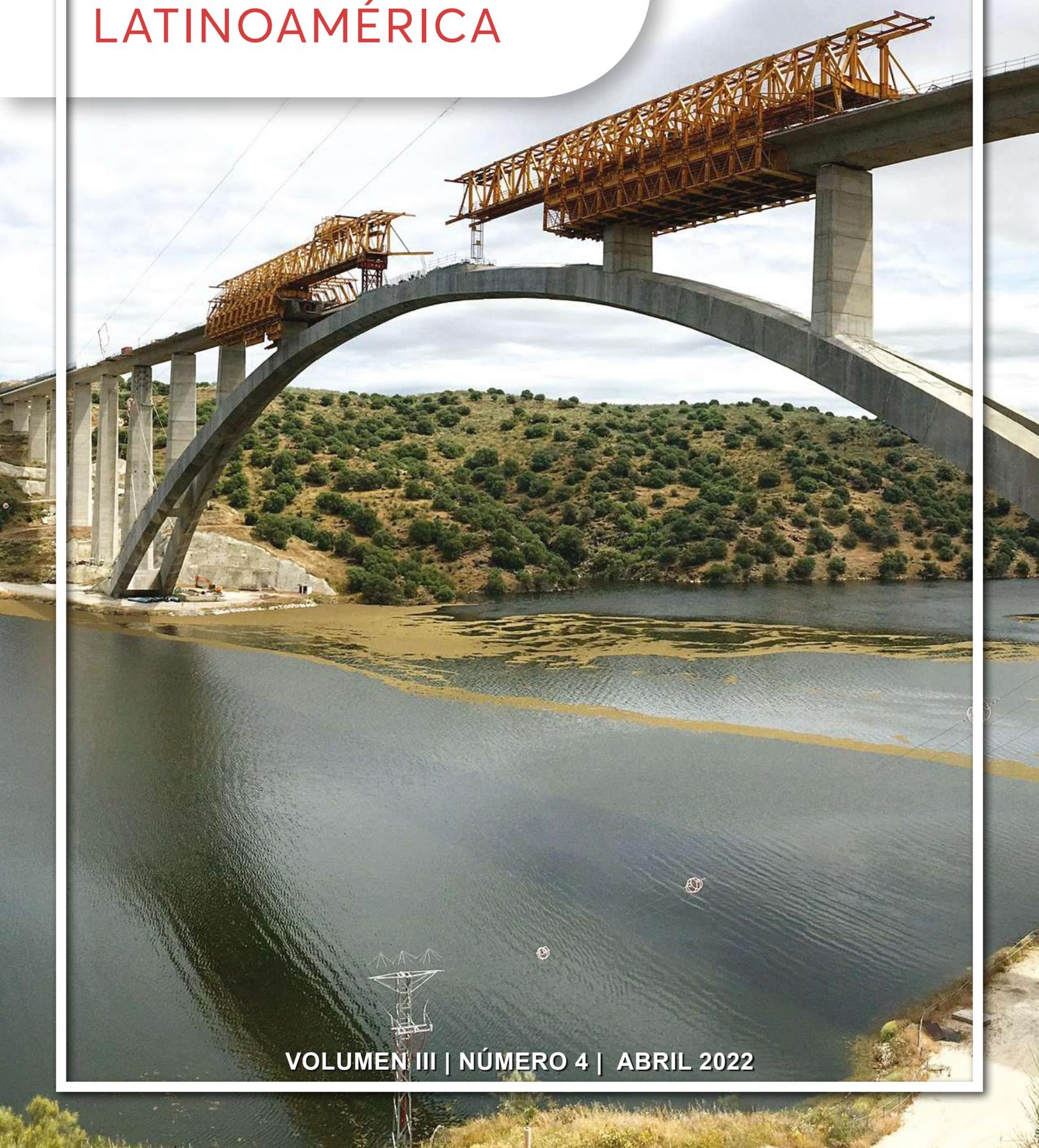


CONCRETO

LATINOAMÉRICA



VOLUMEN III | NÚMERO 4 | ABRIL 2022

CONCRETO LATINOAMÉRICA

Volumen III - Número 4
Abril de 2022

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.

CONTENIDO

Pág.

- 4** | **Presentando una nueva oportunidad de colaboración para la industria del concreto**
Traducción y revisión técnica a cargo del
Capítulo: México Sureste
- 6** | **ACI implementa una nueva ruta para postular proyectos para los premios a la excelencia en la construcción con concreto**
Traducción y revisión técnica a cargo del
Capítulo: Guatemala
- 8** | **Diseño de una membrana de cubierta para un tanque de gas natural licuado**
Traducción y revisión técnica a cargo del
Capítulo: Puerto Rico
- 10** | **Reparación de baches en asfalto con mortero cementante**
Traducción y revisión técnica a cargo del
Capítulo: Costa Rica
- 13** | **Concreto ecológico para una 3DCP sostenible**
Traducción y revisión técnica a cargo del
Capítulo: México Noreste

COMITÉ EDITORIAL:

Presidente del Comité Editorial:

Ing. Alejandro Miguel Narro Aguirre
Presidente de la Sección Noreste de México del ACI.(2020-2022)

Editor en Jefe:

Ing. José Lozano y Ruy Sánchez

Editor Asociado:

M.C. Lucio Guillermo López Yépez

Editor Técnico:

Dr. Alejandro Durán Herrera

Traducción:

Anabel Merejildo

Comité de Noticias y Eventos Concreto Latinoamérica

Ing. Jesús Fernando García Arvisu
Ing. Jesús Arturo Angel Mellado

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
LDI. Luis Yerel Romo Valdez

Diseño Gráfico:

LDI. Monserrat Treviño Garza
Alejandro Martínez Sánchez

"Agradecemos el apoyo a la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León por la colaboración en el diseño editorial".

Diseño Editorial: Comunicación e Imagen Institucional FIC-UANL

Cualquier asunto relacionado con la publicación contactarse a :

Correo: concretolatam@gmail.com

Tel: +52 81 2146 4907

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 Abril del 2022. 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.

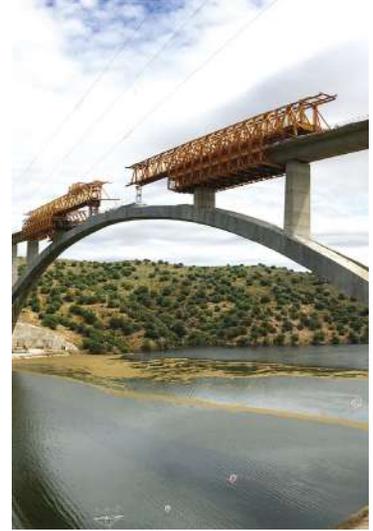
Representantes de los Capítulos ACI de Latinoamérica:

Argentina
Colombia

Costa Rica
Ecuador Centro y Sur
Guatemala

México Noreste
México Noroeste
México Centro y Sur
México Sureste
Panamá
Perú
Puerto Rico

Dr. Raúl Bertero
Dra. Nancy Torres Castellanos
Dr. Fabían Lamus Báez
Ing. Minor Murillo Chacón
Ing. MSc. Santiago Vélez Guayasamín
Ing. Luis Alvarez Valencia
Ing. Xiomara Sapón Roldán
Ing. Alejandro M. Narro Aguirre
Ing. Jesús Fernando Garcia Arvizu
Arq. Arturo Rodriguez Jalili
Mtro. Josph Eli Mandujano Zavala
Ing. Jorge L. Quiróz
Ing. Luciano López Vinatea
Ing. Anabel N. Merejildo



El Viaducto sobre el Río Almonte, en España, fue el primer lugar absoluto en los Reconocimientos a la Excelencia en Construcción con Concreto correspondientes al año 2018. Viaducto ferroviario de alta velocidad (350 km/hr) en la línea que une Madrid con Extremadura en el poniente de España cerca de la frontera con Portugal. El puente salva el paso sobre el río Almonte con una longitud de 996 m de viaducto y un arco de 384 m de claro. Para su construcción se utilizaron concretos de alto desempeño de 80 MPa y un singular sistema de erección de los prefabricados. En su momento (2018) era el puente ferroviario más largo de España y el más largo a nivel mundial para trenes de alta velocidad. (Para más información consultar Revista Concrete International en su número de Noviembre de 2018)



¡Únete Hoy!
Conoce tu capítulo
local ACI

300+ Capítulos profesionales
y estudiantiles
www.concrete.org/chapters



American Concrete Institute
Always advancing

Presentando una nueva oportunidad de colaboración para la industria del concreto

Memorandum del Vicepresidente Ejecutivo

Por Ronald G. Burg



Ronald G. Burg
Vicepresidente Ejecutivo ACI

A lo largo de la vasta historia de ACI, el instituto ha cumplido su visión de brindar a todos el conocimiento necesario para usar el concreto de manera efectiva para satisfacer las demandas de un mundo cambiante de muchas maneras. Algunos ejemplos notables incluyen el desarrollo, la difusión y la adopción de códigos de construcción de ACI que garanticen al público estructuras de concreto seguras y duraderas así como también, programas de certificación de ACI que evalúen la competencia de las inspecciones de concreto y las personas capacitadas para proporcionar una infraestructura de concreto de calidad.

Uno de los mayores desafíos que enfrenta el mundo hoy en día es el calentamiento global debido a los gases de efecto invernadero. De acuerdo a ciertos estudios, la industria del concreto es responsable de aproximadamente el 7% de los gases de efecto invernadero a nivel mundial. Es por eso, el concreto debe desempeñar un papel importante en un futuro sostenible. De acuerdo con esta visión, ACI se encuentra en una posición única para asumir este desafío, en consonancia con la meta del instituto de «Always Advancing» ha habido un desarrollo muy significativo aprobado por la junta directiva de ACI para Concreto Carbono Neutral que se dará a conocer como el Centro NEU.

Con el posicionamiento de ACI como una institución de desarrollo de estándares y una de las fuentes más grandes del mundo de información basada en consenso, códigos y estándares en todas las facetas de la construcción con concreto, un centro de excelencia de ACI está en una posición única para brindar acceso a las tecnologías y el conocimiento necesario para producir y colocar de forma segura el concreto neutro en carbono en el entorno ya construido.



El centro NEU se encuentra ya en operación con Andrea Schokker como su directora ejecutiva. Schokker es una experta líder en temas concretos de sustentabilidad y en el desarrollo de estándares de ACI. Además, pronto se agregará un director técnico y otro personal de apoyo. La visión adoptada por el centro NEU es una industria del concreto en la que todas las partes interesadas tienen acceso a las tecnologías y los conocimientos necesarios para producir y colocar concreto así como productos de concreto sin emisiones de carbono en el entorno construido de manera eficaz y segura. La visión está respaldada por una misión de colaborar globalmente

para impulsar la investigación, la educación, la concientización y la adopción de materiales y tecnologías neutrales en carbono.

El Centro NEU comenzará implementar acciones específicas a partir de mapas de ruta existentes en la industria, buscando efectuar los cambios necesarios en sectores específicos del entorno construido. Otro compromiso será comenzar a trabajar con socios en todo el mundo para desarrollar un plan integral para hacer que la industria del concreto sea neutral en carbono para el 2050. Dentro de estos objetivos generales, varias posibles actividades de implementación (funciones centrales) incluyen:

- Aceleración de la tecnología: el Centro NEU será una puerta de entrada para las nuevas tecnologías que ingresan a la industria y dirigen los recursos necesarios para acelerar su adopción;
- Coordinación con los comités de ACI: los comités técnicos y educativos de ACI son reconocidos mundialmente como un recurso para obtener información de consenso imparcial sobre temas relacionados con el concreto. Según corresponda, el Centro NEU apoyará las actividades de estos comités y ayudará en la difusión y adopción de los recursos del comité;
- Transferencia de tecnología y desarrollo profesional: el Centro NEU hará de esto un enfoque clave. Se reconoce ampliamente que un obstáculo importante para la implementación es ganar conciencia y obtener la aceptación de quienes están en la industria y están entrando en ella;
- Evaluación y validación de tecnología: una función importante y de lanzamiento temprano del Centro NEU servirá como recurso de la industria para evaluar tecnologías de reducción de carbono;

- Abogacía y apoyo técnico: el Centro NEU, en colaboración con el personal de Abogacía del código de ACI, trabajará para que las autoridades y jurisdicciones de los códigos modelo adopten requisitos consensuados de carbono neutral en todo el mundo;

- Alcance internacional y estudiantil: el Centro NEU aprovechará las relaciones de ACI con su extensa red de socios internacionales, capítulos de ACI y miembros estudiantes de ACI para lograr sus objetivos. Empoderar y motivar a la próxima generación de ingenieros y tecnólogos para que participen activamente y apoyen los esfuerzos de descarbonización será un esfuerzo crucial del Centro NEU.

Los objetivos del Centro NEU son elevados y requieren la colaboración y el compromiso de toda la industria del concreto para cambiar la cultura de la industria y lograr sus objetivos. Con este fin, el Centro NRU tendrá abierta su membresía a productores de cemento y concreto, fabricantes de productos de concreto, proveedores de materiales, desarrolladores y propietarios, arquitectos e ingenieros, contratistas, organizaciones de desarrollo de estándares, instituciones educativas y agencias de especificaciones; en resumen, cualquier persona interesada en hacer del concreto una solución neutra en carbono y respetuosa con el medio ambiente para satisfacer las necesidades del mundo.

Para obtener más información sobre NEU: Un Centro de Excelencia de ACI para Concreto Carbono Neutral, visite www.neuconcrete.org.
Ronald G. Burg, PE
Instituto Americano del Concreto.

La traducción de este artículo correspondió al Capítulo de México Sureste

Título: Presentando una nueva oportunidad de colaboración para la industria del concreto



Traductor: Mtro. Josseph Eli Mandujano Zavala



Revisor Técnico: M.I. Arturo Gaytan Covarrubias

ACI implementa una nueva ruta para postular proyectos para los premios a la excelencia en la construcción con concreto

El Programa de Premios a la Excelencia en la Construcción con Concreto del American Concrete Institute (ACI) llega a su octavo aniversario. En adición a la nominación de un proyecto a través de los capítulos ACI locales o socios internacionales, se ha anunciado una nueva opción de auto nominación, haciendo más fácil para las empresas u organizaciones el obtener reconocimiento por su trabajo.

Ganar un premio en su industria puede ser valioso para una organización de muchas maneras. Obtener el reconocimiento de un tercero de confianza genera credibilidad. Una “victoria” o una mención de honor dará lugar a exposición en los anuncios de los medios de prensa de la industria, ayudando a crear conciencia sobre la organización y posicionarla como líder en la industria. Los beneficios se trasladan mas allá del valor de la publicidad. Presentar un proyecto para consideración a una organización que tiene una concentración de los expertos de la industria pueden iniciar una conversación que proporcione valiosos comentarios técnicos. La publicidad para los clientes de una empresa y su proyecto pueden potenciar el desarrollo de negocios. Finalmente, la visibilidad que viene con ganar un premio puede mejorar la moral y la permanencia de los empleados, así como como ayudar en el reclutamiento.

El Programa de Premios a la Excelencia en la Construcción en Concreto del American Concrete Institute (ACI) reconoce proyectos que exhiben innovación y complejidad, así como mostrar el valor que el concreto proporciona como material. ACI es una autoridad líder y un recurso en todo el mundo para el desarrollo, difusión y adopción de sus normas basadas en el consenso sobre el concreto. ACI también ofrece recursos técnicos, oportunidades educativas y de capacitación, así como programas de certificación. En un mercado global donde las demandas económicas, ambientales y estéticas están evolucionando rápidamente, los Premios a la Excelencia de ACI promueven el crecimiento de la industria del concreto fomentando soluciones creativas en la construcción y el uso de nuevas tecnologías. El programa ha crecido constantemente en los 8 años desde que fue presentado, experimentando un aumento en las postulaciones de proyectos, expansión del panel de jueces, y un aumento de oportunidades para premios locales.

El programa de los premios ACI a la Excelencia en la Construcción con Concreto incluye siete categorías:

- Estructuras de poca altura (hasta tres pisos);
- Estructuras de mediana altura (de cuatro a 15 pisos);
- Estructuras de gran altura (más de 15 pisos);
- Infraestructura
- Reparación y Restauración;
- Concreto Decorativo; y
- Encofrado

Cada año, se declaran ganadores del primer y segundo lugar en cada una de las siete categorías, y un proyecto seleccionado para recibir el Premio a la Excelencia General. Se anuncian los ganadores en una gala anual de premios que tiene lugar en la Convención del Concreto ACI de otoño. Los jueces del programa de premios a la Excelencia en Construcción con Concreto son profesionales independientes de la industria, que tienen experiencia técnica en cada categoría de los premios, así como experiencia en proyectos nacionales e internacionales.

Cómo nominar un proyecto para un premio ACI a la Excelencia en la Construcción con Concreto

Este año, ACI está introduciendo una nueva ruta para la nominación de proyectos. Históricamente, la red de capítulos ACI y los socios internacionales han asumido la responsabilidad de la presentación de proyectos, y esta sigue siendo una excelente vía para la nominación de proyectos. Cualquier proyecto en concreto que haya ganado un premio ACI de Capítulo Local se considera automáticamente para los Premios ACI a la Excelencia. Otros proyectos también pueden ser nominados por funcionarios de un capítulo ACI o un socio internacional de ACI. Para empresas u organizaciones que no tienen un capítulo ACI o programa de premios para socios disponible en su área, la auto nominación es una nueva oportunidad. Para esta opción, se solicita una cuota de nominación de US\$500 no reembolsables. Esta tarifa ayuda a cubrir gastos administrativos y permite que el programa continúe creciendo.

Los proyectos nominados deben ser de una construcción nueva, finalizada sustancialmente dentro de los 36 meses siguientes a la fecha límite de presentación. Los requisitos incluyen:

1. Una descripción del proyecto (300 palabras o menos) que ayude a los jueces en sus deliberaciones, la cual se utiliza en el programa y materiales de comunicación.

2. Una descripción de cómo se utilizó el concreto en el proyecto (500 palabras o menos). Esta parte de la solicitud debe abordar lo que hace que el proyecto sea único o complejo.

“La opción de auto nominarse es una maravillosa mejora del programa de premios, asegurando el reconocimiento de lo mejor que hay por ahí”, dijo Michael J. Paul, ex presidente del Comité de Premios a Proyectos Internacionales (IPAC).

Las inscripciones para los Premios a la Excelencia en Concreto ACI 2022 vencen el viernes 29 de abril de 2022. Para auto nominar un proyecto, visite www.concrete.org/aboutaci/honorsandawards/awards/projectawards.aspx. Se realizará la gala de entrega de premios, con el anuncio de los ganadores durante la Convención de Concreto de ACI de otoño en Dallas, TX, EE. UU., el lunes 24 de octubre de 2022.

La traducción de este artículo correspondió al Capítulo de Guatemala

Título: ACI implementa una nueva ruta para postular proyectos para los premios a la excelencia en la construcción con concreto



Traductor y Revisor Técnico:
Ing. Kenneth Alejandro Molina

Diseño de una membrana de cubierta para un tanque de gas natural licuado

P

El Código ACI 376-11¹ aparenta contener una información contradictoria con respecto al diseño de una membrana de cubierta completa para un tanque de contención. La Sección 8.5.3 establece: "El diseño de una cubierta incluye la membrana de cubierta como una parte integral de la resistencia de la cubierta." Esto parece requerir que la cubierta sea diseñada como una estructura de placa compuesta de acero y concreto, puesto que la Sección 8.5.4 provee un espaciamiento mínimo de amarres o pernos para el diseño del miembro compuesto. Por otra parte, la Sección 8.1.1 sugiere que la membrana no tiene que ser compuesta, y la Sección 9.8.4 claramente permite el uso de una membrana o de un recubrimiento en la cubierta. La Sección de Comentarios R9.8.4 expande sobre como la membrana podría ser utilizada como encofrado y/o servir como compuesto, implicando que no es un requisito que la estructura sea compuesta. La Sección de Comentarios R8.5.2 refiere al diseñador al ACI 350-06², pero la sección de Comentarios de la Sección R1.1.7.2 refiere los requisitos de diseños de recubiertas compuestas al ANSI/ASCE 3-91³. ¿Es permitido diseñar una membrana para un domo en acero (apoyado por un pórtico en acero) como una estructura independiente que resista todas las cargas aplicables de diseño, funja como encofrado y provea una barrera de vapor durante la operación, pero que no sea estructuralmente compuesto con la cubierta en concreto?

R

La Sección 8.5.3 del ACI 376-11 requiere que la membrana sea diseñada como parte integral de la cubierta, pero no especifica si la cubierta debe ser compuesta o no. Por tanto, la contestación directa a la solicitud de clasificación es: Si, es permisible diseñar una membrana de cubierta para un domo de acero (apoyada en un pórtico de acero) estructuralmente independiente que sea capaz de resistir las cargas de diseño, fungiendo de encofrado y que provea una barrera de vapor durante su operación que no sea estructuralmente compuesta con la cubierta de concreto.

En adición, una cubierta de concreto no es mandatorio para un sistema de contención completo. Por otra parte, se

torna un requisito cuando es: (a) especificado, (b) un requisito reglamentario, o (c) es requisito de diseño, de ordinario como un medio para resistir explosiones, impactos o cargas de fuego.

Referencias

1. ACI Committee 376, "Code Requirements for Design and Construction of Concrete Structures for the Containment of Refrigerated Liquefied Gases (ACI 376-11) and Commentary," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2013, 149 pp.
2. ACI Committee 350, "Code Requirements for Environmental Engineering Concrete Structures (ACI 350-06) and Commentary," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2006, 485 pp.
3. ANSI/ASCE 3-91, "Standard for the Structural Design of Composite Slabs," American Society of Civil Engineers, New York, NY, 1994.

Agradecemos al Comité de la ACI 376, Concrete Structures for Refrigerated Liquefied Gas Containment, por proveer la respuesta a esta interrogante.

P

Somos subcontratistas en un proyecto en el cual somos responsables por las pruebas de resistencia en compresión mediante probetas cilíndricas de concreto. Las notas en la hoja de portada de los dibujos estructurales incluyen la siguiente cita: “Las probetas cilíndricas de concreto se deben tomar según delineado en el ACI 301-20”. ¿Acaso el ACI 301-20 provee requisitos para la confección de las probetas cilíndricas de concreto para pruebas de resistencia en compresión?

R

No, el ACI 301-20 no provee detalles sobre la confección y preparación de probetas cilíndricas de concreto. Sin embargo, refiere a las agencias de ensayos a los estándares de ASTM International sobre como tomar, curar y ensayar las probetas de concreto. Por ejemplo, la Sección 1.7.3.3(e) establece que las probetas para ensayos se deben preparar y curar según el ASTM C31/C31M-19, “Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Field”. A este mismo estándar se hace referencia en la Sección 2.3.4.1 para moldear las probetas usadas para evaluar la resistencia en campo antes de remover el encofrado.

En cuanto al desempeño y los requisitos de diseño, la Sección 4.2.2.7(a) establece que la resistencia en compresión se mide usando probetas cilíndricas hechas de la misma muestra de concreto, obtenidas en el punto de descarga según el ASTM C172/C172M-17, “Standard Practice for Sampling Freshly Mixed Concrete”,

manejado y curado según el ASTM C31/C31M-19, y ensayado según el ASTM C39/C39M, “Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens”.

Referencias

1. ACI Committee 301, “Specifications for Concrete Construction (ACI 301-20),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2020, 69 pp.

Nota: Información adicional sobre los estándares de ASTM discutidos en este artículo se encuentra en www.astm.org.

La traducción de este artículo correspondió al Capítulo de Puerto Rico

Título: Diseño de una membrana de cubierta para un tanque de gas natural licuado



Traductor:
Ing. Ángel E. Cintrón Jiménez



Revisor Técnico:
Anabel N. Merejildo

Reparación de baches en asfalto con mortero cementante

Nuevo material que se adhiere bien al asfalto y al concreto

por Paul Sampson

Se estima que alrededor del 27% de las principales vías urbanas de los Estados Unidos están en malas condiciones, y los pavimentos deficientes causan casi \$400 en daños por vehículo por año.¹

El mal estado de las carreteras también conduce a costos estimados de \$78 mil millones por año para las empresas debido a retrasos, combustible desperdiciado y horas de trabajo perdidas.² Además, el Instituto Pacífico de Investigación y Evaluación (Pacific Institute for Research and Evaluation) estima que más de 20 000 muertes en carretera por año son causadas por defectos en las carreteras.³

Las reparaciones de baches de concreto son mucho más duraderas cuando se utilizan morteros cementantes de reparación que cumplen con la norma ASTM C928/C928M, “Especificación estándar para productos empacados, secos y de endurecimiento rápido de Materiales Cementantes para Reparaciones de Concreto”. Sin embargo, alrededor del 94% de las superficies de las carreteras en los Estados Unidos son de asfalto,⁴ y los materiales a base de cemento portland no se adhieren adecuadamente al asfalto sin riego de liga o imprimación. La tecnología de reparación patentada X-PHALT™, desarrollada por K&S Materials LLC, Middletown, DE, Estados Unidos, está eliminando ese problema para los baches en asfalto.

Según el presupuesto reciente del gobierno federal de Estados Unidos para la industria del cemento, se gastan \$18 mil millones anuales para reparación de infraestructura, de los cuales el 19% se gasta en carreteras (Figura 1).⁵ Además, los sitios comerciales e industriales necesitan reparaciones de la superficie de las carreteras. Se espera que estas cantidades aumenten significativamente con el proyecto de ley de infraestructura recientemente aprobado.

Reparación de asfalto convencional

Actualmente, los dos tipos de producto más comunes para reparar el asfalto son el parche frío y la mezcla caliente. El parche frío es rápido de aplicar y tiene un bajo costo de material, pero tiene muy baja durabilidad, y esto se traduce en una vida de esperanza media inferior a 1 año. Las reparaciones con mezcla en caliente se aplican como superficies recién pavimentadas, que requieren el uso de equipos pesados en el sitio. Por lo tanto, el costo de la aplicación es significativamente más alto, por lo que la mezcla en caliente se usa típicamente para la reparación de superficies grandes.

Una estimación del costo de la reparación de baches con parche frío es entre \$35 y \$50,⁶ sin contar los costos de movilización. Otra estimación indica que el costo de una reparación de un bache con mezcla en caliente es de \$80 a \$118/ft² (\$861 a \$1270/m²) (incluido el control del tráfico y cuadrillas

de instalación) dependiendo del grado de preparación requerido de la superficie.⁶ (Nota: los valores de USD en el 2013 de la Referencia 6 se convirtieron a valores de USD en el 2021).



Figura.1: Segmentos del mercado de la reparación del concreto en Estados Unidos (de la referencia 5).



Figura.2: Una capa de X-PHALT sobre asfalto. La muestra fue sometida a flexión y se fracturó sin mostrar delaminación.

Nueva tecnología X-PHALT

X-PHALT une a los morteros cementantes con los grupos de carbonilo del bitumen en los pavimentos asfálticos, formando así una adherencia química sin el uso de polímeros, riego de liga, solventes o riego de imprimación. La Figura 2 ilustra una fractura monolítica de una capa de X-PHALT sobre asfalto sometido a un fuerte impacto perpendicular a la interfase. La Figura 3 ilustra el 100% de material extraído al someter a cortante la muestra reparada a lo largo del plano de la interfaz y ninguna superficie original de la interfaz quedó expuesta. Más bien, hubo extracción de cemento o bitumen (asfalto), lo que indica que la resistencia a la adherencia es mayor que la resistencia a la tracción de cada capa de material.



Figura.3: Reparación de asfalto con X-PHALT. La muestra fue sometida a cortante en la interfaz, exhibiendo falla por extracción, lo que indica buena adherencia.

Durabilidad de la reparación

Los materiales de reparación asfáltica pueden exhibir surcos, deformación, abrasión y extracción. Además, las reparaciones compactadas inadecuadamente, crean superficies rugosas en las carreteras. Según una investigación de la Universidad Nacional de Singapur,⁷ cualquier diferencia de altura mayor que 1/4 pulg. (6 mm) crea un aumento significativo en el riesgo de derrape debido a la disminución del área de contacto entre los neumáticos y la superficie de la carretera. Los resultados son la pérdida de control total y mayores distancias de frenado en carreteras rugosas. Usar el material de reparación de mortero cementante permite a los trabajadores emparejar de manera más precisa la superficie de la carretera circundante para crear una reparación más duradera y segura.



Figura.4: Reparación de X-PHALT después de 2 años de servicio: (a) Junta longitudinal de construcción; y (b) baches

Aplicación X-PHALT

X-PHALT está actualmente disponible en 1 hora y 2 horas en sus versiones de regreso al servicio; el primero proporciona de 5 a 10 minutos de tiempo de trabajo y el último proporciona unos 30 minutos de tiempo de trabajo. Las ubicaciones de prueba se han sometido a más de 2 años de evaluación sin signos de deterioro (Figura 4). X-PHALT incorpora subproductos industriales, no provoca quemaduras de piel por álcali, se limpia con agua, es estable a los rayos UV y no contiene compuestos orgánicos volátiles ni cloruros. Se mezcla y se coloca como los morteros tradicionales a base de cemento, y no se necesita entrenamiento o equipo especial. Cualquier bache en concreto o asfalto que tiene una base estable se puede reparar después de que el área de reparación se limpia de material degradado que podría causar agrietamiento reflexivo.

Información adicional está disponible en <http://kandsmateriales.com/xphalt>.

Referencias

1. "The Pothole Facts," Pothole.Info, www.pothole.info/the-facts/, accessed Feb. 10, 2022.
2. "Report of the National Surface Transportation Policy and Revenue Study Commission: Transportation for Tomorrow," National Surface Transportation Policy and Revenue Study Commission, Washington, DC, Dec. 2007, 260 pp.
3. "On a Crash Course: The Dangers and Health Costs of Deficient Roadways," InfrastructureUSA, Oct. 6, 2009, <https://www.infrastructureusa.org/on-a-crash-course-the-dangers-and-health-costs-of-deficient-roadways/>, accessed Feb 10, 2022.
4. Buncher, M., "What Percentage of Our Roads Are Asphalt?" Asphalt Magazine, <http://asphaltmagazine.com/94percent/>, accessed Feb. 10, 2022.

5. "Concrete Repair, Protection and Restoration Industry," Adhesives Technology Corporation, <https://atcepoxy.com/the-concrete-repairindustry/>, accessed Feb. 10, 2022.

6. "How Much Does It Cost to Fix a Pothole?" SealMaster®, <https://sealmaster.net/faq/much-cost-fix-pothole/>, accessed Feb. 10, 2022.

7. Chu, L.; Fwa, T.F.; and Ong, G.P., "Evaluating Hydroplaning Potential of Rutted Highway Pavements," Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies, V. 11, 2015, pp. 1613-1622.

Nota: se puede encontrar información adicional sobre la norma ASTM discutida en este artículo en www.astm.org.



Paul Sampson, tiene más de 35 años de experiencia en materiales industriales. Es el inventor de patentes emitidas y pendientes de tecnología X-PHALT, y co-inventor de patentes para la purificación de cementos a base de arcilla atapulgitica y cenizas volantes. Ha manejado laboratorios de investigación y desarrollo para el grupo de resinas epóxicas de Ciba-Geigy (ahora Huntsman Chemical), ICI Acrylics (ahora Ineos Acrylics/Lucite) y Ceratech Inc. (cementos de alto desempeño). Además, fue responsable de el servicio técnico de varias líneas de productos en Norte América, América del Sur y los países asiáticos de la cuenca del Pacífico. Diseñó y puso en marcha las instalaciones para un nuevo tratamiento superficial de minerales con una capacidad de 5000 toneladas por año. Sampson recibió su Bachiller en ingeniería química de la Universidad Politécnica de la Universidad de Nueva York, Brooklyn, NY, Estados Unidos, y su maestría en ingeniería química de Manhattan College, Riverdale, NY.

La traducción de este artículo correspondió al Capítulo ACI Estudiantil de Costa Rica

Título: Reparación de baches en asfalto con mortero cementante



Traductora:
Vivian Pamela Calvo Morales



Revisor Técnico:
Ing. Guillermo González Beltrán

Concreto ecológico para una 3DCP sostenible

Desarrollo de un diseño de mezcla sostenible

por Wilson Ricardo Leal da Silva y Martin Kaasgaard

El número de proyectos a gran escala que presentan el uso de la impresión tridimensional de concreto (3DCP, por sus siglas en inglés) basada en la extrusión como tecnología de construcción tuvo un fuerte aumento en 2020 y 2021. Entre los ejemplos más notables se encuentran edificios de apartamentos y residencias en Canadá, Alemania, Malawi y los Países Bajos.¹⁻⁴ Independientemente de qué empresa (o asociación) 3DCP participe en estos proyectos, se pueden identificar algunas características comunes entre ellos:

- La tecnología 3DCP basada en la extrusión es la más extendida cuando se trata de la fabricación digital a gran escala (concretamente, en el mercado residencial);
- La tecnología 3DCP se utiliza principalmente para imprimir el contorno (paredes huecas/cubiertas) del edificio, seguido de procesos complementarios como la fundición y la inclusión de refuerzos, y
- Los morteros secos (con agregados de hasta 4 mm [0.16 pulg.]) siguen siendo la principal materia prima utilizada en el proceso.



Figura.1. Transformación del mortero en concreto para hacer posible una 3DCP sostenible a gran escala utilizando concreto ecológico (Nota: 1 mm = 0.04 pulg.)

Si bien se afirma que la combinación de estas características ofrece una solución robusta, rentable y sostenible en comparación con la construcción convencional, el tema de la “sostenibilidad” en la 3DCP sigue siendo objeto de debate y, hasta la fecha, sólo un pequeño número de estudios ofrece una perspectiva completa sobre los aspectos de sostenibilidad de la 3DCP⁵⁻⁹.

La mayor parte de estas publicaciones destacan que el impacto del proceso de fabricación digital es más bien irrelevante si se compara con el impacto de la fabricación de materiales. En otras palabras, suele entenderse que las aplicaciones de fabricación digital que ayudan a reducir el consumo de materiales generan un menor impacto medioambiental global en comparación con los métodos constructivos convencionales, especialmente en la producción de elementos complejos.

El camino hacia una mayor sostenibilidad de la 3DCP en las aplicaciones a gran escala incluye varios aspectos que van desde el diseño hasta la fase de construcción y desde los materiales hasta la maquinaria. Uno de ellos --el objetivo principal de este artículo-- es la ampliación de los componentes sólidos (Figura 1), ya que la cantidad y el tipo de material son factores clave que inciden en el impacto ambiental al producir un elemento por ejemplo, un muro.⁹ Por lo tanto, es necesario seguir estudiando las mezclas de 3DCP que incorporan fracciones de agregados de gran tamaño (similares a las del concreto convencional) para lograr una materia prima con menor energía incorporada desde el principio, y más aún para impulsar el desarrollo de composiciones de 3DCP menos complejas pero más robustas.

Aunque los morteros de 3DCP son cada vez más esbeltos, presentando menores contenidos de cemento y mayores volúmenes de materiales cementantes suplementarios (SCM), y prosperando en su aplicación específica (por ejemplo, elementos arquitectónicos, muebles y elementos urbanos), el paso del mortero al concreto es una solución racional no sólo desde el punto de vista de la sostenibilidad, sino también desde la perspectiva de su costo.

Esto se debe a que los agregados de gran tamaño son los componentes más baratos (en cuanto a costo y a emisiones de CO₂) del concreto. Específicamente, las emisiones de CO₂ asociadas a los agregados de gran tamaño corresponden a alrededor de 1/100 a 1/150 de aquellas del típico cemento portland ordinario (CPO) como el CEM I.¹⁰ Además, los morteros secos son sistemas inherentemente complejos que comprenden varias adiciones y aditivos que pueden no estar disponibles en todos los mercados. Algunas de las composiciones utilizadas hoy en día contienen hasta 15 o 20 ingredientes en su formulación final, de ahí su elevado precio en comparación con el concreto. Por último, el material utilizado en el proceso de impresión tiene que ser rentable en comparación con el concreto convencional producido localmente en una planta de concreto premezclado (RMC, por sus siglas en inglés). Esto último, combinado con aspectos como soluciones para el refuerzo, guías de diseño estructural y normas técnicas, es primordial para permitir el uso generalizado de la 3DCP en el sector de la construcción.

Uno de los aspectos adicionales que hay que tener en cuenta es que la manipulación de las mezclas de concreto de forma controlada, que es fundamental en la 3DCP, impone mayores desafíos al proceso.^{6,11} A medida que el material aumenta, también lo hacen todos los componentes del equipo utilizados para transportar y colocar el concreto a través de una boquilla de extrusión. Esto significa que hay que mover mayores masas en tres dimensiones en el sitio de construcción, lo que conlleva un mayor gasto de energía para operar el sistema. Además, las partículas más grandes que fluyen a través del sistema de bombeo provocarán un mayor desgaste de los equipos, lo que supondrá un aumento de los gastos de sustitución de las piezas desgastadas y la superación del tiempo de inactividad del proceso. Resulta bastante difícil comprender de inmediato el costo relacionado con ello. Un buen ejemplo de este tipo de análisis, especialmente cuando se trata de los potenciales técnicos, económicos y ambientales en la 3DCP, se puede encontrar en la Referencia 1. Como señala este trabajo, a diferencia de los

métodos de construcción convencionales, los costos económicos y ambientales de la 3DCP son independientes de la complejidad de la forma del producto final.

La presentación de un análisis de costos tan exhaustivo está fuera del alcance de este artículo. Nos centramos únicamente en los costos y beneficios ambientales del paso del mortero al concreto en la 3DCP basada en la extrusión. Para ello, el Instituto Tecnológico de Dinamarca está trabajando en el desarrollo de un enfoque de diseño de mezclas de 3DCP sostenible utilizando cementos mezclados y agregados de gran tamaño (hasta 8 mm [0,30 pulg.]). Este desarrollo forma parte del proyecto “Estructuras de Concreto de Nueva Generación Impresas en 3D” (N3XTCON, por sus siglas en inglés),¹¹ cuyo objetivo es desarrollar tecnologías que lleven a la 3DCP a una escala industrial, con un claro enfoque en la sostenibilidad, así como en el diseño estructural y arquitectónico.

Dentro de una amplia gama de cementos mezclados disponibles en el mercado, el equipo de N3XTCON optó por trabajar con un nuevo material de cemento producido por Cementir Holding, etiquetado como FutureCEM® Cemento CEM II/B-M (Q-LL) 52,5 N, que es un cemento de caliza y arcilla calcinada. Este cemento está siendo evaluado para producir una solución de concreto ecológico y de baja huella de CO₂ para la 3DCP. Aquí:

- Revisaremos los aspectos generales del enfoque de diseño de mezcla 3DCP y las mezclas analizadas hasta el momento;
- Presentaremos un análisis comparativo con morteros de referencia y mezclas de concreto producidas con CEM I; y
- Arrojaemos luz sobre los beneficios ambientales que se derivan del paso del material de mortero a concreto.

Enfoque de diseño de mezcla N3XTCON

La premisa básica de nuestra estrategia de diseño de mezclas de concreto ecológico es desarrollar un concreto bombeable y extruible tomando como referencialos protocolos existentes de diseño de mezclas,¹² así como utilizar métodos pragmáticos de prueba de concreto que sean fáciles de implementar en el sitio. La propuesta

de diseño de la mezcla N3XTCON se centra en tres aspectos: sostenibilidad, control reológico y el control de la acumulación estructural. La primera iteración del enfoque el enfoque se describe a continuación.

Sostenibilidad

En primer lugar, la sostenibilidad es la columna vertebral de nuestro diseño de mezcla; en otras palabras, el contenido de cemento de una mezcla 3DCP óptima debe minimizar la huella de carbono global del concreto. Algunos de los parámetros considerados en el diseño de una mezcla 3DCP ecológica incluyen los objetivos de resistencia a la compresión, la curva granulométrica de los agregados, la densidad de empaquetamiento de las partículas, la forma de los agregados, la relación volumétrica del mortero, la composición del aglutinante y el revenimiento del concreto.

En la actualidad, hemos limitado el tamaño máximo de las partículas de los agregados a 8 mm. Es evidente que los parámetros de diseño de la mezcla deben estar relacionados con la configuración de la extrusión. Los indicadores relevantes son:

- La relación entre el tamaño máximo de las partículas y la dimensión mínima de la boquilla de extrusión ($\alpha_1 = \varnothing_{\max} / b_{\text{boquilla}}$); y
- La fracción de volumen de los agregados de gran tamaño ($\alpha_2 = V_{\text{agregados de gran tamaño}} / V_{\text{concreto}}$), donde los agregados de gran tamaño se consideran generalmente mayores de 4 mm y como la fracción de tamaño de partícula que distingue a un mortero de un concreto.

Las mezclas de concreto analizadas hasta ahora tienen una $\alpha_1 < 23\%$ y una $\alpha_2 < 26\%$. Hay que tener en cuenta que α_1 también debe considerarse un factor limitante. Puede calcularse basándose en la distribución granulométrica de los agregados disponibles localmente.

También realizamos pruebas complementarias para desarrollar recomendaciones sólidas para la industria en cuanto a parámetros como la densidad de empaquetamiento de las partículas,

la relación volumétrica del mortero y α_1 y α_2 . Hay que tener en cuenta que los resultados presentados en este artículo corresponden a los desarrollos realizados hasta el momento, por lo que deben considerarse como un “trabajo en curso”. Una vez que nuestro desarrollo haya finalizado, el proyecto N3XTCON estará un paso más cerca de ofrecer un protocolo completo de diseño de mezclas de concreto ecológico que pueda ser replicado por aquellos interesados en desarrollar mezclas 3DCP sostenibles utilizando materiales disponibles localmente.

Dado que el CPO se asocia con altas emisiones de CO_2 ¹⁰, la composición del aglutinante juega un papel clave en la huella de carbono global del concreto. Por lo tanto, de forma similar a lo que ya se utiliza en la tecnología del concreto convencional, hicimos uso tanto de cementos mezclados (en nuestro caso FutureCEM) como de SCM. La Declaración Ambiental de Producto (EPD, por sus siglas en inglés) de FutureCEM muestra que su emisión de CO_2 es de alrededor de 600 kg de CO_2 /tonelada de cemento (1200 lb/tonelada),¹³ que es un 30% menor que la del cemento Aalborg Portland RAPID® CEM I 52.5N (LA) y alrededor de un 45% menor que la del cemento Aalborg White® CEM I 52.5 R SR5.^{14,15} Estos aglutinantes figuran como referencias porque ya fueron probados en diferentes ensayos 3DCP en el Instituto Tecnológico Danés en el marco del proyecto N3XTCON.

Hasta ahora, el procedimiento desarrollado es el siguiente. Una vez que se propone un diseño de mezcla, se realizan pruebas a pequeña escala con lotes de concreto de 7 a 10 L (0.25 a 0.35 pies³) para verificar la consistencia del concreto mediante pruebas de revenimiento. El revenimiento objetivo se sitúa entre 130 y 220 mm (5.0 a 8.75 pulg.) para conseguir un concreto bombeable y extruible. La consistencia del concreto se ajusta principalmente por medio de aditivos reductores de agua (WRA, por sus siglas en inglés) y a través de modificaciones en la composición del aglutinante (es decir, la proporción del CPO y de los SCM). La relación volumétrica del mortero también sirve para ajustar la consistencia del concreto, si la relación agua-materiales cementantes (a/mc) y el contenido de agregados se mantienen constantes. A partir de

los resultados de la prueba de revenimiento, el límite de fluencia inicial ($t_{y's}$) de la mezcla puede calcularse en base a la siguiente ecuación¹⁶

$$t_{y's} = \rho (25.5 - S_h) / 17.6$$

donde ρ es la densidad de la mezcla en kg/m^3 y S_h es el revenimiento en cm. Esto se traduce en un límite de fluencia inicial objetivo que oscila entre 0.5 y 1.6 kPa (0.07 a 0.23 psi) para revenimientos de concreto que van de 130 a 220 mm. Obsérvese que la ecuación de $t_{y's}$ sólo es válida para valores de revenimiento comprendidos entre 50 y 250 mm (2 a 10 pulg.).

La metodología descrita sirve como enfoque pragmático para el diseño de mezclas para la 3DCP y la evaluación de sus propiedades en estado fresco antes de proceder con las pruebas a gran escala. Una vez que se ha determinado el diseño de la mezcla base y se ha demostrado que es bombeable y extruible, se consideran dos aspectos complementarios: la reología y el control de la acumulación estructural, ya que son elementos clave para permitir la 3DCP a gran escala.^{5,17} El control tanto de la reología como de la acumulación estructural se consigue mediante adiciones y aditivos.

Control reológico

El control reológico es necesario para garantizar que la pérdida de consistencia del concreto se reduzca al mínimo, permitiendo un tiempo abierto prolongado (tiempo de operación de una mezcla fresca) para manejar el concreto antes de que se produzca la extrusión. Esto puede lograrse mediante el uso de aditivos tales como retardantes de la hidratación (por ejemplo, gluconato de sodio y aditivos a base de ácido tartárico) y WRAs (aditivos reductores de agua, por sus siglas en inglés), principalmente aditivos reductores de agua de alto rango a base de policarboxilatos (HRWRAs, aditivos super reductores de agua, por sus siglas en inglés). La dosificación de estos aditivos dependerá de los parámetros del proceso de 3DCP y de la tasa de producción, así como de la temperatura y la humedad de la zona.

La forma más sencilla de evaluar si una determinada dosificación es adecuada para la tarea de 3DCP a gran escala es realizar pruebas de revenimiento con el paso del tiempo para lotes de concreto con diferentes dosificaciones de aditivos, teniendo en cuenta que el revenimiento debe mantenerse entre 130 y 220 mm a lo largo del tiempo ($t_{y's}$ alrededor de 0.5 a 1.6 kPa). Para simular el efecto del esfuerzo cortante causado durante el mezclado y el bombeo, que ayuda a reducir la floculación de las partículas, el material debe volver a mezclarse justo antes de realizar cada prueba de revenimiento.

Control de la acumulación estructural

Tras la extrusión del material, debemos asegurarnos de que con el tiempo se produzca una rigidez suficiente para que el elemento impreso no se colapse durante la impresión. Para ello, la estrategia de control de la acumulación estructural se basa en el ajuste de la velocidad de hidratación de los distintos componentes del cemento en la matriz del concreto. En la Referencia 18 se puede encontrar una revisión convincente de las reacciones químicas de diferentes estrategias de activación utilizadas en los procesos de fabricación digital. Para ser breves, en este artículo nos referiremos a cualquier estrategia de activación probada en el proyecto N3XTCON (ya sea en forma de aditivo o de adición) como "acelerantes".

Para controlar la acumulación estructural del concreto, nos valemos del uso de pruebas de penetración, comenzando con una punta semiesférica de 20 mm de diámetro (0.8 pulg.) y, si es necesario, reduciendo gradualmente el tamaño de la punta a medida que el material se hace más rígido. Este ensayo permite cuantificar el límite de fluencia del concreto en estado fresco en el tiempo cero (es decir, justo después de la mezcla y la activación) y a lo largo del tiempo. La ecuación que correlaciona la carga de penetración con el límite de fluencia ($t_{y's}$)¹⁹ para los ensayos realizados con una punta semiesférica es:

$$t_{y's} = F / 3\pi R^2$$

donde F es la carga de penetración en N y R es el radio de la punta semiesférica en mm.

El límite de fluencia de las mezclas que hemos probado hasta ahora está entre 1,1 y 2,5 kPa (0,16 a 0,36 psi) en el tiempo cero. En nuestras pruebas, simulamos que el material ha sido extruido en una placa, donde las pruebas de penetración se llevan a cabo durante un intervalo de tiempo determinado. Utilizamos este rango $\tau_{y,p}$ como indicador de si el material es extruible y apilable antes de que se produzca la aceleración. Obsérvese que cuando se controla la evolución de la resistencia a la fluencia (acumulación estructural) con el paso del tiempo, el material no se vuelve a mezclar antes de cada prueba. Esto se debe a que la intención del ensayo es evaluar la rigidez del material con el paso del tiempo después de que se produzca la extrusión y el material esté en reposo. Aunque esto no corresponde a un método de supervisión en línea, el uso de pruebas de penetración es pragmático, lo que lo convierte en un buen candidato para las pruebas in situ. En la Figura 2 se muestran ejemplos de la acumulación estructural de mezclas de 3DCP activadas con aceleradores de diversos tipos.

Es evidente que la acumulación estructural es proporcional a la dosis de acelerantes añadida a la mezcla de concreto. Desde el punto de vista del diseño de la mezcla, lo más importante es determinar primero la aplicación en la que se va a utilizar una nueva mezcla de 3DCP. La aplicación prevista, especialmente los parámetros geométricos (longitud del contorno y rebordes de las capas) y de proceso (velocidad de impresión y tasa de extrusión del concreto), señalarán la tasa de acumulación vertical (la velocidad a la que el material se apila verticalmente) y el tiempo específico ideal del proceso. Este último se refiere al intervalo de tiempo (después de la extrusión) en el que el material debe ser trabajable antes de mostrar un rápido aumento de la tasa de rigidez.

Por ejemplo, cuando se aplica la 3DCP para imprimir una casa, la tasa de acumulación vertical está en el rango de 0.3 a 0.5 m/h (1.0 a 1.6 pies/h) debido a la longitud de contorno que suele ser grande; mientras que la producción de un elemento de concreto (por ejemplo, una columna con una longitud de contorno relativamente corta) requiere una acumulación

estructural de al menos 2.0 a 3.0 m/h (6.6 a 9.8 pies/h), aunque se han alcanzado tasas de acumulación vertical mucho más rápidas utilizando morteros. En otras palabras, aunque la misma mezcla de concreto base (desde el punto de vista del control de la reología) puede ser adecuada para ambos casos, es el control de la acumulación estructural el que garantiza que el elemento impreso no se colapse y que haya suficiente tiempo abierto para asegurar una unión adecuada entre las capas impresas.

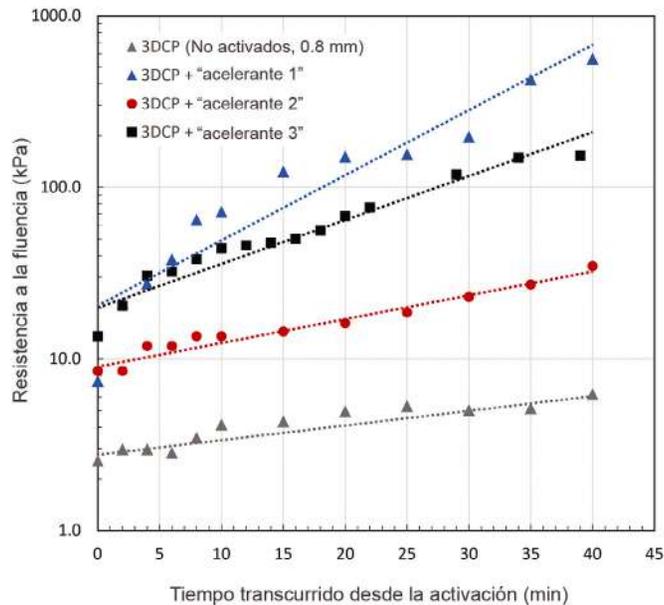


Figura.2. Acumulación estructural de varias mezclas N3XTCON 3DCP con y sin acelerantes (agregados de hasta 8 mm [0.30 in.]). (Nota: 1 kPa = 0,15 psi)

Basándonos en el enfoque de diseño de la mezcla N3XTCON descrito, centrado en la sostenibilidad, el control reológico y el control de la acumulación estructural, hemos desarrollado y probado con éxito diferentes diseños de mezcla de 3DCP, que se discuten en la siguiente sección. Aunque todavía no hemos creado una versión final de la guía de diseño de mezclas de N3XTCON para el uso de 3DCP con agregados de gran tamaño, los resultados obtenidos hasta ahora son prometedores desde el punto de vista ambiental en comparación con los morteros premezclados y el concreto convencional.

Parámetros	Aalborg White CEM I 52.5 R SR5	EN 197-1	RAPID Cement CEM I 52.5 N (MS) (LA)	EN 197-1	FutureCEM CEMII/B-M (Q-LL) 52.5 N	EN 197-1
Contenido de clinker, %	100	95 a 100	96	95 a 100	67	65 a 79
Contenido mínimo adicional de los ingredientes, %	0	0 a 5	4	0 a 5	--	0 al 5
Contenido de arcilla calcinada y caliza, %	--	--	--	--	33	21 a 35
fc, 2d, MPa	44	≥ 30	36	≥20	29	≥20
fc, 28d, MPa	72	≥ 52.5	67	≥52.5	65	≥52.5
Fraguado inicial, min	145	≥ 45	140	≥45	160	≥45
Densidad, kg/m3	3130	--	3130	--	3000	--

Nota: 1 MPa = 145 psi; 1 kg/m3 = 0.06 lb/pie3

3DCP con mortero y concreto

La idea principal del análisis ambiental es destacar los beneficios tanto de la ampliación de los morteros al concreto como de la utilización de cemento mezclado en las mezclas de 3DCP. El tamaño máximo de partícula en nuestros morteros ensayados es de 0.5 (0.02 pulg.), mientras que las mezclas de concreto también contienen agregados de hasta 8 mm. En cada análisis ambiental, las emisiones de CO₂ de las mezclas se normalizan con respecto a una mezcla de referencia, consistente en un mortero o un concreto, producido con uno de los tipos de cemento mencionados en la Tabla 1. Esta tabla también resume los principales parámetros de rendimiento del cemento y los requisitos de composición según la norma EN 197-1.²⁰

En nuestro estudio, las mezclas de concreto 3DCP con resistencias del tipo C25 (25 MPa [3600 psi]) y C45 (45 MPa [6500 psi]) producidas con FutureCEM y RAPID Cement son comparadas con el Caso 1, una mezcla de mortero 3DCP producida con White Cement; con el Caso 2, una mezcla de mortero 3DCP producida con FutureCEM; y con el Caso 3, una mezcla de concreto 3DCP producida con RAPID Cement. Además, llevamos a cabo un análisis complementario en el que se comparan las mezclas de concreto 3DCP con RMC con tipos de resistencia similares.

La Figura 3 muestra algunas secciones de dos muestras de prueba 3DCP, lo que indica que imprimimos con éxito las mezclas de referencia de mortero y de concreto. Obsérvese que el equipo utilizado para el bombeo y la extrusión de morteros y concretos no es el mismo. Específicamente, para las impresiones de mortero, utilizamos una boquilla de 20 mm de diámetro y una bomba de cavidad progresiva con un caudal de hasta 0.1 m³/h (3.5 pies³/h) capaz de bombear materiales con un tamaño de partículas de hasta 2 mm (0.08 pulg.); mientras que para las impresiones de concreto utilizamos una bomba de cavidad progresiva grande con un caudal de hasta 2.4 m³/h (85 pies³/h) capaz de bombear materiales con un tamaño de partículas de hasta 10 mm (0.4 pulg.). Ambos sistemas forman parte del Laboratorio de Concreto de

Alta Tecnología del Instituto Tecnológico de Dinamarca, que utiliza un robot industrial de seis ejes (Fanuc R-2000iC/165F). Para más detalles sobre la configuración de la 3DCP, véase la Referencia 11.



Figura.3. Detalle de las muestras de 3DCP producidas con mortero y con concreto

El contenido de CPO en kg/m^x y el tipo en cada mezcla se indican en la descripción de la Figura 4. El tipo de resistencia de R1 y F1 es C25, mientras que el de R2 y F2 es C45. Hay que tener en cuenta que, aunque las adiciones y los aditivos presentan una elevada emisión de CO₂, por ejemplo, un HRWRA es de unos 1.7 kg de CO₂_{equiv}/kg (lb/lb), lo que supone aproximadamente el doble de la emisión de la mayoría de los cementos,10 su cantidad en la composición total del concreto es bastante baja (del 0.1 al 5% en peso del cemento); por lo tanto, sus contribuciones individuales pueden desestimarse sin problemas. Por lo tanto, nuestro análisis de CO₂ no tiene en cuenta las emisiones de los WRA y los acelerantes utilizados para controlar la reología y la acumulación estructural.

En el caso 1 (Figura 4(a)), los resultados indican que el paso del mortero al concreto contribuye a una reducción de CO₂ que oscila entre el 63 y el 78%, donde las mezclas de concreto producidas con FutureCEM presentan una mayor reducción. El efecto de aumento en la reducción de las emisiones globales de CO₂ de las mezclas se ve reforzado por la sustitución

del sistema aglutinante, es decir, del White Cement al FutureCEM, que por sí solo produce una reducción de aproximadamente el 30% de las emisiones de CO₂.

En el Caso 2 (Figura 4(b)), el aumento de material presenta la misma tendencia, con una reducción global de CO₂ que oscila entre el 40 y el 65% respecto a la mezcla de referencia. La reducción es menos dramática que la observada en el Caso 1 porque el mortero de referencia en el Caso 2 (Mortero B) se produce con FutureCEM. Nótese que la resistencia tipo de los morteros A y B (C55, 55 MPa [8000 psi]) es mayor que la de las mezclas de concreto R y F. No obstante, lo más probable es que una composición de mortero 3DCP con una resistencia tipo similar a la de R y F siga presentando una mayor emisión de CO₂, dado su mayor contenido inherente de aglutinante.

Por último, en el caso 3 (Figura 4(c)), los ajustes en la composición de la mezcla y del aglutinante permitieron una reducción del CO₂ de entre el 16 y el 51% con respecto a la mezcla de referencia, que es una composición típica de concreto 3DCP utilizada como referencia interna para los ensayos de laboratorio. Si comparamos las mezclas con la misma resistencia tipo, es decir, R1 frente a F1 (C25) y R2 frente a F2 (C45), la reducción de la emisión de CO₂ es del 28.0% y del 22.4%, respectivamente. Esto demuestra el beneficio de sustituir el CPO estándar Rapid Cement (CEM I 52,5N (MS) (LA)) por un cemento mezclado como el FutureCEM (CEM II/B-M(Q-LL) 52,5 N) en las mezclas de 3DCP.

A efectos de comparación, la huella de carbono estimada de las mezclas de 3DCP R1, R2, F1 y F2 se representa en la Figura 5 junto con las emisiones de CO₂ de las mezclas de concreto comunicadas por una empresa local de concreto premezclado (RMC).²¹

La figura 5 muestra que las emisiones de las mezclas de 3DCP (R y F) están en el mismo orden de magnitud que el concreto producido localmente para una resistencia tipo determinada. Si tenemos en cuenta que el tamaño máximo de las partículas en las mezclas de 3DCP y RMC-Ecológico no es el mismo (8 y 32 mm [0.30 y

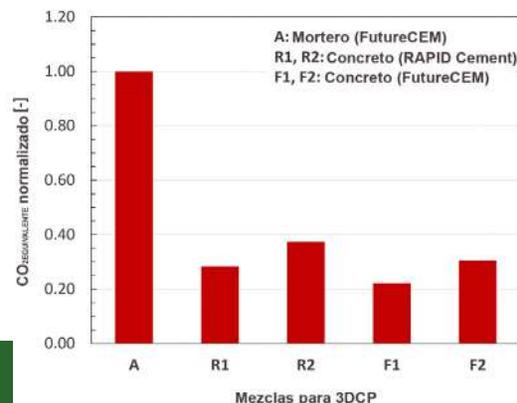
1.26 pulg.]), se puede concluir que la 3DCP puede hacerse sostenible y competitiva desde una perspectiva ambiental frente al concreto convencional si la materia prima utilizada en el proceso de impresión comprende agregados de gran tamaño.

Hasta ahora, los desarrollos del proyecto N3XTCON han permitido la producción de concreto ecológico imprimible con tan sólo 250 kg/m³ de FutureCEM para la resistencia tipo C25. La combinación del protocolo de diseño de la mezcla de 3DCP presentado y el uso de un cemento recientemente desarrollado (FutureCEM) ayudó a producir lo que consideramos una de las composiciones de 3DCP más ecológicas con agregados de gran tamaño para la resistencia tipo dada. Aunque continuaremos con los desarrollos y pruebas del protocolo de diseño de mezcla, la mezcla F1 (C25) es una fuerte candidata para la prueba de demostración a escala real que se realizará en 2022 como hito del proyecto N3XTCON.

Consideraciones finales

La columna vertebral de nuestro trabajo se construyó a través de los años de experiencia desarrollando concretos convencionales, así como concretos autoconsolidables.

El conocimiento que hoy hemos adquirido nos permite la formulación de varias mezclas 3DCP utilizando los materiales localmente disponibles, y es nuestro objetivo proponer una guía práctica N3XTCON de diseño de mezclas 3DCP. A pesar de que aún no hemos obtenido la deseada guía final, los resultados que hemos obtenido son prometedores en términos de sostenibilidad y comportamiento mecánico.



a)

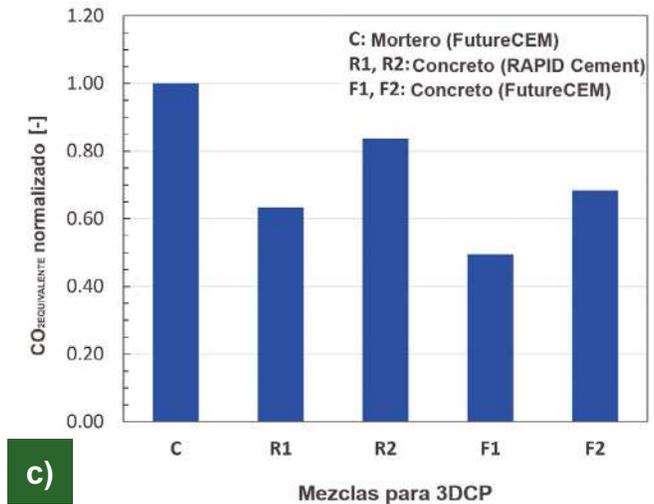
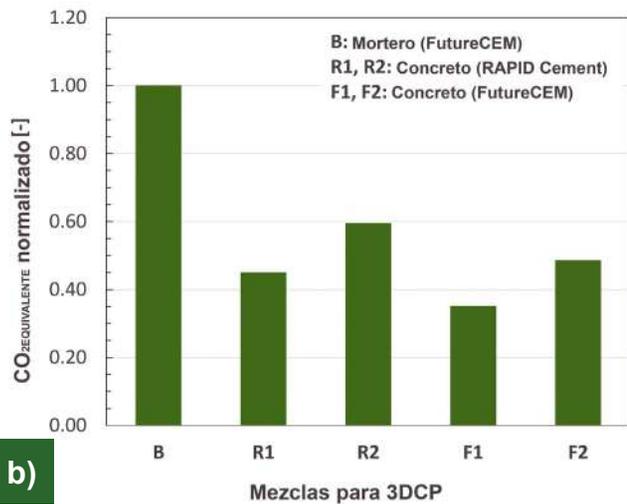


Figura.4. Emisión normalizada de CO₂ de morteros y concretos para 3DCP. Los valores de referencia son: (a) La composición típica de nuestros morteros 3DCP (517 kg/m³ (871 lb/yd³) de CEM I 52.5 R SR5; (b) composición del mortero 3DCP producido con FutureCEM (508 kg/m³ (856 lb/yd³) de CEM II/B-M(Q-LL) 52.5 N); y (c) Mezcla de concreto 3DCP usando RAPID Cement (360 kg/m³ (607lbs/yd³) de CEM I 52.5 N (MS)(LA) y agregados de 0 a 8 mm

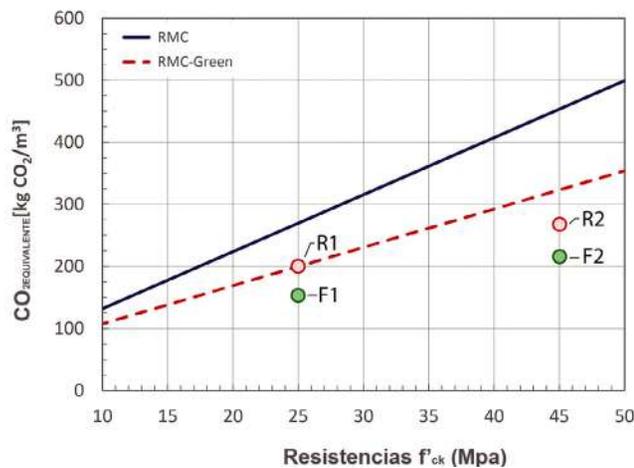


Figura.5. Comparación de emisiones de CO₂ de mezclas de concreto 3DCP contra Concretos premezclados convencionales de distintas resistencias. Nótese que los valores del concreto premezclado convencional corresponden a agregados de hasta 32 mm (1-1/4") y el revenimiento dentro de los 40 a 120 mm (1.5 a 4.75 pulg.), mientras que en el concreto ecológico es una mezcla equivalente producida con el mismo tipo de agregados y rango de revenimiento, pero que no se recomienda para elementos estructurales en situaciones de exposición XS2, XS3 o XA3 (Clases agresivas y extra-agresivas de exposición) de acuerdo con la norma DS/EN 206 DK NA22 (Nota: 1 kg/m³=0.06 lb/ft³; 1 Mpa = 145 psi)

Hasta ahora nuestro desarrollo ha permitido la producción de una mezcla de concreto ecológica susceptible de ser usada en la impresión 3D con relativamente bajo contenido de emisiones de CO₂ cuando se le compara con concretos convencionales de plantas de concreto premezclado en Dinamarca. Lo anterior permite ofrecer a las compañías involucradas en la 3DCP una mezcla alternativa y sustentable de materiales premezclados, y gradualmente pavimenta el camino hacia un concreto 3DCP más sustentable. Finalmente, mientras vamos cambiando el material de mortero a concreto en un camino necesario para apoyar la sustentabilidad en aplicaciones de 3DCP de gran escala, el uso de mortero no debe despreciarse, porque algunos conceptos mínimos de resolución y diseño solamente se pueden alcanzar con el uso de morteros finos con un alto índice de acumulación estructural. En otras palabras, en el mundo del 3DCP hay espacio para ambos, concreto y mortero, todo dependerá de la aplicación de que se trate.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer el apoyo del Fondo Danés de Innovación (GRant No 8055-00030B: Siguiete Generación de Estructuras de Concreto Impresas en 3D) y a todos los socios

del proyecto N3XTCON: Instituto Tecnológico Danés, Universidad Técnica de Dinamarca, Universidad del sur de Dinamarca, Henning Larsen Arquitectos A/S, NCC Damarca A/S, Aalborg Portland A/S, FB Gruppen A/S, y AP Pension Livsforsikringsaktieselskab.

Referencias

1. Everett, H., "PERI Uses COBOD Printer to Build World's First On-Site 3D Printed Apartment Building," 3D Printing Industry, Nov. 2020, <https://3dprintingindustry.com/news/peri-uses-cobod-printer-to-build-worlds-first-on-site-3d-printed-apartment-building-179376>.
2. Sher, D., "First African 3D Printed Buildings Coming Up in Malawi to Support UN's Sustainability Goals," 3D Printing Media Network, Dec. 2020, www.3dprintingmedia.network/first-african-3d-printed-buildings/.
3. Strömbergsson, A., "World Housing and TAM Develop Canada's First AM Village," 3D Printing Media Network, Feb. 2021, www.3dprintingmedia.network/world-housing-and-tam-develop-canadas-first-am-village.
4. Barandy, K., "Dutch Couple Moves into Europe's First 3D Printed House in Eindhoven," Designboom, Apr. 2021, www.designboom.com/architecture/project-milestone-first-3d-printed-concrete-house-europe-eindhoven-netherlands-completion-04-30-2021.
5. De Schutter, G.; Lesage, K.; Mechtcherine, V.; Nerella, V.N.; Habert, G.; and Agustí-Juan, I., "Vision of 3D Printing with Concrete—Technical, Economic and Environmental Potentials," *Cement and Concrete Research*, V. 112, Oct. 2018, pp. 25-36.
6. Han, Y.; Yang, Z.; Ding, T.; and Xiao, J., "Environmental and Economic Assessment on 3D Printed Buildings with Recycled Concrete," *Journal of Cleaner Production*, V. 278, Jan. 2021.
7. Ji, G.; Ding, T.; Xiao, J.; Du, S.; Li, J.; and Duan, Z., "A 3D Printed Ready-Mixed Concrete Power Distribution Substation: Materials and Construction Technology," *Materials*, V. 12, No. 9, May 2019, 14 pp.
8. Agustí-Juan, I., and Habert, G., "Environmental Design Guidelines for Digital Fabrication," *Journal of Cleaner Production*, V. 142, Part 4, Jan. 2017, pp. 2780-2791.
9. Agustí-Juan, I.; Müller, F.; Hack, N.; Wangler, T.; and Habert, G., "Potential Benefits of Digital Fabrication for Complex Structures: Environmental Assessment of a Robotically Fabricated Concrete Wall," *Journal of Cleaner Production*, V. 154, June 2017, pp. 330-340.
10. "Embodied Carbon—The ICE Database," *Circular Ecology*, <https://circularecology.com/embodied-carbon-footprint-database.html>. (last accessed Jan. 25, 2022)
11. Leal da Silva, W.R.; Garzón, S.F.; Andersen, T.J.; and Ahrenkilde, I., "Towards Sustainable 3D Concrete Printing," *CPT Construction Printing Technology*, V. 2.20, 2020, pp. 23-31, https://digitalconcrete2020.com/wp-content/uploads/2020/07/2002_CPT_DC.pdf.
12. "Guidelines for Mix Design of SCC" and "Guidelines for Execution of SCC," Danish Technological Institute, Taastrup, Denmark, 2008, www.dti.dk/guidelines-for-mix-design-of-scc-and-execution-of-scc/description/23767.
13. "Environmental Product Declaration: FutureCEM® Cement CEM II/B-M (Q-LL) 52.5 N," 2020, <https://data.environdec.com/datasetdetail/process.xhtml?uuid=cc38b541-2b99-4309-bdb3-cd2b5f00ee99&version=01.00.001&stock=Environdata>.
14. "Environmental Product Declaration: Aalborg Portland RAPID® Cement CEM I 52.5 N (LA)," The Norwegian EPD Foundation, Oslo, Norway, 2017, 6 pp., www.aalborgportland.dk/wp-content/uploads/2019/02/epd_aalborg_portland_rapid_cement_webversion.pdf.
15. "Environmental Product Declaration: Aalborg White® Cement CEM I 52.5 R – SR5 (EA)," EPD International AB, Stockholm, Sweden, 2018, 12 pp., <https://finnsementti.fi/wp-content/uploads/S-P-01276-Aalborg-White-Cement.pdf>.
16. Roussel, N., "Correlation Between Yield Stress and Slump: Comparison Between Numerical Simulations and Concrete Rheometers Results," *Materials and Structures*, V. 39, No. 4, Aug. 2006, pp. 501-509.
17. Buswell, R.A.; Leal da Silva, W.R.; Jones, S.Z.; and Dirrenberger, J., "3D Printing Using Concrete Extrusion: A Roadmap for Research," *Cement and Concrete Research*, V. 112, Oct. 2018, pp. 37-49.
18. Marchon, D.; Kawashima, S.; Bessaies-Bey, H.; Mantellato, S.; and Ng, S., "Hydration and Rheology Control of Concrete for Digital Fabrication: Potential Admixtures and Cement Chemistry," *Cement and Concrete Research*, V. 112, Oct. 2018, pp. 96-110.
19. Lootens, D.; Jousset, P.; Martinie, L.; Roussel, N.; and Flatt, R.J., "Yield Stress During Setting of Cement Pastes from Penetration Tests," *Cement and Concrete Research*, V. 39, No. 5, May 2009, pp. 401-408.
20. CEN-EN 197-1:2012, "Cement Part 1: Composition, Specifications and Conformity Criteria for Common Cements," European Committee for Standardization (CEN), Brussels, Belgium, 2011, 56 pp.
21. "Prisliste Færdigbeton (Price List for Ready-Mixed Concrete)," Unicon/Cementir Holding, Copenhagen, Denmark, Jan. 2021, www.unicon.dk/media/1660/prisliste-2021-web.pdf. (in Danish)
22. DS/EN 206 DK NA:2020, "Concrete – Specification, Performance, Production and Conformity – Rules for Application of EN 206 in Denmark," Danish Standards Foundation, Nordhavn, Denmark, 2020, 76 pp.



Wilson Ricardo Leal da Silva, es consultor y gerente de proyectos del Instituto Tecnológico Danés en Dinamarca. Trabaja en el campo de las soluciones digitales aplicadas a la tecnología del concreto, donde el 3DCP se ha convertido en su pasión y principal tema de investigación y desarrollo por los pasados 7 años. Ha creado una base de datos de publicaciones relacionadas con el 3DCP – The 3DCP Database (<http://3dconcreteprinting.info>)-- que es de acceso libre y en que se encuentran más de 300 publicaciones enlistadas. Recibió su doctorado de la Universidad Técnica Checa, en Praga, República Checa en 2013 donde trabajo en aplicaciones de inteligencia artificial en tecnología de concreto



Martin Kaasgaard, es consultor senior y gerente de proyectos del Instituto Tecnológico Danés en Dinamarca. Es ingeniero químico con 14 años de experiencia en la industria del concreto. Es un especialista en el diseño de mezclas de concreto, así como en control de calidad del mismo. Ha participado en varios proyectos de investigación y desarrollo europeos enfocados en el concreto autoreparable, concreto fotocatalítico, cementos con cenizas volantes activadas y la formulación de cementantes de bajo contenido de CO2. Recibió su MSc de la Universidad de Aalborg, en Aalborg

La traducción de este artículo correspondió al Capítulo de México Noreste

Título: Concreto ecológico para una 3DCP sostenible



Traductora:
Lic. Iliana M. Garza Gutiérrez



Traductor y Revisor Técnico:
Ing. José Lozano y Ruy Sánchez



CONCRETO
LATINOAMÉRICA