



# CONCRETO

## LATINOAMÉRICA

VOLUMEN VI | NÚMERO 1 | ENERO 2025

**Concreto a Prueba del Futuro:  
Cómo Prolongar la Vida Útil  
de su Concreto**

*Por Jennifer K. Mizer*

---

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. Luis Alvarez Valencia  
Ing. Xiomara Sapón Roldán

### México Noreste

Dr. Alejandro Durán Herrera

### México Noroeste

Ing. Óscar Ramírez Arvizu

### México Centro y Sur

Ing. José Alfredo Rodríguez Campos

### México Sureste

Mtro. Josseph Eli Mandujano Zavala

### República Dominicana

Ing. Piero Roberto Caputo Rodríguez

### Perú

Ing. Julio Antonio Higashi Luy

### Puerto Rico

Ing. Anabel N. Merejildo



El concreto es fundamental para la infraestructura mundial moderna debido a su inherente resistencia, adaptabilidad y relativamente bajo costo comparado con otras opciones. Sin embargo, dos de los principales retos que representa el uso de este material es el impacto ambiental generado durante su producción y los efectos ambientales sobre sus propiedades físicas ocasionados por el cambio climático. El uso de fibras para eliminar el agrietamiento superficial y mejorar otras características del material ha probado con el tiempo ser una acción adecuada para incrementar su durabilidad. En nuestra foto de portada se aprecia la descarga de una mezcladora de concreto reforzado con fibras. (Ver 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 Enero del 2024. 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

## 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. Anakaren Lozano González

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

**Diseño Editorial: Comunicación e Imagen Institucional FIC-UANL**

# REVISORES EDITORIALES

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

Ing. José Lozano y Ruy Sánchez  
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](http://www.concrete.org)



# CONTENIDO

---

## 1 | **Concreto de costa a costa: exploración del control de la hidratación para prácticas de construcción sostenibles**

*Por Mark A. Bury y Carlito Cascone*

## 5 | **La urgente necesidad de aumentar la robustez de los edificios en regiones de alta sismicidad**

*Por Santiago Pujol, Rémy D. Lequesne, y Chungwook Sim*

## 2 | **El cemento está cambiando para bien: Forma parte de la conversación**

*Por Michelle L. Wilson*

## 6 | **Foro De Tecnología, Parte 2: Información Compartida por la “Fundación ACI” 2024**

## 3 | **Concreto a Prueba del Futuro: Cómo Prolongar la Vida Útil de su Concreto**

*Por Jennifer K. Mizer*

## 7 | **Preguntas y Respuestas. Interpretación de los requisitos de las formaletas**

## 4 | **Estudio Inter laboratorio sobre la Precisión al Usar un Escáner Láser Terrestre para Verificar Tolerancias en el Concreto**

*Por Leo (Lingfeng) Zhang, Mike Hernández, James Dare, Mack Kowalsky y Ezra Che*

# 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](mailto:concretolatam@gmail.com)

Tu solicitud y artículo serán evaluados para su publicación.

# 01

## Concreto de costa a costa: exploración del control de la hidratación para prácticas de construcción sostenibles

Por Mark A. Bury y Carlito Cascone

El hormigón en su estado plástico es perecedero, ya que la hidratación (la reacción entre el cemento y el agua) hace que el hormigón fresco pierda su fluidez inicial. El resultado de tiempo de trabajo limitado crea desafíos con los proyectos de construcción de concreto, especialmente aquellos con tiempos de transporte prolongados, retrasos en la colocación o colocaciones de concreto en varias etapas. Para abordar estos y otros desafíos, se puede incluir un aditivo controlador de hidratación (HCA) en la mezcla de concreto en una dosis baja para suspender temporalmente el proceso de hidratación. Además, se puede usar un HCA en dosis más altas para mantener el concreto fresco devuelto lo suficientemente fluido como para reciclarlo combinándolo con concreto recién dosificado.

Este artículo proporciona una descripción general de un aditivo controlador de hidratación (HCA), su uso para reciclar concreto devuelto, un sistema que aborda la gestión del proceso de concreto devuelto utilizando innovaciones en sensores e inteligencia artificial (IA), detalles sobre una sólida evaluación del comportamiento de la estabilización, en un experimento único en todo el país, así como información sobre el potencial para reducir los impactos ambientales de la producción de concreto.

### Aditivo Controlador de Hidratación (Estabilizador)

El desarrollo de estos aditivos comenzó a principios del siglo XX cuando los científicos buscaban formas de mejorar las propiedades del concreto, incluida la ampliación de su trabajabilidad. Los primeros aditivos retardantes proporcionaron control de la hidratación, pero las inconsistencias en el rendimiento limitaron su uso práctico allí donde se necesitaba un control preciso para proyectos de construcción desafiantes.

La siguiente generación de aditivos retardantes surgió como una solución potencial, debido a su capacidad para retardar el tiempo de fraguado del concreto. Sin embargo, estos aditivos presentaban retos para su dosificación porque los tiempos de fraguado del concreto podían variar dependiendo del tipo y la concentración de la química, así como de la mezcla de concreto específica. Para abordar las inconsistencias de los aditivos retardantes tempranos y los problemas que enfrentan los productores de concreto al lidiar con los desechos de concreto devueltos de los proyectos, los investigadores desarrollaron un novedoso HCA que ofrece una respuesta controlada y predecible<sup>1</sup>. Un HCA moderno (también conocido como aditivo estabilizador de hidratación [HSA]) puede regular el proceso de hidratación de manera más consistente, permitiendo a los productores controlar las propiedades de fraguado del concreto, y a los contratistas construir de manera más efectiva. Un HCA logra esto retardando o deteniendo las reacciones de hidratación en el concreto (estabilizando el concreto o poniéndolo a dormir), proporcionando un retraso controlado en el tiempo de fraguado sin comprometer la resistencia o durabilidad de la mezcla.

Los aditivos controladores de hidratación que cumplen con los requisitos de rendimiento de la norma ASTM C494/C494M, Tipo B, retardantes, y Tipo D, reductores de agua y retardantes<sup>2</sup>, se han vuelto esenciales en la construcción moderna, ya que estos aditivos ofrecen resultados predecibles y precisos, mejorando la eficiencia en los sitios de construcción al permitir que los contratistas programen el trabajo de manera más precisa.

### Reutilización del Concreto Plástico Devuelto

Es común que el concreto sobrante se devuelva a la planta del productor para su eliminación. Los agregados usados en ese concreto fresco devuelto pueden ser recuperados mediante una planta de reciclaje de agregados; el concreto fresco devuelto se puede colocar en moldes para producir bloques de concreto prefabricados, o el concreto devuelto endurecido se puede triturar para producir relleno o agregado de concreto reciclado, sin embargo, estas opciones pueden no ser económicas o ambientalmente sustentables. Alternativamente, agregar un HCA a una mezcla de concreto plástico que regrese a la planta puede preservar este concreto y mantenerlo fresco para su posterior reutilización. ASTM 1798/1798M-19, "Especificación estándar para productos devueltos concreto fresco

para uso en un nuevo lote de concreto premezclado<sup>3</sup>, es una norma relevante de la industria. Los pasos básicos para tratar y reutilizar el concreto plástico devuelto se muestran en la Fig. 1.

Los aspectos de durabilidad por la reutilización de concreto plástico devuelto en mezclas compuestas posteriores,<sup>4</sup> han sido evaluados, incluidas pruebas para valorar la susceptibilidad del concreto compuesto al agrietamiento debido a la contracción por secado. Por ejemplo, se llevó a cabo un programa de pruebas de concreto utilizando muestras de concreto que medían 3.5 x 3.5 x 40 pulgadas (890 x 890 x 10,160 mm), como se muestra en la Fig. 2. Cada muestra contenía una barra de acero de 1 pulgada (25 mm) de diámetro recorriendo su centro. La barra estaba sujeta por sus extremos usando varillas de acero para sujetarla, mientras que los dos tercios centrales de la misma, tenían una funda de goma como rompedor de adherencia, permitiendo que el concreto se contrajera libremente.

La Tabla 1 resume los resultados de un estudio de durabilidad comparativo realizado por Senbetta y Bury<sup>4</sup> que examina la diferencia entre el concreto tradicional y una combinación de concreto fresco preservado reciclado con concreto fresco recién dosificado en una proporción de 33 a 67 %, respectivamente.

Los datos de este estudio mostraron que ninguno de los parámetros relacionados con la durabilidad se vio afectado negativamente por el uso de un HCA como parte de una mezcla compuesta de concreto tratado. Por el contrario, se mejoraron la resistencia a la compresión, los parámetros de rendimiento relevantes a la corrosión del acero y la susceptibilidad del concreto al agrietamiento.

## Eficiencia Operativa Mediante Herramientas de Digitalización

Aunque la práctica de estabilizar el hormigón plástico devuelto para su reutilización se ha realizado durante décadas, el proceso no ha estado exento de desafíos para los productores. Algunos de estos desafíos incluyen medir y monitorear el asentamiento, la temperatura y la cantidad de concreto devuelto, así como también el seguimiento de las proporciones de la mezcla. Cada una de estas tareas puede requerir mucha mano de obra y recursos administrativos significativos.

Los avances recientes en la tecnología de sensores de hormigón, la inteligencia artificial y la digitalización han permitido el desarrollo de una plataforma de software útil para los productores de concreto premezclado. Esta nueva herramienta digital facilita la implementación de un programa de devolución de concreto utilizando datos precisos en tiempo real, con requisitos mínimos de mano de obra y comenzando desde el inicio del viaje de regreso del camión a la planta.

La innovadora plataforma (MasterAtlas™) tiene la capacidad de recopilar, almacenar y enviar información del concreto, brindar sugerencias de dosificación de aditivos y alertas automatizadas tanto a los equipos de despacho como al personal de control de calidad para administrar el proceso de retorno del concreto más fácilmente. Además, la plataforma tiene capacidad de documentar y reportar información para gestionar auditorías y actividades comerciales de concreto devuelto, así como mejoras de rentabilidad y valores reducidos de emisiones de



Fig. 1: Pasos para tratar y reutilizar el concreto plástico devuelto

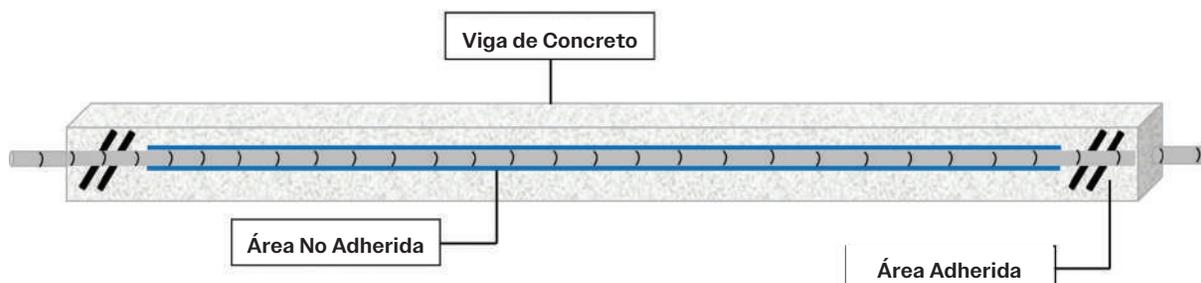


Fig. 2: Especimen de muestra utilizado en el programa de pruebas de concreto

dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), mejorando así la eficiencia operativa y las iniciativas de sustentabilidad. La plataforma de software proporciona una variedad de formas de analizar los datos relacionados con el concreto devuelto y puede personalizarse para la operación del productor en función de los resultados deseados.

## Experimentación que hace Historia

Para evaluar más a fondo el rendimiento de un HCA, se inició un experimento único para probar los límites del control de hidratación del cemento. El concepto del experimento era dosificar y mantener concreto fresco (plástico) durante un período de 7 días usando un HCA mientras lo transportaba a través de los Estados Unidos de costa a costa, y finalmente reciclarlo en una mezcla compuesta de concreto fresco.

## Estudio de Viabilidad de Laboratorio

Para prepararse para la experimentación a largo plazo, se realizó un estudio de viabilidad en laboratorio para descubrir si el hormigón podría mantenerse fluido durante al menos una semana. El objetivo era determinar la dosis necesaria de HCA. El estudio de laboratorio exploró técnicas innovadoras de mezcla de concreto y probó tres mezclas de concreto distintas:

- Concreto de referencia
- Concreto tratado con un HCA
- Concreto compuesto (25% de concreto reciclado y 75% de concreto fresco)

Las proporciones de mezcla para los lotes producidos en el laboratorio se muestran en la Tabla 2. El concreto de referencia se diseñó como una mezcla tradicional utilizando cemento Tipo II. Esta mezcla se formuló para lograr buena trabajabilidad, caracterizada por un asentamiento o revenimiento alto, un fraguado moderado y alta resistencia a compresión y flexión a los 28 días. La segunda mezcla tuvo las mismas proporciones, pero incluyó un HCA para mantener la fluidez del concreto por al menos una semana. La tercera mezcla fue una mezcla compuesta reciclada, compuesta por un 25% de concreto reciclado estabilizado y un 75% de concreto fresco por masa, diseñada para simular concreto devuelto que se reutiliza en una nueva mezcla. Se utilizó una combinación única de aditivos innovadores en la mezcla compuesta para ayudar a iniciar la hidratación (“despertar el concreto”) después de haber sido estabilizado durante 7 días. La combinación de aditivos incluyó: un aditivo reductor de agua de alto rango, un aditivo potenciador de resistencia<sup>5</sup>, un aditivo acelerador de fraguado libre de cloruros, y macro fibras sintéticas. Los resultados de laboratorio mostrados en la Tabla 2 destacan varias observaciones clave:

- Las tres mezclas presentaron alta trabajabilidad/asentamiento.
- El uso de diferentes combinaciones de aditivos tuvo un efecto mínimo en el contenido de aire de las mezclas.
- El HCA seleccionado, en una dosificación de 90 fl oz (5.85 L/100 kg), pudo mantener la fluidez (frescura) del concreto durante una semana.
- La mezcla compuesta presentó un tiempo de fraguado notablemente extendido en

**Tabla 1:**  
**Resultados de un estudio comparativo de durabilidad**

Atributo de desempeño	Concreto tratado en relación al concreto de referencia			Comparación del concreto tratado
	3 días	7 días	28 días	
Resistencia a compresión	+21%	+7%	+6%	Mejor
Ciclo de congelación y descongelación	101% del de referencia			Similar
Análisis de vacíos de aire endurecidos	Factores de espaciamiento y superficie específica adecuados			Similar
Prueba de corrosión a largo plazo	Corriente de corrosión más baja			Mejor
Prueba de corrosión a corto plazo	Capa de pasivación estable			Similar
Abrasión	+5%			Similar
Absorción	-5%			Similar
Volumen de vacíos permeables	-5%			Similar
Susceptibilidad al agrietamiento	75% menos potencial			Mejor

comparación con la mezcla de referencia; sin embargo, mostró un desempeño mucho mayor en resistencia a compresión y flexión.

El objetivo del estudio de laboratorio, para determinar la dosis del HCA necesario para mantener el concreto plástico durante 7 días, se logró. Además, el estudio demostró que una mezcla compuesta con una porción de concreto altamente estabilizado aún puede alcanzar buenas resistencias a compresión y flexión. En la práctica, el uso de un aditivo acelerador adicional podría haber ayudado a lograr un tiempo de fraguado similar al de la mezcla de referencia. La dosificación adecuada de un acelerador para este propósito generalmente se determina mediante una evaluación preliminar. El éxito en esta extrema estabilización del concreto realizada en el laboratorio confirmó que un viaje de larga distancia con concreto fresco es posible si se trata con un HCA.

## Transporte de Concreto a campo traviesa

Las proporciones de la mezcla de concreto utilizadas para el viaje experimental a través del país fueron las mismas que las utilizadas en la mezcla de hidratación controlada de 1 semana del estudio de laboratorio. El evento de 8 días se resume en lo siguiente:

### Día 1

El experimento comenzó en Eastport, ME, EE. UU., la ciudad más al oriente en los Estados Unidos continentales, en la Bahía de Fundy. Los ingredientes del concreto y el equipo de dosificación y mezclado se enviaron previamente a ese lugar para su dosificación y mezcla en el área de estacionamiento de un hotel local.

### Día 2

Se mezcló un volumen de 0,06 m<sup>3</sup> (2 pies cúbicos) de concreto a las 5:00 a. m., se estabilizó (se puso a dormir) con el HCA seleccionado y se cargó en un SUV híbrido para transportarlo por todo el país hasta su destino en San Francisco, CA. EE.UU. El concreto se mezcló hasta obtener una consistencia fluida de 10 pulgadas (254 mm) de extensión, medida con un mini cono de asentamiento. Después de medir la extensión y la temperatura, se cargaron en la camioneta SUV ocho contenedores de 5 gal (18.9 L) cada uno. Cada contenedor contenía 0.007 m<sup>3</sup> (0.25 pies<sup>3</sup>) de concreto; y comenzó el viaje de 7 días. La comprobación inicial del hormigón fue una inspección visual de la fluidez en una parada en la primera posada de Estados Unidos, el Wayside Inn, en Boston, MA, EE. UU. Luego el viaje continuó hacia el oeste. Después de un viaje de 12 horas (en total) hasta Seneca Falls, Nueva York, EE. UU., el concreto todavía estaba fluido, superando con creces la vida útil típica del concreto fluido.

**Tabla 2:**  
**Proporciones de mezcla de concreto de laboratorio con propiedades en estado fresco y endurecido**

Composición de la mezcla de concreto y propiedades en estado fresco y endurecido	Mezcla de referencia	Mezcla con hidratación controlada de 1 semana	Mezcla con 75% de concreto fresco + 25% de concreto devuelto
Cemento Tipo IL, lb/yd <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	705 (418)	705 (418)	529 (314)
Agregado grueso, lb/yd <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	1,584 (940)	1,583 (939)	1,188 (705)
Agregado fino, lb/yd <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	1,296 (769)	1,295 (768)	972(577)
Concreto devuelto, lb/yd <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	—	—	984 (584)
Agua, lb/yd <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	353 (209)	353 (209)	264 (157)
Aditivo reductor de agua, fl oz/cwt (mL/100 kg) de cemento	1 (0.65)	1 (0.65)	—
Aditivo controlador de hidratación, fl oz/cwt (mL/100 kg) de cemento	—	90 (58.5)	—
Aditivo reductor de agua de alto rango, fl oz/cwt (mL/100 kg) de cemento	—	—	3 (1.95)
Aditivo acelerante de fraguado, fl oz/cwt (mL/100 kg) cement	—	—	60 (39)
Aditivo potenciador de resistencia, fl oz/cwt (mL/100 kg) cement	—	—	40 (26)
Fibra sintética, lb/yd <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	—	—	1.5 (0.9)
Asentamiento, in. (mm)	8.75 (222)	9.50 (241)	9.50 (241)
Contenido de aire, %	1.6	2.1	1.1
Resistencia a compresión a 28 días, psi (MPa)	6,580 (45)	—	7,910 (55)
Resistencia a flexión a 28 días, psi (MPa)	530 (4)	—	660 (5)
Tiempo inicial de fraguado, horas	3.5	—	7.8
Tiempo final de fraguado, horas	5	—	11.4

### Día 3

Al revisar el concreto temprano en la mañana el Día 3 se encontró que el concreto estaba más rígido de lo esperado, posiblemente debido al asentamiento y al empaquetamiento de partículas inducido por la vibración continua en la camioneta SUV. El concreto se restauró a su estado fluido, homogéneo y original agitando el hormigón durante aproximadamente 1 minuto utilizando una paleta montada en un taladro accionado por batería. A partir de este momento, el concreto se mezcló cada mañana y se tomaron las medidas de fluidez y temperatura. El día 3 del experimento terminó en Portage, IN, EE. UU.

### Día 4

El día 4, el concreto fue transportado a través de Chicago, IL, EE.UU., y Madison, WI, EE.UU., llegando finalmente a Mitchell, SD, EE.UU. A lo largo de esta ruta se produjeron numerosos retrasos causados por el tráfico.

### Día 5

El día comenzó con una visita al Monte Rushmore, donde el concreto estabilizado en un cubo apodado "Concrete Connie" rápidamente se convirtió en una segunda atracción turística (Fig. 3). Gracias a la cara única del cubo y después de conocer en tiempo real el viaje experimental del autor, los visitantes se fotografiaron con el ya famoso concreto estabilizado. Antes de que terminara el día, el concreto fue transportado durante 14 horas más llegando a Denver, CO, EE. UU.

### Día 6

A las 4:00 a.m. se mezcló el concreto y se registró la temperatura. Las mediciones de temperatura y fluidez revelaron que la hidratación estaba latente, ya que los datos no mostraron actividad de reacción. El viaje a través del país se reanudó con Las Vegas, NV, EE. UU., como destino para este día 6.

### Día 7

El último día de viaje para el concreto estabilizado, se visitó la presa Hoover, un hito icónico para la industria del concreto, para después llegar finalmente a San Francisco, CA. El concreto se mezcló y se encontró que era plástico después de 7 días de transporte.

### Día 8

La última mañana del experimento comenzó a las 5:00 a.m., donde se confirmó la fluidez del concreto. Un productor de concreto local en San José, CA, ayudó a evaluar el concreto de una semana tratándolo como concreto estabilizado devuelto

y simulando el proceso de reciclaje mezclándolo con concreto fresco en una proporción de 25% de concreto reciclado y 75% de concreto fresco en masa. Las proporciones del concreto fresco se muestran en la Tabla 3. El concreto fresco (la "mezcla de activación") era el mismo que se usó en la evaluación de laboratorio pero también contenía un aditivo acondicionador de concreto (CCA) para ayudar a facilitar la trabajabilidad de la mezcla compuesta.

Un CCA es una nueva clase de aditivo líquido desarrollado para mejorar y ampliar la robustez de todas las propiedades asociadas con el manejo de concreto fresco. Esto incluye, entre otros, la producción, entrega, bombeo, colocación, consolidación y acabado de concreto. Un CCA reducirá la viscosidad plástica de una mezcla de concreto mientras mantiene un asentamiento constante (valor de límite elástico estático). Esta viscosidad reducida da como resultado mezclas que se pueden manipular con un gasto de energía y esfuerzo significativamente menor. Un ACC se puede utilizar en cualquier mezcla de concreto, pero debe considerarse especialmente al reutilizar concreto devuelto, particularmente cuando se combinan dos o más diseños de mezcla de concreto en diferentes proporciones para formar una sola mezcla compuesta.

**Tabla 3:**  
**Proporciones de la mezcla de concreto fresco elaborada con materiales locales**

Material de la mezcla de concreto con materiales locales	Cantidad
Cemento, lb/yd <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	529 (314)
Agregado grueso, lb/yd <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	1,188 (705)
Agregado fino, lb/yd <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	987 (586)
Agua, lb/yd <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	264.5 (157)
Macrofibra, lb/yd <sup>3</sup> (kg/m <sup>3</sup> )	1.5 (0.9)
Aire diseñado, %	2.5
Aditivo reductor de agua de alto rango, fl oz/cwt (mL/100 kg)	3 (195)
Acelerante, fl oz/cwt (mL/100 kg)	90 (5,870)
Aditivo para mejorar resistencia, fl oz/cwt (mL/100 kg)	7 (455)
Aditivo para acondicionamiento de concreto, fl oz/cwt (mL/100 kg)	1.5 (98)

Se fabricaron cilindros de prueba a partir de la mezcla compuesta para evaluar la resistencia del concreto. El viaje ampliado del concreto fresco tenía como objetivo poner a prueba los límites del control de la hidratación y promover un concepto de residuo cero para el concreto mediante el reciclaje. En la Fig. 4 se muestran algunas estadísticas interesantes del viaje a través del país, así como de la ruta recorrida.

Visite <https://master-builders-solutions.com/en-us/news/blog/concrete-riding-shotgun/> para obtener más detalles sobre el viaje.

## Resultados de la prueba

Las mediciones de asentamiento y temperatura del concreto tomadas diariamente durante todo el viaje experimental, se realizaron utilizando un mini cono de asentamiento y un termómetro digital. Los valores se representan en la Fig. 5. Los resultados indican que el asentamiento del concreto se puede mantener durante un período prolongado. Además, el cambio mínimo en la temperatura del concreto también indicó que la hidratación está controlada.

90 días después del procesamiento por lotes, la resistencia a la compresión promedio del concreto compuesto se midió en 10,890 psi (75.1 MPa). El transporte de concreto fresco durante 7 días y 4,295 millas (6,912 km) probablemente nunca se haya realizado antes y, sin duda, ha establecido un récord para probar los límites del control de hidratación. Los requisitos del mundo real para mantener el concreto fresco estarían muy por debajo de este parámetro.

## Prácticas Sostenibles

La reutilización del concreto fresco devuelto como parte de una nueva mezcla compuesta tiene un impacto positivo y sostenible al reducir

la necesidad de producción de hormigón fresco. Esta reducción tiene un doble efecto: reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> al requerir menos hormigón virgen y extender potencialmente la vida útil de las estructuras debido a una mayor durabilidad. Además, las mezclas compuestas que utilizan hormigón reciclado se pueden optimizar en términos económicos y de rendimiento utilizando técnicas estadísticas descritas por Luciano y Bobrowski<sup>6</sup>. Un ejemplo de los posibles ahorros en emisiones de CO<sub>2</sub> para diferentes volúmenes de producción anual de plantas, asumiendo la reutilización de un 4% de concreto devuelto, se muestra en la Tabla 4. Estos valores se calculan con base en una mezcla típica de concreto de 4,000 psi (27.6 MPa) (incluye las emisiones de CO<sub>2</sub> por el transporte de materiales) y variarán según la resistencia real, el diseño de la mezcla y la región. Los valores proporcionados son indicativos de los posibles ahorros. Además de los ahorros en emisiones de CO<sub>2</sub>, la Tabla 5 también muestra el volumen potencial de concreto devuelto que se puede desviar de los vertederos mediante el reciclaje.

## Comentarios finales

La exitosa finalización del viaje a través del país con concreto fluido demuestra la robusta efectividad del HCA probado para extender el estado plástico del concreto. El mantenimiento constante de los valores de revenimiento y temperatura a lo largo del viaje confirmó una actividad de hidratación mínima, si es que hubo alguna, dentro de la mezcla de concreto.

Este experimento tiene importantes implicaciones para la industria de la construcción. Al extender de manera predecible la trabajabilidad del concreto, un HCA puede:



Fig. 3: El cubo que contenía el concreto estabilizado fue apodado "Connie Concreto"

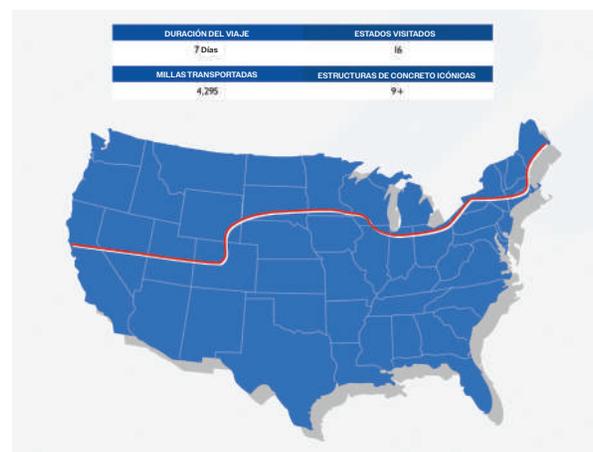


Fig. 4: Estadísticas del viaje y la ruta recorrida

- Facilite tiempos de transporte prolongados: la capacidad de mantener el concreto fluido durante períodos más prolongados permite el transporte a mayores distancias sin comprometer sus características finales;
- Gestionar los retrasos en la colocación: los horarios de construcción afectados por el clima, fallos mecánicos u otros eventos pueden beneficiarse de la flexibilidad que ofrece el control de la hidratación para la colocación del concreto.
- Minimizar el desperdicio de concreto: sobrantes de concreto (y concreto devuelto) de un proyecto se pueden conservar mediante un HCA y reutilizarse en otros proyectos; y
- Mejorar las prácticas de construcción sostenible: la reutilización del hormigón devuelto no sólo evitará que el material entre en los vertederos, sino que también reducirá las emisiones generales de CO<sub>2</sub> al minimizar la necesidad de producir concreto adicional.

Las posibilidades que ofrecen los aditivos de control de hidratación, control de fraguado, mejoradores de resistencia y acondicionamiento del concreto han aportado conocimientos valiosos para futuras investigaciones, proporcionando soluciones para obstáculos retadores en la construcción y facilitando el uso de prácticas sustentables.

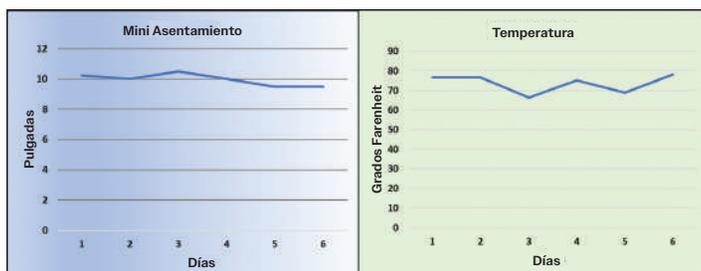


Fig. 5: Asentamiento (Revenimiento) y temperatura del concreto estabilizado medidos durante su viaje a través de los Estados Unidos

## Agradecimientos

Los autores desean agradecer a John Luciano, Greg Guecia, María Navarro y al equipo de laboratorio de Master Builders Solutions por su ayuda en el desarrollo y prueba de las mezclas de concreto. Los autores también desean agradecer a Alana Guzzetta y su equipo del Laboratorio Nacional de Investigación de Vulcan Materials Company en San José, CA, EE. UU., por su ayuda en la evaluación del viaje concreto posterior a campo traviesa.

## Referencias

1. Bobrowski, G. y Bury, M.A., "Novel Approach for Controlling Hidratación del cemento y sus aplicaciones", Construcción y Tecnología, 1990, págs. 15-21.
2. ASTM C494/C494M-24, "Especificación estándar para aditivos químicos para concreto", ASTM International, West Conshohocken, PA, 2024, 15 págs.
3. ASTM C1798/1798M-19, "Especificación estándar para productos devueltos de concreto fresco para uso en un nuevo lote de concreto premezclado", ASTM International, West Conshohocken, PA, 3 págs.
4. Senbetta, E. y Bury, M.A., "Hidratación controlada del cemento: Su efecto sobre la durabilidad del concreto", SP-131: Durabilidad del concreto—G.M. Simposio Internacional Idorn, Jens Holm y Mette Geiker, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, marzo de 1992, págs. 179-194.
5. Grissom, T., "¿Cómo afrontar los desafíos del cemento tipo IL?—Aditivos basados en nanopartículas", Concrete International, V. 46, No. 1, enero de 2024, págs. 53-55.
6. Luciano, J.J. y Bobrowski, G.S., "Using Statistical Methods to Optimize High-Strength Concrete Performance", Transportation Research Record, No. 1284, 1990, págs. 60-69.

Tabla 4:

Potenciales ahorros de emisiones de CO<sub>2</sub> para diferentes volúmenes de producción anual de la planta (asumiendo la reutilización del 4% del concreto devuelto)

Producción anual, yd <sup>3</sup>	Concreto devuelto anual del 4%					
	60,000	50,000	40,000	30,000	20,000	10,000
Concreto devuelto anual, yd <sup>3</sup>	2,400	2,000	1,600	1,200	800	400
Ahorro anual de emisiones de CO <sub>2</sub> , lb	1,619,352	1,349,460	1,079,568	809,676	539,784	269,892

Nota: 1 yd<sup>3</sup> = 0.76 m<sup>3</sup>; 1 lb = 0.45 kg

Tabla 5:

Potenciales ahorros de emisiones de CO<sub>2</sub> para diferentes proporciones de concreto fresco y reciclado

Ahorro de emisiones de CO <sub>2</sub> , lb/10 yd <sup>3</sup> (kg/7.65 m <sup>3</sup> )	Relación entre concreto fresco y reciclado				
	90:10	80:20	70:30	60:40	50:50
	675 (306)	1,349 (612)	2,024 (918)	2,699 (1224)	3,374 (1,530)

**Mark A. Bury**, FACI, es Gerente de Producto en Master Builders Solutions con 44 años de experiencia en concreto. Posee títulos en ciencias aplicadas y mercadeo empresarial. Bury es Miembro Honorario del Comité C09 de ASTM, Concreto y Agregados para Concreto. Fue Presidente reciente del Subcomité C09.47 de ASTM, Concreto Autocompactante, y es actualmente Presidente del grupo de trabajo del Subcomité C09.23, Sección 3, Aditivos Químicos. Bury tiene múltiples patentes relacionadas con aditivos para la durabilidad del concreto, ha publicado numerosos artículos sobre tecnología del concreto y aditivos, y participó en experimentos únicos sobre concreto en el espacio a bordo del transbordador espacial Endeavour.



**Carlito Cascone**, miembro de ACI, es Científico de Ingeniería en Master Builders Solutions, Beachwood, OH, EE. UU. Lleva 4 años en la comunidad de investigación y desarrollo. Cascone se formó en biología y química en Hiram College, Hiram, OH. Sus intereses de investigación incluyen la corrosión inducida por microorganismos en concreto, la corrosión por macrocelda, los nanomateriales y astroconcreto. Es miembro de los Comités del ACI 211, Proporción de Mezclas de Concreto; 222, Corrosión de Metales en Concreto; 231, Propiedades del Concreto en Edades Tempranas; y 309, Consolidación del Concreto; además de ser miembro de los Subcomités del ACI 201-K, Ataque Biogénico; y 241-A, Aplicación e Implementación de Concreto Nanoingenierizado.



Título original en inglés:  
**Coast-to-Coast Concrete:  
Exploring Hydration Control  
for Sustainable  
Construction Practices**

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



*Traductor:*  
**Ing. Jorge  
Campoverde**



*Revisor Técnico:*  
**Ing. Santiago Velez  
Guayasamín, MSc  
DIC**

# 02

## El cemento está cambiando para bien: Forma parte de la conversación

Por Michelle L. Wilson

La industria del concreto se encuentra en un punto de inflexión, con un creciente enfoque en la sustentabilidad que reconfigura la forma en que el cemento y el concreto se diseñan, producen e implementan. Para seguir siendo relevantes en el mercado actual, todos los actores de la industria -incluidos propietarios, diseñadores, productores, contratistas y proveedores de materiales - deben mantenerse informados sobre las prácticas y materiales en evolución que pueden apoyar una construcción sostenible.

### Camino hacia la neutralidad de carbono

La industria cementera estadounidense se ha comprometido a lograr la neutralidad del carbono en toda la cadena de valor para 2050. En 2021, la Asociación del Cemento Portland (PCA) presentó la hoja de ruta hacia la neutralidad del carbono, que abarca los cinco eslabones de la cadena de valor: clínter, cemento, concreto, construcción y absorción del carbono (Fig. 1). Esta hoja de ruta hace énfasis en la reducción de emisiones en cada etapa, desde la producción de clínter y cemento hasta los impactos en la fase de construcción y uso.

La hoja de ruta del PCA da prioridad a tres áreas clave:

- **Combustibles alternativos** - La sustitución de combustibles fósiles por biomasa y otros materiales que normalmente se desecharían pero que tienen un valor significativo como combustible, reduce las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), desvía materiales de los vertederos y recupera una parte significativa de la energía incorporada contenida en esos materiales. Actualmente, el uso de combustibles alternativos en Estados Unidos es inferior al 14%, con un objetivo del 50% para 2050;

- **Captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS)** - La aplicación de tecnologías de CCUS puede evitar parte significativa de las emisiones de la fabricación de cemento; y
- **Cementos mezclados** - Los cementos mezclados con menor contenido de carbono reducen las emisiones y minimizan el uso de materiales vírgenes. El objetivo es alcanzar una relación clínter-cemento de 0.75 para 2050.

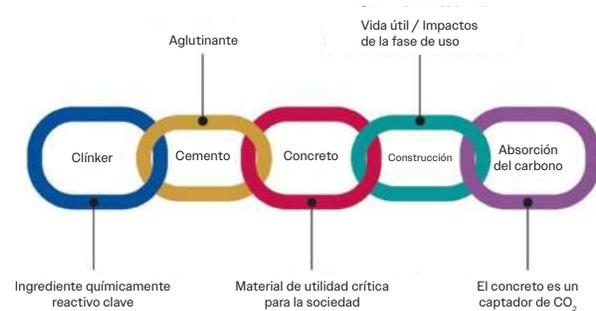


Fig. 1: Cada eslabón de la cadena de valor contribuye a la sostenibilidad, con un impacto combinado mayor que la suma de sus partes.

### Evolución de las especificaciones del cemento

Las especificaciones del cemento en Norteamérica han evolucionado significativamente a lo largo del último siglo para satisfacer las nuevas demandas y adaptarse a las prácticas sostenibles (Fig. 2). Las primeras investigaciones de Bogue, realizadas en el marco de una beca de la PCA en la década de 1920, exploraron la composición del cemento portland y, en última instancia, contribuyeron al desarrollo de la norma ASTM C150/C150M, “Especificaciones estándar para cemento Portland” (Standard Specification for Portland Cement), en 1940. Desde entonces, las especificaciones del cemento en Estados Unidos han evolucionado para dar prioridad al rendimiento del cemento.

La norma ASTM C595/C595M, Especificación Estándar para cementos hidráulicos mezclados” (Standard Specification for Blended Hydraulic Cements), publicada inicialmente en 1967, permitió el uso de materiales alternativos en el cemento. Décadas de investigación y colaboración, lideradas por ASTM Internacional y otras organizaciones, han dado lugar a especificaciones y métodos de ensayo que abordan los cementos contemporáneos, mientras continúan perfeccionándose para hacer frente a los retos futuros.

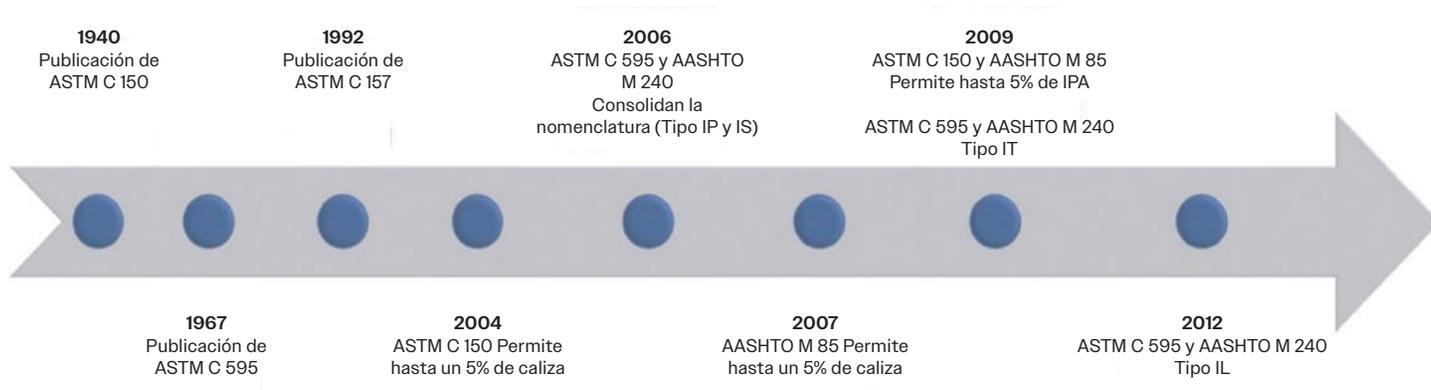


Fig. 2: Evolución de las normas de cemento de ASTM Internacional.

## Áreas de interés del PCA

Para más información sobre las áreas de interés de la hoja de ruta del PCA, visite <https://pcalibrary.libguides.com> y acceda a las «Guías de Recursos Bibliotecarios» en el menú principal.

## Cementos mezclados

Los cementos hidráulicos mezclados se fabrican triturando o mezclando dos o más tipos de materiales finos. La norma ASTM C595/C595M (AASHTO M 240) reconoce cuatro clases principales de cementos mixtos:

- Tipo IL – Cemento Portland con piedra caliza (PLC);
- Tipo IP – Cemento Portland puzolánico;
- Tipo IS – Cemento Portland de escoria de alto horno; y
- Tipo IT – Cemento adicionado ternario.

Las propiedades especiales, como la resistencia moderada o alta a los sulfatos, pueden verificarse mediante ensayos. Cuando procede, se añaden descripciones adicionales a la designación del tipo de cemento. Por ejemplo, Tipo IL (MS) indica un Cemento Portland de piedra caliza (PLC) moderadamente resistente a los sulfatos.

Los cementos mezclados ASTM C595/C595M son una alternativa más sostenible a los cementos portland tradicionales ASTM C150/C150M. Al incorporar piedra caliza y materiales cementantes suplementarios (SCM) como cenizas volantes, cemento de escoria y otras puzolanas, los cementos mezclados reducen las emisiones y la demanda de recursos naturales. Los PLC incluyen entre un 5% y un 15% de piedra caliza molida, lo que supone hasta un 10% más que el máximo del 5% del cemento portland ASTM C150/C150M, lo que se traduce en

una reducción de la huella de carbono de hasta un 10%. Los tipos IP, IS e IT pueden tener huellas de carbono aún menores, ya que permiten proporciones más elevadas de materiales distintos del Clinker.

Los cementos mezclados también pueden mejorar la durabilidad y resistencia del concreto. Por ejemplo, optimizar la cantidad de cemento de escoria o puzolana en los cementos mezclados puede ayudar a mitigar la reactividad álcali-agregado.

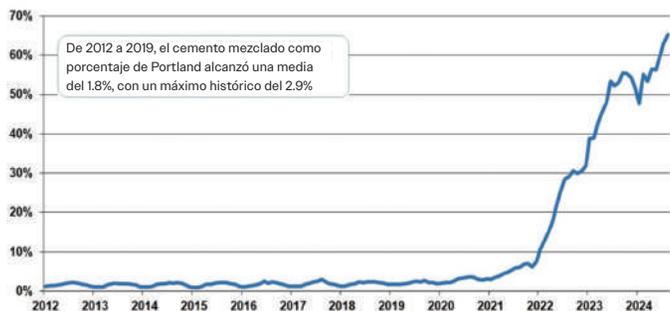
## Uso de Cementos mezclados

Los cementos mezclados pueden utilizarse en todas las aplicaciones del concreto, ya sea como único material cementante o en combinación con SCM añadidos en la planta de concreto. Desde 2021, la cuota de los cementos mezclados en el consumo total de cemento en EE.UU. ha aumentado sustancialmente (Fig. 3). El uso de PLC (Tipo IL) ha aumentado de menos del 5% en 2021 a aproximadamente el 58% del mercado de cemento de EE.UU. hasta agosto de 2024 (Encuesta Geológica de Estados Unidos [USGS]).

La disponibilidad regional de estos materiales varía, y los fabricantes están explorando ingredientes de origen local para futuras formulaciones de cemento.

## Perspectivas de futuro de los Cementos mezclados

De cara al futuro, los avances en los cementos mezclados podrían reducir aún más las emisiones de carbono. Los investigadores y productores de materiales están investigando fuentes de materiales cementantes suplementarios (SCM) más allá de los subproductos industriales tradicionales. Entre ellas figuran las puzolanas naturales, las arcillas calcinadas, piedra pómez, esquistos expandidos, cenizas volcánicas y las cenizas de carbón recogidas en vertederos.



**Fig. 3: La participación de los cementos mezclados en el consumo total de cemento en Estados Unidos ha aumentado sustancialmente desde 2021 (USGS).**

Estos SCMs alternativos no suelen cumplir las especificaciones tradicionales de la industria. En este ámbito se están llevando a cabo numerosos trabajos de normalización. El paso de predicciones empíricas a predicciones basadas en la ciencia de los materiales sobre la reactividad y el rendimiento del cemento favorece el desarrollo de futuras especificaciones basadas en el rendimiento, lo que garantiza una calidad uniforme del concreto con una mayor flexibilidad en la selección de materiales.

## Desafíos para la adopción

Aunque los cementos mezclados ofrecen importantes ventajas medioambientales, se enfrentan a varios obstáculos para su adopción generalizada:

- Conservadurismo de la industria - los ingenieros y constructores familiarizados con el cemento portland pueden mostrarse reticentes a adoptar nuevos materiales sin suficientes pruebas de rendimiento o experiencia en el uso del nuevo material; y
- Limitaciones de la cadena de suministro - la disponibilidad regional de los componentes del cemento mezclado afecta a la viabilidad, y el transporte puede contrarrestar los beneficios medioambientales.

Las diferencias en las propiedades de los tipos de cemento mezclado pueden requerir ajustes en las mezclas de concreto, manejo, curado y técnicas de aplicación. Para superar estos obstáculos habrá que invertir en investigación, desarrollo de normas y formación de la industria. En particular, muchos cementos mezclados ya han demostrado su eficacia. Otras soluciones -aunque todavía no están disponibles- son técnicamente posibles con políticas de apoyo y pruebas que aceleren su desarrollo e implantación.

## Comunicación, educación y colaboración

En octubre de 2024, la PCA celebró una mesa redonda para las partes interesadas de la industria en Aurora, CO, EE. UU., con miembros y personal de la Asociación Nacional de Concreto Premezclado (NRMCA), la Asociación Americana de Constructores de Concreto (ASCC) y la Asociación Americana de Pavimentos de Concreto (ACPA) junto con otros representantes clave de la industria.

Los debates se centraron en la importancia de:

- Comunicación - mejorar del intercambio de información en toda la cadena de valor en relación con las mezclas de concreto con bajas emisiones de carbono;
- Educación - Formación en todo el sector sobre iniciativas sostenibles y actualizaciones técnicas para apoyar la toma de decisiones con conocimiento de causa; y
- Colaboración - Coordinación entre las partes interesadas para equilibrar los objetivos de sostenibilidad con requisitos de rendimiento del concreto.

La PCA se compromete a continuar estos debates y la colaboración en toda la cadena de valor cemento-concreto-construcción. La conversación en torno al cemento se está ampliando. Con todas las partes implicadas en la mesa, es posible lograr un progreso significativo. Forme parte de la conversación y ayude a dar forma a un futuro sostenible para el cemento y el concreto.

Para más información, póngase en contacto con Michelle Wilson en [mwilson@cement.org](mailto:mwilson@cement.org).

Nota: Para más información sobre las normas de ASTM International de las que se habla en este artículo en [www.astm.org](http://www.astm.org)

## Acerca de la Asociación de Cemento Portland

Fundada en 1916, la Asociación de Cemento Portland (PCA) es la principal organización de política, investigación, educación e inteligencia de mercado al servicio de los fabricantes de cemento de Estados Unidos. La PCA apoya la sostenibilidad, la innovación y la seguridad, al tiempo que fomenta la mejora continua en la fabricación, distribución, infraestructura y crecimiento económico del cemento. Para más información, visite [www.cement.org](http://www.cement.org).

**Michelle L. Wilson**, FACI, es Directora Senior de Tecnología del Concreto y Divulgación de la Industria en la Asociación de Cemento Portland (PCA). Cuenta con más de 25 años de experiencia en materiales de concreto, especificaciones, rendimiento, solución de problemas y reparación. Wilson es la autora principal del libro de la PCA Design and Control of Concrete Mixtures (Diseño y control de mezclas de concreto). Es responsable de los recursos técnicos de la PCA, que abarcan todo el espectro de la tecnología del cemento y el concreto, incluida la divulgación industrial y el apoyo a la Hoja de ruta hacia la neutralidad en carbono de la PCA. Wilson formó parte de la Junta Directiva de ACI y fue Presidenta del Comité 301 de ACI, Especificaciones para la Construcción de Concreto. Fue galardonada con la Medalla Arthur R. Anderson 2022 por sus contribuciones al avance del conocimiento del concreto. También es miembro honorario del Comité C09 de ASTM International, Concrete and Concrete Aggregates, ha formado parte del Comité Ejecutivo del C09 y es Presidenta del Subcomité C09.40 de ASTM International, Ready-Mixed Concrete. Wilson se licenció en Ingeniería Arquitectónica en la Milwaukee School of Engineering (MSOE), Milwaukee, WI, EE.UU., con especialización en Ingeniería Estructural y Materiales de Concreto. En 2022, la MSOE le concedió el premio a la mejor estudiante del año.



Título original en inglés:  
**Cement Is Changing for Good:  
Be Part of the Conversation**

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



*Traductor:*  
**Est. Luis Angel  
Cubas Saavedra**



*Revisores Técnicos:*  
**Ing. Julio Higashi  
Luy**



**Ing. Jakelyn Quispe  
Vásquez**

# 03

## Concreto a Prueba del Futuro: Cómo Prolongar la Vida Útil de su Concreto

Por Jennifer K. Mizer

Siendo el eje medular de la infraestructura moderna, el concreto constituye el fundamento mismo de las estructuras que van desde imponentes rascacielos y puentes extensos, hasta casas residenciales y pasarelas peatonales públicas. Debido a su resistencia inherente, adaptabilidad y costo relativamente bajo en comparación con materiales de construcción alternativos, el concreto ha seguido siendo el material más ampliamente utilizado en la construcción durante siglos. No obstante, el impacto ambiental de la producción de concreto, junto con los desafíos que presenta la infraestructura envejecida y las condiciones del cambio climático, está generando un cambio de paradigma hacia el concreto a prueba del futuro como el mejor programa de acción para mantener la integridad estructural y garantizar su durabilidad.

### Desafíos Importantes que Impactan la Durabilidad del Concreto

La durabilidad del concreto se ve influenciada por diferentes acciones interrelacionadas, cada una de las cuales contribuye a su degradación paulatina. Los factores ambientales juegan un papel significativo en este proceso. Cuando está expuesto al agua en climas fríos, el agua puede penetrar en el concreto antes de congelarse y expandirse, provocando agrietamiento interno y desconchamiento superficial. A medida que pasa el tiempo, los ciclos repetidos de congelamiento y descongelamiento pueden conducir a un daño estructural significativo. La exposición a sustancias químicas tales como la lluvia ácida, los contaminantes industriales y las sales para deshielo también contribuyen a la degradación del concreto descomponiendo la pasta de cemento y debilitando la matriz del concreto.

Otro reto importante es la corrosión inducida por cloruro, que es particularmente problemática en estructuras expuestas a ambientes marinos o sales para deshielo. Los cloruros penetran el concreto

y llegan al acero de refuerzo, iniciando un proceso de corrosión que expande y agrieta el concreto circundante. Esto no sólo reduce la integridad estructural del concreto, sino que también conduce a penetración adicional de agentes perjudiciales.

Las prácticas de construcción y las rutinas de mantenimiento también impactan la durabilidad del concreto. Por ejemplo, el curado inadecuado, el diseño de mezcla inapropiado y la compactación insuficiente pueden causar debilidad y defectos en el concreto. Estas fallas iniciales crean vías para que los agentes ambientales penetren y deterioren el concreto a medida que pasa el tiempo. Además, el mantenimiento inadecuado – tal como olvidar sellar grietas o no reparar áreas dañadas con prontitud – permite que el deterioro avance libremente, dando por resultado la necesidad de reparaciones más extensas y costosas a largo plazo.

Por otra parte, la complejidad cada vez mayor de las estructuras modernas de concreto presenta desafíos adicionales. Los diseños arquitectónicos a menudo requieren cimbras y materiales de alta resistencia, lo que exige técnicas de construcción precisas y materiales de alta calidad. Toda desviación de estos requerimientos puede poner en peligro la integridad estructural del concreto. Conforme estas estructuras envejecen, también se hacen más susceptibles a cargas dinámicas, tales como vibraciones de tránsito y actividad sísmica, que pueden exacerbar las debilidades ya existentes y acelerar su deterioro.

### Soluciones Innovadoras y Rentables para Prolongar la Vida Útil del Concreto

Para cumplir con la creciente demanda de infraestructura duradera y sustentable, la industria de la construcción está adoptando soluciones más innovadoras y avanzadas que prolongan la durabilidad del concreto a la vez que generan ahorros en costos y reducen el impacto ambiental en su totalidad.



Sal para deshielo sobre una superficie de concreto

## Materiales Cementicios Avanzados

Uno de los avances más prometedores en la tecnología del concreto es el desarrollo de materiales avanzados, tales como el concreto de alto desempeño (HPC [por sus iniciales en inglés]) y concreto de ultra alto desempeño (UHPC [por sus iniciales en inglés]). Estos materiales se diseñan específicamente para proporcionar resistencia y durabilidad superiores frente a las solicitaciones ambientales, incorporando materiales cementicios complementarios (SCMs [por sus iniciales en inglés]), tales como ceniza volante, cemento de escoria y humo de sílice, que mejoran las propiedades del concreto tradicional. Esto mejora su capacidad para soportar ambientes agresivos, reduce la permeabilidad e incrementa la resistencia a ataques químicos y abrasión. Como resultado, la vida útil de las estructuras de concreto puede extenderse de manera significativa conservando su rentabilidad.

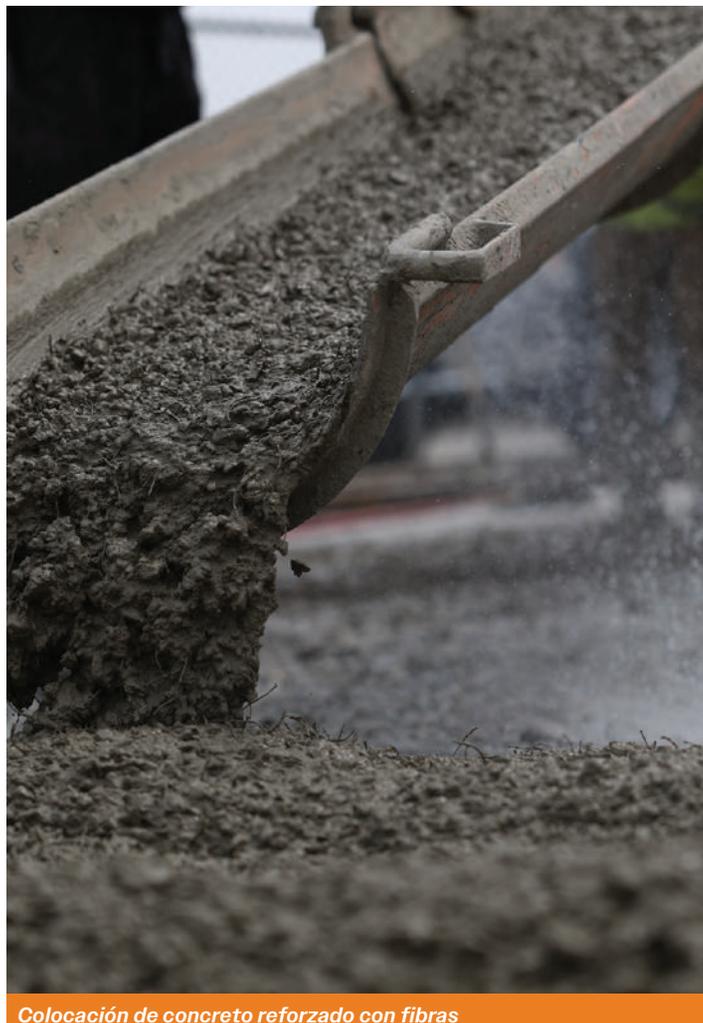
## Captura y utilización del carbono

Otro de los avances esenciales es la captura y utilización del carbono (CCU [por sus iniciales en inglés]), una tecnología innovadora que aborda tanto los desafíos ambientales como de durabilidad en la producción del concreto. Este enfoque capta las emisiones de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) de los procesos industriales y las incorpora en la mezcla de concreto, donde el  $\text{CO}_2$  se mineraliza y se convierte en carbonatos estables. Posteriormente, estos carbonatos se integran a la matriz del concreto, reduciendo así la huella de carbono en la producción y mejorando simultáneamente las propiedades del material. La incorporación de los carbonatos mejora la densidad del concreto, reduce la porosidad e incrementa la resistencia a los factores ambientales tales como la carbonatación y la penetración del cloruro.

## Concreto Autocicatrizante

Un avance vanguardista en los materiales de construcción, es el concreto autocurativo diseñado para reparar de forma autónoma grietas y daños muy pequeños que ocurren a medida que transcurre el tiempo. Esta innovadora solución del concreto integra agentes curativos encapsulados, tales como microcápsulas que contienen materiales poliméricos o sistemas a base de bacterias. Cuando se forman grietas, estos agentes se liberan y reaccionan con el concreto circundante para formar un sello, cerrando de manera eficaz las grietas y evitando la penetración de sustancias

nocivas. Este mecanismo de auto reparación potencializa significativamente la durabilidad de las estructuras de concreto, reduciendo la necesidad de mantenimiento y reparaciones frecuentes.



Colocación de concreto reforzado con fibras

## Nanotecnología en el concreto

La nanotecnología está transformando la industria de la construcción permitiendo la manipulación de los materiales a nivel molecular, lo que mejora de manera importante el desempeño del concreto. Al incorporar nanopartículas como nano-sílice y nanotubos de carbono en la matriz del concreto, mejoran las propiedades tales como la resistencia y durabilidad y capacidad de soporte de otros agentes ambientales. Estas nanopartículas rellenan huecos, reducen la porosidad y fortalecen la zona de transmisión interfacial entre la pasta del cemento y los agregados, lo que da por resultado un concreto más denso, más resiliente, menos susceptible al agrietamiento y degradación. La nanotecnología también facilita el concreto inteligente con capacidades de autodetección para monitorear la salud estructural en tiempo real.

## Tecnología de Impresión 3D

Mediante la activación de la fabricación precisa y eficiente de estructuras de concreto complejas con la deposición de capa por capa, la tecnología de impresión tridimensional (3-D) está revolucionando la industria de la construcción. Este abordaje innovador permite la realización de diseños complejos, optimización en el uso y reducción del desperdicio de materiales – todo ello a la vez que se minimiza la necesidad de cimbras tradicionales y se aceleran los tiempos de construcción. Por otra parte, el concreto impreso en 3-D puede integrar materiales y aditivos avanzados para potencializar la durabilidad y desempeño. La precisión y personalización que ofrece la impresión 3-D produce estructuras de concreto de alta calidad que requieren menor mantenimiento y con mayor durabilidad.

## Integración de Prácticas Sustentables para Lograr el Exito del Concreto Durable

Si bien las tecnologías innovadoras juegan un papel esencial para aumentar la durabilidad y la vida útil del concreto, integrar prácticas sustentables en cada aspecto de la construcción y mantenimiento del concreto es de suma importancia para la durabilidad – garantizando así que las estructuras no sólo sean resilientes sino también ecológicamente respetuosas.

Algunas de estas prácticas sustentables incluyen:

- **Optimización en el suministro de los materiales** - la selección y suministro de los materiales tiene un impacto profundo en la huella ambiental y en el desempeño general del concreto. Elegir materiales localmente disponibles y sustentables reduce las emisiones causadas por la transportación y apoya a las economías regionales. Utilizar agregados reciclados y subproductos industriales, tales como agregados reciclados de concreto y escoria, también puede disminuir la demanda de materiales vírgenes y reducir el impacto ambiental;
- **Puesta en marcha de las normas de construcción verde** - Las normas de construcción verde tales como LEED y BREEAM garantizan que los proyectos de concreto cumplan con criterios de alta sustentabilidad. Estas normas promueven la eficiencia en el uso de la energía, la conservación de los recursos y la calidad medioambiental, orientando todo el diseño y la construcción de estructuras de concreto

hacia un menor impacto ecológico y una mayor durabilidad;

- **Priorización de la evaluación del ciclo de vida** - Una evaluación del ciclo de vida (LCA [por sus iniciales en inglés]) mide el impacto ambiental de las estructuras de concreto desde la producción hasta su disposición. Al analizar factores tales como el consumo de energía, el uso de recursos y las emisiones durante toda la vida útil de una estructura, los interesados pueden tomar decisiones informadas que minimicen el impacto ambiental y optimicen la sustentabilidad. Los hallazgos de una LCA pueden guiar para la selección de materiales, los métodos de construcción y las estrategias de mantenimiento, dando lugar a estructuras de concreto más durables y amigables con el ambiente.
- **Aumento en la eficiencia del uso de energía** - Las prácticas eficientes en cuanto al uso de energía en la construcción y mantenimiento de estructuras de concreto contribuyen a extender su vida útil y reducir el impacto ambiental. Por ejemplo, las características del diseño tales como recubrimientos reflectantes y aislamiento térmico pueden mejorar el desempeño de la energía en construcciones de concreto. Además, las fuentes de energía renovable como los paneles solares o los generadores eólicos pueden reducir aún más la huella de carbono de la construcción y sus costos de operación; y
- **Promoción de la educación y capacitación** - Invertir en educación y capacitación para profesionales de la construcción garantiza que se pongan en práctica de manera eficaz las tecnologías y prácticas sustentables más recientes. Los programas y las certificaciones de desarrollo profesional continuo mantienen informadas a las partes interesadas en la



Demostración de impresión 3-D en World of Concrete, Las Vegas, NV, Estados Unidos de Norteamérica

industria respecto a los avances y prácticas sustentables en la tecnología del concreto.

## Conclusión

Integrar tecnologías avanzadas con prácticas sustentables ofrece un enfoque integral para el concreto a prueba del futuro. Al abordar consideraciones tanto técnicas como ambientales, los involucrados pueden lograr soluciones de concreto durables, rentables y amigables con el ambiente que cumplan con las exigencias de la infraestructura moderna, a la vez que contribuyen a la sustentabilidad a largo plazo del concreto.

Para obtener más información, visite [www.euclidchemical.com](http://www.euclidchemical.com).

**Jennifer K. Mizer** es miembro de ACI y Directora de Servicios de Marketing en The Euclid Chemical Company, fabricante de concreto especializado y soluciones de construcción en mampostería. Veterana en la industria con más de 20 años de experiencia, Mizer administra las actividades de comunicaciones de comercialización para la extensa línea de aditivos, fibras de refuerzo, producción para reparación de concreto, materiales de pisos y sistemas de concreto decorativo de Euclid.



Título original en inglés:  
**Future-Proofing Concrete:  
How to Prolong Your  
Concrete's Lifespan**

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



*Traductora:*  
**Lic. Ana P. García  
Medina**



*Revisor Técnico:*  
**Dr. Esteban  
Astudillo de la  
Vega**

## Estudio Inter laboratorio sobre la Precisión al Usar un Escáner Láser Terrestre para Verificar Tolerancias en el Concreto

Por Leo (Lingfeng) Zhang, Mike Hernández, James Dare, Mack Kowalsky y Ezra Che

Este artículo aborda un estudio diseñado para reconsiderar un debate en curso sobre el uso de escáneres láser tridimensionales (3D) para evaluar las tolerancias en la construcción de concreto. Tanto el hardware y software de los escáneres como las prácticas generales continúan evolucionando, por lo que surge la pregunta, ¿cómo ha afectado este progreso la precisión de las mediciones por escaneo?

A partir de mediados de la década de 2010, los escáneres láser se han utilizado para evaluar la planicidad y nivelación de los pisos, así como la precisión de las estructuras construidas. Un taller sobre escáneres láser en el *World of Concrete* de 2018 despertó la inquietud de que se necesitaba un estudio sobre el uso de escáneres láser en campo para validar la precisión, repetibilidad y reproducibilidad de esta clase de herramientas. Posteriormente, se desarrolló un plan de estudio para determinar si los escáneres láser tenían la capacidad técnica para evaluar las tolerancias horizontales y verticales según lo especificado en ACI SPEC-117-10(15)<sup>1</sup>, así como proporcionar datos adecuados para determinar la planicidad de pisos  $F_F$  y la nivelación de pisos  $F_L$  según ASTM E1155/E1155M.<sup>2</sup>

Los resultados se publicaron en dos artículos de *Concrete International*.<sup>3,4</sup> Basado en las capacidades generales de los ocho participantes, los autores de la referencia 3 concluyeron que “sería apropiado utilizar un escáner láser para verificar el cumplimiento de las especificaciones cuando se mida una tolerancia vertical de 5/8 de pulgada (15.9 mm) o más y una tolerancia horizontal de 1 pulgada [25.4 mm] o más”. Sin embargo, un examen de los datos tabulados muestra que tres de los participantes pudieron lograr resultados mucho mejores que el grupo en general, tanto en términos de mayor precisión en comparación con una estación total, como en menores desviaciones estándar. ¿Podrían sus resultados alcanzarse de manera más amplia hoy en día? Vamos a averiguarlo.

La tecnología de escaneo láser, ahora se ubica en campos que van desde la arqueología hasta la medicina, tiene una historia fascinante enraizada en el espíritu innovador del siglo XX. Aunque sus orígenes se remontan a la década de 1960, no fue hasta finales de la década de 1990 que el escaneo láser comenzó a revolucionar la manera en que las personas capturan e interactúan con el mundo.

Los primeros intentos de escaneo láser fueron rudimentarios, involucrando luces, proyectores y cámaras para capturar datos de superficie. Estos sistemas eran lentos, torpes y carecían de la precisión de la tecnología moderna. Sin embargo, el desarrollo de LiDAR (detección y medición por láser) en 1985 marcó un punto de inflexión significativo. Al utilizar pulsos láser para medir distancias, LiDAR permitió una captura de datos 3D más rápida y precisa.

A finales de la década de 1990, el escaneo láser ganó popularidad en la ingeniería y la topografía, gracias en gran parte al innovador escáner Cyrax desarrollado por Cyra Technologies. Este escáner portátil allanó el camino para una adopción más amplia de la tecnología. En los años 2000 se dieron avances adicionales con la introducción de escáneres de 360 grados y mejoras significativas en velocidad, precisión y portabilidad.

### Una Revisión de Métodos de Escaneo

Hoy en día, el escaneo láser abarca una variedad de técnicas, cada una con sus propias fortalezas y aplicaciones:

- **Escaneo Láser Terrestre (TLS):** También conocido como LiDAR basado en el suelo, el Escaneo Láser Terrestre (TLS por sus siglas en inglés) implica configurar un escáner en un trípode para capturar datos 3D altamente precisos de los entornos circundantes. Este método se utiliza ampliamente en topografía, construcción y documentación arquitectónica.
- **Escaneo Láser Móvil (MLS):** Los sistemas MLS se montan en vehículos, lo que permite la recolección rápida de datos sobre grandes áreas. Esto es particularmente útil para la cartografía de carreteras, ferrocarriles e infraestructura.
- **Escaneo Láser Aerotransportado (ALS):** Montados en aeronaves o drones, los sistemas ALS capturan datos desde el aire, lo que los hace ideales para la cartografía a gran escala, la gestión forestal y las encuestas aéreas.

- **Localización y Mapeo Simultáneos (SLAM):** La tecnología SLAM permite que los escáneres mapeen un entorno mientras determinan simultáneamente su ubicación dentro de ese entorno. Esto es particularmente útil para el mapeo interior y la navegación robótica.

Esta diversa gama de métodos de escaneo ha ampliado las aplicaciones del escaneo láser, convirtiéndolo en una herramienta esencial para numerosas industrias.

## Construyendo el Futuro: El Escaneo Láser en la Construcción

Una de las aplicaciones más impactantes del escaneo láser se encuentra en la industria de la construcción. Dentro de esta industria, el escaneo láser está transformando los flujos de trabajo y mejorando la eficiencia en cada etapa del ciclo de vida de un proyecto:

- **Pre-construcción:** El escaneo láser permite la creación de modelos 3D altamente precisos de los sitios existentes, proporcionando información crucial para la planificación y el diseño. Esto ayuda a identificar posibles conflictos o desafíos antes de que comience la construcción, reduciendo costosas modificaciones.
- **Monitoreo de la construcción:** Al realizar escaneos periódicos en el sitio durante la construcción, se puede seguir el progreso en comparación con el diseño original. Esto ayuda a identificar cualquier desviación de manera temprana, asegurando que el proyecto se mantenga dentro del cronograma y el presupuesto.
- **Control de calidad:** El escaneo láser permite mediciones precisas y comparaciones, asegurando que la construcción se ajuste a los estándares y especificaciones de calidad. Esto minimiza errores y reduce la necesidad de rediseñar.
- **Documentación de “obra terminada”:** Al finalizar el proyecto, el escaneo láser proporciona un registro completo y preciso de la estructura tal como se construyó. Esta valiosa documentación se puede utilizar para la gestión de instalaciones, renovaciones y futuras expansiones.

Ejemplos específicos de escaneo láser en acción:

- **Renovación y restauración:** El escaneo láser es invaluable en proyectos que involucran estructuras existentes, especialmente edificios históricos. Permite la creación de modelos digitales detallados que capturan características arquitectónicas intrincadas, ayudando en los esfuerzos de preservación y asegurando una restauración precisa.
- **Zonas de exclusión por seguridad, sensibilidad ambiental y respuesta a emergencias:** El análisis del contexto escaneado de un edificio propuesto permite identificar líneas eléctricas aéreas, hidrantes, árboles maduros y sumideros de tormentas. La ubicación de las líneas eléctricas y los puntos de servicios de emergencia ayuda a planificar la instalación de grúas y la logística del sitio. Los árboles maduros que se preservarán durante la construcción y los drenajes de tormenta afectan la planificación de bombeo de concreto y lavado de camiones de concreto.
- **Coordinación de sistemas mecánicos, eléctricos y de plomería (MEP):** El escaneo láser ayuda a identificar posibles conflictos entre los sistemas MEP y los elementos estructurales, facilitando la coordinación y evitando costosos conflictos en el sitio.
- **Análisis estructural:** Los datos de escaneo pueden utilizarse para evaluar la integridad estructural de edificios e infraestructuras, identificando áreas de preocupación y facilitando trabajos de mantenimiento o reparación.
- **Prefabricación:** El escaneo láser respalda la creciente tendencia de la prefabricación, permitiendo mediciones precisas y modelos digitales que garantizan una fabricación exacta de componentes fuera del sitio.

## Alcance del Estudio

### Diseño

Este estudio fue diseñado para cumplir con la norma ASTM E691-23, “Práctica estándar para realizar un estudio Inter laboratorio para determinar la precisión de un método de prueba”.<sup>5</sup> El enfoque estuvo en la aplicación de los sistemas TLS (Escaneo Láser Terrestre), ya que TLS es ampliamente reconocido como la técnica de escaneo más precisa y exacta, y se ha adoptado ampliamente para verificar dimensiones y

ubicaciones en proyectos de construcción. Los objetivos del estudio fueron determinar la precisión, repetibilidad y reproducibilidad de la tecnología TLS cuando se utiliza para verificar que los elementos de concreto construidos están dentro de las tolerancias especificadas, proporcionar una estimación de sesgo, actualizar las conclusiones del estudio mencionado previamente, y proporcionar información sobre los factores que podrían introducir errores en los resultados de cumplimiento de tolerancia.

Es importante destacar que este estudio fue diseñado para evaluar el rendimiento de la tecnología TLS en un sitio de construcción, y no en un entorno controlado. Además, este estudio no tenía la intención de reevaluar la idoneidad del escaneo láser para el sistema de números F (F-number system). Tampoco fue diseñado para comparar diferentes sistemas de hardware o software.

### Participantes y Área de Prueba

El estudio involucró a 13 participantes de diversas regiones de los Estados Unidos (la norma ASTM E691-23 establece que se debe contar con un mínimo de seis “laboratorios” para participar en un estudio, y recomienda al menos ocho para permitir la deserción). Los participantes se ofrecieron voluntariamente para realizar las pruebas en un sitio de construcción en Santa Cruz, California, EE. UU., los días 27 y 28 de julio de 2024 (Tabla 1). El área de prueba estaba ubicada en el Área de Colado 1 del Nivel 2 de un edificio en construcción por parte de The Conco Companies. Este nivel consistía en una losa postensada (PT) que fue colocada el 16 de julio y tensada el 24 de julio. El encofrado de la losa postensada permaneció en su lugar bajo el área de prueba para evitar que la carga muerta estructural afectara los bordes de la losa o las ubicaciones de los objetivos de apertura de la losa. El área de prueba también incluía columnas que fueron coladas el 23 de julio y paredes de concreto lanzado que fueron colocadas el 22 de julio. El área de prueba fue preparada para permitir con seguridad su acceso (Fig. 1).



Fig. 1: Vista parcial del área de prueba, participantes y sus instrumentos de Escaneo Láser Terrestre (TLS)

Tabla 1: Pruebas en el sitio de construcción de diversos equipos de Escaneo Láser Terrestre (TLS)

Participante	Rol	Región	Hardware	Software de registro	Configuraciones de escaneo (1ª/2ª)	Experiencia (años)
1	Proveedor de Servicio	Noreste	FARO Premium 70	FARO SCENE 2023.1	20/18	10 a 15
2	Contratista	Suroeste	Leica RTC360	Leica Cyclone Register360 V2024.0.1	11/12	15+
3	Contratista	Suroeste	FARO Focus Premium 350	FARO SCENE	16/17	10 a 15
4	Fabricante	Sureste	FARO Focus Premium 350m	FARO Scene 2023.1 y 2024	17/13	Menor a 5
5	Contratista	Suroeste	Leica RTC360	Leica Cyclone Register360 Plus	12/11	5 a 10
6	Proveedor de Servicio	Noroeste			7/6	10 a 15
7	Fabricante	Oeste Medio			12/10	5 a 10
8	Contratista	Noreste			8/10	Menor a 5
9	Topógrafos	Suroeste	Leica P50	Leica Cyclone	6/5	10 a 15
10	Fabricante	Montañas rocallosas	Trimble X9	FieldLink and Realworks	8/8	5 a 10
11	Topógrafos	Suroeste		Trimble Realworks	9/8	10 a 15
12	Contratista	Noroeste	Leica RTC360	Leica Cyclone Register360 Plus	7/6	10 a 15
13	Fabricante	Noreste	Z+F Imager 5016	Z+F LaserControl	7/7	15+

Los participantes incluyeron contratistas, topógrafos, proveedores de servicios y representantes de fabricantes de escáneres.

Aunque los organizadores no realizaron una selección rigurosa de los participantes, todos los participantes estaban calificados por su experiencia en escaneo láser. Antes de las pruebas, se organizaron dos reuniones virtuales para ayudar a los participantes a comprender las tareas de prueba y planificar el levantamiento topográfico en consecuencia. También se les pidió que revisaran y ajustaran los escáneres antes de la prueba en campo. Durante la prueba, cada participante tuvo tiempo suficiente para operar correctamente el equipo.

### Material de Prueba

El “material de prueba” consistió en 19 puntos de control, que fueron objetivos de 6 pulgadas (152 mm) en blanco y negro impresos en hojas de papel de 100 lb sin recubrimiento y adheridos a superficies de concreto utilizando un adhesivo en aerosol (Figura 2), o en las intersecciones de finas líneas de tiza (Figura 3). Los puntos de control del 200 al 205 consistieron en objetivos de papel en blanco y negro colocados en superficies verticales de concreto. Los puntos de control 100 al 103 consistieron en objetivos de papel blanco y negro colocados en la superficie de la losa, con un desplazamiento de 6 pulgadas (152 mm) desde el borde de la losa. Los puntos de control 300 al 308 consistieron en seis líneas de tiza trazadas sobre la superficie de una pared de concreto para formar nueve puntos de intersección. El material de prueba también incluyó 12 puntos de control (CPI a CP12), que consistieron en objetivos en forma de paleta blanco y negro (Figura 4). Consulte la Fig. 5 para un plano detallado de la distribución de los objetivos.

Las posiciones de los puntos de control y los puntos de verificación fueron establecidas y levantadas independientemente por dos equipos de topógrafos licenciados (de BKF y KW) y dos equipos de ingeniería de campo (de Conco y K&K). Dos equipos también realizaron un levantamiento de cierre de los puntos de control para confirmar que los targets no fueron alterados durante el período de prueba de 2 días. Se realizaron ajustes de mínimos cuadrados sobre los puntos levantados y los valores finales fueron acordados por los cuatro equipos de topografía.

Las coordenadas de los puntos de control fueron distribuidas a los participantes del escaneo en formato CSV (ID de punto, Coordenada Norte, Coordenada Este, Elevación) por correo electrónico. Se les pidió a los participantes que determinaran las coordenadas Norte (Y), Este (X) y Elevación (Z) de

los 19 puntos de verificación, utilizando los puntos de control (hasta 12) que consideraran necesarios para la georreferenciación durante el post-procesamiento de las nubes de puntos generadas por sus escáneres.



Fig. 2: Uno de los objetivos de papel en blanco y negro utilizados durante las pruebas



Fig. 3: Muro de concreto con líneas finas de tiza



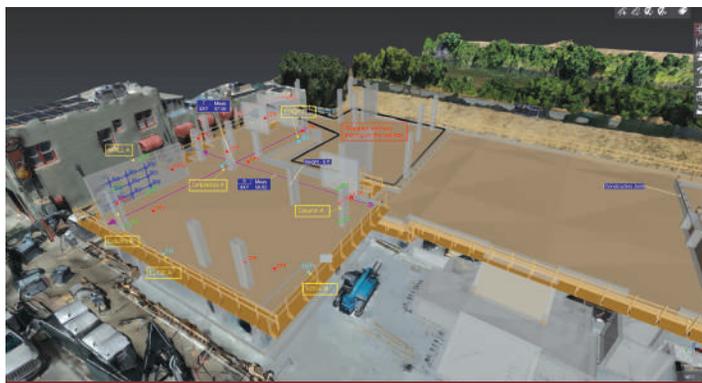
Fig. 4: Los puntos de control consistieron en objetivos en forma de paleta blanco y negro diseñados para ser rotados alrededor de los ejes centrales para realizar mediciones de línea de visión

## Actividades de Prueba

Se organizó una reunión de recepción previa a la prueba patrocinada por la Fundación ASCC el 26 de julio de 2024, un día antes del primer día de pruebas, para asegurar que todos los participantes estuvieran familiarizados con la misión y para distribuir los archivos necesarios para la comunicación de sus resultados. Estos archivos incluían un modelo de Revit, un modelo CAD bidimensional (2-D), dos hojas de datos en formato Excel y un levantamiento topográfico. Los modelos Revit y CAD proporcionaban las ubicaciones de diseño de los puntos en el área de prueba, y compartían el mismo origen que los puntos de control en el sitio de pruebas. Hoja de Excel B.1: Formateada para ingresar los valores de Coordenada Norte, Este y Elevación de los puntos de verificación. Hoja de Excel B.2: Formateada para ingresar las desviaciones de distancia en comparación con las ubicaciones de diseño para columnas, paredes, bordes y aberturas (Fig. 5).

El levantamiento incluyó preguntas sobre la recopilación de datos y los archivos de registro para futuros estudios. También se solicitó a los participantes que proporcionaran los archivos de intercambio de datos ASTM E57<sup>5</sup> para sus escaneos. Estos archivos serán utilizados por los autores en un análisis posterior.

Cada participante realizó escaneos dos veces durante el fin de semana para cumplir con el requisito mínimo para un estudio de repetibilidad. Cada uno aplicó sus propias mejores prácticas y flujo de trabajo de forma individual (se les dio libertad para seleccionar los puntos de configuración del TLS y las densidades de escaneo que consideraran necesarias para establecer las posiciones de configuración).



**Fig. 5: Plano de distribución de los objetivos: cuatro puntos de control CP1-4 en la losa y ocho puntos de control CP5-12 en superficies verticales; cuatro objetivos de papel blanco y negro en el borde de la losa (100 a 103); cuatro objetivos de papel blanco y negro en la cara de la columna (200 a 203); dos objetivos de papel blanco y negro en la cara de la pared (204, 205); y seis líneas de tiza claras en la cara de la pared formando nueve puntos de intersección (300 a 308)**

## Análisis de Datos

### Parte 1a - Declaración de la Precisión

Este estudio incluye 10 puntos de control en papel y 9 intersecciones de líneas de tiza, conocidos colectivamente como “targets” en el contexto siguiente. Las coordenadas x, y, y z de los 19 puntos de control fueron organizadas en filas y columnas en una hoja de cálculo (B.1). Dos participantes no pudieron proporcionar las coordenadas de las intersecciones de las líneas de tiza debido a limitaciones de los parámetros de configuración del escáner y la captura fotográfica que no permitieron que las intersecciones fueran visibles en los datos de la nube de puntos. Además, un participante no pudo devolver las coordenadas del punto de verificación 101 debido a limitaciones de captura de datos y línea de visión. El total de valores devueltos es de 456 registros para cada coordenada x, y, y z. Cada coordenada de objetivo (x, y, y z) existe en el espacio 3-D. La magnitud del vector en el plano 2-D se calculó utilizando la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las coordenadas x e y, y la magnitud del vector en 3-D se calculó utilizando la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de las coordenadas x, y, y z. Los valores 2-D y 3-D fueron incluidos en la misma hoja de cálculo.

Luego, se calcularon las estadísticas de la celda según ASTM E691-23, Sección 15.4<sup>6</sup>, lo que proporcionó el promedio de la celda, la desviación de la celda, el valor  $h$  de la consistencia entre laboratorios y el valor  $k$  de la consistencia dentro de los laboratorios de los resultados de la prueba del participante. Posteriormente, se calcularon las estadísticas de precisión según ASTM E691-23, Secciones 15.5 y 15.6, que proporcionan la desviación estándar de repetibilidad y la desviación estándar de reproducibilidad (Figura 6). Mientras tanto, las estadísticas de consistencia  $h$  y  $k$  fueron calculadas según ASTM E691-23, Sección 15.7, y se proporcionaron gráficos de los valores  $h$  y  $k$  (Figura 7). Los gráficos  $h$  y  $k$  ofrecen una visión general de la variabilidad de los resultados y destacan los valores atípicos que deben ser investigados. En este estudio, se eligió un nivel de confianza del 1.0% para el análisis  $h$  y  $k$ , ya que el juicio de los datos sugirió que usar un nivel de confianza más alto no resultaría en un número excesivo de valores atípicos. Los resultados mostraron que cuatro targets de los participantes 3, 10 y 13 cayeron fuera del valor crítico 2.41 en el estudio  $h$ , mientras que dos targets de los participantes 3 y 8 cayeron fuera del valor crítico 2.54 en el estudio  $k$ . Estos seis valores atípicos fueron investigados y considerados no lo suficientemente significativos como para ser excluidos del análisis. Por lo tanto,

todos los datos se retuvieron para el análisis de la declaración de precisión y la estimación de sesgo.

La desviación estándar de repetibilidad (Sr) y la desviación estándar de reproducibilidad (SR) para cada target se presentan en la Figura 6. Los datos muestran que la desviación estándar varía entre 0.020 y 0.060 pulgadas (0.5 a 1.5 mm), con variación mínima entre los objetivos blanco y negro en superficies horizontales (serie 100), objetivos blanco y negro en superficies verticales (serie 200) e intersecciones de líneas de tiza. Así, los límites de repetibilidad y reproducibilidad al 95%, según las Ecuaciones (12) y (13) de ASTM E691-23, varían entre 0.056 y 0.168 pulgadas (1.4 a 4.3 mm), aproximadamente 1/8 de pulgada (3.2 mm).

### Parte 1b – Estimación del sesgo

Se utilizaron dos estaciones totales Leica de 1 segundo y una Trimble de 0.5 segundos para establecer las mediciones de referencia en el terreno. Se aplicaron ajustes por mínimos cuadrados a todas las mediciones de los puntos de control CPI a CP12, y las coordenadas de todos los puntos de verificación fueron levantadas por cuatro partes diferentes, quienes llegaron a un consenso sobre los valores finales. El error cuadrático medio (RMSE, por sus siglas en inglés) es una métrica comúnmente utilizada para evaluar la precisión de un modelo o sistema de medición, calculando la raíz cuadrada de

la diferencia promedio al cuadrado entre los valores predichos y observados. El RMSE proporciona una medida de qué tan bien las predicciones de un modelo coinciden con los datos observados reales. Un valor más bajo de RMSE indica mayor precisión, mientras que un valor más alto sugiere discrepancias mayores entre los resultados predichos y los observados. En este estudio, se introdujeron 456 coordenadas de los puntos de control (x, y, y z) en una hoja de cálculo como valores predichos. Luego, se calcularon los errores correspondientes utilizando las coordenadas de los puntos de control (x, y, y z) obtenidas de las mediciones con la estación total como valores observados. Posteriormente, se

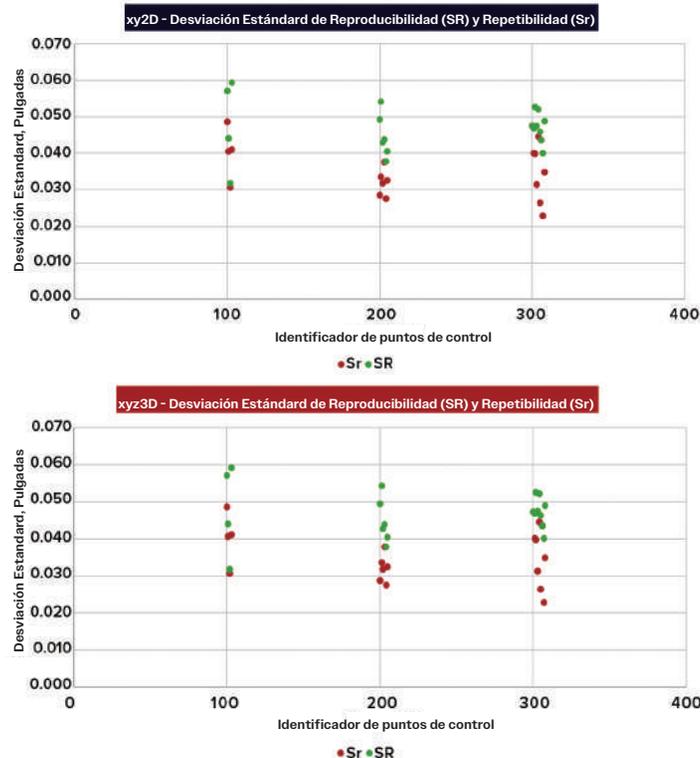


Fig. 6: Estadísticas de precisión: desviación estándar de repetibilidad y desviación estándar de reproducibilidad para los valores en 2-D (arriba) y 3-D (abajo) (Nota: 1 pulgada = 25.4 mm)

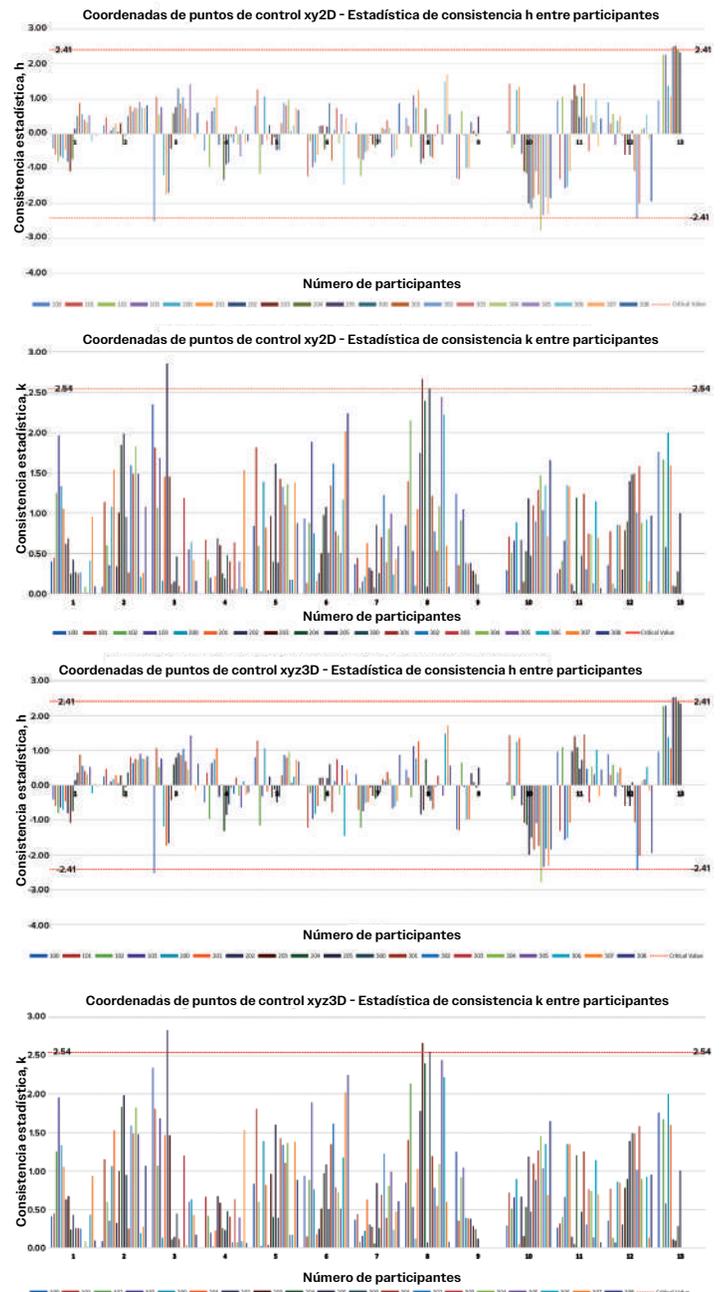


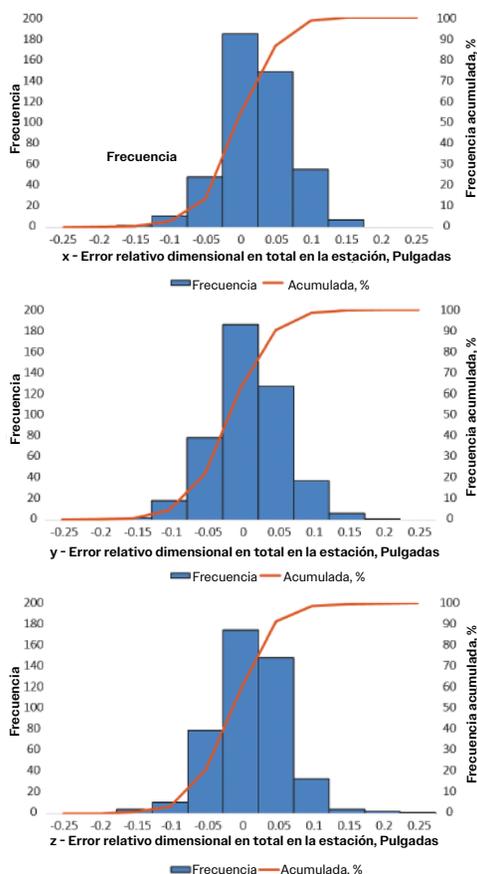
Fig. 7: Estadísticas de consistencia: h consistencia entre laboratorios y k consistencia dentro del laboratorio de los resultados de las pruebas de los participantes

calculó la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados para determinar el error en 2-D en el plano x-y y el error en 3-D en el espacio.

Se aplicaron los coeficientes para el nivel de confianza del 95% (1.9600 para 1-D, 1.7308 para 2-D y 1.6166 para 3-D)<sup>7</sup>. De los 456 puntos de datos, el RMSE en 2-D al nivel de confianza del 95% se calculó como 0.125 pulgadas (3.2 mm), y el RMSE en 3-D al 95% fue de 0.142 pulgadas (3.6 mm); ver Tabla 2.

### Parte 1c – Comparación con el estudio de 2018

La conclusión del estudio de escaneo láser de ASCC de 2018 destacó que, debido a los errores significativamente más pequeños observados en los tres principales participantes, usar sus desviaciones estándar (SD) como los valores de incertidumbre estándar reduciría las tolerancias horizontales y verticales en aproximadamente un 50% y un 30%, respectivamente. La Tabla 3 muestra que los resultados de los 13 participantes se alinean con los de los tres principales participantes del estudio de 2018. La Figura 8 presenta histogramas que muestran el error relativo a los valores de referencia para 456 puntos de control de todos los participantes.



**Fig. 8: Histogramas que muestran el error relativo a los valores de referencia para 456 objetivos de todos los participantes (Nota: 1 pulgada = 25.4 mm)**

## Parte 2 – Interpretación de tolerancias por cada participante con estadísticas

Cuando se trata de planos de construcción que muestran las desviaciones de los elementos de concreto existentes con respecto a sus ubicaciones de diseño (ya sea en el plano x-y o la elevación z), se utilizan diversos estilos de planos o informes. Estos incluyen planos de obra reales que indican las desviaciones de la ubicación de diseño en un modelo 3-D, formatos CAD 2-D o dibujos en PDF, mapas de calor de elevación de losas, mapas de plomada vertical o perfiles de sección, marcas de elevación en cuadrícula, modelos scan-to-BIM, mapas de calor de desviaciones 3-D, entre otros. Sabemos que procesos como el promedio, remuestreo, suavizado, malla o técnicas de mejor ajuste aplicadas a los datos de la nube de puntos pueden introducir errores. Uno de los objetivos de este estudio es examinar cómo estas operaciones afectan el resultado final al usar un conjunto de datos de nube de puntos relativamente preciso y exacto.

A todos los participantes se les proporcionó un modelo en Revit y un archivo CAD 2D que mostraba los elementos de concreto a examinar. Estos archivos de diseño digital comparten el mismo sistema de coordenadas que los controles de levantamiento topográfico proporcionados, lo que permite inspeccionar las desviaciones de ubicación y elevación respecto al diseño superponiendo los datos de la nube de puntos con los archivos de diseño digital.

Se instruyó a los participantes que devolvieran los valores de desviación respecto al diseño en cuatro áreas del borde de la losa y las aberturas de la losa (objetivos 100, 101, 102 y 103), así como en dos superficies de columnas (superior e inferior) y paredes (superior e inferior). Para garantizar la consistencia en la comparación, se pueden utilizar los objetivos de las series 100 y 200 para evaluar las desviaciones en los mismos puntos. Alternativamente, se pueden usar los bordes reales de las losas, ya que los objetivos cercanos a los bordes se establecieron con un desplazamiento exacto de 6 pulgadas. De manera similar, se pueden utilizar las superficies de concreto de las columnas, ya que los objetivos se fijaron directamente a las superficies de concreto.

La referencia fue establecida importando mediciones de estación total de estos objetivos en un plano de planta de Autodesk Civil 3D. Se tomaron mediciones perpendiculares desde los puntos de la estación total hasta los elementos de concreto para determinar los valores de desviación en el plano xy para los 10 objetivos (o elementos de concreto). De

manera similar, las desviaciones en el eje z para los cuatro objetivos de la losa se calcularon restando las elevaciones de diseño de las mediciones de elevación tomadas con la estación total en estos cuatro objetivos. Los valores de desviación se analizaron utilizando sus valores absolutos.

Ocho participantes lograron proporcionar valores de desviación, lo que resultó en 80 puntos de datos para el plano xy y 32 puntos de datos para el eje z que se usaron en el análisis. La Tabla 4 presenta las estadísticas y la comparación de los valores de desviación de los 10 objetivos (elementos de concreto) a partir de las 19 coordenadas objetivo-medidas directamente desde el escaneo láser. Las desviaciones estándar de las desviaciones en XY y Z fueron aproximadamente el doble que las de las mediciones directas del escaneo láser, lo que indica

que se introdujeron errores cuando los participantes analizaron las desviaciones del diseño.

Un factor que contribuyó a este resultado fue que un objetivo estaba ubicado en un área deprimida de la losa, lo que significa que la elevación de diseño de la losa no se alineaba con el área “plana”, algo que algunos participantes no tuvieron en cuenta, lo que resultó en errores humanos. La Figura 9 proporciona un ejemplo que ilustra cómo el ruido en la nube de puntos, el algoritmo de mejor ajuste o el error humano pueden afectar el resultado final al determinar el cumplimiento de tolerancias.

Se observaron mediciones de desviación, que varían entre 0.017 y 0.030 pulgadas (0.43 a 0.76 mm), a partir de la mejor extracción del plano (plano azul), la nube de puntos en el borde y dos parámetros de mallado. Este ejemplo cubre un área pequeña, pero el impacto podría ser más significativo a mayor escala.

**Tabla 2:**  
**Errores de objetivo de escaneo láser vs estación total, en pulgadas**

Estadísticas de sesgo	Y	X	Z	XY (2D)	XYZ (3D)
Media	-0.012	-0.002	-0.011	0.061	0.078
Rango	0.377	0.354	0.397	0.251	0.323
Mínimo	-0.203	-0.212	-0.184	0.002	0.008
Máximo	0.174	0.142	0.214	0.252	0.331
Conteo	456.000	456.000	456.000	456.000	456.000
RMSE	0.053	0.049	0.050	0.072	0.088
Nivel de confianza (95.0%)	0.104	0.097	0.098	0.125	0.142

Nota: 1 pulg. = 25.4 mm

**Tabla 3:**  
**Resultados de los 13 participantes del estudio de 2018**

	2018, 8 participantes			2018, 3 participantes con menores errores			2024, 13 participantes		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
Conteo	310	310	310	114	114	114	456	456	456
Desviación estándar (pulg.)	0.125	0.106	0.082	0.056	0.074	0.057	0.049	0.052	0.049
8 X U. L.	<b>1.002</b>	<b>0.852</b>	<b>0.653</b>	0.445	0.590	0.456	<b>0.395</b>	<b>0.413</b>	<b>0.393</b>
Tolerancia mínima	1 pulg. o > horizontal		5/8 pulg. vertical				1/2 pulg. or > horizontal y vertical		

Nota: 1 pulg. = 25.4 mm

**Tabla 4:**  
**Comparación de los valores de desviación de 10 objetivos (elemento de concreto) obtenidos a partir de 19 coordenadas objetivo medidas directamente desde el escaneo láser**

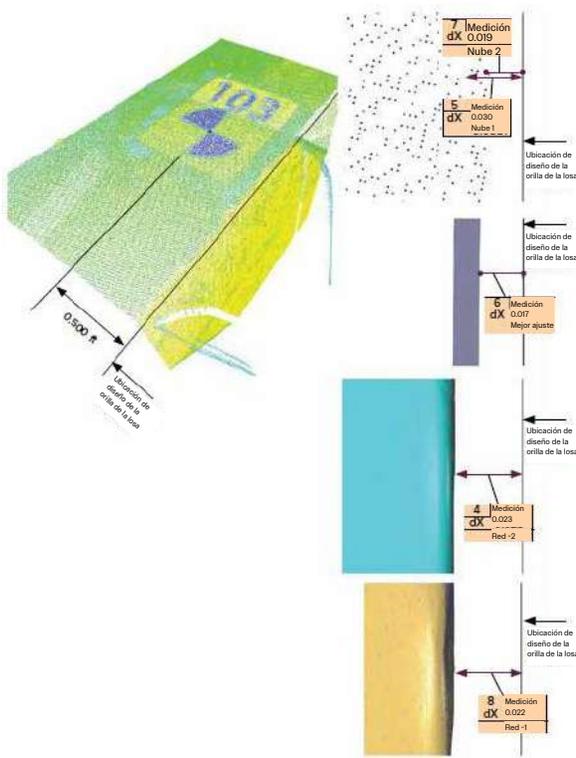
19 coordenadas objetivo			Desviación del escaneo al diseño en 10 objetivos	
Estadísticas	Análisis de objetivos en X e Y	Análisis de objetivos en Z	Desviación del diseño en X y Y	Desviación del diseño en Z
Conteo	456	456	80	32
Mínimo (pulg.)	0.002	-0.184	0.000	0.000
Máximo (pulg.)	0.252	0.214	0.263	0.431
Promedio (pulg.)	0.061	-0.011	0.068	-0.011
Desviación estándar (pulg.)	0.038	0.049	0.065	0.112

Nota: 1 pulg. = 25.4 mm

## Conclusión y Recomendaciones

El estudio de escaneo láser de ASCC de 2018 sugirió que sería apropiado utilizar un escáner láser para el cumplimiento de especificaciones cuando se mide una tolerancia vertical de 5/8 pulgadas o más y una tolerancia horizontal de 1 pulgada o más. También se encontró que los tres principales participantes con los errores más bajos pudieron reducir la tolerancia horizontal y vertical en aproximadamente un 50% y 30%, respectivamente, al utilizar las desviaciones estándar (SD) como los valores de incertidumbre estándar. Se introdujo un concepto de “razón de incertidumbre” para determinar cuánto de la tolerancia de medición debería asignarse a la precisión de la construcción. Se introdujo y aplicó la prueba de incertidumbre de la norma ANSI/NCSL Z540.3:2006<sup>8</sup> con una relación TUR (razón de incertidumbre de prueba) de 1:4 en ese estudio.

En resumen, se sugirió que la relación entre la desviación estándar de la media (o mediciones individuales) y la tolerancia de construcción debería ser de 1:8.



**Fig. 9:** El objetivo 103 se encontraba a 0.500 pies (0.15 m) del borde de la losa. Se observaron mediciones de desviación, que varían entre 0.017 y 0.030 pulgadas (0.43 a 0.76 mm), a partir de la nube de puntos en el borde, el mejor ajuste de los datos y dos parámetros de mallado.

La Guía de Especificaciones del Nivel de Precisión (LOA)<sup>9</sup> del Instituto de Documentación de Edificaciones de EE.UU. (USIBD) proporciona directrices heurísticas para la desviación estándar de medición de sensores en relación con la tolerancia general. Generalmente, la desviación estándar debe ser aproximadamente una quinta parte de la tolerancia general para  $P = 30\%$  y  $1-\alpha = 95\%$ , para cumplir con los requisitos de fabricación, donde  $P$  representa la proporción de la tolerancia de medición en relación con la tolerancia general.<sup>8</sup>

El ACI PRC-117.114, “Guía para la Compatibilidad de Tolerancias en la Construcción de Concreto”,<sup>10</sup> proporciona un ejemplo en la Sección 3.4.4. Es razonable tener una precisión de medición con un nivel de confianza del 99.7% (tres desviaciones estándar) que sea una tercera parte de la tolerancia de construcción.

Basado en estudios similares y las recomendaciones de diversas industrias, así como el análisis de este estudio, los autores repitieron el factor de 8 veces la desviación estándar medible para la tolerancia aplicable en la construcción de concreto en las conclusiones. Es razonable recomendar el uso de un TLS (escáner láser terrestre) para el cumplimiento de especificaciones al medir tolerancias horizontales y/o verticales de 0.5 pulgadas (13 mm) o más.

Reconociendo la creciente importancia del escaneo láser en la construcción, el Subcomité 117-L de la ACI, especializado en escaneo láser, ha enfocado sus esfuerzos en la verificación de concreto utilizando TLS para este estudio. Este énfasis se debe a las ventajas únicas que el TLS ofrece en comparación con otros métodos para este propósito. En primer lugar, el escaneo láser terrestre (TLS) proporciona una captura de datos 3-D densa y altamente precisa, lo que permite mediciones exactas de las superficies de concreto. Este nivel de detalle es crucial para identificar desviaciones sutiles de las especificaciones de diseño y garantizar el cumplimiento de las tolerancias.

En segundo lugar, el TLS ofrece un enfoque de medición sin contacto, lo que minimiza el riesgo de dañar o alterar la superficie de concreto durante la inspección. Esto es particularmente importante para el concreto recién colocado o acabados delicados. Por último, el TLS permite una recolección de datos eficiente, reduciendo el tiempo y la mano de obra requeridos para realizar inspecciones completas en comparación con los métodos tradicionales.

¿Qué sigue? Si bien la adopción del escaneo láser y las tecnologías de captura de realidad en la industria del concreto mejora la eficiencia del proyecto, reduce los costos y mejora la calidad y seguridad,

es importante reconocer la posible dependencia de tales tecnologías. La sobre dependencia de equipos y software que pueden volverse obsoletos o propensos a problemas técnicos podría presentar desafíos. Muchas organizaciones, incluyendo, pero no limitándose a ACI Subcomité 117-L, The COMMITTEE (una nueva organización de pruebas), la Red de Captura de Realidad (RCN) y el Instituto de Documentación de Edificaciones de EE.UU. (USIBD), han tomado medidas para probar estas tecnologías. Por lo tanto, los autores fomentan más estudios para evaluar estas tecnologías en proyectos de construcción activos con el fin de comprender mejor su viabilidad a largo plazo y las limitaciones en aplicaciones reales.

## Créditos del Proyecto

Los autores agradecen a las siguientes personas y empresas por su apoyo en el estudio: Bruce Suprenant, Consultor de Concreto; Scott Anderson y Michael Schneider, Fundación ASCC; James Klinger, Ray Hefner y Erica Stone, ASCC Rex Donahay, ACI; Chad Watson, Mike Leon, Mariah Garcia y Jose Laguna, The Conco Companies; Nick Garcia y Francisco Choto, Western National Contractors; Chris Garcia y Josh DeStefano, DPR Construction; Juergen Mauer y Joseph Carter, Z+F USA, Inc.; Joe Merritt, Baker Construction John Marino, FARO Technologies, Inc.; Michael Harvey, Leica Geosystems; Mike Collins, BKF Engineers; Chuck McCallum y Marilyn Stratton, Kier + Wright; David Larson, BuildingPoint Pacific; y Rothbucher System.

Los participantes del estudio incluyeron:

- Melinda Hanneson y Lukas Duruttya, DiCarlo Precision Instrument, Inc.;
- Keaton Clark, DPR Construction;
- Eric Peterson, Webcor Construction;
- Noah Wells, FARO Technologies, Inc.;
- Javier Lagarde, Rodrigo Jimenez, Hunter Keck y Luis Sierra, The Conco Companies;
- Mack Kowalski, Kettler & Kowalski LiDAR Scanning Services;
- Ted Moberg, Leica Geosystems;
- Yesenia Agreda y Jose Monroy, Baker Construction;
- Sanela Domitrovic, Colby Qualls, Jose Guzman y Servando Renteria, BKF Engineers;
- Steven Ostrowski, Trimble Inc.;
- Casey R. Lynch, Chuy Martinez, Javier Martinez, Ricardo Martinez y Steven Ramirez, Kier + Wright;
- Gabriel Kettler, Turner Construction
- Andrew Thierwechter, Z+F USA, Inc.

## Referencias

1. Joint ACI-ASCC Committee 117, "Specification for Tolerances for Concrete Construction and Materials and Commentary (ACI SPEC-117-10) (Reapproved 2015)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2010, 76 pp.
2. ASTM E1155/E1155M-23, "Standard Test Method for Determining FF Floor Flatness and FL Floor Levelness Numbers," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2023, 9 pp.
3. Paul, W.; Klinger, J.; and Suprenant B.A., "ASCC 3-D Laser Scanning Study, Part 1: Eight participants used scanners to determine target coordinates," Concrete International, V. 41, No. 1, Jan. 2019, pp. 22- 29.
4. Paul, W.; Klinger, J.; and Suprenant, B.A., "ASCC 3-D Laser Scanning Study, Part 2: Eight participants used scanners to determine F-numbers," Concrete International, V. 42, No. 2, Feb. 2020, pp 30-36.
5. ASTM E691-23, "Standard Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision of a Test Method," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2023, 23 pp.
6. ASTM E2807-11(2019), "Standard Specification for 3D Imaging Data Exchange, Version 1.0," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2023, 26 pp.
7. Hofmann-Wellenhof, B.; Lichtenegger, H.; and Wasle, E., GNSS – Global Navigation Satellite Systems, SpringerWienNewYork, 2008, 516 pp.
8. ANSI/NCSS Z540.3:2006 (R2013), "Requirements for the Calibration of Measuring and Test Equipment," National Conference of Standards Laboratories, Glen Ellyn, IL, 2013, 21 pp.
9. "USIBD Level of Accuracy (LOA) Specification Guide," U.S. Institute of Building Documentation, 2016, 30 pp.
10. Joint ACI-ASCC Committee 117, "Guide for Tolerance Compatibility in Concrete Construction (ACI PCR-117.1-14)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014, 47 pp.

**Leo (Lingfeng) Zhang**, miembro del ACI, es Gerente de Construcción Virtual en The Conco Companies, Concord, CA, EE. UU. Es miembro del Comité 131 del ACI, Modelado de Información de Construcción de Estructuras de Concreto, y del Comité Conjunto ACI-ASCC 117, Tolerancias. Es Presidente del Subcomité 117-L del ACI, Escaneo Láser. Zhang obtuvo su licenciatura en física de materiales en la Universidad de Tecnología de Dalian, Dalian, China, y su maestría en gestión de la construcción en la Universidad de Florida, Gainesville, FL, EE. UU.



**Mack Kowalski** se dedica a explorar técnicas de captura de realidad. Es miembro del Subcomité 117-L del ACI. Anteriormente, dirigió el departamento de topografía de una importante empresa de construcción. Su interés en la tecnología LiDAR creció con el tiempo, lo que lo llevó a unirse a un importante distribuidor de Leica en 2022. Co-fundó LiDAholics Consulting L.L.C. y K&K Laser Scanning, donde continúa contribuyendo al avance de la industria. También comparte su experiencia a través de artículos en la revista xyHt y colaboraciones en LiDAR News.



**Ezra Che** es Profesor Asistente de Investigación en Geomática en la Universidad Estatal de Oregón, Corvallis, OR, EE. UU. Su investigación se centra en el procesamiento eficiente de nubes de puntos 3D y sus aplicaciones, así como en el modelado de errores en datos geoespaciales. También es Director Técnico (CTO) y cofundador de EZDataMD, una empresa de transferencia tecnológica que ofrece soluciones técnicas en el procesamiento y las aplicaciones de datos de nubes de puntos 3D mediante el desarrollo de software personalizado, pruebas de aplicaciones, levantamientos topográficos y consultoría tecnológica. Che se desempeña como Líder de Análisis de Datos para la Infraestructura de Investigación en Riesgos Naturales RAPID de la NSF, Editor Asociado del IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, y miembro del Consejo Editorial de Photogrammetric Record.



**Mike Hernandez**, Miembro Honorario del ACI, es el Director Técnico de la ASCC. Hernández tiene más de 25 años de experiencia en operaciones de construcción y es un ingeniero profesional con licencia en Colorado y Florida. Es miembro del Comité 131 del ACI y del Comité Conjunto ACI-ASCC 117, así como de varios otros comités del ACI. También se desempeña como Co- Presidente de los Comités Técnico, de Acabados y de Sostenibilidad de la ASCC.



**James Dare** es Consultor de Pisos que trabaja para el grupo de empresas CoGri Group. Cuenta con más de 15 años de experiencia en la industria de pisos de concreto industrial y ha participado en el diseño, levantamiento topográfico, pruebas, construcción y rectificación de pisos de alta tolerancia para la industria de la logística. Ha estado involucrado en numerosos estudios para investigar métodos y equipos de levantamiento que permitan alcanzar las altas precisiones requeridas para medir la regularidad de la superficie de los pisos en los sistemas de almacenes automatizados actuales y futuros. Está ubicado en el Reino Unido, pero trabaja a nivel mundial brindando soporte a clientes y oficinas globales del CoGri Group.



Título original en inglés:  
Interlaboratory Study on  
Precision Statement of Using a  
Terrestrial Laser Scanner to Verify  
Concrete Tolerance

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



*Traductora:*  
**Jesús Omar  
Montaña Montaña**  
*Estudiante Ing. Civil  
Universidad de Sonora*



*Revisor Técnico:*  
**Ing. Oscar Ramírez  
Arvizu**

## La urgente necesidad de aumentar la robustez de los edificios en regiones de alta sismicidad

Por Santiago Pujol, Rémy D. Lequesne, y Chungwook Sim

El Comité 133 del ACI, Inspección de Desastres, se creó para reportar sobre los efectos de grandes desastres en construcción en concreto en todo el mundo y para identificar posibles problemas de diseño que requieran cambios en los códigos. El trabajo del comité ha sido descrito por Laughery et al.<sup>1</sup> Entre las inspecciones anteriores realizadas o apoyadas por el comité se encuentran las de Shah et al.<sup>2</sup>, Abrahamczyk et al.<sup>3</sup>, Sim et al.<sup>4</sup>, Villalobos et al.<sup>5</sup>, Alcocer et al.<sup>6</sup>, y Pujol et al.<sup>7</sup>. El último trabajo de inspección se completó después de la secuencia de terremotos de Pazarcik y Elbistan en Turquía de 2023<sup>8</sup>. Se analizan las implicaciones de las últimas observaciones de campo, de acuerdo con las referencias anteriores, en relación con el futuro de la práctica del concreto reforzado (CR). Primero se proporciona un contexto histórico para respaldar la discusión que sigue.

### Contexto histórico

Tras el terremoto de Kanto que devastó Tokio en 1923, los edificios diseñados por Tachū Naito se destacaron por haber sobrevivido con daños mínimos<sup>9</sup>. Naito había sido alumno de Riki Sano, pupilo de John Milne. Milne era un ingeniero de minas inglés que fue contratado para enseñar en Japón cuando el país estaba experimentando una rápida modernización a fines del siglo XIX, y que hoy es reconocido como uno de los fundadores de la ingeniería sísmica. George Howe, un exitoso arquitecto estadounidense que trabajaba para la industria del acero en busca de soluciones después de los desastres sísmicos de Santa Bárbara (1925) y Long Beach (1933), resumió las ideas de Naito de la siguiente manera<sup>9</sup>:

“La construcción debe ser del tipo llamado ‘rígido’ para que el período de vibración del edificio sea lo más pequeño posible”.

“Prevenir daños en los muros en cualquier (edificación) tipo ‘flexible’ es un problema serio. En

una construcción “rígida” no se producen daños en los muros porque la deflexión es limitada...” [Aquí, “flexibilidad” se debe interpretar como antónimo de rigidez y no como ‘deformabilidad’ o capacidad de deformación.]

“En la actualidad, la opinión mayoritaria favorece el tipo ‘rígido’. Los edificios diseñados con este método han resistido con éxito terremotos de naturaleza altamente destructiva”.

“Para que un edificio sea ‘rígido’, debe estar bien arriostrado para resistir fuerzas horizontales. Naito logra esto utilizando diagonales, riostras profundas, ... También aboga por utilizar ... muros... construidos de concreto debidamente reforzado...”

“Hay una teoría apoyada por algunos ingenieros de que un tipo de construcción ‘flexible’ sería más económico”.

Japón continuaría construyendo edificios robustos en la tradición de Naito, quien se convirtió en el presidente del Instituto de Arquitectura de Japón en 1954. En 1968, la idea de que la resiliencia se deriva de la robustez estructural había sido expresada en términos matemáticos claros y simples por Shiga et al.<sup>10</sup> La formulación de Shiga, que se basaba en datos de campo en lugar de cálculos, favorecía los edificios con muros y columnas de CR más grandes.

Por el contrario, en 1959, la Asociación de Ingenieros Estructurales de California (SEAOC) había adoptado prácticas de diseño que favorecían estructuras menos rígidas, y estas prácticas se incluyeron posteriormente en los códigos de construcción estadounidenses<sup>11</sup>. Es probable que la divergencia entre los enfoques japonés y estadounidense fuera influenciada por el desarrollo del espectro de aceleraciones por M. Biot en Caltech (1932). A simple vista, el espectro de aceleraciones se observa que apunta en la dirección opuesta a las recomendaciones de Naito. La aparente economía de las estructuras menos rígidas también hizo que la idea fuera atractiva, lo que dio lugar a una divergencia duradera entre las prácticas japonesas y estadounidenses. Como resultado, los edificios en Japón (y Chile, donde comenzó una tradición de construir edificios con muros robustos en respuesta a los terremotos en la década de 1930, y más tarde en Colombia y Perú, donde las ideas chilenas se han extendido) son mucho más robustos que los edificios de los numerosos países que han seguido el modelo estadounidense, incluida Turquía.

Este artículo describe las tendencias observadas en las medidas de robustez de edificios y las observaciones de desempeño recopiladas después de 15 terremotos. Estos datos permiten hacer comparaciones entre los países que siguieron la preferencia japonesa por estructuras “rígidas” y

aquellos que construyeron estructuras menos rígidas. La robustez de edificios se cuantifica utilizando los índices formulados por Hassan y Sozen<sup>12</sup>, quienes simplificaron y generalizaron aún más la formulación propuesta por Shiga et al.<sup>10</sup> También se debe reconocer a Sozen<sup>13</sup> por defender el control de la deriva como la clave en el diseño de edificios sismo resistentes a pesar de que las ideas de SEAOC se habían convertido en el statu quo. Las observaciones en Chile, donde los edificios tienen abundantes muros que tienen una densidad de muros promedio del 6% de la superficie típica del piso (densidad de muros del 3% en cada dirección principal del plano del piso<sup>14</sup>), respaldaron las ideas de Sozen<sup>13</sup>, y también lo han hecho las observaciones de trabajos de investigación posteriores.

## Los datos

Los datos presentados aquí incluyen los siguientes eventos (los valores de velocidad máxima del suelo [PGV] y su base se describen en Pujol et al.<sup>8</sup>):

- Japón 1968: PGV = 35 cm/s (13.8 in/s)<sup>10</sup>
- Chile 1985: PGV = 35 cm/s (13.8 in/s)<sup>14</sup>
- Turquía: Erzincan 1992: PGV = 50 cm/s (19.7 in/s)<sup>12</sup>; Duzce 1999: PGV = 50 cm/s (19.7 in/s)<sup>15</sup>; Bingol 2003: PGV = 37 cm/s (14.6 in/s)<sup>16</sup>; Pazarcik y Elbistan 2023: PGV = 90 cm/s (35.4 in/s)<sup>8</sup>
- Perú 2007: PGV = 62 cm/s (24.4 in/s)<sup>17</sup>
- China 2008: PGV = 30 cm/s (11.8 in/s)<sup>18</sup>
- Haití 2010: PGV = 45 cm/s (17.7 in/s)<sup>19</sup>
- Nueva Zelanda 2011: PGV = 65 cm/s (25.6 in/s)<sup>20,21</sup>
- Perú 2007: PGV = 62 cm/s (24.4 in/s)<sup>17</sup>
- China 2008: PGV = 30 cm/s (11.8 in/s)<sup>18</sup>
- Haití 2010: PGV = 45 cm/s (17.7 in/s)<sup>19</sup>
- Nueva Zelanda 2011: PGV = 65 cm/s (25.6 in/s)<sup>20,21</sup>
- Nepal 2015: PGV = 70 cm/s (27.6 in/s)<sup>2</sup>
- Ecuador 2016: PGV = 55 cm/s (21.7 in/s)<sup>5</sup>
- Taiwan 2016: PGV = 45 cm/s (17.7 in/s)<sup>22</sup>
- México 2017: PGV = 30 cm/s (11.8 in/s)<sup>6</sup>
- Corea del Sur 2017: PGV = 45 cm/s (17.7 in/s)<sup>4</sup>

Los edificios estudiados tenían de uno a 23 pisos, de los cuales el 90% correspondían a edificios con siete pisos o menos. A excepción de los de Japón y Chile, la mayoría de las estructuras estudiadas estaban diseñadas para sufrir grandes derivas. Las estructuras en Japón y Chile, por otro lado, eran generalmente mucho más robustas y tenían muchos muros estructurales. En Nepal y Haití, no está claro si el diseño consideró las demandas laterales en todos los casos. Las observaciones sugieren que muchos de los edificios de concreto reforzado estudiados se

construyeron sin el detallado necesario para lograr ductilidad.

El sistema de clasificación de daños es el siguiente:

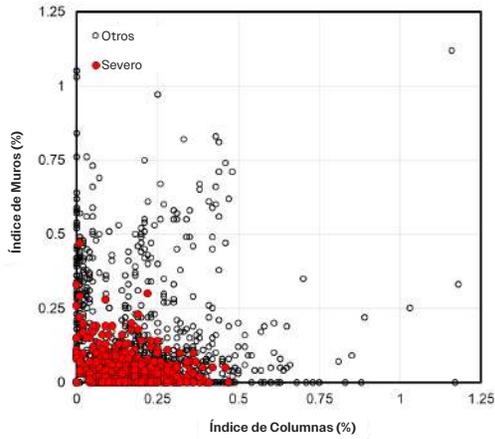
- Para los datos informados por Shiga et al.<sup>10</sup> de Japón (Terremoto de Tokachi-Oki de 1968), daño severo se refiere a fallas por corte en columnas.
- Para los datos reportados por Riddell et al.<sup>14</sup> de Chile (Terremoto de Viña del Mar de 1985), daño severo se refiere a un lugar alto en la escala usada para clasificar el daño.
- En los datos recopilados a partir de 1992, daños graves se refieren a edificios con fallas estructurales o colapso. En Bingöl, grietas por cortante en columnas cortas con estribos muy espaciados se clasificaron como daño severo<sup>16</sup>.

Las encuestas no han intentado cubrir ciudades enteras o barrios. Por el contrario, han intentado, en general, obtener muestras que incluyan edificios con y sin daños severos en zonas con evidencia de movimientos de tierra de gran intensidad.

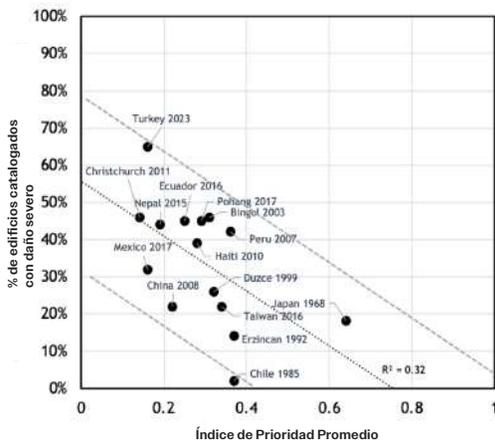
## Los índices

Se calcularon los índices de Hassan y Sozen<sup>12</sup> para cada estructura del conjunto de datos: el índice de muros (WI), el índice de columnas (CI) y el Índice de Prioridad (PI). El WI es la relación de la suma de las áreas de las secciones transversales de muros en una dirección al área total del piso por encima del nivel crítico, incluidos balcones y áticos. El área de la sección transversal de los muros incluye los muros de CR y una décima parte del área de muros de mampostería rodeados por elementos de CR. El WI asignado a un edificio es el menor de los valores calculados para dos ejes ortogonales. El CI es la relación de la mitad del área de la sección transversal total de las columnas al área total de la planta por encima del nivel crítico, incluyendo balcones y áticos. El PI es la suma de WI y CI. Estos índices se adaptaron de Shiga et al.<sup>10</sup> Otros autores<sup>7,22</sup> han reportado los efectos de variaciones de estas definiciones y comparaciones con índices alternativos.

Para definir estos índices para estructuras en Japón, las áreas estructurales relativas de muros y columnas se infirieron a partir de una versión digitalizada de un gráfico publicado por Shiga y conocido en Japón como “El mapa de Shiga”. En otros casos, las dimensiones de muros estructurales y columnas o sumas calculadas de las áreas de las secciones transversales de muros y columnas estructurales se obtuvieron de mediciones en campo.



**Fig. 1: Datos de Índice de muros (WI) e Índice de columnas (CI) de más de 1600 edificios medidos después de 15 sismos. Edificios calificados con daño “severo” presentaban daños como fallas por cortante en columnas o colapso**



**Fig. 2: Porcentaje de edificios medidos con daño severo versus Índice de Prioridad (PI) promedio**

## Correlación entre daño y robustez

Los datos de las evaluaciones mencionadas se presentan en la Fig. 1, que ilustra más de 1,600 edificios representados por pares de valores de CI y WI mínimo (calculado para la dirección en planta con un índice de muros más pequeño).

La gráfica muestra que los edificios con daños severos están concentrados en el cuadrante definido por  $WI < 0.25\%$  e  $IC < 0.25\%$ . Otra forma de separar edificios con daños graves del resto es con una línea en  $WI = 0.2\%$ . Sólo nueve de los edificios con  $WI > 0.2\%$  sufrieron daños graves, independientemente del CI, detallado del refuerzo o la intensidad del sismo. Separar los datos por sitio del terremoto no cambia las conclusiones, lo cual es notable dada la variedad de escenarios que se están considerando.

La Fig. 2 compara lo observado en Turquía en 2023 con lo observado en los otros 14 sismos. La ordenada de cada punto representa el porcentaje de todos los edificios que exhibieron daños severos (como se definió anteriormente) en su respectiva

evaluación. La abscisa de cada punto es el promedio de los valores de PI para todos los edificios considerados en un sitio determinado. A pesar de (a) las diferencias en las prácticas de diseño y construcción, (b) variaciones en la intensidad del sismo y (c) la plausible falta de uniformidad en las prácticas de evaluación, la figura sugiere una fuerte correlación entre daño y PI. En ciudades donde los ingenieros optaron por utilizar columnas y muros estructurales grandes y/o numerosos, los edificios se han comportado mejor, sustentando lo que Naito recomendó hace más de 100 años.

## Discusión

Los datos presentados respaldan las ideas de Naito y Sozen y sugieren que, en ausencia de un control de calidad de campo riguroso y pruebas exhaustivas de las prácticas de detallado de refuerzo existentes y nuevas, valdría la pena exigir un área mínima de muros estructurales en CR y edificios de acero estructural en zonas de alta sismicidad. El requisito ayudaría a prevenir colapsos y reducir el daño estructural, salvando vidas en consecuencia. También daría como resultado una mayor funcionalidad de los edificios y ciudades después de los terremotos, reduciendo así la afectación de la población y aumentando la resiliencia de la comunidad.

A falta de tal requisito, la industria del CR también corre el riesgo de perder una gran parte del mercado de la construcción. Después de los terremotos de Canterbury de 2010-2011, dos de cada tres edificios en el distrito central de negocios de Christchurch, Nueva Zelanda, fueron demolidos. Muchos de estos edificios tenían estructuras de CR con detallado para ductilidad y por tanto proyectados para tener grandes derivas durante los terremotos. El resultado fue devastador para la comunidad de Christchurch y para la confianza de esa comunidad en las estructuras de CR. En muchos casos, el detallado era aceptable, pero la incertidumbre entre los ingenieros sobre qué hacer con edificios con agrietamiento excesivo y signos de fluencia, pólizas de seguro generosas y acordonamiento de 2 años del distrito central llevó a la mayoría de los propietarios a reclamar el pago de seguros y construir de nuevo usando un material alternativo. Ahora el 70% de la superficie de edificios reconstruida después de los terremotos está soportada por acero estructural<sup>23</sup>.

Se pueden hacer varias observaciones considerando esta experiencia colectiva:

- Innumerables edificios de CR están expuestos a una alta amenaza sísmica en el mundo;

- Después de grandes desastres sísmicos, la prensa y las redes sociales distribuyen imágenes que no representan bien las estructuras de CR;
- Incluso si una estructura de CR sobrevive a un terremoto sin daños críticos, su agrietamiento y descascaramiento, especialmente en elementos que han fluido, generarán preguntas de parte de propietarios e ingenieros;
- Nuestra profesión debería redefinir el objetivo del diseño sísmico. Las comunidades dependen de edificios e infraestructura funcionales; la confianza en la ingeniería se ve socavada cuando el daño es grave o generalizado. Propietarios e inquilinos esperan, con razón, poder volver a ocupar edificios poco después de los terremotos, por lo que establecer una meta de simplemente evitar el colapso debe abandonarse como un concepto obsoleto; y
- Se necesitan tiempo y recursos excesivos para evaluar, reparar y reabrir edificios; esto provoca el desplazamiento de población, lo que agota aún más los recursos y desacelera la recuperación. En Turquía (2023), muchos edificios sin daño estructural aparente que podrían haberse restaurado fueron programados para demolición por las autoridades gubernamentales ante la insistencia de sus ocupantes debido a daño no estructural. Se debe limitar el daño de elementos estructurales y no estructurales para generar confianza y permitir una evaluación, reparación y reutilización más rápidas.

Para lograr estos objetivos de desempeño el enfoque de diseño que permite que las estructuras exhiban grandes derivas en los terremotos requiere; (a) que las estimaciones de futuras intensidades de los sismos sean confiables; y (b) apropiado diseño y construcción de detalles del refuerzo para acomodar las derivas impuestas. Este enfoque de diseño, por lo tanto, no es tolerante con subestimaciones de la demanda o errores en el diseño o construcción.

Las incertidumbres que involucran estimaciones factibles de futuros movimientos sísmicos son abrumadoras. Los movimientos registrados en Antakya, Turquía, superaron el máximo esperado para un período de retorno nominal de 2,500 años. Lo mismo ocurrió en Christchurch, Nueva Zelanda, donde hoy no se están construyendo edificios que puedan satisfacer las demandas que se midieron (sobre la base de que es muy poco probable que tales demandas ocurran de nuevo). En Haití, aunque no hubo instrumentos que proporcionaran resultados

confiables de la intensidad del movimiento del suelo, estimaciones de la intensidad de diseño, disponibles antes del terremoto, indican que era claramente mucho menor (0.1 g) que la intensidad real. En Tohoku, Japón, la energía total liberada por el terremoto de 2011 fue mucho mayor que la que esperaban los sismólogos porque se descubrió que la ruptura total de la falla fue el doble de lo previsto. En Chi-Chi, Taiwán, los valores registrados de PGV no tenían precedentes, pero ahora se han producido intensidades similares nuevamente en 2023 en el sur de Turquía. Los ingenieros deben diseñar considerando lo que estiman los sismólogos, por supuesto, pero también deben tener en cuenta las posibles consecuencias de las incertidumbres/incógnitas en esas estimaciones.

No hemos ensayado elementos estructurales en todas las configuraciones que son plausibles en la realidad y los terremotos seguirá enseñándonos cómo mejorar las estructuras. Por ejemplo, después de Chile 2010, la comunidad de ingenieros reexaminó lo que pensábamos sobre la capacidad de deformación de los muros estructurales. Las “rótulas plásticas” no eran tan largas como esperábamos<sup>24</sup>, y los empalmes por traslape causaron concentraciones de esfuerzos que redujeron la capacidad de deformación<sup>25</sup>.

Hay detalles de refuerzo que fueron concebidos con la resistencia en mente. Sin embargo, la respuesta a un terremoto requiere deformabilidad. Las longitudes de desarrollo y los empalmes por traslape son buenos ejemplos de detalles que fueron concebidos para alcanzar un cierto nivel de resistencia en lugar de un objetivo de deformación. Se suponía que la deformabilidad era consecuencia de la fluencia, pero no se hizo cuantificación explícita de la capacidad de deformación para ajustar las formulaciones relacionadas con adherencia.



**Fig. 3:** Falla de un muro con empalmes por traslape del refuerzo vertical corto y sin confinamiento del elemento de borde, Turquía, 2023

Observaciones de campo realizadas en 2023 después de los terremotos de Pazarcik y Elbistan en Turquía sugieren la necesidad de las siguientes mejoras a las disposiciones de los códigos de construcción:

- No se requiere que los muros ordinarios (muros no clasificados como “muros especiales”), que se pueden utilizar en regiones que se cree que tienen moderada sismicidad y pueden sufrir fluencia de barras longitudinales, tengan bordes confinados (elementos de borde). Estos muros también pueden tener bajas cuantías de refuerzo ( $\leq 0.25\%$ ) y empalmes por traslape cerca de secciones críticas. La Fig. 3 muestra daños de un muro con detallado común. Los muros ordinarios deberían prohibirse en regiones con sismicidad moderada o deberían tener detalles de refuerzo capaces de limitar los daños;
- El refuerzo longitudinal de columnas y elementos de borde de muros debe estar confinado dentro de la cimentación cuando estén ubicados cerca de un borde de la cimentación si se espera que las barras fluyan. Si no están confinadas, las barras pueden pandearse (Fig. 4), causando descascaramiento afectando el soporte de columnas o muros. El Código ACI-318-19(22)<sup>26</sup> requiere tal confinamiento en estructuras para las categorías (SDC) D, E y F, pero el requisito debe extenderse a la categoría (SDC) C porque se espera fluencia de las barras;
- Los riesgos de descascaramiento y de pandeo de las barras se exageran cuando las barras longitudinales se empalman inmediatamente encima de la cimentación (Fig. 5), porque la región de empalme más rígida fuerza la concentración de rotación en la base de la columna o muro. También es probable que los empalmes por traslape fallen cuando se los somete a demandas de deformación inelásticas cíclicas. No se deben permitir empalmes por traslape en la base de columnas de pórticos intermedios resistentes a momento; y

- Las barras longitudinales de viga que pasan fuera de la columna deben confinarse para limitar el daño por descascaramiento (Fig. 6) y la pérdida de rigidez. El Código ACI-318-19(22)<sup>26</sup> requiere este confinamiento en nudos de pórticos especiales resistentes a momento, pero este requisito debería aplicarse a otros nudos sujetos a fluencia de las barras en caso de sismo incluyendo los pórticos “no participantes” en categorías (SDC) D, E y F, y en pórticos intermedios resistentes a momento.



**Fig. 4:** Falla de una columna (izquierda) y de un muro estructural (derecha) sin confinamiento adecuado dentro de la cimentación cerca de un borde, Turquía, 2023



**Fig. 5:** Falla de una columna sin confinamiento adecuado dentro de la cimentación cerca de un borde y empalmes por traslape inmediatamente arriba de la cimentación, Turquía, 2023



**Fig. 6:** Nudo viga-columna con el refuerzo de la viga no confinado, Turquía, 2023

En Antakya, tras el terremoto de Pazarcik y Elbistan de 2023 en Turquía, se observó que los edificios flexibles tenían derivas residuales excesivas. Los edificios de la Fig. 7 fueron construidos por un contratista utilizando el mismo conjunto de planos. Los detalles de refuerzo observados en estos edificios eran mejores que los observados en la mayoría de los demás edificios de la zona. A pesar del relativamente buen detallado, el primer piso del edificio en el fondo, que no se derrumbó, tenía una deriva residual de aproximadamente 6%, mientras que el edificio en primer plano colapsó, probablemente debido a efectos de segundo orden (P-delta).

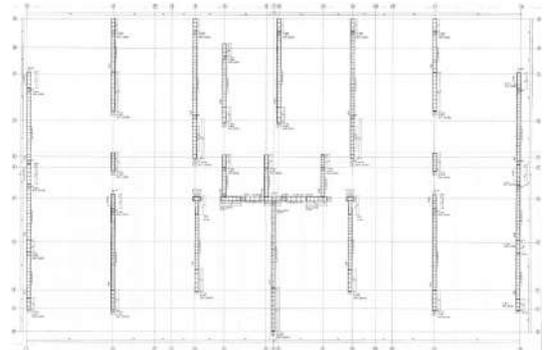


**Fig. 7:** Edificio con “mejor” detallado que se volcó (adelante) y edificio con deriva residual del 6% (atrás), Turquía, 2023.

Algunos edificios tenían un  $WI = 0.6\%$  en una dirección y  $0.03\%$  en la dirección ortogonal (en otras palabras, el índice de muros fue 20 veces mayor en una dirección que en la otra). La Fig. 8 muestra un edificio de este tipo: se derrumbó durante el terremoto de Pazarcik y Elbistan de 2023. Se debería requerir un área mínima de muros estructurales para cada dirección en planta.

Los costos asociados al aumento de la robustez no son críticos<sup>25,27-29</sup>; es poco probable que excedan del 1 al 2% del costo total de construcción (incluido el valor del terreno). Compárese esto con los honorarios del agente inmobiliario (a menudo del 5 al 6%) o con el interés compuesto cobrado por los bancos. Además, compárese los costos de una mayor robustez con los costos (tanto financieros como en términos de sufrimiento humano) de albergar temporalmente a poblaciones desplazadas, demoler estructuras dañadas y reconstrucción. Estos enormes costos a menudo corren a cargo de los gobiernos, creando impacto en los presupuestos a largo plazo que afectan a la sociedad más allá de los límites geográficos de los efectos del terremoto. Si, como sugieren los datos, modestos aumentos en el costo asociados a una mayor robustez pueden prevenir en gran medida daños graves y reducir los daños en general, son posibles enormes ahorros a largo plazo.

Por todas estas razones, afirmamos que debemos pasar de estructuras que sufren grandes desplazamientos que dependen de detalles impecables (y de una respuesta ideal) a estructuras más robustas que se desplazan menos y permiten cierto margen de error. En ese proceso, sin embargo, el detallado no debería verse comprometido porque eso restaría valor a los beneficios de limitar las demandas de deriva. Juntas, estas recomendaciones, se puede esperar que produzcan estructuras más seguras que tienen más probabilidades de ser habitables después de un terremoto.



**Fig. 8:** Planta de un edificio con formaleta tipo túnel con más muros estructurales en una dirección que en la otra (Fuente: plano disponible de registros públicos)

## Conclusiones

Si la industria de CR no se esfuerza por reducir los límites de las derivas y/o aumentar la cantidad de muros estructurales en áreas altamente sísmicas, es probable que los terremotos sigan causando daños generalizados, perjudicando a los usuarios y desacreditando a la industria. Una alternativa es requerir que los muros estructurales en cada dirección en planta ocupen al menos el 0.2% del área total de piso sobre el terreno en edificios hasta de 15 pisos conservando los requisitos de detallado especiales. El detallado es fundamental como salvaguarda en casos en los que la intensidad del movimiento del suelo y las demandas de deriva resultantes sean mayores de lo esperado. En edificios más altos, la tradición chilena sugiere que una densidad de muro de 3% del área de la primera planta (para cada dirección del plano) es suficiente. Otra alternativa es trabajar con la industria del acero para reducir los límites de deriva actualmente impuestos por la Sociedad Americana de Ingenieros Civiles (ASCE) y el Consejo Internacional de Construcción (IBC). El acero también es vulnerable a deformaciones y derivas, y es probable que daños en tabiques, fachadas y acabados sean altos en edificios con derivas de piso superiores al 1%, independientemente del tipo de estructura que los soporte.

## Referencias

1. Laughery, L.A.; Puranam, A.Y.; Segura, C.L.; and Behrouzi, A.A., "The Institute's Team for Damage Investigations," *Concrete International*, V. 42, No. 11, Nov. 2020, pp. 32-40.
2. Shah, P.; Pujol, S.; Kreger, M.; and Irfanoglu, A., "2015 Nepal Earthquake," *Concrete International*, V. 39, No. 3, Mar. 2017, pp. 42-49.
3. Abrahamczyk, L.; Penava, D.; Haweyou, M.; Anic, F.; Schultz, A.; and Rautenberg, J., "Assessment of Damage to Modern Reinforced Concrete Buildings – Engineering Analysis of the M6.4 Albania Earthquake, 26th of Nov. 2019," Proceedings of the 8th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering (COMPdyn), Athens, Greece, June 28-30, 2021, 15 pp.
4. Sim, C.; Laughery, L.; Chiou, T.C.; and Weng, P.-W., 2017 Pohang Earthquake, 2018, datacenterhub.org.
5. Villalobos, E.; Sim, C.; Smith-Pardo, J.P.; Rojas, P.; Pujol, S.; and Kreger, M., "April 16, 2016 Ecuador Earthquake Damage Assessment Survey," *Earthquake Spectra*, V. 34, No. 3, Aug. 2018, pp. 1201-1217.
6. Alcocer, S.; Behrouzi, A.; Brena, S.; Elwood, K.; Irfanoglu, A.; Kreger, M.; Lequesne, R.D.; Mosqueda, G.; Pujol, S.; Puranam, A.; Rodriguez, M.; Shah, P.; Stavridis, A.; and Wood, R., "Observations about the Seismic Response of RC Buildings in Mexico City," *Earthquake Spectra*, V. 36, No. 2S, Dec. 2020, pp. 154-174.
7. Pujol, S.; Laughery, L.; Puranam, A.; Hesam, P.; Cheng, L.-H.; Lund, A.; and Irfanoglu, A., "Evaluation of Seismic Vulnerability Indices for Low-Rise Reinforced Concrete Buildings Including Data from the 6 February 2016 Taiwan Earthquake," *Journal of Disaster Research*, V. 15, No. 1, Feb. 2020, pp. 9-19.
8. Pujol, S.; Bedirhanoglu, I.; Donmez, C.; Dowgala, J.D.; Eryilmaz Yildirim, M.; Klaboe, K.; Koroglu, F.B.; Lequesne, R.D.; Ozturk, B.; Pledger, L.; and Sonmez, E., "Quantitative Evaluation of the Damage to RC Buildings Caused by the 2023 Southeast Turkey Earthquake Sequence," *Earthquake Spectra*, V. 40, No. 1, Feb. 2024, pp. 505-530.
9. Howe, G.E., "Requirements for Buildings to Resist Earthquakes," American Institute of Steel Construction, Chicago, IL, 1936.
10. Shiga, T.; Shibata, A.; and Takahashi, T., "Earthquake Damage and Wall Index of Reinforced Concrete Buildings," Proceedings of the 12th Tohoku District Symposium, Japan, 1968, pp. 29-32 (in Japanese).
11. Diebold, J.; Moore, K.; Hale, T.; and Mochizuki, G., "SEAOC Blue Book: Seismic Design Recommendations 1959 to 2008," The 14th World Conference on Earthquake Engineering, Beijing, China, Oct. 12-17, 2008, 8 pp.
12. Hassan, F., and Sozen, M.A., "Seismic Vulnerability Assessment of Low-Rise Buildings in Regions with Infrequent Earthquakes," *ACI Structural Journal*, V. 94, No. 1, Jan.-Feb. 1997, pp. 31-39.
13. Sozen, M.A., "Review of Earthquake Response of Reinforced Concrete Buildings with a View to Drift Control," Proceedings of the 7th World Conference on Earthquake Engineering, Turkish National Committee on Earthquake Engineering, Istanbul, Turkey, 1980.
14. Riddell, R.; Wood, S.L.; and De La Llera, J.C., "The 1985 Chile Earthquake: Structural Characteristics and Damage Statistics for the Building Inventory in Vina del Mar," Report No. SRS 534, University of Illinois, Urbana, IL, 1987, 265 pp.
15. Dönmez, C., and Pujol, S., "Spatial Distribution of Damage Caused by the 1999 Earthquakes in Turkey," *Earthquake Spectra*, V. 21, No. 1, Feb. 2005, pp. 53-69.
16. Gur, T.; Pay, A.C.; Ramirez, J.A.; Sozen, M.A.; Johnson, A.M.; and Irfanoglu, A., "Performance of School Buildings in Turkey During the 1999 Düzce and the 2003 Bingöl Earthquakes," *Earthquake Spectra*, V. 25, No. 2, May 2009, pp. 239-256.
17. Sim, C.; Skok, N.; Irfanoglu, A.; Pujol, S.; Sozen, M.; and Song, C., "Database of Low-Rise Reinforced Concrete Buildings with Earthquake Damage," 2016, datacenterhub.org.
18. Zhou, W.; Zheng, W.; and Pujol, S., "Seismic Vulnerability of Reinforced Concrete Structures Affected by the 2008 Wenchuan Earthquake," *Bulletin of Earthquake Engineering*, V. 11, No. 6, Sept. 2013, pp. 2079-2104.
19. O'Brien, P.; Eberhard, M.; Haraldsson, O.; Irfanoglu, A.; Lattanzi, D.; Lauer, S.; and Pujol, S., "Measures of the Seismic Vulnerability of Reinforced Concrete Buildings in Haiti," *Earthquake Spectra*, V. 27, No. 1S, Oct. 2011, pp. 373-386.
20. Kam, W.Y.; Pampanin, S.; and Elwood, K., "Seismic Performance of Reinforced Concrete Buildings in the 22 February Christchurch (Lyttleton) Earthquake," *Bulletin of the New Zealand Society of Earthquake Engineering*, V. 44, No. 4, Dec. 2011, pp. 239-279.
21. Pledger, L.; Pujol, S.; and Chandramohan, R., "Investigating the Effect of Stiffness on the Seismic Performance of RC Structures," Proceedings of the New Zealand Society for Earthquake Engineering 2023 Annual Technical Conference, Auckland, New Zealand, Apr. 19-21, 2023, 8 pp.
22. Puranam, A.; Irfanoglu, A.; Pujol, S.; Chiou, T.C.; and Hwang, S., "Evaluation of Seismic Vulnerability Screening Indices using Data from the Taiwan Earthquake of 6 February 2016," *Bulletin of Earthquake Engineering*, V. 17, No. 4, Nov. 2018, pp. 1963-1981.
23. Bruneau, M., and MacRae, G., *Reconstructing Christchurch: A Seismic Shift in Building Structural Systems*, The Quake Centre, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2017, 170 pp.
24. Takahashi, S.; Yoshida, K.; Ichinose, T.; Sanada, Y.; Matsumoto, K.; Fukuyama, H.; and Suwada, H., "Flexural Drift Capacity of Reinforced Concrete Wall with Limited Confinement," *ACI Structural Journal*, V. 110, No. 1, Jan.-Feb. 2013, pp. 95-104.
25. Pollalis, W., and Pujol, S., "Development and Splice Lengths for High-Strength Reinforcement Volume II: Drift Capacity of Structural Walls with Lap Splices," Pankow Foundation, Apr. 2020, 135 pp.

26. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (ACI CODE-318-19) (Reapproved 2022)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019, 624 pp.
27. García, L.E.; Perez, A.; and Bonacci, J., "Cost Implications of Drift Controlled Design of Reinforced Concrete Buildings," 11th World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, Mexico, June 23-28, 1996.
28. Pledger, L.; Pujol, S.; and Chandramohan, R., "Reducing Design Drift Limits," Proceedings of the 18th World Conference on Earthquake Engineering (WCEE2024), Milan, Italy, June 30-July 5, 2024.
29. Boyar, T.B., "Cost Analysis for Earthquake Resilience in Reinforced Concrete Structures," MS thesis, Izmir Institute of Technology, Izmir, Turkey, 2024. Received and reviewed under Institute publication policies.

**Santiago Pujol**, FACI, es profesor de ingeniería civil en la Universidad de Canterbury, Christchurch, Nueva Zelanda, y director del Comité ACI 133, Investigación de Desastres.



**Rémy D. Lequesne**, FACI, es Profesor de Ingeniería Civil, Ambiental y Arquitectónica en la Universidad de Kansas, Lawrence, KS, USA. Es miembro de varios comités de ACI, incluido el Comité ACI 133, Investigación de Desastres y el Subcomité ACI 318-J, nudos y conexiones.



**Chungwook Sim**, miembro ACI, es Profesor Asociado de Ingeniería Civil y Ambiental en la Universidad de Nebraska-Lincoln, Lincoln, NE, USA. Es miembro del Comité ACI 133, Investigación de Desastres.



Título original en inglés:  
**The Urgent Need for Increased Robustness of Buildings in Highly Seismic Regions**

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



*Traductor y Revisor Técnico:*  
**Pedro Nel Quiroga, Ph. D**

## Foro De Tecnología, Parte 2: Información Compartida por la “Fundación ACI” 2024

### Presentado por Craig W. Hargis, Vicepresidente, Servicios Técnicos, Fortera

Fortera es un fabricante pionero de cemento verde enfocado en la descarbonización del cemento en colaboración con los fabricantes de cemento. Su proceso ReCarb® mineraliza el dióxido de carbono industrial ( $\text{CO}_2$ ) para producir materiales cementantes con un 70% menos de emisiones de  $\text{CO}_2$  que el cemento Portland. La tecnología se integra a las plantas de fabricación de cemento existentes, extrayendo  $\text{CO}_2$  industrial del conducto de gases de un horno de cemento y capturándolo sin necesidad de compresión o purificación. El  $\text{CO}_2$  mineralizado puede utilizarse para producir cemento compuesto, o puede usarse como el único aglutinante en el concreto. Los pasos del proceso incluyen calcinar caliza para producir cal, disolver la cal en un solvente de marca registrada, y bombear  $\text{CO}_2$  a través de la solución (Fig. 1). Se produce carbonato de calcio reactivo (vaterita) como un precipitado que se filtra, seca y pule térmicamente antes del envío para la producción de concreto.

Durante más de 25 años, la Fundación ACI ha organizado Foros de Tecnología para apoyar el enfoque en expansión que tiene el ACI en cuanto al avance de la industria del concreto. Estos encuentros han sido eventos educativos y de networking enfocados en la innovación, que presentan ponencias de investigadores, representantes de los comités del ACI y desarrolladores de nuevas tecnologías para el diseño, construcción e inspección. Este artículo es el segundo de una serie de tres que resume las presentaciones realizadas en el Foro de Tecnología 2024.

Las innovaciones que tienen un gran impacto en la industria a menudo se incluyen en un panel de discusión en el que se designa tiempo suficiente para preguntas de los asistentes y respuestas de parte de los ponentes. En el Foro de Tecnología 2024, el tema correspondiente a los materiales para concreto de bajo carbono se presentó de esta manera. Se realizaron cinco presentaciones rápidas por parte de los propietarios de tecnología sobre diversas opciones de bajo carbono. Tras una discusión prolongada, el segmento concluyó con una presentación que describe el nuevo código de concreto de bajo carbono de ACI.

Estas presentaciones del Foro se pueden descargar en: <https://www.acifoundation.org/portals/12/Files/CIC/2024-Technology-Forum-Presentations.zip>.

### C-Crete Technologies

#### Presentado por Rouzbeh Savary, Presidente, C-Crete Technologies

C-Crete ha sido pionera en un aglutinante de concreto que está esencialmente libre de emisiones de  $\text{CO}_2$ . El concreto producido utilizando el aglutinante C-Crete supera al concreto de cemento Portland en rendimiento. Requiere menos agua, es fluido, el fraguado es similar al del concreto convencional y alcanza una resistencia de más de 7,000 psi (48 MPa). Además, el aglutinante cumple o supera los estándares de la industria como ASTM C1157/C1157M (consulte la Tabla 1) y tiene paridad de costos con el cemento convencional. Hasta ahora, se han colocado más de 2,500 toneladas (2,270 toneladas métricas)

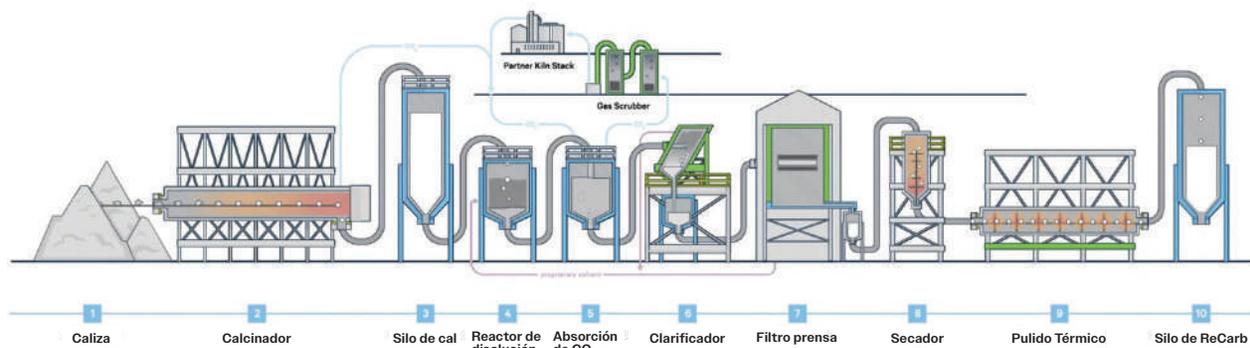


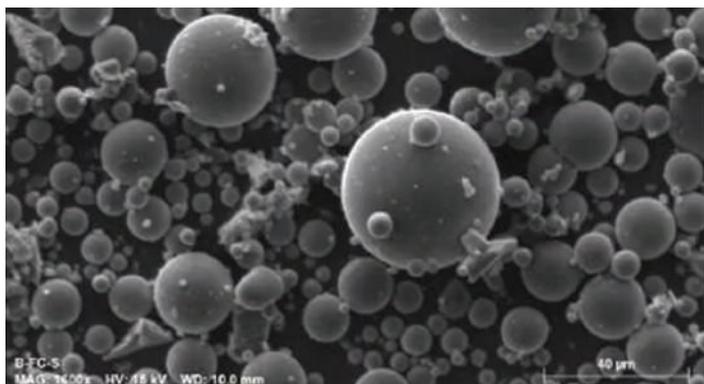
Fig. 1: El proceso de Fortera produce carbonato de calcio reactivo disolviendo cal en un solvente de marca registrada, bombeando  $\text{CO}_2$  a través de la solución y procesando el precipitado resultante.

de productos C-Crete en cimientos, muros a cortante, columnas, pisos, losas apoyadas en placas metálicas (slab-on-deck), entradas a estacionamientos, y hoy se realizan además otro tipos de proyectos. Se han producido aglutinantes utilizando materias primas como el basalto, zeolita, granito y escoria, y se están desarrollando aglutinantes basados en materiales adicionales.

## Terra CO<sub>2</sub>

### Presentado por Michele Blackburn, Directora Comercial, Terra CO<sub>2</sub>

La tecnología de Terra CO<sub>2</sub> utiliza materias primas a base de silicato ampliamente disponibles, que se encuentran entre los materiales más abundantes de la Tierra. Las plantas de la compañía se están ubicando en o cerca de sitios de extracción de agregados ya existentes, minimizando así los costos de transporte y aprovechando la infraestructura.



**Fig. 2:** El proceso de Terra CO<sub>2</sub> se basa en la vitrificación de silicatos. La compañía actualmente está produciendo un material cementante suplementario puzolánico vítreo y microesférico, y está desarrollando un aglutinante no hidráulico.

Las materias primas incluyen silicatos como basalto, pizarra, esquisto y residuos de minería. Estos materiales se muelen y se vitrifican en un polvo vítreo que es un material cementante suplementario, OPUS SCM (Fig. 2), el cual es adecuado para el reemplazo directo de cenizas volantes Clase F en el concreto.

Para alcanzar producción a escala industrial, Terra CO<sub>2</sub> ha desarrollado instalaciones de procesamiento avanzadas (APF) que actualmente producen OPUS SCM y en el futuro producirá un reemplazo completo de cemento, OPUS ZERO™, un aglutinante no hidráulico. Si se fabrica utilizando energía renovable, la producción de OPUS ZERO no liberará emisiones de CO<sub>2</sub>. Terra CO<sub>2</sub> está iniciando la construcción de su primera instalación de APF a principios de 2025. La planta estará ubicada en el mercado de Dallas-Fort Worth, TX, EE. UU.

## Prometheus Materials

### Presentado por Loren Burnett, Presidente y CEO, Prometheus Materials

Prometheus Materials actualmente está produciendo un cemento y concreto con emisiones de carbono negativas. Esto se logra secuestrando carbono durante la fabricación y evitando los procesos con alto contenido de carbono asociados con la producción de cemento.

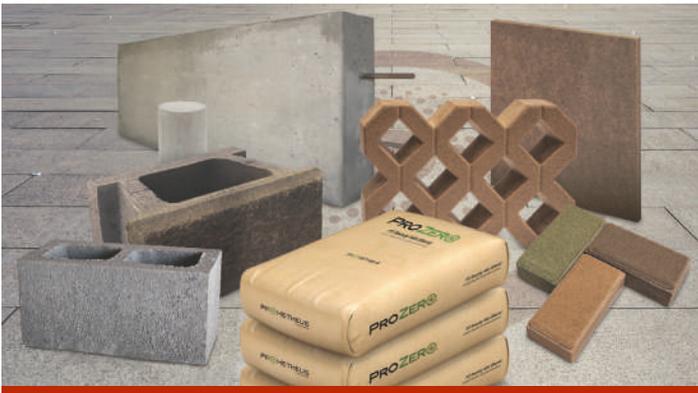
La mezcla suplementaria ProZero™ de la compañía es un reemplazo 1:1 del cemento Portland ordinario (OPC) (Fig. 3). Este material compuesto se mezcla con agregado y OPC y, como resultado, produce una reducción de hasta el 166 % en el potencial de calentamiento global (GWP por sus siglas en inglés).

**Tabla 1:**

**Se ha demostrado que el aglutinante C-Crete cumple con los requisitos de ASTM C1157/C1157M, “Especificación estándar de desempeño para cemento hidráulico”.**

Propiedad	Tiempo	Prueba ASTM	Resultados C-Crete	Min o máx por especificación	Unidad
Resistencia a compresión	3 días	C109/C109M	5,000	> 1,800	psi
	7 días		6,200	> 2,900	psi
	28 días		8,000	> 4,060	psi
Expansión de barras de mortero	14 días	C1038/C1038M	0.012	< 0.02	%
Tiempo de fraguado, Ensayo Vicat		C191	165	45 < Asentamiento < 420	minutos
Contenido de aire		C185	1.7	< 12	%
Cambio en longitud Autoclave		C151/C151M	0.21	< 0.8	%
Reacción Álcali - Silice	14 días	C1260	0.01	0.02	%
	56 días		0.02	0.06	%

Nota: 1000 psi = 6.9 MPa



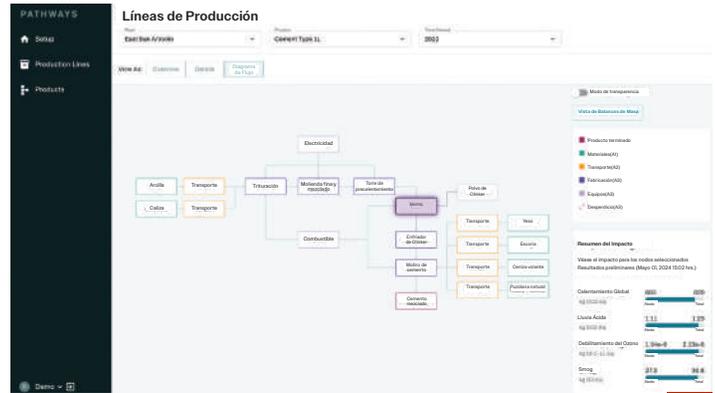
**Fig. 3:** La mezcla ProZero™ de Prometheus Materials puede utilizarse en una variedad de productos.

Las microalgas son la clave. La compañía está fabricando su producto en su planta piloto utilizando algas que crecen en fotobiorreactores. A medida que la compañía avanza hacia la distribución global, trabajará con socios para cultivar algas en estanques al aire libre. En el proceso, pendiente de patente de la compañía, las microalgas se cultivan utilizando luz solar, nutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio), agua y CO<sub>2</sub>; y se estimulan para producir carbonato de calcio biomineralizado. El agua se evapora del carbonato de calcio dejando como remanente los materiales algales, los cuales luego se combinan con aglutinantes de marca registrada. El polvo resultante se envía a productores de cemento, concreto y productos de concreto manufacturados para su producción y distribución. El proceso puede utilizar agua reciclada no potable; y prácticamente toda el agua utilizada en el proceso de producción se devuelve al medio ambiente.

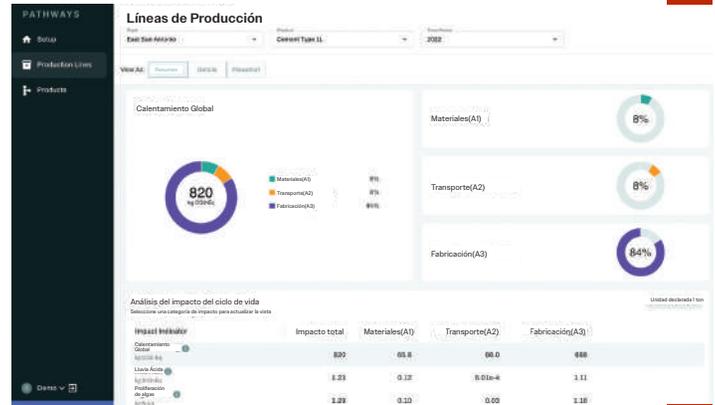
## Pathways

### Presentado por Dorian Krausz, Líder Fundador de Carbono, Pathways

La plataforma de Pathways, impulsada por inteligencia artificial (IA), ingiere y transforma datos no estructurados, realiza evaluaciones del ciclo de vida (LCA) conformes con ISO y EN, supervisa la verificación independiente de terceros y publica automáticamente declaraciones ambientales de productos (EPD) específicas del producto sin recopilación manual de datos (Fig. 4). La visibilidad de esta capa de datos en tiempo real permite a los fabricantes comprender los impactos ambientales de sus procesos, identificar puntos críticos de emisión y desbloquear estrategias de descarbonización. Por lo tanto, pueden reducir efectivamente los impactos ambientales de las nuevas construcciones y cumplir con las demandas de los propietarios de edificios, los sistemas de certificación y las regulaciones que rigen el carbono incorporado.



**A**



**B**

**Fig. 4:** Pathways trabaja con fabricantes para crear LCA de productos y EPD: (a) utilizando un gemelo digital ambiental del proceso de línea de producción para un material dado, el sistema Pathways ingiere datos no estructurados; y (b) el panel de control del sistema permite al fabricante identificar puntos críticos en sus procesos y realizar comparaciones lado a lado de múltiples instalaciones dentro de sus carteras.

## Soluciones Innovadoras para la Adopción de Concreto Bajo en Carbono en Códigos para la Construcción

### Presentado por Matthew P. Adams, Profesor Asociado, Instituto de Tecnología de Nueva Jersey

Adams discutió cómo los gobiernos y la industria han definido el concreto bajo en carbono, cómo la política afecta la implementación (Fig. 5) y qué deben hacer los innovadores para ingresar al mercado del concreto bajo en carbono. La experiencia ha demostrado que las políticas exitosas tienen las siguientes características:

- Agnosticismo tecnológico
- Participación de las partes interesadas de la comunidad
- Liderazgo tanto en el desarrollo como en la implementación de políticas
- Participación de la comunidad y colaboración con contratistas para transferir conocimiento
- Disposición a absorber el riesgo del propietario
- Potencial de compensación de costos.

## Foro de Innovación en Concreto 2025

El Foro de Innovación en Concreto 2025 brindará a los asistentes la oportunidad de conectarse con otros profesionales de la industria y aprender sobre las tendencias actuales, las tecnologías emergentes, los nuevos productos y otras innovaciones. El evento también brindará oportunidades para que los asistentes establezcan relaciones estratégicas y amplíen sus redes de contactos.

¡Programe la fecha y únase a nosotros este año en Denver, CO, EE. UU., en el Hotel Clio del 12 al 14 de agosto de 2025!

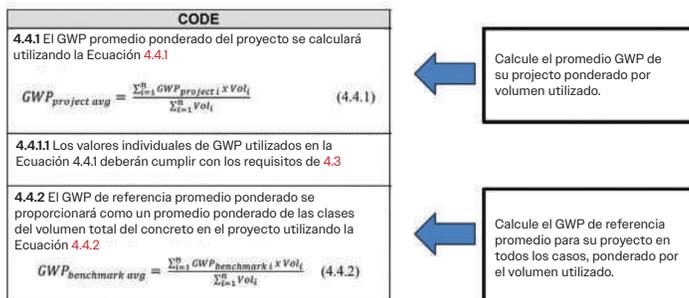
La actualización del programa estará disponible en la página web de la Fundación ACI: [www.acifoundation.org](http://www.acifoundation.org)

Generalmente, el concreto bajo en carbono se define por su potencial de calentamiento global (GWP), determinado mediante el uso de declaraciones ambientales de producto (EPD). Debido a que muchos parámetros determinarán el GWP de un proyecto, las políticas exitosas deben estar dictadas por estándares de desempeño. Es decir, las políticas deben basarse en encontrar un punto de referencia y definir la reducción deseada en relación con ese punto de referencia. El Comité ACI 323, Código de Concreto Bajo en Carbono, publicó recientemente un nuevo código de construcción modelo para hacer precisamente eso. El nuevo ACI CODE-323-24 requerirá que los diseñadores elijan su ruta de cumplimiento según el tipo y tamaño del proyecto (consulte la Fig. 5). Si bien muchos tipos de proyectos están excluidos de la versión actual del documento debido a la falta de datos de referencia, de los tipos de proyectos que están incluidos en el código, se requiere que los más grandes alcancen un GWP del proyecto por debajo de un punto de referencia del proyecto (consulte la Fig. 6). Se les pide a los diseñadores de proyectos medianos que documenten el GWP de su proyecto. Adams concluyó aconsejando a los innovadores que desarrollen guías y documentos de especificación para demostrar que su tecnología funciona dentro de los estándares y métodos existentes.



Total de GWP permisible se basa en un promedio ponderado.  
GWP real es también un promedio ponderada

**Fig. 5: "Concreto Bajo en Carbono—Requisitos y Comentarios del Código (ACI CODE-323-24)" define tres vías de cumplimiento basadas en el tamaño del proyecto.**



**Fig. 6: El nuevo Código especifica que los valores de GWP del proyecto y de referencia son promedios ponderados.**

Título original en inglés:  
Innovation Shared at the  
ACI Foundation 2024  
Technology Forum, Part 2

**La traducción de este artículo  
correspondió al Capítulo Costa Rica**



*Traductora y  
Revisora Técnica:*  
**Ing. Tyssen Wong  
Chang**

## Interpretación de los requisitos de las formaletas

**P.** Llevamos más de 30 años instalando formaletas y colocando hormigón armado estructural. Recientemente se ha cuestionado la comprensión de los requisitos de formaleta en un proyecto que requería que las formaletas de soffito de madera: 1) se dispusieran de forma ordenada y simétrica con un mínimo de juntas; y 2) se suministraran en el mayor tamaño posible para minimizar el número de juntas. Presentamos un plano de formaleta en el que se indicaban planchas de madera contrachapada de 1.2 x 2.4 m (4 x 8 pies), dispuestas de forma escalonada a partir de una esquina, tal y como se muestra en la Fig. 1. El arquitecto rechazó nuestro plano de taller, exigiendo que el contrachapado fuera de 1.5 x 3.0 m (5 x 10 pies) como “tamaño práctico más grande” y que las planchas se dispusieran “simétricamente” alrededor de cada habitación individual mostrada en los planos arquitectónicos. La diferencia de coste entre nuestra propuesta de disposición de la formaleta y la solicitada por el arquitecto era de 500,000 USD. No tenemos ese dinero en nuestra oferta. ¿Hemos interpretado mal estos requisitos de formaleta todos

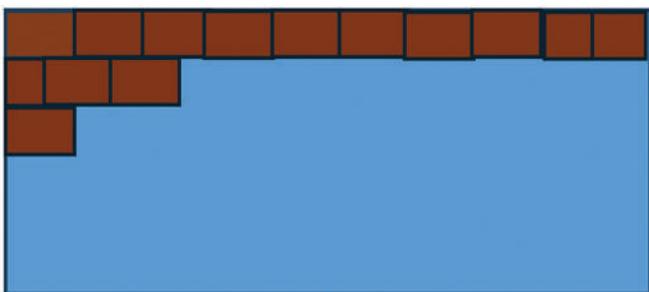


Fig. 1: Propuesta de paneles de madera contrachapada escalonados de 1.2 x 2.4 m (4 x 8 pies) comenzando en una esquina.

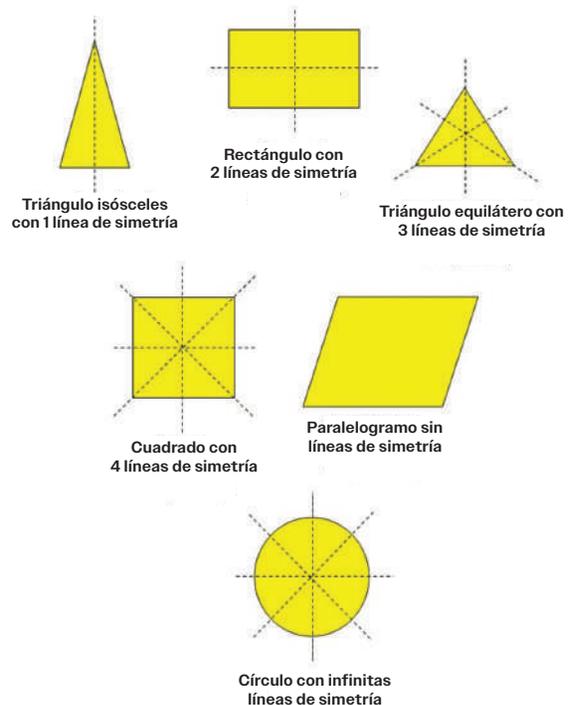


Fig. 2: Eje de simetría para diferentes formas.

**R.** ¿Estos años? Este problema se plantea con poca frecuencia, pero cuando lo hace, puede resultar caro. La práctica habitual es que los contratistas suministren planchas de contrachapado de 4 x 8 pies dispuestas como se muestra en la Fig. 1 cuando los términos “ordenado y simétrico” no están definidos en los documentos contractuales.

Una interpretación razonable del contratista para el tamaño práctico más grande es madera contrachapada de 4 x 8 pies, porque la madera contrachapada de 5 x 10 pies es a menudo un pedido especial, por lo que su entrega puede retrasar el proyecto. Asimismo, si el arquitecto no define en los documentos del contrato que el eje de simetría o la “formaleta de soffito debe estar dispuesta simétricamente por habitación”, entonces de nuevo se tendrá que aplicar una interpretación razonable del contratista. Los tribunales han dictaminado generalmente que el redactor de documentos contractuales ambiguos es responsable si el contratista tiene una interpretación razonable.

ACI SPEC-301-20, “Especificaciones para construcción de concreto”,<sup>1</sup> evita esta cuestión al no utilizar las palabras “ordenada”, “simétrica” o “mayor tamaño práctico”. Si ACI SPEC-301-20 incorporara “mayor tamaño práctico” y “ordenado y simétrico”, requeriría que el especificador en la Lista de Comprobación de Requisitos Obligatorios indicara el “mayor tamaño práctico” así como “ordenado y simétrico” en los documentos contractuales.

ACI PRC-347-14(21), Guía de Formaletas para Hormigón, Sección 7.5.2, establece que “la formaleta debe instalarse cuidadosamente para producir patrones de juntas ordenados y simétricos, a menos que se especifique lo contrario. Las juntas deben ser verticales u horizontales y, cuando sea posible, deben escalonarse para mantener la continuidad estructural”.<sup>2</sup> Sin embargo, el documento no describe lo que constituye un “patrón de juntas simétrico”.

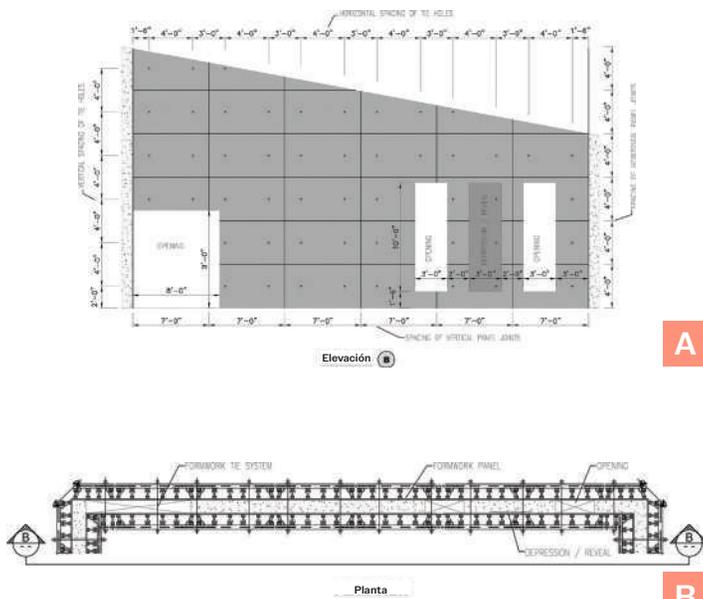


Fig. 3: Formaleta de obra: (a) uso de bandas de 4 x 8 pies, y elevación del aspecto de la cara de la formaleta (Fig. 4.1c en ACI PRC-347.3-13); y (b) plano de la formaleta (Fig. 4.1d en ACI PRC-347.3-13).

Lamentablemente, AIA MasterSpec<sup>®3</sup> establece los siguientes requisitos ambiguos:

#### AIA MasterSpec Sección 033000 Hormigón Vertido en obra:

- Materiales de formaleta - Hormigón acabado liso: Paneles de formaleta que proporcionan superficies de hormigón continuas, verdaderas y lisas. Se suministran en los tamaños más grandes posibles para minimizar el número de juntas.
- Acabado de superficies encofradas - Acabado liso formaleta (ACI 301-20 Acabado superficial SF-2.0): Textura de hormigón en bruto impartida por el material de formaleta, dispuesta de forma ordenada y simétrica con un número mínimo de juntas.

#### AIA MasterSpec Sección 033300 Hormigón arquitectónico:

- El acero, plástico reforzado con fibra de vidrio u otros materiales para paneles no absorbentes aprobados y que proporcionen superficies de hormigón arquitectónico continuas, verdaderas y lisas. Se suministran en el mayor tamaño posible para minimizar el número de juntas.

- Acabados lisos con figuras de la formaleta: Textura del hormigón impartida por el material de la formaleta, debe ser dispuesto de forma ordenada y simétrica con un mínimo de juntas. Curiosamente, AIA MasterSpec utiliza el mismo lenguaje para el hormigón estructural y arquitectónico, aunque el “mayor tamaño práctico” y “ordenado y simétrico” son preocupaciones que rara vez se asocian con la formaleta para el hormigón estructural. Para agravar el dilema, pocos arquitectos definen los requisitos de “mayor tamaño práctico” y “ordenado y simétrico”, incluso para el hormigón arquitectónico.

Aunque el tamaño práctico más grande está abierto a la interpretación, generalmente vemos que los contratistas eligen madera contrachapada de 4 x 8 pies. Si se desea otro tamaño, los documentos contractuales deberán incluir un requisito específico.

Los requisitos de “ordenado” deben definirse en los documentos contractuales. Ordenado es un adjetivo que describe la disposición de la formaleta siguiendo un patrón. ¿Se indica o describe el patrón en el pliego de condiciones? Si es así, ese es el requisito del contrato. Si no, hay que aceptar la interpretación razonable del contratista.

El mismo requisito se aplica a “simétrico”. El término es un adjetivo que describe algo que tiene proporciones equilibradas, donde las piezas están dispuestas uniformemente a ambos lados de una línea, plano, punto o eje central, coincidiendo en tamaño, forma y colocación. Por lo tanto, la línea, plano, punto o eje divisorio debe especificarse para describir la disposición de la formaleta. La figura 2 muestra el eje de simetría para diferentes formas, con la disposición de formaleta más probable como cuadrada y rectangular (más adelante en esta respuesta se proporciona un ejemplo de disposición de formaleta triangular).

ACI PRC-347.3-13(21), Guía de Superficies de Hormigón con patrones de la formaleta, Sección 4.3, recomienda que el especificador “genere un dibujo del aspecto de la superficie encofrada de acuerdo con los requisitos de los documentos del contrato”.<sup>4</sup> Este dibujo del aspecto de la superficie encofrada ayuda a hacer coincidir las expectativas con el aspecto final del hormigón formaleta. El dibujo debe indicar la ubicación de las juntas en el material de revestimiento de la formaleta, los orificios de anclaje y cualquier elemento arquitectónico como huecos o falsos orificios de anclaje. La figura 3 ilustra un dibujo del aspecto de la superficie encofrada que muestra el alzado de un muro acabado y una vista en planta de la disposición de la formaleta de un muro realizado con formaleta de obra.

Preguntamos a Chris Forster, vicepresidente de Operaciones de Largo Concrete, Inc. y ex Presidente del Comité 303 de ACI, Hormigón Arquitectónico Colado en Obra, sobre las definiciones de “simétrico y ordenado”. Afirmó que nunca ha tenido problemas con esta cuestión, ya que los arquitectos de su zona detallan las ubicaciones específicas de las juntas de formaleta en los planos de techos reflejados. Además, se “entiende” que “simétrico y ordenado” indica al contratista que debe utilizar planchas completas en una disposición organizada, ya que la mayoría de los propietarios no quieren ver una colcha de retazos de tamaños de madera contrachapada.

En la figura 4 se muestra un ejemplo de los detalles de la forma en el plano del techo reflejado. Este arquitecto quería láminas triangulares de madera contrachapada unidas a una disposición en cuadrícula y coordinadas con cada penetración, como las luminarias y los rociadores contra incendios.

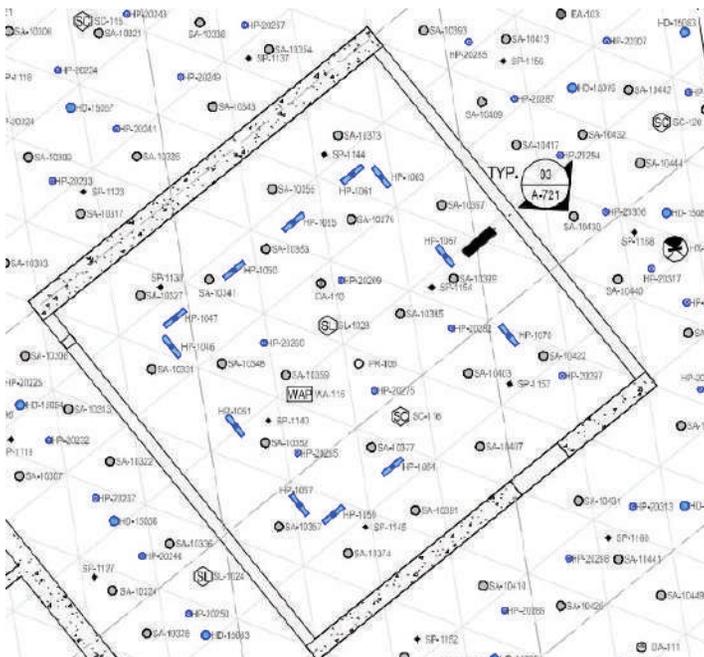
En su caso, el hecho de que el arquitecto no incluyera en el pliego de condiciones requisitos específicos sobre las “mayores dimensiones posibles” de las planchas de formaleta, una definición de disposición “ordenada y simétrica” o planos de aspecto de la superficie encofrada, hace que las exigencias del arquitecto posteriores a la licitación puedan ser objeto de una solicitud de cambio.

## Referencias

1. ACI Committee 301, “Specifications for Concrete Construction (ACI SPEC-301-20),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2020, 69 pp.
2. ACI Committee 347, “Guide to Formwork for Concrete (ACI PRC-347-14) (Reapproved 2021),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014, 36 pp.
3. AIA MasterSpec®, The American Institute of Architects, Washington, DC.
4. ACI Committee 347, “Guide to Formed Concrete Surfaces (ACI PRC-347.3-13) (Reapproved 2021),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2013, 17 pp.

Gracias a James E. Klinger, consultor de hormigón, Antioch, CA, EE. UU., y Bruce A. Suprenant, consultor de hormigón, Denver, CO, EE. UU., por proporcionar la respuesta a esta pregunta.

*Las preguntas de esta columna fueron formuladas por usuarios de los documentos del ACI y han sido respondidas por el personal del ACI o por un miembro o miembros de los comités técnicos del ACI. Las respuestas no representan la posición oficial de un comité del ACI. Los comentarios deben enviarse a keith.tosolt@concrete.org.*



**Fig. 4: Ejemplo de un plano arquitectónico de techo reflejado (RCP) que indica la disposición triangular de las juntas de formaleta del soffito de madera contrachapada (cortesía de Largo Concrete, Inc.)**

Título original en inglés:  
Interpretation of  
Formwork Requirements

La traducción de este artículo  
correspondió al Capítulo Puerto Rico



*Traductora:*  
**Nicole Mejía  
Borrero**



*Revisora Técnica:*  
**Anabel N. Merejildo**



**CONCRETO**  
LATINOAMÉRICA