uniaxial, cumplen los siguientes criterios:

- Resistencia a la rotura de al menos 5 MPa (0.73 ksi);
- Relación de endurecimiento por deformación (resistencia máxima a la tensión/resistencia a la rotura) de al menos 1.1; y
- Deformación asociada a la resistencia máxima a la tensión de al menos 0.001.

Los materiales que no cumplen todos estos criterios se clasifican como materiales de UHPC con ablandamiento por deformación unitaria. Del mismo modo, las normas suizas³ determinan las propiedades de endurecimiento por deformación unitaria por tensión mediante ensayos de tensión uniaxial, y clasifican los materiales de UHPC con

comportamiento de deformación unitaria por tensión como UA y UB. Los materiales UA requieren una resistencia al agrietamiento de al menos 7 MPa (1.0 ksi), un coeficiente de endurecimiento por deformación unitaria de al menos 1.1 y una deformación unitaria en la resistencia de localización de grietas de al menos 0.0015, mientras que los materiales UB requieren una resistencia mínima al agrietamiento de al menos 10 MPa (1.5 ksi), un coeficiente de endurecimiento por deformación unitaria de al menos 1.2 y una deformación en la resistencia de localización de la grieta de al menos 0.002. Estas normas^{2,3} indican que la resistencia al agrietamiento debe corresponder a la de la matriz del UHPC sin fibras. Sin embargo, ninguna de las dos normas^{2,3} ofrece orientación suficiente para determinar la resistencia al agrietamiento a partir de la curva esfuerzo-deformación unitaria del compuesto del UHPC, lo que introduce un elemento de subjetividad a la hora de evaluar si los materiales del UHPC cumplen con los índices de endurecimiento especificados.

En Estados Unidos, las Especificaciones de la Guía de la AASHTO para el diseño estructural con concreto de ultra alto comportamiento²⁵ proporcionan dos modelos idealizados para materiales del UHPC que presentan un comportamiento de endurecimiento por deformación unitaria a tensión. Un material clasificado como H-2 en la norma AASHTO T 397 para ensayos de tensión uniaxial tiene una resistencia a la localización de grietas igual a la resistencia efectiva a la formación de grietas. Los materiales H-2 de UHPC suelen contener una fracción volumétrica de fibra del 2% o menos, con una relación entre la resistencia a la localización de grietas y la resistencia efectiva al agrietamiento inferior a 1.2. Un material clasificado como H-1 según la norma AASHTO T 397 presenta un comportamiento de endurecimiento bilineal, y la relación entre la resistencia a la localización de grietas y la resistencia efectiva al agrietamiento es de al menos 1.2. Esta clasificación se aplica, por lo general, a los materiales de UHPC reforzados con una fracción volumétrica de fibra superior al 3%.

La Figura 4 ilustra cómo la Guía de la AASHTO tiene en cuenta las propiedades de endurecimiento por deformación unitaria de los materiales de UHPC. El material UHPC H-2 presenta una meseta de pseudoefuerzo, lo que concuerda con una respuesta plástica perfectamente elástica, mientras que el material UHPC H-1 muestra una respuesta de endurecimiento bilineal en la región de endurecimiento por deformación unitaria. La Guía de la AASHTO

establece criterios mínimos de endurecimiento por deformación unitaria tanto para los materiales de UHPC de tipo H-1 como para los de tipo H-2, exigiendo una resistencia efectiva al agrietamiento de al menos 5.2 MPa (0.75 ksi) y una deformación unitaria de localización mínima de 0.0025.

Con el fin de promover un enfoque estandarizado en la práctica de la ingeniería, se recomienda el uso de la norma AASHTO T 397 para definir la resistencia efectiva al agrietamiento mediante el método de desplazamiento de deformación unitaria del 0.02%. Las Figuras 5(a) y (c) muestran las curvas uniaxiales individuales de esfuerzo-deformación unitaria para dos mezclas de UHPC que presentan una respuesta de endurecimiento bilineal. La viabilidad del método de compensación del 0.02% se ilustra en las Fig. 5(b) y (d), donde se muestra que la resistencia efectiva al agrietamiento difiere desde la primera desviación de la linealidad.

Las Figuras 6(a) y (c) muestran las curvas individuales de esfuerzo-deformación por tensión de una mezcla de UHPC con diferentes contenidos de fibra en volumen; ambas presentan una respuesta casi elástica-perfectamente plástica. Las Figuras 6(b) y (d) destacan la importancia de aplicar el método de desplazamiento del 0.02% para los materiales que presentan un comportamiento H-2 en el UHPC, ya que, de lo contrario, una identificación incorrecta de la resistencia al agrietamiento podría llevar a clasificar erróneamente el material como de ablandamiento por deformación unitaria. Las curvas

promediadas que se muestran en las Figuras 5(a), 5(c), 6(a) y 6(c) se incluyen únicamente para facilitar la visualización de la respuesta total a la tensión y no deben utilizarse para determinar las propiedades de tensión. La resistencia efectiva al agrietamiento y a la localización de las mezclas de UHPC que se indican se obtienen mediante el procesamiento aritmético de los resultados individuales de los ensayos. En lo que respecta al diseño estructural y la calificación de materiales, la Guía de la AASHTO exige además que las propiedades de diseño del UHPC se establezcan con una desviación estándar de 1.5 por debajo de los valores medios de las propiedades de tensión derivadas de las curvas individuales de esfuerzo-deformación unitaria, a fin de tener en cuenta la variabilidad estadística.

Dada la repetibilidad y la claridad con las que se identificaron de manera consistente los parámetros clave del endurecimiento por deformación unitaria en las Figuras 5(b), 5(d), 6(b) y 6(d) mediante el procedimiento AASHTO T 397, se recomienda que el sector de la construcción adopte las definiciones de resistencia efectiva al agrietamiento y resistencia a la localización para informar sobre las propiedades de tensión. Aunque el ensayo de tensión uniaxial sigue siendo experimentalmente complejo y el valor de desplazamiento del 0.02% puede requerir ajustes para ciertas respuestas de endurecimiento bilineal, estos métodos proporcionan curvas de esfuerzo-deformación unitaria a tensión del UHPC que permiten una comparación racional y coherente de las propiedades de tensión.

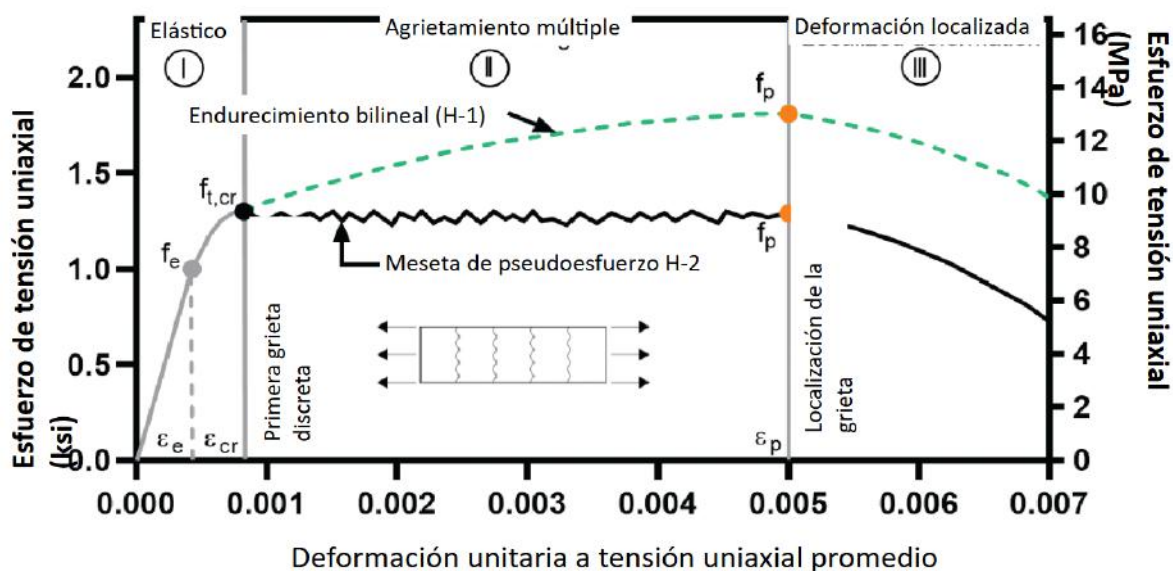
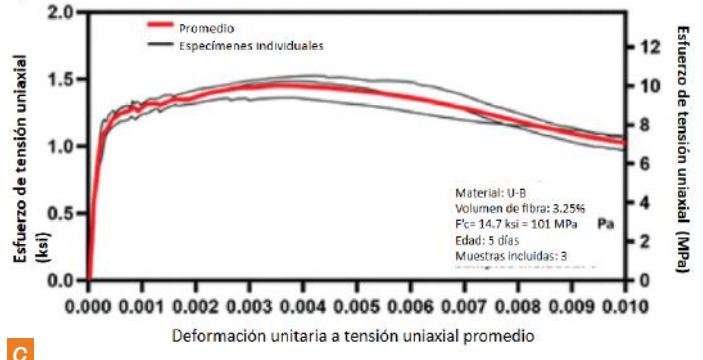
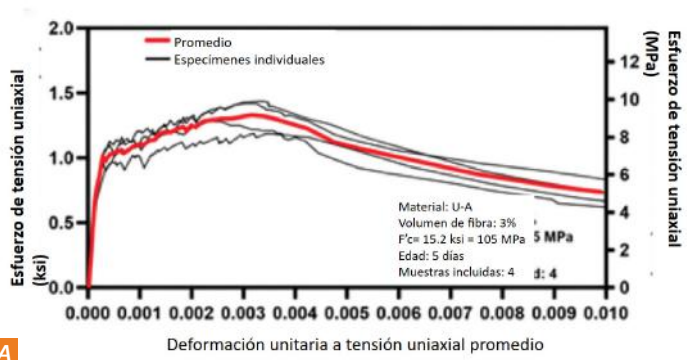
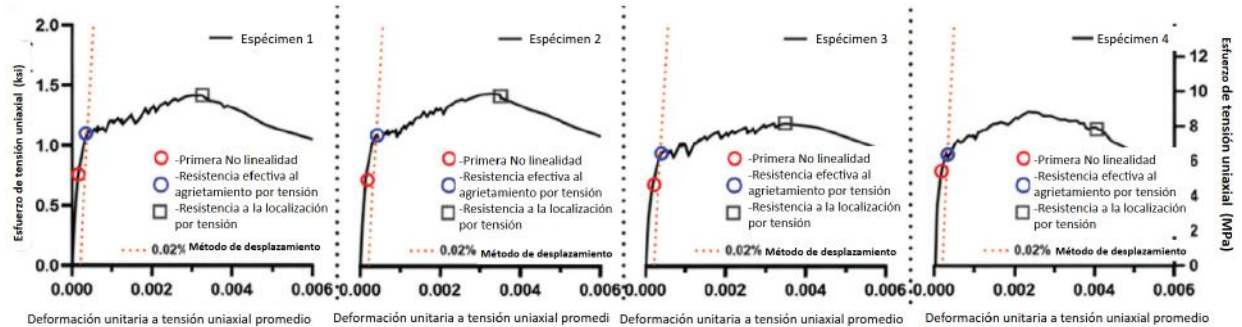


Fig. 4: Respuesta a la tensión idealizada que muestra los diferentes comportamientos posibles en la zona de agrietamiento múltiple (adaptado de Haber et al.¹⁹)

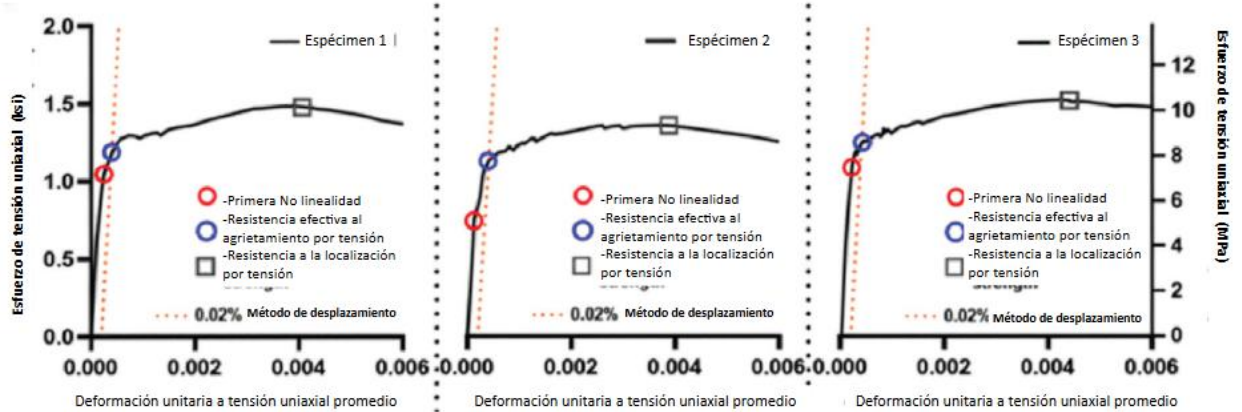


A

C



B



D

Fig. 5: Ilustración de la metodología AASHTO T 397 para identificar puntos clave en las curvas de esfuerzo-deformación unitaria a tensión para dos mezclas diferentes de UHPCC (U-A y U-B); (a) respuesta de esfuerzo-deformación unitaria a tensión de las muestras U-A con $V_f = 3\%$ (adaptado de Haber et al.¹⁹); (b) puntos clave identificados en las curvas de esfuerzo-deformación unitaria a tensión para cuatro muestras de la mezcla de UHPCC U-A; (c) respuesta de esfuerzo-deformación unitaria a tensión de las muestras U-B con $V_f = 3,25\%$ (adaptado de Haber et al.¹⁹); y (d) puntos clave identificados en las curvas de esfuerzo-deformación unitaria a tensión para tres muestras de la mezcla de UHPCC U-B

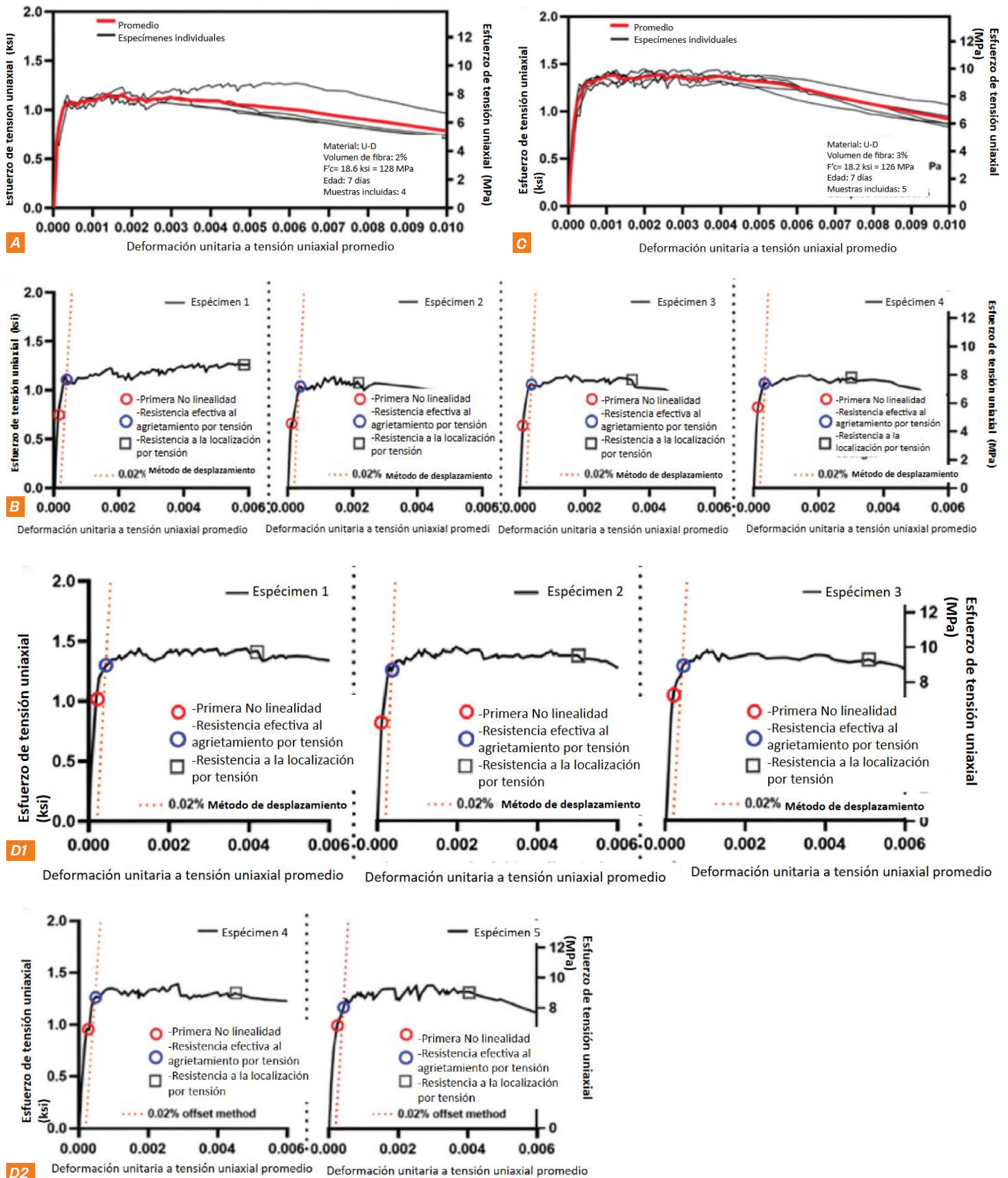


Fig. 6: Ilustración de la metodología AASHTO T 397 para identificar puntos clave en las curvas de esfuerzo-deformación unitaria a tensión de la mezcla de UHPC U-D con diferentes fracciones volumétricas de fibra: (a) respuesta de esfuerzo-deformación unitaria a tensión de las muestras U-D con $V_f = 2\%$ (adaptado de Haber et al.¹⁹); (b) puntos clave identificados en las curvas de tensión-deformación unitaria a tensión para cuatro muestras de la mezcla de UHPC U-D; (c) respuesta de tensión-deformación unitaria a tensión de muestras de U-D con $V_f = 3\%$ (adaptado de Haber et al.¹⁹); y (d) puntos clave identificados en las curvas de tensión-deformación unitaria a tensión para cinco muestras de la mezcla de UHPC U-D

Conclusiones

En este artículo se reevalúan las definiciones existentes del endurecimiento por deformación unitaria a tensión, tanto en el concreto reforzado con fibras (FRC) clásico como en el concreto de ultra alto comportamiento (UHPC), y se aboga por una presentación coherente de las propiedades de endurecimiento por deformación unitaria. Aunque el concepto de endurecimiento por deformación es sencillo desde el punto de vista teórico, la falta de datos consistentes y objetivos sobre las propiedades a tensión indica que se necesitan directrices prácticas para que los ingenieros puedan evaluar si su material presenta propiedades de endurecimiento por deformación unitaria a tensión. Por consiguiente, los autores recomiendan definir la resistencia al agrietamiento utilizando la resistencia efectiva al agrietamiento determinada mediante el método del desplazamiento del 0.02%, en lugar de basarse en métodos visuales o en la identificación de la primera no linealidad en la curva de esfuerzo-deformación unitaria a tensión. Se recomienda utilizar la resistencia a la localización de grietas, tal como se define en la norma AASHTO T 397, en lugar de seleccionar el valor máximo del pico posterior a la aparición de las grietas. En conjunto, estas definiciones proporcionan una base estandarizada y reproducible para evaluar el endurecimiento por deformación unitaria a tensión en los materiales del UHPC para aplicaciones estructurales. Las Figuras 5 y 6 ilustran la identificación de puntos clave en las curvas de esfuerzo-deformación unitaria a tensión de los materiales del UHPC que presentan un comportamiento de endurecimiento bilineal (H-1) y elástico-perfectamente plástico (H-2). Se reconoce que la norma AASHTO T 397 no es un método de caracterización perfecto; es posible que sea necesario ajustar el valor de desplazamiento del 0.02%, especialmente en el caso de los materiales del UHPC que presentan un comportamiento de endurecimiento bilineal pronunciado, y su aplicación actual sigue estando limitada en gran medida a la práctica de la ingeniería de puentes. No obstante, sus definiciones estructuradas ofrecen una base racional y transparente para comparar los resultados de los ensayos a tensión, lo que supone una solución práctica hasta que una mayor adopción y la disponibilidad de datos experimentales adicionales permitan un mayor perfeccionamiento.

Agradecimientos

Esta investigación ha sido financiada en parte por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de Taiwán (subvención n.º 109-2636-E-006-015). Para cualquier consulta, envíe un correo electrónico al autor responsable, C.-C. Hung, a cchung@mail.ncku.edu.tw. Las opiniones expresadas son las de los autores y no reflejan la política ni la postura oficial del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

Referencias

1. Hung C.-C.; El-Tawil, S.; and Chao, S.-H., "A Review of Developments and Challenges for UHPC in Structural Engineering: Behavior, Analysis, and Design," *Journal of Structural Engineering*, ASCE, V. 147, No. 9, 2021, p. 03121001. doi: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0003073
2. CSA A23.1:19/CSA A23.2:19, "Concrete Materials and Methods of Concrete Construction/Test Methods and Standard Practices for Concrete," CSA Group, Toronto, ON, Canada, 2019.
3. SIA, "Technical Leaflet SIA 2052: UHPFRC—Materials, Design and Construction," Swiss Society of Engineers and Architects, Zurich, Switzerland, 2016.
4. Bermudez, M., and Hung C.-C., "Shear Strength Database for Nonprestressed High-Strength High-Performance Fiber-Reinforced Cementitious Composites and Ultra-High-Performance Concrete Beams without Stirrups," *ACI Structural Journal*, V. 122, No. 1, Jan. 2025, pp. 213-223. doi: 10.14359/51743296
5. AASHTO T 397-22, "Standard Method of Test for Uniaxial Tensile Response of Ultra-High-Performance Concrete," American Association of State Highway Transportation Officials, Washington, DC, 2022.
6. NF P 18-470, "Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete—Specifications, Performance, Production, and Conformity," Association Française de Normalisation (AFNOR Group), Saint-Denis, France, July 2016, 84 pp.
7. NF P 18-710, "National Addition to Eurocode 2 — Design of Concrete Structures: Specific Rules for Ultra-High Performance Fibre-Reinforced Concrete (UHPFRC)," Association Française de Normalisation (AFNOR Group), Saint-Denis, France, 2016, 137 pp.
8. fib, "fib Model Code for Concrete Structures (2020)," International Federation for Structural Concrete, Lausanne, Switzerland, 2023, 780 pp.

9. Naaman, A.E., and Reinhardt, H.W., "Characterization of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites—HPFRCC," High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 2 (HPFRCC): Proceedings of the Second International RILEM Workshop, A.E. Naaman and H.W. Reinhardt, eds., Ann Arbor, MI, 1996, pp. 1-24.
10. Naaman, A.E., "Engineered Steel Fibers with Optimal Properties for Reinforcement of Cement Composites," Journal of Advanced Concrete Technology, V. 1, No. 3, 2003, pp. 241-252. doi: 10.3151/jact.1.241
11. Naaman, A.E., "Half a Century of Progress Leading to Ultra-High Performance Fiber Reinforced Concrete: Part 1-Overall Review," Proceedings of the 2nd International RILEM Conference on Strain Hardening Cementitious Composites, R.D.T. Filho, F.A. Silva, E.A.B. Koenders, and E.M.R. Fairbairn, eds., Rio de Janeiro, Brazil, 2011, pp. 17-26.
12. Naaman, A.E., "Tensile Strain-Hardening FRC Composites: Historical Evolution Since the 1960," Advances in Construction Materials 2007, Springer, Berlin, Heidelberg, Germany, 2007, pp. 181-202. doi: 10.1007/978-3-540-72448-3_19
13. Naaman, A., "Strain Hardening and Deflection Hardening Fiber Reinforced Cement Composites," Proceedings of the 4th International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, University of Michigan, Ann Arbor, MI, 2003, pp. 95-113.
14. El-Tawil, S., "High Bond Steel Fibers for Ultra High-Performance Concrete (UHPC)," Project No. NCHRP IDEA Project 235, Sept. 15, 2022.
15. Wille, K.; El-Tawil, S.; and Naaman A.E., "Properties of Strain Hardening Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete (UHPFRC) Under Direct Tensile Loading," Cement and Concrete Composites, V. 48, Apr. 2014, pp. 53-66. doi: 10.1016/j.cemconcomp.2013.12.015
16. Wille, K., and Naaman, A.E., "Pullout Behavior of High-Strength Steel Fibers Embedded in Ultra-High-Performance Concrete," ACI Materials Journal, V. 109, No. 4, July-Aug. 2012, pp. 479-488. doi: 10.14359/51683923
17. Bermudez, M.; Wen, K.-W.; and Hung, C.-C., "A Comparative Study on the Shear Behavior of UHPC Beams with Macro Hooked-End Steel Fibers and PVA Fibers," Materials, V. 15, No. 4, 2022, Article No. 1485. doi: 10.3390/ma15041485
18. Bermudez, M., and Hung, C.-C., "Shear Strength Equation and Database for High-Strength High-Performance Fiber-Reinforced Concrete and Ultra-High-Performance Concrete Beams without Stirrups," ACI Structural Journal, V. 121, No. 4, July 2024, pp. 185-95. doi: 10.14359/51740716
19. Haber, Z.B.; De la Varga, I.; Graybeal, B.A.; Nakashoji, B.; and El-Helou, R., "Properties and Behavior of UHPC-Class Materials," FHWA-HRT-18-036, Federal Highway Administration, Office of Infrastructure Research and Development, Washington, DC, 2018, 170 pp.
20. Naaman, A.E., and Shah, S.P., "Strain Capacity of Strain-Hardening Ultra-High-Performance Concrete with Steel Fibers," ACI Materials Journal, V. 119, No. 2, Mar. 2022, pp. 171-80. doi: 10.14359/51734357
21. Graybeal, B.A., and Baby, F., "Development of Direct Tension Test Method for Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete," ACI Materials Journal, V. 110, No. 2, Mar.-Apr. 2013, pp. 177-186. doi: 10.14359/51685532
22. ASTM E8/E8M-22, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials," ASTM International, West Conshohocken, PA, 31 pp. doi: 10.1520/E0008_E0008M-22
23. ASTM C1856/C1856M-17, "Standard Practice for Fabricating and Testing Specimens of Ultra-High Performance Concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA, 4 pp. doi: 10.1520/C1856_C1856M-17
24. El-Helou, R.G.; Haber, Z.B.; and Graybeal, B.A., "Mechanical Behavior and Design Properties of Ultra-High-Performance Concrete," ACI Materials Journal, V. 119, No. 1, Jan. 2022, pp. 181-194 doi: 10.14359/51734194
25. AASHTO, "Guide Specifications for Structural Design with Ultra-High Performance Concrete," first edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2024, 97 pp.

Manuel Bermúdez, miembro del ACI, es investigador postdoctoral en la Universidad Nacional Cheng Kung, en Tainan (Taiwán). Obtuvo su maestría y doctorado en ingeniería civil en la Universidad Nacional Cheng Kung. Es miembro de los Comités 239 del ACI, Concreto de ultra alto comportamiento, y 445, Cortante y Torsión.



Chung-Chan Hung, miembro del ACI, es profesor de ingeniería civil en la Universidad Nacional Cheng Kung e investigador del Centro Nacional de Investigación en Ingeniería Sísmica de Taiwán. En 2010 obtuvo su maestría en ingeniería mecánica y su doctorado en ingeniería civil en la Universidad de Michigan, Ann Arbor, MI, EE. UU. Sus intereses de investigación incluyen las estructuras reforzadas de concreto de alto comportamiento, los materiales cementantes y estructuras de concreto de alto comportamiento fibroreforzados, y la rehabilitación estructural.



Título original en inglés:
**Revisiting the Definitions of
Tensile Strain-Hardening
Properties in UHPC
Materials for Structural
Applications**

**La traducción de este artículo
correspondió al Capítulo Noreste
de México**



Traducción:
**Lic. Iliana Margarita
Garza Gutiérrez**



Revisión Técnica:
**Dr. B Tadeo Terán
Torres**

**Perspectivas de ingeniería:
Preguntas y Respuestas sobre LC³
y CCIL.
Guía práctica para materiales
Cementantes de bajo contenido
de Clínker para el Concreto**

P1. *He oído hablar de LC³, pero ¿qué es exactamente?*

R1. El cemento de caliza y arcilla calcinada LC³, por sus siglas en inglés (Limestone calcined clay cement), es un cemento mezclado de bajo contenido de clínker que combina Clinker de cemento Portland con arcilla calcinada, caliza molida y yeso, con el fin de reducir las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) y, al mismo tiempo, mantener un buen rendimiento mecánico y durabilidad.¹ LC³ se introdujo como una alternativa escalable al cemento Portland convencional, que no depende de materiales cementantes suplementarios (MCS) provenientes de subproductos industriales limitados, como cenizas volantes y cemento de escoria. En estos sistemas ternarios, la alúmina de la arcilla calcinada interactúa con la piedra caliza durante la hidratación, lo que contribuye a estabilizar los productos de reacción y a mejorar el desempeño general.¹ Una formulación representativa de LC³ contiene aproximadamente 50% de clínker de cemento Portland, 5% de yeso, 15% de caliza, y 30% de arcilla calcinada como MCS.¹ Según ASTM C595/ C595M,² estos sistemas pueden clasificarse como cementos ternarios Tipo IT; por ejemplo, esta composición se designaría como Tipo IT(L15)(P30). Si bien el LC³ está diseñado para producirse en una planta cementera como un cemento adicionado, también puede obtenerse una mezcla cementante similar mediante la combinación cemento Portland-caliza conocido como PLC o Tipo IL, con arcilla calcinada. El diseño y el desempeño de estos sistemas—denominados en el presente texto como cemento de arcilla calcinada-Tipo IL-caliza (CCIL, por sus siglas en inglés)—constituye el enfoque de una investigación reciente financiada por

la Administración Federal de Carreteras de Estados Unidos (FHWA), y dirigida la Universidad Estatal de Iowa.

P2. *¿Qué es CCIL, y en qué se diferencia de LC³?*

R2. CCIL se refiere a mezclas de “arcilla calcinada + cemento Tipo IL”, las cuales reproducen las composiciones similares a las del LC³ pero se combinan en el punto de producción del concreto, en lugar de durante la fabricación del cemento.³ Esta diferencia es particularmente relevante en el mercado estadounidense, donde existe una tradición de utilizar MCS como reemplazos parciales del cemento en el concreto, en lugar de incorporarlos como componentes de cementos previamente adicionados.

El cemento Tipo IL se clasifica según ASTM C595/ C595M² y contiene de 5 a 15% de caliza en masa. Los MCS de arcilla calcinada se clasifican como puzolanas naturales de Clase N según ASTM C618⁴ o ASTM C1945.⁵ En los sistemas CCIL, el MCS sustituye parcialmente al cemento Tipo IL, lo que reduce el contenido de caliza por debajo del 15% y aumenta el contenido de clínker. Aunque el sistema resultante presenta un contenido de clínker superior 50% típico de LC³, este podría ser tan bajo como el 55%.⁶ En la Fig.1. se comparan ejemplos de mezclas CCIL con un LC³ típico.

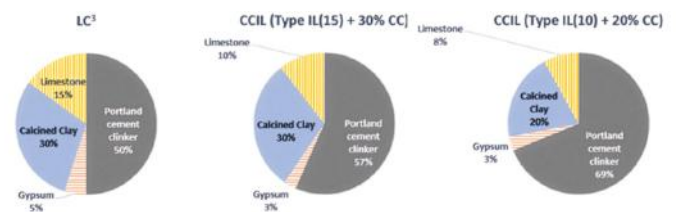


Fig. 1: Porcentajes en peso de clínker de cemento Portland y otros componentes cementantes en un sistema LC³ de referencia (izquierda) y mezclas CCIL de ejemplo elaboradas de cementos Tipo IL con diferentes contenidos de caliza y distintos porcentajes de reemplazos en masa de arcilla calcinada (centro y derecha) En este ejemplo, se asumió que el contenido de yeso del cemento Tipo IL era del 4%.

P3. *¿Debe el MCS ser una arcilla calcinada en un cemento Tipo IT o CCIL?*

R3. Las arcillas calcinadas son arcillas naturales que han sido sometidas a calentamiento o calcinación para descomponer su estructura cristalina, lo que las hace puzolánicamente reactivas en sistemas cementantes. Muchas de las arcillas calcinadas que son consideradas como MCS, están basadas en caolinita, como el metacaolín, que se comercializó como MCS durante décadas. Sin embargo, las puzolanas naturales de arcilla calcinada pueden variar en su contenido de caolinita o incluir otros minerales arcillosos o arcillas mixtas. Aunque el LC³ se refiere exclusivamente a cementos adicionados que contienen MCS de arcilla calcinada, prácticamente cualquier MCS puede utilizarse para crear un cemento tipo IT conforme a ASTM C595/C595M².

Los MCS con alto contenido de alúmina, incluidas muchas arcillas calcinadas pueden reaccionar con caliza para formar productos que rellenan los poros y mejoran la resistencia^{6,7}. La elección del MCS en un cemento adicionado, o para su uso en mezclas de concreto, depende de la disponibilidad regional y de los requisitos de desempeño. En Estados Unidos, algunas regiones cuentan con recursos abundantes y económicos de arcilla calcinada, mientras que otras dependen de puzolanas naturales volcánicas, cenizas volantes o cemento de escoria. El término CCIL se refiere al uso de arcilla calcinada como MCS en concreto; sin embargo, otras opciones de MCS también ofrecen un buen desempeño cuando se combinan con cemento Tipo IL.⁶

P4. *¿Cómo se comparan las propiedades de los productos frescos LC³ y CCIL con Tipo I/IL?*

R4. A diferencia de las cenizas volantes, la mayoría de las puzolánicas naturales, incluidas las arcillas calcinadas, aumentan la demanda de aditivos reductores de agua en las mezclas de concreto¹⁶. La selección de un aditivo apropiado será fundamental, especialmente porque los asentamientos iniciales pueden ser menores en concretos con LC³ y CCIL pero también porque la retención del asentamiento

podría ser más difícil.⁸ A medida que una variedad de cementos compuestos ingresan al mercado, la selección de aditivos adecuados— incluidos los aditivos reductores de agua de policarboxilato avanzados de alto rango y agentes mitigadores de arcilla desarrollados para sistemas de arcilla calcinada de alta área superficial específica — será fundamental para la trabajabilidad y el desempeño. Están surgiendo guías orientadas a la práctica para ayudar a diseñadores y productores a comprender estos sistemas.⁹

P5. *¿Debe el MCS ser una arcilla calcinada en un cemento Tipo IT o CCIL?*

R5. El fraguado y la hidratación inicial del concreto se ven afectados por las propiedades de los materiales cementantes suplementarios MCS — tales como el tamaño de partícula y el equilibrio entre alúmina y sulfato— así como por los aditivos, como los reductores de agua, que se utilizan comúnmente para mantener la trabajabilidad cuando se emplean puzolanas naturales.

Investigaciones realizadas en la Universidad Estatal de Iowa han demostrado que algunas mezclas del concreto CCIL presentan tiempos del fraguado inicial y final más cortos (aproximadamente 40 minutos menos) en comparación con las mezclas de cementos Tipo IL, mientras que otras mezclas CCIL presentan tiempos de fraguado inicial y final más prolongados. Los tiempos de fraguado más largos en estos sistemas podrían deberse a dosificaciones más altas de aditivos reductores de agua de alto rango, lo que resalta la necesidad de seleccionar adecuadamente los aditivos y de realizar pruebas de dosificación. Para aplicaciones en campo, se debe monitorear el tiempo de fraguado del concreto CCIL, y el tiempo de acabado superficial y el intervalo de corte de juntas deben ajustarse según corresponda, para garantizar una calidad de construcción adecuada.

P6. *¿Cómo se desarrolla la resistencia en el concreto LC³ y CCIL?*

R6. La resistencia a compresión a edades tempranas (≤ 7 días) de las mezclas de concreto LC³ y CCIL es generalmente menor que la de las mezclas correspondientes elaboradas con cemento tipo IL, debido a la reacción relativamente más lenta de la arcilla calcinada en comparación con la del cemento (reacción puzolánica frente a hidratación).¹ Se pueden utilizar aditivos acelerantes, incluidas opciones sin cloruros, como agentes de nucleación, o aceleradores con cloruros cuando sea apropiado, para aumentar la resistencia inicial,¹⁰ sin embargo, se deben realizar pruebas de dosificación para confirmar que las combinaciones de materiales y aditivos generen el desempeño deseado. Investigaciones realizadas en la Universidad Estatal de Iowa han demostrado que, a los 7 días, la mayoría de las mezclas de concreto CCIL pueden alcanzar 26 MPa (3,780 psi) o más, suficiente para aplicaciones en pavimentos. A edades posteriores (≥ 28 días), la resistencia a la compresión del concreto LC³ o CCIL es generalmente comparable o incluso superior a la de un concreto correspondiente elaborado con cemento Tipo I o IL.¹ Estos concretos pueden alcanzar fácilmente entre 30 a 40 MPa (4,350 a 5,800 psi) a los 28 días, y de 35 a 45 MPa (5,000 a 6,500 psi) a los 90 días, lo cual los hace adecuados para la mayoría de las aplicaciones estructurales. Al igual que en el concreto fabricado con cemento convencional, la resistencia a la tracción por hendimiento y a la flexión, así como el módulo de elasticidad del concreto CCIL, están estrechamente relacionados con la resistencia a la compresión.

P7. *¿Cómo se desempeñan los concretos con LC³ y CCIL en función de los principales parámetros de durabilidad?*

R7. Los concretos LC³ y CCIL generalmente desarrollan una microestructura densificada debido a la reacción puzolánica de la arcilla calcinada y a la formación de carboaluminatos, lo que da lugar a una menor permeabilidad y a una mayor resistencia al deterioro relacionado con los mecanismos de transporte. Investigadores de la Universidad Estatal de Iowa han demostrado que, cuando la calidad constructiva se controla

adecuadamente (en particular el asentamiento, el contenido de aire y el espaciamiento) y se alcanza una resistencia suficiente, los concretos LC³ y CCIL generalmente presentan una muy buena resistencia a los ciclos de congelamiento y descongelamiento, una resistividad superficial significativamente mayor y una menor sorptividad al agua que los concretos elaborados con cemento tipo IL. Esto sugiere un excelente desempeño en entornos severos. Los estudios también han demostrado que el concreto con LC³ presenta una excelente resistencia a la reacción álcali-sílice (RAS) con agregados reactivos y al ataque de sulfatos.¹¹ Sin embargo, se han reportado resultados contradictorios sobre la retracción a edades tempranas de los concretos con LC³ y CCIL, los cuales dependen en gran medida de las proporciones de la mezcla de concreto, los procedimientos de ensayo y las condiciones de curado. Si bien algunos estudios reportan una mayor retracción en concretos que contienen materiales a base de arcilla calcinada,¹² otros observan un comportamiento de retracción comparable al del concreto elaborado con cemento Portland.^{13,14} Para minimizar el potencial de fisuración por retracción en aplicaciones de campo, se recomienda controlar la evaporación de la humedad mediante un curado rápido y adecuado, realizar juntas oportunas y considerar el uso de curado interno o aditivos reductores de retracción para colocaciones de alto riesgo (como estructuras de secado rápido y estructuras altamente restringidas construidas con una baja relación agua/aglomerante).

P8. *¿Existe alguna otra diferencia en el desempeño del concreto LC³ y CCIL?*

R8. Dos aspectos merecen mayor atención: 1) la generación de calor, especialmente en aplicaciones de concreto masivo; y 2) el equilibrio de sulfatos.

El calor se libera cuando el cemento reacciona con el agua, lo que incrementa la temperatura interna del concreto. Los elementos de concreto de gran tamaño pueden experimentar altas temperaturas durante el curado, así como grandes diferencias de temperatura entre el centro, más caliente, y la superficie, más fría, donde el calor se libera con mayor facilidad al ambiente.

A diferencia de las puzolanas naturales crudas de origen volcánico, como la zeolita o la piedra pómez, que liberan menos calor que el cemento durante la hidratación,¹⁵ la reacción puzolánica de la arcilla calcinada puede liberar más calor por masa reaccionada que el cemento. Sin embargo, investigaciones realizadas en la Universidad de Florida han demostrado que las arcillas calcinadas liberan calor a una tasa menor que el cemento, y que esta tasa depende del contenido de caolinita de la arcilla. Al desarrollar planes de control térmico, se debe tener precaución y considerar la posible mayor liberación de calor de las mezclas de concreto que contienen arcilla calcinada.

Otra forma en que los sistemas cementantes a base de arcilla calcinada difieren es que pueden requerir sulfato de calcio (yeso) adicional en comparación con los cementos Tipo I o IL. Los iones sulfato desempeñan un papel fundamental en el control de las reacciones de hidratación, especialmente en la interacción entre la alúmina de la arcilla calcinada y el C₃A del cemento. Un equilibrio adecuado de sulfato previene fraguados rápidos o retardado y favorece un desarrollo sólido de la resistencia a edades tempranas. Tanto las mezclas LC³ como las CCIL con bajo o excesivo contenido de sulfato pueden presentar un desempeño deficiente,¹ por lo que mantener el contenido de sulfato dentro de un rango aceptable es esencial para maximizar la resistencia y la durabilidad.

El contenido óptimo de sulfato en los sistemas CCIL depende de la pureza, el tamaño de partícula y la mineralogía de la arcilla, así como del método de mezclado. En la práctica, existe un rango aceptable de contenidos de sulfato (en lugar de un único contenido óptimo). Los modelos predictivos desarrollados en el Instituto de Tecnología de Georgia como parte del proyecto patrocinado por la FHWA pueden ayudar a determinar el rango adecuado de adición de sulfato para cada formulación, garantizando un fraguado y desarrollo de resistencia confiables. En aplicaciones de campo, la optimización del sulfato debe adaptarse a las materias primas específicas utilizadas. Se recomienda a los productores monitorear el contenido de sulfato y el comportamiento de hidratación, utilizando los modelos y métodos de prueba disponibles para asegurar un rendimiento constante. Con una gestión adecuada del sulfato, el concreto CCIL puede ofrecer trabajabilidad, resistencia y durabilidad predecibles.

P9. *¿Cómo se desempeñan los concretos LC³ y CCIL en la construcción en campo?*

R9. En 2024, se construyó un tramo de prueba de pavimento en las instalaciones de MnROAD en Minnesota, EE. UU, utilizando un producto piloto LC³ especialmente fabricado por un fabricante regional de cemento. El objetivo era evaluar la reducción de clínker con arcilla calcinada y caliza en condiciones reales de tráfico y clima frío, como se muestra en la Fig 2¹⁶. Si bien requirió una mayor dosificación de reductor de agua en comparación con el control para lograr una trabajabilidad adecuada, el concreto LC³ no presentó problemas de construcción significativos durante su colocación. La mezcla se dosificó, colocó, terminó y curó utilizando prácticas estándar de pavimentación con encofrado deslizante. Las propiedades de la mezcla, tanto en estado fresco como endurecido, cumplieron con las especificaciones del Departamento de Transporte (DOT). Cabe destacar que el color del concreto era marrón en lugar de gris, debido a las características de la arcilla calcinada utilizada. La inspección posterior a la primera exposición invernal indicó que el pavimento se había comportado correctamente.



Fig. 2: La sección de prueba 2401 de MnROAD se colocó el 9 de septiembre del 2024. El material cementante Estaba compuesto por una mezcla de 50% de cemento Tipo IL (15% de caliza), 30% de arcilla calcinada y 5% de yeso (contenido total de 570 lb/yd³)

P10. *¿Cuáles son las compensaciones económicas y ambientales del concreto con LC³ y CCIL?*

R10. Dado que el desempeño a largo plazo de los concretos LC³ y CCIL aún no se ha evaluado completamente, todavía no se dispone de un análisis integral del ciclo de vida ni de su impacto ambiental. Un análisis sencillo realizado en la Universidad Estatal de Iowa, centrado en la etapa de producción de materiales cementantes alternativos indicó que el concreto con LC³ mantiene un costo comparable a pesar del elevado precio de la arcilla calcinada en el mercado estadounidense actual. Se espera que la mayor durabilidad y la microestructura densificada de los concretos con LC³ y CCIL se traduzcan en una mayor vida útil, lo que potenciará aún más los beneficios ambientales, económicos y de seguridad de estos sistemas de bajo contenido de clínker.

P11. *¿Qué perspectivas hay hacia el futuro?*

R11. Se prevé que las mezcla con LC³ y CCIL despierten un creciente interés en las industrias del cemento y concreto próximamente, impulsado por sus beneficios en sostenibilidad y desempeño.

Varios cementos tipo IT y productos MCS de arcilla calcinada a escala piloto ya están en desarrollo por parte de fabricantes estadounidenses. Esto indica que se aproximan una mayor disponibilidad comercial y la adopción generalizada de estos cementos adicionados con bajo contenido de clínker. Mientras se continúa el monitoreo del pavimento con LC³ en MnROAD, se realizarán pruebas de campo adicionales con mezclas con LC³ y CCIL de diversas composiciones y en diferentes regiones climáticas con el fin de evaluar su durabilidad y desempeño a largo plazo. Los resultados positivos demostrarán la viabilidad de los cementos adicionados con arcilla calcinada como opción para la construcción de pavimentos sostenibles, servirán de base para especificaciones de pavimentos con materiales innovadores, orientarán futuras optimizaciones de mezclas de concreto con LC³ y CCIL, y ampliarán la adopción de concreto LC³ y CCIL en proyectos de infraestructura en Estados Unidos.

Agradecimientos

El equipo de autores colaboró en un proyecto de investigación patrocinado por el Programa de Investigación Avanzada Exploratoria (EAR) de la Administración Federal de Carreteras de EE.UU. (FHWA) bajo el número de subvención 693JJ32350029, con la ayuda de otros miembros del equipo, estudiantes e investigadores posdoctorales: Daniel Benkeser, Sristi Das Gupta, Paola Huynh, Dayou Luo, Thien Tran, Aiqing Xu y Newell Washburn. Agradecemos especialmente a Michelle Cooper de la FHWA por su orientación y apoyo, y al Departamento de Transporte de Minnesota (MN DOT) por permitir al equipo utilizar datos de una de las secciones de prueba construidas en MnROAD en 2024. La información de esta sesión de preguntas y respuestas se presentó en el Foro de Innovación en Concreto 2025 de la Fundación ACI el 13 de agosto de 2025.

Referencias

1. Zunino, F.; Martirena, F.; and Scrivener, K., "Limestone Calcined Clay Cements (LC³)," *ACI Materials Journal*, V. 118, No. 3, May 2021, pp. 49-60. doi: 10.14359/51730422
2. ASTM C595/C595M-25, "Standard Specification for Blended Hydraulic Cements," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2025, 9 pp. doi: 10.1520/C0595_C0595M-25
3. Riding, K.A., and Zayed, A., "What's Old is New Again: A Vision and Path Forward for Calcined Clay Use in the USA," *Calcined Clays for Sustainable Concrete*, RILEM Bookseries, V. 25, Springer, Singapore, pp. 785-792. doi: 10.1007/978-981-15-2806-4_87
4. ASTM C618-25a, "Standard Specification for Coal Ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2025, 5 pp. doi: 10.1520/C0618-25A
5. ASTM C1945-25, "Standard Specification for Raw or Calcined Natural Pozzolan for Use in Concrete," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2025, 5 pp. doi: 10.1520/C1945-25
6. O'Quinn, K.; Bernal, S.A.; and Juenger, M.C.G., "Blending Portland Limestone Cement with Supplementary Cementitious Materials to Minimize Clinker Content," *Construction and Building Materials*, V. 505, Dec. 2025, Article No. 144657. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2025.144657
7. Bharadwaj, K.; Isgor, O.B.; and Weiss, W.J., "Supplementary Cementitious Materials in Portland-Limestone Cements," *ACI Materials Journal*, V. 119, No. 2, May 2022, pp. 141-154. doi: 10.14359/51734356

8. Moghul, S.; Zunino, F.; and Flatt, R.J., "Flow Loss in Superplasticized Limestone Calcined Clay Cement," Journal of the American Ceramic Society, V. 108, No. 5, Dec. 2024, pp. 1-16. doi: 10.1111/jace.20344
9. Carneiro Ribeiro, F.R.; Ruviano, A.S.; de Matos, P.R.; and Kirchheim, A.P., "Impact of Different Superplasticizers on Hydration, Rheology, Mechanical Strength, and Environmental Evaluation of LC³ Cements," Case Studies in Construction Materials, V. 23, Dec. 2025, Article No. e05347. doi: 10.1016/j.cscm.2025.e05347
10. Kurtis, K.E.; Stewart, L.K.; Grubert, E.A.; Rios, R.T.; Lolli, F.; Kopp, T.; Rigaud, T.; Golden, D.; and Paredes, S., "Recommendations for Future Specifications to Ensure Durable Next Generation of Concrete," Report FHWA-GA-24-2019, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA, Feb. 2024.
11. Yu, C.; Li, Z.; and Liu, J., "Degradation of Limestone Calcined Clay Cement (LC³) Mortars Under Sulfate Attack," Low-Carbon Materials and Green Construction, V. 1, No. 1, Feb. 2023, Article No. 4. doi: 10.1007/s44242-022-00003-1
12. Afroz, S.; Nguyen, Q.D.; Zhang, Y.; Kim, T.; and Castel, A., "Cracking of Limestone Calcined Clay Blended Concrete and Mortar Under Restrained Shrinkage," Construction and Building Materials, V. 386, July 2023, Article No. 131599. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131599
13. Wyrzykowski, M.; Di Bella, C.; Sirtoli, D.; Toropovs, N.; and Lura, P., "Plastic Shrinkage of Concrete Made with Calcined Clay- Limestone Cement," Cement and Concrete Research, V. 189, Mar. 2025, Article No. 107784. doi: 10.1016/j.cemconres.2025.107784
14. Nguyen, Q.D.; Afroz, S.; Zhang, Y.; Kim, T.; Li, W.; and Castel, A., "Autogenous and Total Shrinkage of Limestone Calcined Clay Cement (LC³) Concretes," Construction and Building Materials, V. 314, Part A, Jan. 2022, Article No. 125720. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2021.125720
15. Lucero, C., "Evaluating Natural Pozzolans for Mitigating Temperature Rise in Mass Concrete," Report No. 8530-2017-30, US Bureau of Reclamation, Sept. 2017.
16. Wallace, M.; Burnham, T.; and Calvert, J., 2024 MnROAD Construction Activities, Final Report NRRRA 202502, Minnesota Department of Transportation, Minneapolis, MN, June 2025, 82 pp.

Gracias a Maria Juenger, La Universidad de Texas de Austin, Austin, TX, EE.UU; Kimberly Kurtis, instituto Tecnológico de Georgia, Atlanta, GA, EE.UU; Kyle Riding, Universidad de Florida, Gainesville, FL, EE.UU; Peter Taylor, Centro Nacional de Tecnología de Pavimento de Concreto, Ames, IA, EE.UU; and Kejin Wang, Universidad del Estado de Iowa, Ames, IA, por responder estas preguntas.

Título original en inglés:
**Engineering Insights: Q&A on LC³
 and CCIL—Practical Guidance
 for Low-Clinker Cementitious
 Materials for Concrete**

**La traducción de este artículo
 correspondió al Capítulo Perú**



Traducción
**Est. Zaily Antonela
 Rodríguez Moreno**



Revisión Técnica:
**Ing. Christopher
 Joseph Nuñez
 Varillas**



CONCRETO
LATINOAMÉRICA