

CONCRETO

LATINOAMÉRICA



VOLUMEN V | NÚMERO 2 | FEBRERO 2024

CONCRETO

LATINOAMÉRICA

Volumen V - Número 2
Febrero de 2024

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

CONTENIDO

- I** | **In Memoriam:**
Ramón L. Carrasquillo, PhD, PE
Capítulo: Puerto Rico
- 1** | **La certificación...
No es un entrenamiento**
Traducción y revisión técnica a cargo del
Capítulo: Costa Rica (Estudiantil)
- 2** | **Refuerzo de GFRP para instalaciones de
protección contra flujo de lodo**
Traducción y revisión técnica a cargo del
Capítulo: Noroeste
- 3** | **"Seguridad razonable" de las estructuras
existentes, Parte 4: Una nueva esperanza**
Traducción y revisión técnica a cargo del
Capítulo: Perú
- 4** | **Dificultades con el Diseño Tilt-Up**
Traducción y revisión técnica a cargo del
Capítulo: Ecuador Centro y Sur
- 5** | **Preguntas y Respuestas.
Barras de PRFV en elementos a compresión**
Traducción y revisión técnica a cargo del
Capítulo: Puerto Rico

COMITÉ EDITORIAL:

Presidente del Comité Editorial:

Dr. Jorge Maurilio Rivera Torres
Presidente de la Sección Noreste de México del ACI.(2022-2024)

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**

**Cualquier asunto relacionado con la publicación
contactarse a :**

Correo: concretolatam@gmail.com

Tel: +52 81 2146 4907

Representantes de los Capítulos ACI de Latinoamérica:

Argentina
Colombia

Costa Rica
Ecuador Centro y Sur
Guatemala

México Noreste
Mexico Noroeste
México Centro y Sur
México Sureste
República Dominicana
Perú
Puerto Rico

Dr. Raúl Bertero
Dra. Nancy Torres Castellanos
Dr. Fabián Augusto Lamus Báez
Ing. Minor Murillo Chacón
Ing. MSc. Santiago Vélez Guayasamín
Ing. Luis Alvarez Valencia
Ing. Xiomara Sapón Roldán
Dr. Jorge Maurilio Rivera Torres
Ing. Oscar Ramírez Arvizu
Ing. José Alfredo Rodríguez Campos
Mtro. Joseph Eli Mandujano Zavala
Ing. Piero Roberto Caputo Rodríguez
Ing. Julio Antonio Higashi Luy
Ing. Anabel N. Merejildo



Colocación de concreto en columnas y la losa de un puente en Canadá. El uso de barras de fibra de vidrio (GFRB) como refuerzo en elementos sujetos a carga axial o flexo-compresión, se ha popularizado durante la última década. Esto a pesar de las diferencias existentes entre distintas regulaciones en Norteamérica" (Para más información vea el artículo 5 de este número en la página 38.

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

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

Dr. Lucio Guillermo López Yépez
Lic. Iliana M. Garza Gutiérrez

¡Únete Hoy!



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



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 Febrero 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.

Ramón L. Carrasquillo, PhD, PE

El Dr. Ramón Carrasquillo falleció el 1° de febrero de 2024. Nuestras más profundas y sinceras condolencias a su amada esposa Libby y a su familia.

por José "Pepe" Izquierdo-Encarnación

Ramón, conocido por sus amigos como "Mongüi", fue un incansable educador, investigador, productor y consultor del concreto durante 45 años. Su experiencia en hormigón era conocida y apreciada en todo el mundo. Era más grande que la vida, siempre con una gran sonrisa, un ingenio impecable y generosamente dispuesto a ayudar a todos, en todas partes, sin esperar nada a cambio. Ramón publicó más de 100 publicaciones e informes académicos y realizó más de 400 presentaciones técnicas.

En el American Concrete Institute (ACI) recibió muchos honores que incluyen Miembro Honorario y Fellow, miembro de la Junta Directiva, Premio a la Educación, Premio Robert E. Philleo y la Medalla Henry C. Turner. Trabajó en varios comités de ACI: ACI 201- Durabilidad del Hormigón, ACI 211- Diseño de Mezclas de Hormigón, ACI 232- Cenizas Volantes y Puzolanas Naturales en el Hormigón, ACI 301- Especificaciones para el Hormigón, Comité Asesor Internacional de ACI y Comité ASTM C09- Hormigón y Agregados de Hormigón.

Además, Ramón fue distinguido miembro de la Academia de Ingeniería de Puerto Rico y de la Academia Panamericana de Ingeniería.

Un excelente educador e investigador en la Universidad de Texas en Austin durante 22 años. Fue un excelente educador e investigador líder en materiales de construcción durante más de 30 años. Sus numerosos proyectos de investigación abarcaron temas que van desde la tecnología de materiales básicos hasta la producción, el diseño, el rendimiento y la implementación en el campo de los resultados de la investigación. Los principales temas de investigación incluyen materiales cementantes, reciclaje, durabilidad del hormigón, hormigón de alta resistencia, producción de hormigón, diseño estructural, corrosión, control de calidad, construcción de hormigón y hormigón de alto rendimiento. Y, sobre todo, las grandes habilidades comunicativas de Ramón y su capacidad para centrarse en cuestiones clave y explicar relaciones complejas de forma simplificada y comprensible le hicieron eficaz como perito y en la resolución de conflictos.

IN MEMORIAM



Dr. Ramón Carrasquillo.



Dr. Ramón Carrasquillo con su esposa Libby Carrasquillo durante convención del ACI.



Dr. Ramón Carrasquillo en la Convención del 2022 de la Asociación Puertorriqueña del Concreto.



Durante convención del ACI, de derecha a izquierda, Dr. Ricardo López, Dr. Roberto Stark, Dr. Guillermo Santana, Ing. José "Pepe" Izquierdo-Encarnación y el Dr. Ramón Carrasquillo.



Parte de la directiva del ACI Capítulo de Puerto Rico, de derecha a izquierda, José M. Mejía-Borrero, Ing. Rubén Segarra, Anabel N. Merejildo, Dr. Ramón Carrasquillo y Ing. José “Pepe” Izquierdo-Encarnación, durante seminario de la Beca Dr. Ramón Carrasquillo.



Dr. Ramón Carrasquillo recibiendo el honor de Miembro Honorario del ACI durante la convención del ACI de “Primavera” 2023 por el Dr. Charles Nmai.



Dr. Ramón Carrasquillo y Ing. José “Pepe” Izquierdo-Encarnación durante inspección al Puente Atirantado de Naranjito, Puerto Rico.



Durante convención del 2012 del ACI, de derecha a izquierda, Dr. Ramón Carrasquillo, Ing. José “Pepe” Izquierdo-Encarnación y Ing. Carlos A. Lázaro.

De 1992 a 1996, Ramón fue Director Asociado del Centro Internacional de Investigación de Agregados. Además, fue el fundador y presidente de Rainbow Materials, Inc., una empresa de concreto premezclado que operó en el mercado del centro de Texas desde 1994 hasta 2004.

Más allá de sus extensos logros técnicos y contribuciones a la industria del concreto a través de la investigación y la consultoría, Ramón impactó personalmente a cientos de personas a través de una tutoría jovial y generosa que abarca varios continentes. Su compromiso con los Capítulos Latinoamericanos de ACI fue incomparable, asistiéndolos, participando como conferencista y patrocinándolos durante varias décadas. Hace más de 35 años, Ramón, en conjunto con la Asociación del Concreto de Puerto Rico, estableció un fondo de becas para ayudar a los estudiantes económicamente desfavorecidos a obtener títulos de ingeniería.

Innumerables ingenieros, científicos de materiales, académicos y otros en el campo pueden dar fe del corazón generoso de Ramón y su excepcional capacidad para transmitir conocimiento, sabiduría y orientación en su enseñanza.

Aunque lo extrañaremos profundamente, Ramón siempre será recordado y su legado perdurará.

La certificación... No es un entrenamiento

Estar preparado para una sesión de certificación es importante para el éxito

por Michael Morrison

El personal certificado está alrededor de nosotros en todos los aspectos de la vida. Contadores, mecánicos, técnicos en rayos x, profesores, son ejemplos de personal certificado. En la industria de construcción existen diferentes profesiones para certificarse, tales como soldadores, conductores de maquinaria pesada, inspectores, artesanos, gerente de proyectos, gerente de seguridad, técnicos de laboratorio y técnicos de campo. Las certificaciones son muy comunes y permiten mantener un excelente nivel de calidad en la industria de la construcción. Para algunos, es solo un requisito laboral especificado en un código o normativa; para otros, es un requisito de la empresa para poder realizar la acreditación; finalmente, para ciertas empresas es una herramienta para decir: "Miren, tenemos el personal más calificado para su proyecto".

Las certificaciones verifican que las personas tienen un nivel de competencia adecuado para realizar labores específicas. Además, permite que las personas digan: "Oigan, soy una persona competente en esta área de trabajo, lo pueden corroborar con esta credencial, yo me la gané". Esa credencial verifica que se estudiaron todos los aspectos de un área de práctica determinada, fueron asesorados, se ejecutaron los procedimientos y métodos, se adquirió confianza en la capacidad y el conocimiento, y luego se demostró esa competencia realizando un examen.

Ya sea que envíe a su empleado o se registre en un programa usted mismo, la expectativa de la agencia certificadora es que los candidatos han invertido el tiempo para prepararse y están listos para demostrar sus habilidades y sus conocimientos.

Es interesante que los examinadores de la certificación ACI a menudo observan empleados enviados por las empresas con poca o nula

preparación o experiencia; sin embargo, esperan que sus empleados sean certificados simplemente asistiendo a una sesión. Este no es el caso con las certificaciones ACI debido a que el conocimiento y la habilidad son evaluados con pruebas individuales. Los candidatos deben ganarse la certificación, por lo que una buena preparación es esencial para tener éxito en la certificación.

Algunos ejemplos de preparación inadecuada son:

- Un individuo es nuevo en la industria y nunca ha estado en contacto con concreto fresco en campo o en el laboratorio, aún así, asiste a la sesión de certificación "Técnico en Pruebas al Concreto en la Obra".
- Un inspector de concreto no tiene conocimiento ni experiencia con anclaje al concreto; aun así, asiste a la sesión de certificación de inspector de instalación de anclajes de concreto posteriores a la instalación.
- Un técnico de laboratorio de concreto no tiene experiencia ni conocimiento en el ensayo de mampostería, aun así, asiste a la sesión de técnico de laboratorio en ensayos de mampostería.

"Las certificaciones verifican que las personas tienen un nivel de competencia adecuado para realizar labores específicas"

Frustraciones y fracaso

Registrarse en una sesión de certificación ACI sin ningún conocimiento o experiencia puede ser arriesgado y costoso. Los candidatos están desperdiciando tiempo y dinero si no aprueban.



Fig. 1: Certificación de técnico en ensayo de concreto autocompactable durante un evento de nieve.

Fig. 2: Examinador de certificaciones supervisando una prueba de ensayo de flujo de la EN.

Enviando empleados sin experiencia para “ser certificados”, sin invertir tiempo preparándolos y entrenándolos los condiciona a fracasar en las pruebas; no es justo para ellos ni para el grupo patrocinador del ACI que organiza la sesión.

Los candidatos sin preparación usualmente están incómodos, nerviosos y tienden a no aclarar sus dudas en la sesión de revisión. Además, deben sentir presión por su trabajo para pasar el examen. “Realmente necesitamos que obtengas esta certificación” añade más presión a la situación, lo que puede ser muy estresante inclusive para una persona completamente preparada.

Algunos grupos patrocinadores del ACI ofrecen sesiones de revisión antes de una sesión de examen, mientras que otras solo ofrecen exámenes. Estas sesiones de revisión usualmente consisten en medio día de sesión o reunirse un par de tardes durante 2 o 3 horas. Es importante recalcar que es una sesión de revisión, no de entrenamiento.

Algunos programas de certificación ACI contienen seis, ocho, y hasta diez métodos ASTM, AASHTO o EN, un programa para inspector puede tener entre 10 a 20 documentos de referencia en su paquete de estudio. Las sesiones de revisión proporcionan una pequeña idea de especificaciones relacionadas a cada método de prueba, práctica o código para el programa. Estas sesiones son presentadas en un formato que permite que los asistentes se familiaricen con el contenido y que repasen las especificaciones presentadas. Además, las sesiones brindan la oportunidad a los candidatos de realizar preguntas sobre aspectos que no han comprendido totalmente cuando se prepararon por sí solos. En muchos casos, las sesiones de práctica son ofrecidas para los programas con requisitos de desempeño. Reiterando, estas sesiones dan otra oportunidad para responder preguntas que se generen en la sesión.

¿Cómo prepararse?

Estar seguro de estar preparado al asistir a una sesión de certificación es muy importante para el éxito. Para prepararse para los programas de certificación de ACI visite www.concrete.org/certification y seleccione el programa de interés (actualmente cuenta con 32). Cada programa cuenta con una página donde se aclaran los detalles de los contenidos del programa, y en muchos casos, hay un video corto de apoyo para cada programa específico, y lo que es más importante, cada programa tiene un -análisis de tareas de trabajo- (JTA, por sus siglas en inglés) muy específico, que yo comparo con un "cuerpo de conocimientos". Basado en los documentos de referencia del programa, cada JTA menciona elementos específicos que el candidato debe conocer, comprender o demostrar.

Los análisis de tareas de trabajo (JTA) son un mapa/guía de ruta diseñados para que los candidatos se preparen para obtener una certificación. Antes de empezar con el camino, se deben comprar o conseguir los documentos de referencia necesarios. Se deben hacer preguntas a compañeros de trabajo y supervisores; y cuando sea posible, se deben practicar los métodos en un laboratorio o en el campo. Si se cuenta con amigos que hayan conseguido la certificación, se recomienda pedirles ayuda y consejos.

El mejor de los casos es buscar a un mentor. Múltiples mentores son necesarios a lo largo de una carrera, simplemente porque se encuentran nuevas y diferentes áreas prácticas con el paso del tiempo, en mi caso muchos mentores me ayudaron a desarrollar mis habilidades de inspección, otros con el manejo de proyectos y la habilidad para hacer reportes. Hablar con mentores generosos y con mucho conocimiento puede ser clave para el éxito del futuro.

ACI puede ayudar

Además de solicitar ayuda de empleados, otras opciones para aprender y practicar están disponibles mediante la universidad del ACI y el centro de recursos del ACI.

La universidad del ACI cuenta con seis cursos de capacitación en apoyo a los programas de certificaciones del ACI. Seguir el paquete específico de estudio ayudará a los candidatos a desarrollar conocimientos y servirá como repaso de algunos de los conocimientos necesarios. La mayoría de los programas para técnicos de laboratorio y técnicos de campo incluyen videos de entrenamiento. Adicionalmente, la universidad del ACI cuenta con programas educativos certificados en concreto básico, fundamentos de concreto para construcción y materiales de construcción que pueden ayudar a aumentar el conocimiento del concreto. Cabe recalcar que los cursos certificados requieren pasar exámenes cortos para validar el conocimiento retenido. Los cursos certificados son una herramienta educativa; sin embargo, no tienen el mismo peso que las certificaciones, las cuales requieren de evaluaciones rigurosas y exhaustivas del conocimiento y de diversas habilidades. Los cursos que se compran se mantienen en una cuenta del cliente por 90 días en la universidad del ACI y pueden ser una herramienta útil en el proceso de preparación.

Los centros de recursos del ACI ofrecen regularmente entrenamiento programado solamente para todos los programas de Técnico de Laboratorio y de Campo, y de programas de Especialistas (actualmente 12). Durante un curso de capacitación del Centro de Recursos de ACI, los asistentes pasan un día con el equipo de las certificaciones del ACI, aprenden los fundamentos de los métodos de prueba para comprender por qué se hace y cómo interpretar los resultados del ensayo. Los participantes aprenderán técnicas, las mejores prácticas y consejos



Fig. 3: Demostración de la ASTM C900, método de prueba estándar de la resistencia a la extracción por deslizamiento de concreto endurecido.



Fig. 4: Certificación de ensayos físicos de cemento.

relacionados con el área práctica de interés. Un curso del Centro de Recursos del ACI prepara a los individuos para que regresen a su empresa y practiquen más, lean sobre todos los métodos de prueba requeridos, después se registren para una sesión con el grupo patrocinador del ACI más cercano para realizar el examen y tratar de conseguir la certificación. El Centro de Recursos del ACI también ofrece programas de capacitación personalizados para nuevos empleados o para nuevas áreas de práctica que la empresa decida ofrecer.

Las certificaciones del ACI han ayudado a la industria del concreto y la mampostería desde hace más de 40 años, empezando con el programa técnico de ensayos de concreto en la obra en 1983. Las certificaciones del ACI se han ramificado en cuatro áreas de práctica: programas de ensayo, programas de inspección, especialistas en construcción, y diseño, ofreciendo actualmente 32 diferentes programas de certificación. Visite www.concrete.org para mayor información.



Michael Morrison, FACI, FASTM es un gerente del programa de desarrollo de las certificaciones. Él lidera el desarrollo de nuevos programas de certificaciones con potencial, y ayuda a los subcomités con programas actuales aprobados por estos mismos. Él también ejerce como representante de Certificación de ACI para organizaciones de desarrollo de estándares y es miembro activo de ASTM International.

*Título original en inglés: Certification...
It's not Training*

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



Traductor:
José Fabio Oviedo Ordóñez



Revisor Técnico:
**Ing. Guillermo González
Beltrán, Ph.D.**

Refuerzo de GFRP para instalaciones de protección contra flujo de lodo

por Valery Hurynovich y Antonio Nanni



Fig. 1: Calles de Asjabad, Turkmenistán, después de una inundación de lodo (foto tomada de: <https://centralasia.media/news:1448895/>)



Fig. 2: Ubicación de las instalaciones de protección contra flujo de lodo.

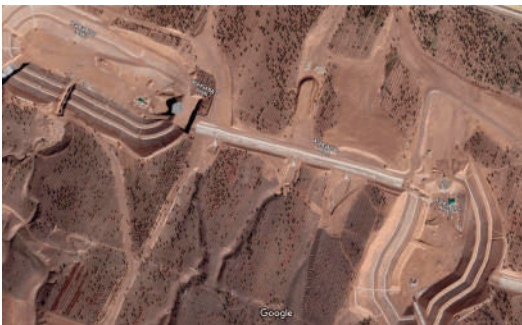


Fig. 3: Instalaciones de almacenamiento de flujo de lodo.

Un complejo único de instalaciones de protección contra el flujo de lodo se construyó recientemente para proteger la ciudad de Asjabad, Turkmenistán, usando concreto con refuerzo de polímero de fibra de vidrio (GFRP). Las especificaciones del proyecto y disposiciones de diseño se basaron en los actuales estándares rusos para el refuerzo con polímero de fibra de vidrio, y el proyecto fue realizado en tiempo y apegado al presupuesto.

Asjabad es la capital y ciudad más grande de Turkmenistán. La ciudad está situada al pie de la cordillera de Kopet Dag, en Asia Central, con el punto más alto ubicado a una altura de 2,940 m (9,646 ft) sobre el nivel del mar. Las laderas de la cordillera frente a Asjabad son empinadas y están marcadas por barrancos. De marzo a octubre, eventos periódicos de precipitación convectiva registraron un total de más de 400 mm (16 in.) de precipitación. Grandes precipitaciones ocurren con una frecuencia muy baja, pero en casos donde la precipitación es muy grande, masivos cuerpos de lodo fluyen por las laderas y las llanuras.

En 1991, el gobierno de Turkmenistán tomó medidas significativas para revitalizar Asjabad, convirtiéndose en una ciudad moderna con edificios públicos, monumentos y parques. La ciudad es famosa por su arquitectura: construcciones recubiertas de mármol blanco, mezquitas con hermosas cúpulas doradas y grandes monumentos. Para proteger Asjabad y su gente del riesgo de corrientes de flujo de lodo (Figura 1), se tomó la decisión de construir un complejo de instalaciones de protección contra corrientes de lodo. La construcción inició en marzo de 2020 y fue terminada en septiembre del 2022. El complejo de estructuras se localiza en la parte sur de Asjabad, y recibe agua de la cordillera Kopet Dag. (Fig. 2).

El proyecto contemplaba la construcción de estructuras de almacenamiento de lodo (Fig. 3) en los cauces de los principales barrancos, así como un sistema de canales y tuberías que conducen el agua depurada al canal de desvío de corrientes de flujo de lodo existente (llamado Canal de Asjabad).

El objetivo principal de las estructuras es recibir e interceptar el escurrimiento de lodo y el agua de lluvia de las lluvias que caen en la zona. Después de la sedimentación completa de

los depósitos detríticos en las estructuras de almacenamiento, la descarga del agua limpia, que formaba parte del flujo de lodo, comienza cuando las compuertas son abiertas y las estaciones de bombeo son activadas.

Las estructuras de desvío de agua están construidas con concreto reforzado (RC) canales y tuberías que reciben y desvían el agua clarificada de las estructuras de almacenamiento de lodo. Los canales de desviación de agua reciben torrentes de la cordillera Kopet Dag a lo largo de su longitud, reduciendo así la cantidad de agua de lluvia que llega a Asjabad. Estos proyectos masivos de construcción incluyen lo siguiente:

- Nueve estructuras de almacenamiento de lodo;
- Cinco canales de flujo de lodo con una longitud total de 7 km (4.3 millas);
- Canales de desvío de agua con una longitud total de 22 km (13.7 millas);
- Conductos de desvío de agua con una longitud total de 9 km (5.6 millas);
- Restauración de canales de desvío de lodo existentes con una longitud total de 19 km (11.8 millas);
- Siete estaciones de bombeo;
- Dos estructuras de salida de agua; y
- Restauración de tres puentes.

El grupo de estructuras de protección contra flujo de lodo es único, ya que puede recibir flujo de lodo y aguas pluviales con un volumen total de 12.4 millones de metros cúbicos (16.2 millones de yardas cúbicas), al mismo tiempo que puede soportar un terremoto con magnitud de 9.0.



Fig. 4: Barras de refuerzo de fibra de vidrio recubiertas de arena utilizadas en el proyecto.

Para ayudar a garantizar la vida útil sin mantenimiento de los canales de desvío por un total de 100 años, se eligieron barras de refuerzo de fibra de vidrio (GFRP) como refuerzo para el concreto en este proyecto. El compuesto de GFRP seleccionado estaba en forma de barras recubiertas de arena (rectas o curvadas) (Fig. 4), hechas con fibra de vidrio resistente a la corrosión (E-CR), embebidas en resina epóxica. Las barras de refuerzo de fibra de vidrio se están volviendo más populares debido a sus propiedades, que permiten alargar la vida útil de servicio y reducir los costos de construcción (Tabla 1). Las barras de refuerzo de fibra de vidrio no presentan corrosión, tienen alta resistencia a la tracción, y buena resistencia a la fatiga, son livianas, y presentan transparencia electromagnética. Aún y que las barras de refuerzo de fibra de vidrio presentan un módulo elástico bajo y una baja resistencia al corte transversal, estas propiedades no representan factores significativos en losas uniformemente cargadas construidas sobre el terreno. En adición a esto, el bajo peso de las barras de refuerzo de fibra de vidrio minimiza costos de transporte y colocación.

Tabla 1:
Propiedades físicas y mecánicas de las barras de fibra de vidrio y barras de acero usadas en el diseño

Propiedad	GFRP	Barras de Acero A500 (GOST R 52544-2006')
Resistencia característica a la tensión, MPa (ksi)	1100 (160)	500 (72.5)
Resistencia de diseño a la tensión, MPa (ksi)	641 (93)	435 (63)
Resistencia de diseño a la tensión bajo cargas sostenidas y a largo plazo, MPa (ksi)	330 (47.9)	435 (63)
Módulo de tensión, no menor que, MPa (ksi)	50,000 (7250)	200,000 (29,000)
Elongación de falla, ϵ , %	2.2	14.0
Coefficiente de expansión térmica, $1/^\circ\text{C}$	$(6.0 \text{ to } 10.0) \times 10^{-6}$	$(11.5 \text{ to } 14.5) \times 10^{-6}$
Conductividad	No conductivo	Conductivo
Propiedades magnéticas	No magnético	Magnético
Resistencia corrosiva y química	Alta	Baja

Tabla 2:
Especificaciones del material (GFRP)

Propiedad	GOST 31938-2012 ³	ASTM D7957/D7957M-17 ⁴
	GFRP/BFRP	GFRP
Contenido de fibra en masa, no menor que, %	75	70
Resistencia nominal última a la tracción, MPa (ksi)	800 (116)	533 a 843 (77.3 a 122.3) dependiendo del diámetro de la barra
Módulo de elasticidad nominal, no menor que, MPa (ksi)	50,000 (7250)	44,800 (6500)
Resistencia al corte transversal garantizada, no menor que, MPa (ksi)	150 (21.7)	131 (19)
Resistencia nominal última a compresión, no menor que, MPa (ksi)	300 (43.5)	—
Resistencia de unión garantizada, no menor que, MPa (ksi)	12 (1.74)	7.6 (1.1)
Pérdida de resistencia a la tracción después de la exposición a condiciones alcalinas, no mayor que, %	25 (30 días a 60°C [140°F])	20 (90 días a 60°C [140°F])
Resistencia de unión garantizada después de la exposición a condiciones alcalinas, no menor que, MPa (ksi)	10 (1.45)	—
Temperatura media de transición, no menor que, °C (°F)	—	100 (212)
Grado medio de curación, %	—	95
Límite de temperatura de operación, no mayor que, °C (°F)	60 (140)	—
Absorción de humedad en 24 horas a 50°C (122 °F), no mayor que, %	—	0.25
Absorción media de la humedad hasta la saturación, no mayor que, %	—	1 (para saturación a 50°C [122°F])

Especificaciones de materiales y diseño

La normativa utilizada para el refuerzo de canales con barras de fibra de vidrio en el desarrollo del proyecto fue la siguiente:

- SP 295.1325800.2017, “Concrete Structures Reinforced with Fibre – Reinforced Polymer Bars. Design Rules”²; y
- GOST 31938-2012, “Fibre Reinforced Polymer Bar for Concrete Reinforcement. General Specifications”³ (Tabla 2).

Los principales criterios de cálculo incluyeron:

- Ancho máximo permitido de grietas de 0.7 mm (0.03 pulg.);
- Distancia entre grietas de 0.5 a 1 m (1.6 a 3.9 pies);
- El esfuerzo en barras sometidas a cargas a largo plazo no puede ser mayor a 330 MPa (47.8 ksi);
- El esfuerzo en barras sometidas a cargas a corto plazo no puede exceder 641 MPa (93 ksi); y
- Concreto (B25) con resistencia a la compresión de 14.5 MPa (2100 psi).



Fig. 5: Refuerzo de GFRP en losas de canal.



Fig. 6: Losas de canal después de la colocación del concreto.

Tabla 3:
Número total y peso de barras de fibra de vidrio usadas en el proyecto

Nombre	Longitud, m (ft)	Peso, tonne (ton)
Barras rectas		
GFRP 10	151,026 (495,492)	25.97 (28.73)
GFRP 12	7,834,137 (25,702,549)	1997 (2201)
GFRP 16	6955 (22,818)	3.23 (3.56)
Barras curvas		
GFRP 12	32,690 (107,250)	8.92 (9.83)
Total	8,024,808 (26,328,111)	2035 (2243)

La resistencia de diseño de las barras de fibra de vidrio fue calculada considerando un factor de resistencia del material de 1.2 y un factor de operación de 0.7 (estructuras operadas a la intemperie y en contacto con el suelo).

- Los parámetros determinados para los canales fueron los siguientes (Fig. 5):
- Espesor de losa de 400 mm;
- Diámetro de barras de 12 milímetros (0.47 pulg.);
- Espaciamiento entre barras en lecho superior de 250/250 mm (10/10 pulg.);
- Espaciamiento entre barras en lecho inferior de 250/250 mm; y
- Longitud de traslape de barras de 600 mm (24 pulg.).

Con base en los cálculos para la exposición a la temperatura, las dimensiones para los paneles de canal se definieron en 30 x 30 m (98.4 x 98.4 pies) (Fig. 6).

Fueron usadas en el proyecto las barras de refuerzo de fibra de vidrio con diámetros de 10, 12 y 16 mm; adicionalmente, barras de 12 mm dobladas en forma de “L” fueron empleadas para empalmar.

Las barras rectas se suministraron en longitudes máximas de 13 metros (42.6 pies). Las cantidades totales se muestran en la Tabla 3.

Economía de la aplicación de refuerzo con barras de fibra de vidrio

El diseño inicial del proyecto requería barras de acero A500 de 12 milímetros de diámetro instaladas con un espaciamiento de 250/250 mm en el lecho superior y en el lecho inferior de las losas. La longitud requerida de las barras se estimó en 7.9 km (4.8 millas), incluyendo las longitudes de empalme por traslape. Cuando se construyó esta obra, el costo de las barras de acero de 12 mm de diámetro era de 0.27 USD/pie, mientras que el costo de las barras de fibra de vidrio de 12 mm de diámetro era de 0.23 USD/pie.

Los cálculos de proyecto mostraron que las barras de acero podían ser reemplazadas por barras de fibra de vidrio sin necesidad de cambiar el diámetro y espaciamiento entre barras, generando un ahorro en costos del 16% (Tabla 4).

El costo de entrega de las barras de fibra de vidrio al sitio de la obra representó una parte significativa del costo del proyecto. El peso total de las barras de acero habría sido de 7,812 toneladas (7,087 tonnes). En contraste, el peso total de las barras de fibra de vidrio requeridas para el proyecto fue de 2,243 toneladas (2,035 tonnes).

Tabla 4:
Comparación directa de los costos del material para barras de acero y barras de fibra de vidrio

Material	Diámetro de barra, mm						Costo total, USD	
	10		12		16		A500	GFRP
	A500	GFRP	A500	GFRP	A500	GFRP		
Longitud, pies	495,492	495,492	25,809,801	25,809,801	22,818	22,818		
Peso por unidad de longitud, lb/pies	0.415	0.116	0.597	0.171	0.812	0.312		
Peso total, lb	205,431	57,269	15,400,708	4,422,767	18,524	7119		
Costo por unidad de longitud, USD/pie	0.19	0.15	0.27	0.23	0.37	0.36		
Costo, USD	95,134	72,837	7,089,694	5,936,254	8522	8215	7,193,350	6,017,306
Diferencia, USD							1,176,044	
Ahorro, %							16	

Nota: 1 mm = 0.04 pulg.; 1 pie = 0.3 m; 1 lb/pie = 1.5 kg/m; 1 lb = 0.45 kg

Tabla 5:**Comparación de los costos totales del Proyecto**

Tipo de refuerzo	A500	GFRP
Costo de las barras, USD	7,193,350	6,017,306
Número de remolques	—	101
Número de vagones de ferrocarril	110	—
Costo de envío por remolque, USD	—	4240
Costo de envío por vagón de ferrocarril, USD	8140	—
Costos de transporte, USD	895,400	428,240
Costos incluyendo transporte, USD	8,088,750	6,445,546
Diferencia, USD	1,643,205	
Ahorro, %	20	

La eficiencia económica total por reemplazar las barras de acero por barras de fibra de vidrio, incluyendo el costo de envío, fue de 20% (Tabla 5.)

Si bien no se llevó a cabo una evaluación precisa de los costos de descarga, operación de grúa, y habilitado del refuerzo, se observó que el uso de barras de fibra de vidrio mejoró los tiempos de ejecución y redujo los costos laborales. La construcción de instalaciones de protección contra flujos de lodo ha sido completada satisfactoriamente, y el dueño ha decidido aplicar el refuerzo con barras de fibra de vidrio en futuros proyectos.

Referencias

1. GOST R 52144-2006, "Weldable Deformed Reinforcing Rolled Products of A500C and B500C Classes for Reinforcement of Concrete Constructions. Specifications" Agencia Federal de Regulación Técnica y Metrología, Moscú, Rusia, 2006, 23 págs.
2. SP 295.1325800.2017, "Concrete Structures Reinforced with Fibre - Reinforced Polymer Bars. Design Rules," Ministerio de construcción, Vivienda y Servicios Públicos, Moscú, Rusia, 2017, 55 págs.
3. GOST 31938-2012, "Fibre-Reinforced Polymer Bar for Concrete Reinforcement. General Specifications," Agencia Federal de Regulación Técnica y Metrología, Moscú, Rusia, 2012, 40 págs.
4. ASTM D7957/D7957M-17, "Standard Specification for Solid Round Glass Fiber Reinforced Polymer Bars for Concrete Reinforcement," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, 5 págs.



Valery Hurynovich tiene más de 9 años de experiencia en la industria de elementos compuestos. Se desempeña como director de operaciones de Galen Panamerica LLC, con sede en Estados Unidos, empresa dedicada a ofrecer soluciones de refuerzo compuesto para construcciones industriales y civiles. Recibió su maestría ejecutiva MBA de la TRIUM Global Executive MBA, una alianza entre la Escuela de Negocios Stern de la Universidad de Nueva York, la Escuela de Administración HEC Paris y la Escuela de Economía y Ciencias Políticas de Londres.



Antonio Nanni, FCI, es profesor y director del Departamento de Ingeniería Civil y Arquitectura de la Universidad de Miami, Coral Gables, FL, USA, y presidente del ACI en el período 2023-2024. Es miembro de numerosos comités ACI, incluyendo el comité ACI 440, Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement. Ha recibido varios premios, incluyendo la medalla IIFC del Instituto Internacional del FRP en Construcción, y el premio Henry L. Michel en 2012 para el avance de la industria de la investigación.

Título original en inglés: GFRP Reinforcement for Concrete Facilities to Protect Against Mudflow

La traducción de este artículo correspondió al Capítulo de México Noroeste



Traductor:
Jesús Omar Montaña Montaña



Revisor Técnico:
Ing. Oscar Ramírez Arvizu

"Seguridad razonable" de las estructuras existentes, Parte 4: Una nueva esperanza

por David G. Tepke, Liying Jiang, Keith E. Kesner y Stephen S. Szoke.

En las tres primeras partes de esta serie se examinó la pregunta acerca de qué constituye la "seguridad razonable" de una estructura existente y las limitaciones asociadas a la evaluación de la seguridad. Esta última parte brindará algunas conclusiones sobre la evaluación de la "seguridad razonable" a través de la valoración del estado, debatirá el impacto de los cambios de paradigma en la construcción y explorará tendencias y tecnologías avanzadas que llevarán al sector hacia el futuro, proporcionando "una nueva (o continuada) esperanza". El rápido ritmo de avance hace que sea una época apasionante para el sector.

"Seguridad razonable" o "Posiblemente inseguro" mediante evaluaciones del estado

Debería ser aparente que los conceptos de "seguridad razonable" y "posiblemente inseguro" son condiciones que invocan incertidumbre y subjetividad en la mayoría de las situaciones. Consideremos los casos esquemáticos de la Fig. 1 en combinación con el continuo de condiciones descritas en la Tabla 2 de la Parte 1¹ de esta serie: desde una certeza creciente de "seguridad razonable" (hacia la derecha en las figuras) frente a una certeza decreciente de "seguridad razonable" (o alternativamente una certeza creciente de condiciones "inseguras") (hacia la izquierda en las figuras). Como se muestra en la Fig. 1(a), las estructuras nuevas o las estructuras típicas relativamente libres de defectos conocidos proporcionan un mayor nivel de confianza en la seguridad, representado por la tendencia a "segura". Esto se debe a una mayor confianza en que la estructura se construyó de acuerdo con los códigos contemporáneos y los procedimientos de inspección especiales y no ha estado expuesta a condiciones de servicio a largo plazo que puedan haber aumentado la probabilidad de deterioro, la posibilidad de eventos extremos o las condiciones de sobrecarga.

En el caso de las estructuras más antiguas o con daños aparentes moderados, Fig. 1(b), es menos probable que se pueda concluir que las condiciones son seguras basándose en una inspección visual hasta que se obtenga más información de una evaluación completa. Las estructuras más antiguas con daños críticos generalizados o conocidos, Fig. 1(c), pueden llevar a una confianza relativamente alta en que la estructura es insegura y a una confianza relativamente baja en que se puede concluir que es razonablemente segura basándose en una inspección visual. Esto es un cambio a un "sesgo inseguro". En algunos casos, puede ser posible concluir con certeza razonable que la estructura o los componentes son inseguros basándose en una inspección visual. Este puede ser el caso cuando hay concreto con riesgo significativo de desprendimiento en zonas elevadas accesibles al público, hay un derrumbe parcial, los elementos estructurales están excesivamente dañados, u otras condiciones similares están presentes. Sin embargo, sigue existiendo una pequeña probabilidad de "seguridad razonable" debido a posibles redundancias o superaciones de la resistencia esperada que la inspección visual puede no captar. La Fig. 1(d) muestra esquemáticamente la diferencia entre tener pruebas suficientes para concluir que una estructura o un componente es "seguro" y no tener pruebas que sugieran que la estructura o el componente es "inseguro" basándose en una inspección visual de un edificio antiguo típico con daños o deterioro moderados.

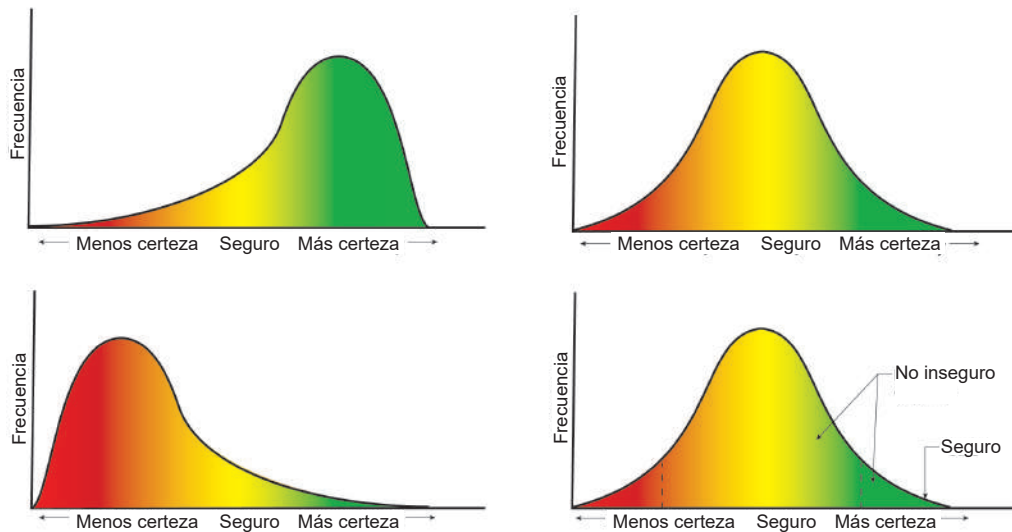


Fig. 1: Esquemas conceptuales que muestran la certeza de la seguridad basada en inspecciones visuales: (a) estructuras típicas sin daños aparentes o razones para creer que hay deficiencias; (b) estructuras antiguas con daños moderados; (c) estructuras con daños críticos generalizados o aparentes; (d) diferencia en la certeza requerida para concluir que una estructura o componente es "seguro" comparada con la requerida para concluir que no hay pruebas visuales que sugieran que una estructura es "insegura".

La responsabilidad de concluir la certeza relativa de la seguridad es mayor que la de concluir que no hay pruebas de condiciones "inseguras" (como representan las áreas bajo las curvas de la Fig. 1(d)). Con pruebas y evaluaciones adicionales, la certeza relativa de la condición puede afinarse, mejorando así la confianza en que una estructura es "razonablemente segura" o "probablemente insegura". La Fig. 2 muestra esquemáticamente los cambios que se producen al comparar la certeza de las inspecciones visuales y la certeza una vez que se realizan pruebas y evaluaciones más exhaustivas. Obsérvese que el cambio a "probablemente insegura" puede ser muy agudo si se encuentra una condición definitiva que represente una condición peligrosa, mientras que un cambio a un sesgo de "seguridad razonable" mediante pruebas y evaluaciones favorables seguirá teniendo generalmente cierta variabilidad asociada a la incapacidad de evaluar de forma concluyente todas las propiedades y condición de la estructura que puedan contener escenarios ocultos desfavorables.

Impacto del cambio de paradigma en la construcción

Las tendencias y tecnologías de diseño de nuevas estructuras, la investigación y mantenimiento de estructuras existentes y la reparación y extensión de la vida útil de estructuras deterioradas, cambian con el tiempo. Estos cambios conducen a diferentes expectativas de normativas asociadas a las condiciones existentes y al desempeño estructural. Por ejemplo, a menos que exista una deficiencia en la construcción, hoy en día no es habitual que el ataque externo por sulfatos sea motivo de preocupación dentro de una vida útil razonable, siempre que el suelo o el agua circundantes se hayan evaluado adecuadamente para establecer la condición de exposición y que la mezcla de concreto se haya diseñado y producido para hacer frente a la exposición. Sin embargo, a menos que estén atentos al estudio de las tendencias históricas y contemporáneas, los profesionales pueden pasar por alto matices sutiles que son contrarios a sus experiencias. Un profesional puede llegar a la conclusión de que ciertos tipos de estructuras no son propensas a sufrir daños o ciertos tipos de deterioro porque no ha experimentado tales daños o deterioros en su práctica.

Los cambios de paradigma en las prácticas de la industria requieren vigilancia y receptividad para cambiar la forma de pensar o abordar la investigación y reparación de las estructuras existentes. En la Tabla 1 se dan ejemplos de cambios de paradigma en el sector, el posible sesgo de evaluación que puede producirse y cómo cada cambio puede afectar al sector en el futuro.

Los paradigmas de la nueva construcción y las implicaciones asociadas para el servicio posterior de las estructuras existentes cambian, y también deben cambiar los paradigmas de la evaluación de las estructuras existentes para aprovechar las tecnologías y los avances. En lo que queda de la Parte 4 se analizarán algunos de estos cambios de paradigma previstos para la evaluación de las estructuras y la seguridad.

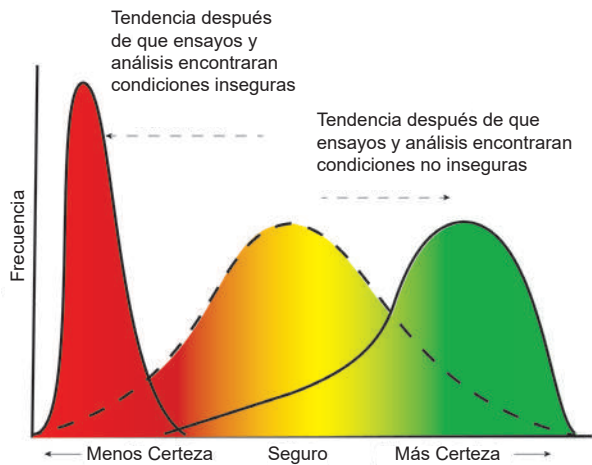


Fig. 2: Cambio en la certeza de la seguridad después de ensayos y análisis.

Tendencias recientes Códigos, normativa e inspecciones

Desde la década de 1960, se han añadido disposiciones a los códigos de construcción para ayudar a garantizar que los edificios se construyan de acuerdo con los documentos de construcción (consulte Inspección especial en la Tabla 1). La necesidad de inspecciones especiales continuas o periódicas se enumera como requisito en el Capítulo 17 del IBC 2021⁴. Para el concreto estructural reforzado colado en sitio, las disposiciones de inspección especial del IBC 2021 incluyen: verificación del diseño de la mezcla; fabricación de muestras de ensayo; determinación del asentamiento, contenido de aire y temperatura del concreto; técnicas y temperaturas de curado; e inspección de la forma, ubicación y dimensiones del encofrado. En el caso de armaduras, debe verificarse su colocación. Si está soldada, se comprobará su soldabilidad y se inspeccionará la soldadura. También deben inspeccionarse los anclajes. Existen requisitos adicionales para el concreto prefabricado y postensado, y para el concreto lanzado.

A la hora de establecer un programa para investigar la integridad estructural de los edificios, debe tenerse en cuenta el alcance de la inspección y de las inspecciones especiales requeridas durante la construcción original y, cuando se disponga de ellos, los informes de inspecciones especiales pueden ayudar en los esfuerzos de evaluación. Los edificios diseñados y construidos de acuerdo con códigos de construcción recientes que incluyen disposiciones como las del capítulo 17

del IBC tienen menos probabilidades de presentar desviaciones con respecto a los documentos de construcción, pero las deficiencias estructurales debidas a daños, deterioro, modificaciones inadecuadas durante las renovaciones y otras causas pueden seguir estando presentes y deben tenerse en cuenta durante la investigación para evaluar la seguridad.

Los cambios de paradigma también incluyen nuevas tecnologías y sistemas de concreto. Estos cambios hacen necesarios nuevos códigos y normas. La Tabla 2 muestra el desarrollo de nuevos códigos y la revisión de los existentes en la última década para garantizar que los profesionales del diseño y los contratistas dispongan de los recursos adecuados y que los propietarios comprendan mejor cómo evaluar y reparar adecuadamente las estructuras. Algunos ejemplos concretos de nuevos códigos son los siguientes:

- El concreto estructural reforzado internamente con polímeros reforzados con fibra de vidrio (GFRP, por sus siglas en inglés) está ganando popularidad, especialmente para elementos en ambientes corrosivos. Recientemente se ha publicado el ACI CODE-440.11-22⁵, al que se hace referencia en el Código Internacional de la Edificación de 2024⁶. Se espera que el nuevo código facilite la construcción con refuerzo de GFRP. El Comité 440S del ACI, Código de reparación y rehabilitación del concreto con polímeros reforzados con fibras, está desarrollando un código para la reparación y rehabilitación mediante sistemas FRP externos;
- La fabricación aditiva con materiales cementantes (concreto impreso en tres dimensiones [3-D]) también está ganando popularidad. ACI ha formado el Grupo de Trabajo de Innovación ITG-12 sobre Requisitos de Código para la Construcción de Muros Construidos Aditivamente para desarrollar requisitos mínimos de diseño y construcción para ayudar en la aceptación y el uso de concreto impreso en 3-D;
- Existe una tendencia a cambiar los ingredientes del concreto para reducir su impacto en el calentamiento global y su huella

de carbono. El Comité 323 del ACI, Código del Concreto Bajo en Carbono, está desarrollando un estándar que puede impactar en los diseños de mezclas para lograr un concreto bajo en carbono;

- y
- Se ha identificado la necesidad de formalizar los requisitos de durabilidad y mantenimiento para complementar los requisitos estructurales exigidos por el código para las estructuras en las que se necesita una vida útil prolongada, la estructura se encuentra en condiciones severas, o ambas condiciones. Se prevé que esta necesidad se aborde en un código de durabilidad que está elaborando el Comité 321 del ACI, Código de Durabilidad del Concreto.

Estos son sólo algunos ejemplos de cómo los códigos y las normas facilitarán nuevos cambios de paradigma, ya que el concreto y la tecnología del concreto siempre están avanzando para satisfacer demandas siempre cambiantes.

Tabla 1:
Ejemplos de cambios de paradigma, implicaciones y sesgos de evaluación asociados

Cambio de paradigma	Implicaciones para las estructuras existentes	Posible sesgo en la evaluación	Posibles implicaciones futuras
Uso de aire incorporado en el concreto	Antes de la década de 1960, las normas y códigos del ACI no exigían el aire incorporado en el concreto nuevo expuesto a condiciones de congelación y descongelación. Los aditivos inclusores de aire y los protocolos de prueba han avanzado con el tiempo. Las estructuras más antiguas pueden carecer de resistencia a los daños por congelación y descongelación.	Limitado: La mayoría de los profesionales entienden los problemas y las implicaciones del aire incorporado y los daños por congelación y descongelación en el concreto a partir de la evidencia histórica.	Limitadas
Inspecciones especiales	Desde la década de 1960, se han ido añadiendo disposiciones a los códigos de edificación para ayudar a garantizar que los edificios se construyan de acuerdo con los documentos de construcción. En 1967, aparecieron algunos requisitos de inspección especial en el Código Uniforme de la Edificación, a los que siguió la primera aparición en el Código Nacional de la Edificación de 1987 ² . Este último se atribuye en gran medida a un informe presentado a la Cámara de Representantes de EE.UU.*	Sustancial: Los requisitos de inspección para las nuevas construcciones son una parte integral de los códigos de construcción actuales. Los requisitos del código sin un medio de aplicación a través de inspecciones harían poco para satisfacer el propósito del código de construcción, generalmente entendido como: "...establecer los requisitos mínimos para proporcionar un nivel razonable de seguridad, salud y bienestar general a través de la resistencia estructural..." ³	Limitadas
Construcción costera	Muchos condominios costeros en destinos vacacionales se construyeron en las décadas de 1970, 1980 y 1990. Estas estructuras tienen ahora 30, 40 o 50 años y, a menos que reciban un buen mantenimiento, pueden estar al final o cerca del final de la vida útil prevista si no se toman medidas de preservación exhaustivas.	Aunque es bien sabido que las estructuras costeras son susceptibles a la corrosión y requieren mantenimiento y reparación, la experiencia de los profesionales con las consideraciones sobre el final de vida de servicio puede ser limitada, y algunos profesionales pueden estar menos acostumbrados a considerar la vida última.	Las estructuras costeras requerirán una amplia preservación, o un número cada vez mayor se convertirá en estructuralmente deficiente o insegura hacia el final de las condiciones de servicio.
Uso de acero de integridad estructural	Antes de que las estructuras se rigieran por la norma ACI 318-89, ⁴ no se exigía acero de integridad estructural. Las estructuras construidas hacen más de 30 años pueden carecer de acero instalado intencionadamente para mejorar la resistencia al colapso.	Quienes diseñan estructuras nuevas pueden tener la percepción de que las estructuras más antiguas tienen capacidades inherentes proporcionadas por la integridad del acero porque muchos profesionales del diseño empezaron sus carreras en los años 1980 o después.	Algunos tipos de estructuras antiguas en entornos corrosivos o agresivos pueden volverse cada vez más susceptibles a condiciones críticas y problemas de seguridad.

Protección contra la corrosión de los sistemas de acero postensado	Entre mediados de los años 50 y 60, se utilizaba papel kraft y tendones expuestos; antes de finales de los 90, se exigía una resistencia a la corrosión menos amplia que la actual. Las estructuras construidas hacen más de 30 años pueden carecer de una protección adecuada contra la corrosión según los estándares contemporáneos.	Las estructuras postensadas más antiguas se acercan a los 50 años o más, y las que tienen una protección inferior a la actual se acercan a los 30 años o más. Los profesionales suelen pensar que han funcionado bien y que seguirán haciéndolo. Sin embargo, es posible que las estructuras más antiguas no sean tan duraderas como se podría esperar.	Las estructuras postensadas en ambientes corrosivos con una protección deficiente contra la corrosión pueden volverse cada vez más inseguras desde el punto de vista estructural, a menos que se mantengan en buen estado durante el servicio, se protejan de las condiciones nocivas o se rehabiliten y conserven cuando se identifiquen dichas condiciones.
--------------------------------------------------------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

*Comité de Ciencia y Tecnología, "Structural Failures in Public Facilities (House Report 98-621)", U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 15 de marzo de 1984, 156 pp. El informe expone las conclusiones y recomendaciones de una investigación llevada a cabo a raíz de graves accidentes, como el colapso del Skyline Plaza en Virginia en 1973, el del tejado del Rosemont Horizon Arena en Illinois en 1979 y el de la pasarela del Hotel Hyatt Regency en Missouri en 1981.

Tabla 2:
Una década de desarrollo de recursos

Año	Designación	Título	Estado
2013	228.2R-13	Informe sobre métodos de ensayo no destructivos para la evaluación del concreto en estructuras	Revisión
	440.8-13	Especificación para materiales de polímero reforzado con fibra de carbono y de vidrio (FRP) fabricados por laminación húmeda para refuerzo externo de estructuras de concreto y mampostería	Primera edición
	562-13	Requisitos del Código para la Evaluación, Reparación y Rehabilitación de Edificios de Concreto y Comentarios	Primera edición
2014	222.2R-14	Informe sobre Corrosión en Acero de preesfuerzo	Revisión
	364.10T-14	Rehabilitación de Estructura con Pérdida de Sección de Refuerzo	Primera edición
	546.3R-14	Guía para la selección de materiales para reparación de concreto	Revisión
2015	364.11T-15	Gestión de la expansión de la reacción álcali-agregado en el concreto masivo	Primera edición
	364.12T-15	Reparación de grietas con fugas en paredes de estructuras de contención de líquidos	Primera edición
	364.13T-15	Reparaciones para refuerzo con cubierta poco profunda	Primera edición
	440.1R-15	Guía para el diseño y la construcción de concreto estructural reforzado con barras de polímero reforzado con fibra (FRP)	Primera edición
	440.9R-15	Guía de protocolos de acondicionamiento acelerado para la evaluación de la durabilidad del refuerzo interno y externo de polímero reforzado con fibra (FRP)	Primera edición
2016	562-16	Requisitos del Código para la Evaluación, Reparación y Rehabilitación de Estructuras de Concreto Existentes y Comentario	Revisión
2017	364.14T-17	Determinación de la pérdida de sección de barras de acero de refuerzo dañadas o corroídas	Primera edición
2018	364.15T-18	Importancia de que las etiquetas informativas de materiales de reparación empaquetados, informen sobre si compensan o no el encogimiento o la contracción	Primera edición
	364.16T-18	Propiedades físicas y características que afectan a la sensibilidad al agrietamiento de los materiales cementantes de reparación	Primera edición
	364.17T-18	Cómo medir el pH de una superficie de concreto antes de instalar un revestimiento de suelo	Primera edición
	563-18	Especificaciones para la reparación de concreto en edificios	Primera edición
2019	222R-19	Guía para la protección contra la corrosión del acero de refuerzo en el concreto	Revisión
	228.1R-19	Informe sobre métodos para estimar la resistencia del concreto en sitio	Revisión
	364.1R-19	Guía para la evaluación de estructuras de concreto antes de su rehabilitación	Revisión
	562-19	Requisitos del Código para la Evaluación, Reparación y Rehabilitación de Estructuras de Concreto Existentes y Comentario	Revisión
2020	546.2R-20	Guía para la reparación subacuática del concreto	Revisión
	546.4R-20	Guía para el control de calidad en la obra y la garantía de calidad de los materiales cementantes empaquetados	Primera edición

2021	PRC-364.2-21	Aumento de la capacidad de corte de las estructuras de concreto armado existentes - Nota técnica	Revisión
	PRC-364.4-21	Determinación de la capacidad de carga de una estructura cuando no se dispone de planos estructurales - Nota técnica	Revisión
	PRC-364.5-21	Importancia del módulo de elasticidad en los materiales de reparación de superficies - Nota técnica	Primera edición
	PRC-364.7-21	Evaluación y minimización de las microgrietas en la reparación del concreto - Nota técnica	Primera edición
	PRC-364.9-21	Grietas en una reparación de concreto - Nota técnica	Primera edición
	PRC-440.10-21	Resistencia al fuego de elementos de concreto reforzados con FRP - Nota técnica	Primera edición
	CODE-562-21	Evaluación, reparación y rehabilitación de estructuras de concreto existentes - Código y comentarios	Revisión
2022	PRC-364.3-22	Ficha sobre materiales cementantes de reparación-Guía	Revisión
	PRC-364.6-22	Remoción del concreto en reparaciones con acero de refuerzo corroído - Nota técnica	Revisión
	PRC-364.8-22	Nota técnica sobre hidrodemolición para la retirada de concreto en sistemas postensados no adheridos	Revisión
	CODE-440.11-22	Requisitos del Código de la Edificación para el Concreto Estructural Reforzado con Barras de polímero reforzado con fibra de vidrio (GFRP) - Código y comentarios	Primera edición
	SPEC-440.12-22	Refuerzo de estructuras de concreto con materiales de polímero reforzado con fibra (FRP) adheridos externamente mediante el método de colocación en húmedo - Especificación	Primera edición
	SPEC-440.5-22	Construcción con barras de refuerzo de polímero reforzado con fibra de vidrio-Especificaciones	Revisión
	SPEC-440.6-08(17)(22)	Especificaciones de las barras de polímero reforzado con fibra de carbono para el refuerzo del concreto	Re aprobado
	PRC-440.7-22	Guía de diseño y construcción de sistemas de polímeros reforzados con fibra de vidrio para el refuerzo de estructuras de albañilería.	Revisión
SPEC-440.8-13(22)	Materiales de polímero reforzado con fibra de carbono y de vidrio (FRP) fabricados por laminación húmeda para el refuerzo externo de estructuras de concreto y albañilería - Especificación	Re aprobado	
2023	PRC-228.3-23	Lo que un propietario debe saber sobre los ensayos no destructivos-Nota técnica	Primera edición
	PRC-228.4-23	Guía de inspección visual del concreto	Revisión
	PRC-440.2-23	Diseño y construcción de sistemas de polímero reforzado con fibra (FRP) adheridos externamente para el refuerzo de estructuras de concreto - Guía	Revisión
	PRC-546-23	Guía de reparación del concreto	Revisión

Nota: Puede encontrar información adicional sobre los documentos enumerados en este cuadro en www.concrete.org.

Durabilidad en el diseño

Cuando se diseñan y mantienen adecuadamente para resistir el deterioro provocado por las condiciones de exposición imperantes, las estructuras de concreto son muy duraderas y resistentes. Tradicionalmente, los códigos de construcción estadounidenses no han considerado explícitamente la vida útil como parte del diseño. Las disposiciones de durabilidad incluidas en los requisitos de diseño, junto con las buenas prácticas de construcción, se han utilizado para lograr una vida de diseño razonable y un nivel de resistencia contra el deterioro relacionado con los materiales. Como se explica en Tepke⁷ y en la Parte 2 de esta serie⁸, los conocimientos de la industria cambian con el tiempo, y se incluyen requisitos de durabilidad mejorados para abordar problemas recién descubiertos o abordar mejor los conocidos. Muchos edificios de concreto armado construidos a lo largo del siglo XX que utilizaban códigos más antiguos todavía están en servicio. El mantenimiento, las evaluaciones rutinarias y, cuando se justifique, las evaluaciones más exhaustivas y las reparaciones con medidas de extensión de la vida útil pueden seguir prolongando la vida útil de estos edificios de concreto existentes, incluso cuando los códigos y las normas de la industria en el momento de la construcción no sean tan avanzados como los más contemporáneos.

La versión actual de ACI CODE-318-19(22)⁹ incluye disposiciones estándar sobre durabilidad. Mientras que algunas disposiciones están en consonancia general con el estado de la práctica para abordar problemas particulares de durabilidad, algunas no están tan mejoradas o son menos completas para estructuras en las que se desea una vida útil más larga o las condiciones son severas. Por ejemplo, ACI CODE-318-19(22) tiene disposiciones relativamente completas para el aire incorporado para proporcionar resistencia al daño por congelación y descongelación y el uso de cemento resistente al sulfato para proporcionar resistencia al ataque del sulfato. Sin embargo, las disposiciones para abordar la corrosión de la armadura embebida en el Código están relacionadas con el contenido de cloruros en el concreto, la relación agua-materiales cementantes (w/cm), la resistencia a la compresión y una declaración más generalizada de mayor protección (Sección 20.5.1.4.1):

"En ambientes corrosivos u otras condiciones de exposición severas, el recubrimiento de concreto especificado deberá incrementarse según se considere necesario. Deberán cumplirse los requisitos aplicables para el concreto basados en las categorías de exposición de 19.3, o deberá proporcionarse otro tipo de protección."

En general, estas disposiciones proporcionan una "durabilidad razonable" para la mayoría de las estructuras y requisitos que se pueden cumplir en la mayoría de los proyectos (incluida la dosificación del agua, la medición de la resistencia como sustituto de la protección contra la corrosión y la medición de los niveles de cloruros combinados) y, por tanto, son útiles para muchas situaciones (como demuestra la capacidad de servicio a largo plazo de muchas estructuras). Sin embargo, algunas estructuras en entornos más severos, o aquellas que requieren una vida útil más larga de lo normal, pueden requerir una dirección adicional, disposiciones mejoradas, más flexibilidad para utilizar enfoques alternativos, mayor capacidad para utilizar pruebas de desempeño, consideración específica de la vida útil o un tratamiento más exhaustivo. Se espera que iniciativas tales como una presentación más formal de la predicción de la vida útil por parte del Comité 365 de ACI, Predicción de la Vida Útil, y la formación del Comité 321 de ACI, Código de Durabilidad del Concreto, proporcionen una dirección suplementaria para aumentar la durabilidad o la vida útil, cuando se requieran niveles superiores a los de ACI CODE-318.

La durabilidad es también un concepto que puede aplicarse al uso continuado de estructuras que, de otro modo, podrían haber sido retiradas del servicio debido a su deterioro o a un suceso extremo. El uso de evaluaciones de ingeniería y reparaciones adecuadas permite que los edificios existentes sigan siendo funcionales o incluso que se recuperen después de haber sido sometidos a situaciones extremas. ACI CODE-562-21¹⁰ es un ejemplo de norma industrial que tiene en cuenta la durabilidad y la prolongación de la vida útil de las reparaciones y representa la formalización actual de la información del sector. Se incluyen disposiciones para documentar las condiciones, considerar la vida útil y proporcionar planes de mantenimiento después de las reparaciones para abordar la durabilidad. La durabilidad también está íntimamente ligada a la sostenibilidad, como se analiza en la siguiente sección.

Sostenibilidad

Se ha prestado mucha atención a la reducción del potencial de calentamiento global de las nuevas construcciones. El movimiento hacia el uso de materiales más sostenibles ha dado lugar a alternativas a las mezclas de concreto con un historial probado basado en décadas de desarrollo y uso. Habrá que seguir de cerca la durabilidad y capacidad de servicio a largo plazo de estas innovadoras mezclas de concreto, ya que el uso de materiales alternativos en la nueva construcción puede dar lugar a diferencias en el desempeño esperado y a matices necesarios en la evaluación o reparación de estructuras existentes. Este mayor escrutinio debería proporcionar información valiosa para comprender mejor el rendimiento a largo plazo del concreto producido con materiales alternativos.

Si bien las iniciativas para reducir el carbono incorporado y el impacto en el calentamiento global se han centrado en las nuevas construcciones, también se ha llegado a la conclusión de que es necesario prestar la misma atención al mantenimiento y la prolongación de la vida útil de las estructuras existentes¹¹⁻¹³. La vida útil de los edificios puede prolongarse mediante una evaluación adecuada

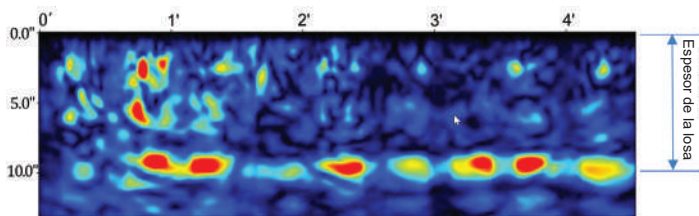


Fig. 3: Tomografía ultrasónica de una losa de concreto.

de los mismos y la ejecución de reparaciones, medidas de prolongación de la vida útil y planes de mantenimiento. A menudo se trata de un enfoque más sostenible que la demolición o la deconstrucción y sustitución. Aunque los costes de las evaluaciones y las reparaciones pueden ser a veces elevados e implicar la reubicación parcial o temporal de los ocupantes, generalmente serán inferiores a los de la reubicación permanente, la demolición o deconstrucción y la sustitución. Por lo general, la evaluación combinada con reparaciones, en caso necesario, es más sostenible desde el punto de vista medioambiental y económico.

El Hotel Winecoff de Atlanta (GA, EE.UU.) es un excelente ejemplo de estructura reconvertida para un uso prolongado mediante la aplicación racional de evaluaciones, reparaciones y renovaciones. El hotel, construido en 1913, fue completamente destruido por un incendio en 1946. Tras una evaluación y unas reparaciones adecuadas, reabrió sus puertas como Hotel Peachtree en 1951 y, en 1967, se convirtió en una residencia para ancianos. El Winecoff permaneció desocupado durante 20 años y, una vez más, con las evaluaciones y reparaciones adecuadas, reabrió como el lujoso Ellis Hotel en 2007.

Tecnologías avanzadas Últimos avances en pruebas y evaluación

A finales del siglo XX y principios del XXI se introdujeron en el sector varias tecnologías y mejoras de las existentes para ayudar a evaluar el estado de los edificios existentes. En muchos de estos avances influyen la mayor velocidad de procesamiento, la mejora de las interfaces de usuario y la presentación gráfica de los datos. La técnica de ondas de corte ultrasónicas de baja frecuencia y contacto en seco de matriz múltiple desarrollada en la década de 1990 (ACI 228.3-2013¹⁴) ha sido comercializada en los últimos 20 años por múltiples fabricantes. Esta tecnología, también conocida como tomografía ultrasónica,

puede producir imágenes bidimensionales (2-D) o 3-D para detectar defectos internos (Fig. 3). También se han desarrollado sistemas de radar de penetración en el suelo (GPR, por sus siglas en inglés) fáciles de usar, con algoritmos de postprocesado que convierten los datos tradicionales en representaciones visuales más intuitivas para su fácil interpretación o la localización del acero de refuerzo (Fig. 4). Ejemplos de algunos avances recientes en dispositivos de ensayo de corrosión que resultan prometedores son los ensayos de velocidad de corrosión sin contacto¹⁵, el uso de un robot volador para ensayos de potencial de corrosión¹⁶ y la tomografía electroquímica para la detección de corrosión localizada¹⁷. Aunque no son exhaustivos, los avances enumerados demuestran un progreso continuo y unas perspectivas de futuro prometedoras.

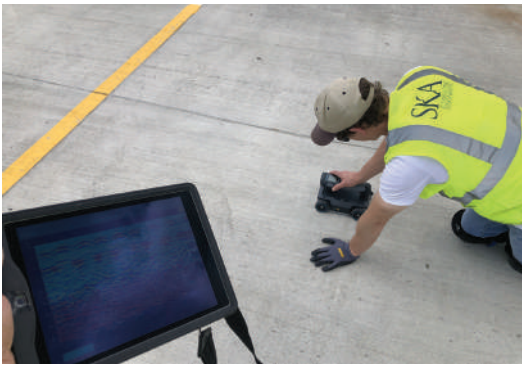
Modelización de la información para la construcción

El modelado de información para la construcción (BIM, por sus siglas en inglés) se ha convertido en la base de la transformación digital en los sectores de la arquitectura, la ingeniería y la construcción. El BIM ayuda a optimizar el diseño, mejorar la precisión y conectar el diseño con la fabricación, mejorando así de forma integral la calidad de la construcción. El software BIM se utiliza ampliamente para crear modelos tridimensionales que documentan exhaustivamente los componentes estructurales, las conexiones y los materiales de todo el edificio o estructura.

En muchos proyectos, el BIM se emplea para los elementos estructurales. El uso de BIM sigue creciendo, especialmente en proyectos de mayor envergadura. Cuando el BIM se utiliza para nuevas construcciones, los datos (modelo 3D y resultados, incluidos los planos de construcción) pueden ser un gran recurso para ayudar en la evaluación del edificio cuando envejece y requiere una evaluación de la seguridad estructural (Fig. 5).

Lidar y fotogrametría

Los sistemas de escaneado Lidar (light detection and ranging en inglés) utilizan el escaneado láser para producir imágenes tridimensionales detalladas de entornos y geometrías complejas en sólo unos minutos por escaneado. Las imágenes



resultantes son conjuntos de millones de puntos de medición tridimensionales combinados con fotografías. Los datos escaneados se procesan y registran en un ordenador para crear una nube de puntos. La nube de puntos puede compartirse para visualizarla, planificarla, medirla, añadir notas o importarla a un software de diseño asistido por ordenador (CAD, por sus siglas en inglés). Cuando se importa en un software CAD, se puede crear un modelo BIM y dibujos a partir de la nube de puntos del estado de construcción.

La línea de visión del objeto de interés es el factor más importante en la captura de datos de escaneado. Deben realizarse varios escaneados para evitar obstáculos. Dependiendo de lo que se esté escaneando, puede ser necesario subir o bajar el trípode para capturar las áreas por debajo y por encima de los objetos.

El escaneado Lidar es muy útil para producir un modelo tridimensional que refleje el estado/geometrías existentes del interior de la estructura del edificio, incluidos los componentes estructurales, equipos, tuberías y cualquier otra obstrucción. Esto es extremadamente útil para edificios/estructuras antiguas y complejos existentes en los que no se dispone de planos estructurales, el sistema estructural no es aparentemente reconocible o existe un número significativo de obstrucciones que impiden el acceso a zonas ocultas específicas (Fig. 6). Además, el escaneado lidar también puede ser eficaz en la planificación de la construcción de reparaciones en términos de correlación de las ubicaciones de reparación necesarias, las ubicaciones de apuntalamiento y encofrado, y la identificación/ubicación de obstrucciones.

Con la cámara de alta resolución integrada, los datos fotogramétricos recopilados también pueden superponerse al modelo tridimensional o al modelo BIM, lo que permite una inspección digital del estado existente de la estructura. Esto también permite recopilar todos los datos de inspección a un ritmo suficiente para que la inspección pueda ser más frecuente a la vez que menos costosa; alternatively, proporciona una comprensión más profunda de la salud general de una estructura, tanto de forma inmediata como a lo largo del tiempo¹⁸.

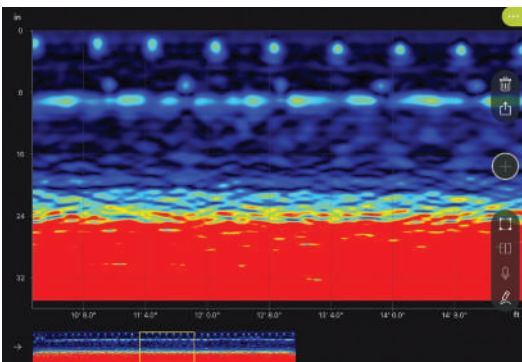
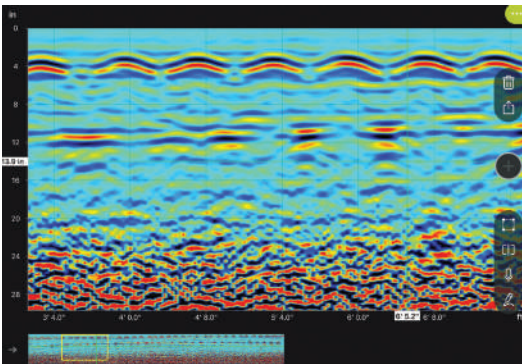


Fig. 4: Representación del acero de refuerzo mediante radar de penetración en el suelo: captura de datos (arriba), representación visual estándar (centro) e imagen procesada que muestra la ubicación del acero de refuerzo (puntos azules) y la profundidad de la losa (línea azul) (abajo).

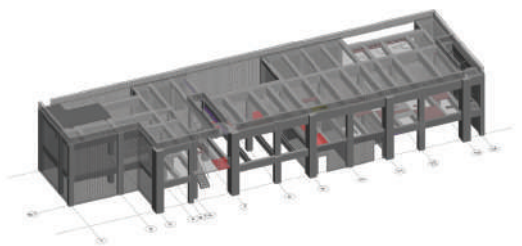


Fig. 5: Modelo tridimensional de un edificio con delaminación del concreto indicada (mostrada en áreas resaltadas en rojo).

Control de la salud estructural

Existe una gran variedad de tecnologías para monitorizar la respuesta estructural, las condiciones ambientales y el inicio o la propagación del deterioro, con el objetivo de ayudar a los propietarios y consultores a determinar cuándo deben tomarse medidas para resolver problemas de seguridad, mantenimiento o deterioro. ACI PRC-444.2-21¹⁹ enumera varias tecnologías disponibles en la actualidad, incluidos los sistemas de control acústico para estructuras postensadas, los monitores de deformación y deflexión por desplazamiento para evaluar el movimiento en componentes estructurales clave y el control de



Fig. 6: Utilización del escaneo lidar para captar el estado de una zona inaccesible: (a) montaje; y (b) una salida.

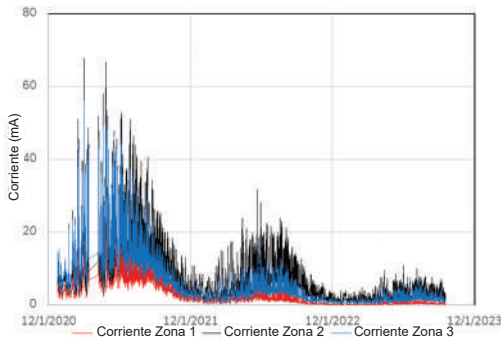


Fig. 7: Corriente registrada por el sistema SHM en el estadio reparado.

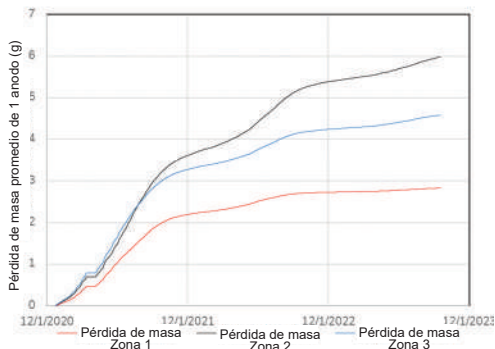


Fig. 8: Pérdida de masa del ánodo calculada a partir de la generación de corriente.

la corrosión para estructuras en entornos susceptibles, todos ellos componentes y condiciones que pueden afectar a la seguridad estructural.

Los resultados de la monitorización de la salud estructural (SHM, por sus siglas en inglés) pueden utilizarse para controlar los cambios en el rendimiento o para predecir la necesidad de futuras reparaciones. Las Figuras 7 y 8 muestran los resultados de la monitorización de ánodos galvánicos instalados en la estructura de un estadio recientemente reparado. La corriente generada por los ánodos en discreto fue registrada por un registrador de datos (Fig. 7). A continuación, la corriente generada se convirtió en pérdida de masa en los ánodos mediante la Ley de Faraday. La pérdida de masa de los ánodos a lo largo del tiempo (Fig. 8) se utilizará para predecir la vida útil restante de los ánodos. Se emplean sensores integrados adicionales para controlar la temperatura y la humedad relativa en las tribunas a fin de examinar la vida útil prevista del revestimiento aplicado.

Las consideraciones clave incluyen la selección del número y la ubicación de los sensores para describir adecuadamente la estructura. Aunque pueden instalarse sensores en zonas que se consideren de interés para evaluar la estructura, confiar en los sensores para obtener información completa conlleva un riesgo inherente, ya que la supervisión de toda la estructura puede resultar difícil o prohibitiva desde el punto de vista de los costes. Por ello, en la actualidad es necesario realizar inspecciones in situ. Cuando las inspecciones in situ indican un posible problema y se realiza una evaluación más tradicional, los sistemas SHM pueden utilizarse para aumentar las evaluaciones existentes o iniciar otras nuevas. En los últimos años se han logrado avances significativos en lo que respecta a la interfaz de usuario, la recopilación de datos, la gestión y el intercambio de datos, por ejemplo, en las nubes, y la reducción al mínimo de las conexiones. Se espera que se produzcan más avances en estos aspectos, pero también en las aplicaciones de la inteligencia artificial y el aprendizaje automático para seleccionar los lugares de prueba e interpretar los datos.

Drones

Los drones son vehículos aéreos no tripulados (UAV, por sus siglas en inglés) que utilizan hélices para volar a una posición deseada en el aire mientras son controlados por un piloto en tierra. Los drones suelen estar equipados con cámaras especializadas de alta resolución para proporcionar fotografías mejoradas de lugares y estructuras que son caros, costosos y peligrosos de inspeccionar mediante acceso humano, como edificios de mediana y gran altura o estructuras industriales altas, como torres de refrigeración y puentes. Los vehículos aéreos no tripulados pueden utilizarse para escanear



Fig. 9: Los daños exteriores pueden resaltarse en un modelo tridimensional creado mediante fotogrametría UAV.

exhaustivamente superficies expuestas, y los datos resultantes pueden procesarse para crear imágenes precisas de alta resolución y modelos digitales tridimensionales.

Las imágenes detalladas pueden utilizarse para identificar y medir defectos visuales, registrar los resultados para su uso y comparación en el futuro, determinar el estado general de la estructura y servir de base para seleccionar zonas para una investigación o evaluación detallada sobre el terreno. Cabe señalar que se requiere un inspector experimentado para realizar las inspecciones digitales, ya que las tareas incluyen la revisión del modelo 3D y de las imágenes para identificar y categorizar los defectos. Aunque los resultados de una inspección como los mostrados en la Fig. 9 no pueden proporcionar datos exhaustivos adecuados para la confirmación inmediata de la seguridad razonable de una estructura, sí pueden hacerlo:

- Permiten la recogida holística de los defectos de forma inmediata y a lo largo del tiempo a un coste relativamente bajo (en comparación con el acceso humano);
- Proporcionar información exhaustiva sobre la salud general de una estructura; y
- Permitir una evaluación posterior sobre si es necesaria una evaluación en profundidad del estado para determinar la seguridad razonable de la estructura.

Acceso industrial por cuerda

El acceso industrial mediante cuerdas (IRA, por sus siglas en inglés) se refiere a las técnicas mediante las cuales se accede a las paredes exteriores de edificios u otras estructuras por medio de cuerdas. El objetivo principal de los trabajos verticales en cuerda es permitir el acceso a lugares de difícil acceso de edificios o estructuras altas sin andamios, plataformas giratorias o drones cuyo

uso pueda estar restringido por la normativa de la Administración Federal de Aviación (FAA, por sus siglas en inglés).

Los trabajos verticales en cuerda empezaron a utilizarse para trabajos industriales en la década de 1980. Desde entonces, asociaciones comerciales como la Industrial Rope Access Trade Association (IRATA) y la Society of Professional Rope Access Technicians (SPRAT) lo han codificado y convertido en un método probado y fiable para acceder a lugares de difícil acceso. En la actualidad, los trabajos verticales en cuerda suelen ser un medio de inspección práctica en edificios de gran altura o estructuras altas en los que los andamios o las plataformas giratorias no resultan prácticos o resultan prohibitivos desde el punto de vista de los costes (Fig. 10). Además de la inspección visual, se pueden realizar ensayos no destructivos adicionales, como la inspección de impacto acústico, la inspección GPR o la inspección de corrosión, si se consideran parte de la evaluación para determinar la seguridad estructural, mediante el acceso con cuerdas.

Aprendizaje automático

El aprendizaje automático (ML, por sus siglas en inglés) es el estudio de algoritmos informáticos que pueden aprender y desarrollarse por sí solos con la experiencia y los datos históricos. El ML se utiliza en una amplia gama de aplicaciones, y recientemente se ha producido un aumento exponencial de su uso en la tecnología del concreto sobre la base de una serie de publicaciones pertinentes²⁰. El primer artículo identificado en relación con el concreto y el ML se publicó en 1992²¹.

El ML se ha utilizado en diferentes campos de la tecnología del concreto, y los resultados mostraron que las técnicas de ML pueden predecir el resultado basándose en datos históricos y se consideran aceptables para evaluar, modelar y



Fig. 10: Acceso industrial por cuerda desde lo alto de una estructura elevada.

predecir las propiedades del concreto desde su estado fresco hasta su endurecimiento, y desde su estado endurecido hasta su vida útil.

Desde el punto de vista de la seguridad de la estructura, tanto la durabilidad como la vida útil son parámetros necesarios que pueden preverse utilizando tecnologías de ML. Por ejemplo, los investigadores utilizaron datos registrados sobre la carbonatación del concreto con agregados reciclados²⁰. El modelo desarrollado por ML captó los parámetros que influían en la profundidad de la carbonatación y optó por ejecutar un proceso específico que demostró un rendimiento excepcional en la predicción de la profundidad de la carbonatación, lo que constituye una gran herramienta para predecir la durabilidad del concreto que aborda los problemas de corrosión relacionados con la carbonatación.

Se está desarrollando el ML para la detección de grietas en el concreto, que es una de las tareas importantes y que consumen mucho tiempo para la evaluación del estado o la inspección periódica que puede ser necesaria para algunas estructuras

existentes. Las investigaciones actuales indican que pueden utilizarse algoritmos para detectar grietas en estructuras de concreto. Por ejemplo, se están adoptando diferentes algoritmos ML para monitorear los elementos estructurales de concreto basados en datos adquiridos por sensores en tiempo real y detección de imágenes en color para detectar grietas habituales en la superficie del concreto, se estaban entrenando algoritmos para reconocer los patrones de las grietas e identificarlas con precisión, y se estaba utilizando un método de aprendizaje profundo para desarrollar un detector automático de grietas en el concreto. Además, la propagación de grietas en estructuras de concreto también se puede predecir utilizando ML y se está estudiando actualmente.

Las aplicaciones del ML en las tecnologías del concreto aún están en sus inicios y suponen un reto; sin embargo, la investigación no ha dejado de desarrollarse. Al igual que otras tecnologías en desarrollo, como los drones y las tecnologías lidar, los avances del ML ofrecen una perspectiva prometedora para ayudar en la evaluación de la seguridad de las estructuras.

Resumen

A los profesionales del diseño se les pide habitualmente que evalúen la seguridad de las estructuras existentes, a menudo basándose en información limitada y con acceso limitado a la estructura. Esta serie de artículos examina algunos de los retos asociados a las evaluaciones de estado y la necesidad de que los resultados se presenten dentro del contexto de las limitaciones de la evaluación.

Desde las primeras aplicaciones del concreto estructural y, posteriormente, las primeras normas de diseño y construcción, se han producido cambios significativos en el concreto y en la tecnología del concreto. En los últimos 50 años, se han producido cambios más sustanciales para garantizar mejor que los edificios nuevos se diseñen y construyan adecuadamente para satisfacer los requisitos de capacidad de servicio y niveles razonables de seguridad, así como la evaluación y valoración de los edificios existentes y el diseño y ejecución de reparaciones. En este artículo se analizan los continuos avances en el concreto y la tecnología del concreto, tanto para

la nueva construcción como para la prolongación de la vida útil de las estructuras existentes, en lo que respecta a la evaluación y valoración de las estructuras existentes.

Una mejor comprensión del comportamiento del concreto en las estructuras existentes, los cambios de paradigma, la revisión de los códigos y normas existentes y el desarrollo de otros nuevos, así como la aceptación de nuevas tecnologías, demuestran que hay nuevas esperanzas de seguir garantizando que las estructuras diseñadas y construidas con concreto estructural sigan proporcionando razonablemente la salud, la seguridad y el bienestar general del público durante su vida útil prevista y mucho más.

Referencias

1. Kesner, K.E.; Tepke, D.G.; Jiang, L.; and Szoke, S.S., "Reasonable Safety' of Existing Structures, Part 1," *Concrete International*, V. 45, No. 11, Nov. 2023, pp. 43-48.
2. Matthews, M.A., "Special Inspections as Originally Intended," *The Construction Specifier*, Feb. 10, 2015.
3. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-89) and Commentary—ACI 318R-89," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1989, 353 pp.
4. "2021 International Building Code (IBC)," International Code Council, Washington, DC, Dec. 2020.
5. ACI Committee 440, "Building Code Requirements for Structural Concrete Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars—Code and Commentary (ACI CODE-440.11-22)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2023, 260 pp.
6. "2024 International Building Code (IBC)," International Code Council, Washington, DC, Dec. 2023.
7. Tepke, D.G., and Isgor, O.B., "Is the Inside of Your Structure Safe from Corrosion?" *Concrete International*, V. 45, No. 8, Aug. 2023, pp. 31-36.
8. Tepke, D.G.; Jiang, L.; Kesner, K.E.; and Szoke, S.S., "Reasonable Safety' of Existing Structures, Part 2," *Concrete International*, V. 45, No. 12, Dec. 2023, pp. 51-56.
9. 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.
10. ACI Committee 562, "Assessment, Repair, and Rehabilitation of Existing Concrete structures—Code and Commentary (ACI CODE- 562-21)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2013, 88 pp.
11. ICRI Committee 160, "Sustainability for Repairing and Maintaining Concrete and Masonry Buildings," International Concrete Repair Institute, St. Paul, MN, 2014, 13 pp.
12. Renne, N.; Kara De Maeijer, P.; Craeye, B.; Buyle, M.; and Audenaert, A., "Sustainability Assessment of Concrete Repairs through Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Cost Analysis (LCCA)," *Infrastructures*, V. 7, No. 10, Sept. 2022.
13. Vittoch, L.; Buyle, M.; Audenaert, A.; Seuntjens, O.; Renne, N.; and Craeye, B., "Revamping Corrosion Damaged Reinforced Concrete Balconies: Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost of Life-Extending Repair Methods," *Journal of Building Engineering*, V. 52, July 2022.
14. ACI Committee 228, "Report on Nondestructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structure (ACI 228.2R-13)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2013, 82 pp.
15. Fahim, A.; Ghods, P.; Isgor, O.B.; and Thomas, M.D.A., "A Critical Examination of Corrosion Rate Measurement Techniques Applied to Reinforcing Steel in Concrete," *Materials and Corrosion*, V. 69, No. 12, July 2018, pp. 1784-1799.
16. Pfändler, P.; Bodie, K.; Crotta, G.; Pantic, M.; Siegwart, R.; and Angst, U., "Non-Destructive Corrosion Inspection of Reinforced Concrete Structures Using an Autonomous Flying Robot," *Automation in Construction*, V. 158, Feb. 2024.
17. Van Ede, M.C.; Fichtner, A.; and Angst, U., "Nondestructive Detection and Quantification of Localized Corrosion Rates by Electrochemical Tomography," *NDT & E International*, V. 142, Mar. 2024.
18. D'Amico, N., and Yu, T., "Photogrammetric Analysis of Concrete Specimens and Structures for Condition Assessment," Conference: SPIE Smart Structures and Materials + Nondestructive Evaluation and Health Monitoring, Apr. 2016.
19. ACI Committee 444, "Structural Health Monitoring Technologies for Concrete Structures—Report (ACI PRC-444.2-21)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2021, 110 pp.
20. Gamil, Y., "Machine Learning in Concrete Technology: A Review of Current Researches, Trends, and Applications," *Frontiers in Built Environment*, V. 9, Feb. 2023.
21. Li, Z.; Yoon, J.; Zhang, R.; Rajabipour, F.; Srubar III, W.V.; Dabo, I.; and Radlinska, A., "Machine Learning in Concrete Science: Applications, Challenges, and Best Practices," *Computational Materials*, V. 8, June 2022.

Seleccionados por los editores por su interés para el lector.



David G. Tepke, FACI, es ingeniero principal de SKA Consulting Engineers, Inc. en Charleston, SC (EE.UU.). Está especializado en evaluación estructural y de materiales, resolución de problemas, reparación y prolongación de la vida útil. Es especialista en corrosión y especialista en revestimientos protectores certificado por NACE/AMPP. Tepke es presidente del Comité 222 del ACI, Corrosión de Metales en el Concreto, y miembro del Comité del ACI sobre Promoción y Divulgación de Códigos y Normas; y de los Comités 201, Durabilidad del Concreto; 301, Especificaciones para la Construcción de Concreto; 321, Código de Durabilidad; y 329, Criterios de Desempeño para Concreto Premezclado. Es ingeniero profesional licenciado.



Keith E. Kesner, FACI, es Director de Proyectos de Simpson Gumpertz & Heger, Inc. Está especializado en la evaluación y rehabilitación de estructuras existentes. Es presidente del Comité de Reparación y Rehabilitación del ACI TAC y del Subcomité 562-E, Sísmico, del ACI. También es miembro del Comité de Promoción y Divulgación de Códigos y Normas del ACI; del Comité de Actividades Técnicas; y de los Comités 228, Ensayos No Destructivos del Concreto; 364, Rehabilitación; 562, Evaluación, Reparación y Rehabilitación de Edificios de Concreto; y de los Subcomités 318-C, Seguridad, Capacidad de Servicio y Análisis del ACI; y de varios grupos de colaboración de iniciativas estatales. Fue uno de los galardonados con el Premio a la Práctica de la Construcción de ACI en 1998 y recibió el Premio al Miembro Joven de ACI en 2005. Kesner obtuvo su licenciatura en la Universidad de Connecticut, Storrs, CT, EE.UU., y su máster y doctorado en la Universidad de Cornell, Ithaca, NY, EE.UU. Está colegiado como ingeniero profesional en varios estados y como ingeniero de estructuras en Hawai e Illinois.



Liying Jiang, Miembro del ACI y Directora de Ingeniería de Structural Technologies. Está especializada en evaluaciones de estructuras existentes, valoración de materiales de concreto, diseño de medidas de reparación y rehabilitación, y desarrollo de estrategias de gestión para estructuras afectadas por reacción álcali-silice (ASR por sus siglas en inglés), corrosión y otros problemas relacionados con los materiales. Es presidenta del Subcomité 364-C del ACI, Subcomité TechNote, y Secretaria del Subcomité 228-B del ACI, Visual Condition Survey of Concrete. También es miembro de los Comités 228 (Ensayos no destructivos del hormigón) y 364 (Rehabilitación) del ACI.



Stephen S. Szoke, FACI, Personal Distinguido de ACI, es Ingeniero de Defensa del Código en ACI. Participa activamente en el desarrollo de modelos de códigos de construcción, normas de referencia, reglas y reglamentos. Szoke es miembro del personal de enlace del Comité de promoción y divulgación de códigos y normas de ACI. Es ingeniero profesional licenciado.

Título original en inglés: "Reasonable Safety" of Existing Structures, Part 4: A New Hope

La traducción de este artículo correspondió al Capítulo de Perú



*Traductor y Revisor Técnico:
Ing. Julio Antonio Higashi Luy*

Dificultades con el Diseño Tilt-Up

por Trent Nagele, John Lawson y Jeff Griffin.

La construcción de hormigón Tilt-up se ha convertido en uno de los métodos más utilizados (por pie cuadrado) para la construcción de edificios de baja altura en los Estados Unidos. La forma más común es un edificio de un solo piso con paredes de hormigón altas y delgadas. El diseño de estas paredes delgadas está usualmente controlado por una flexión y deflexión fuera de plano, con el diseño normalmente siguiendo las disposiciones alternativas para paredes delgadas en la sección 11.8 del Código ACI-318-19 (22)¹. La base histórica para estas disposiciones se remonta a pruebas de escala real llevadas a cabo a principios de la década de 1980 en una operación conjunta entre la ACI Capítulo Sur de California (ACISCC) y la Asociación de Ingenieros Estructurales del Sur de California (SEAOSC)². Estos resultados fueron validados en pruebas recientes realizadas por la Universidad de Nebraska en un informe de 2022 preparado por la Asociación de Concreto Tilt-Up (TCA)³.

Esta historia es importante porque valida los supuestos subyacentes del método de diseño. Los diseñadores de paredes que carecen de apreciación por esta historia pueden implementar diferentes enfoques teóricos con la creencia de que con sus esfuerzos aumentarán la precisión y eficiencia. Sin embargo, estos suelen contraponerse al comportamiento experimental observado y pueden llevar considerablemente a diseños de pared poco prudentes.

Los errores comunes incluyen:

- Usar un momento de inercia efectivo en lugar de un momento de inercia agrietado para el diseño de resistencia con efectos de segundo orden p -delta (P - Δ); y
- Usar un módulo de ruptura incorrecto.

En algunas instancias, estos errores pueden ser facilitados por paquetes de software comerciales – ya sea proporcionándolos como métodos alternativos o integrando uno o ambos dentro del código fuente.

Para obtener información adicional y una discusión más detallada de los temas en este artículo, consulte la TechNote de ACI PRC-551.3-21, “Dificultades de las Disposiciones de Paredes Delgadas de ACI 318”.

Momento de Inercia

Diseñar muros delgados para flexión fuera de plano requiere considerar los efectos de segundo orden. En algunos casos, los momentos adicionales de los efectos de segundo orden pueden superar a los momentos primarios. El cálculo de los momentos de segundo orden es una función directa de la deflexión fuera de plano, la cual es dependiente del momento de inercia de la sección transversal.

La respuesta de los paneles de muros delgados quedó bien establecida mediante pruebas en la década de 1980 y sigue una curva bilineal clara al trazar la carga lateral o los momentos frente a la deflexión (Fig. 1). El cambio repentino de la pendiente en el punto de inflexión de la curva está asociado con el agrietamiento. A momentos bajos, el panel sin grietas tiene una respuesta elástica con muy poca deflexión como se muestra en la porción casi vertical de la curva. Esta parte de la curva usa un momento de inercia casi igual al momento de inercia bruto, I_g . No obstante, una vez

que el panel se agrieta, la deflexión se incrementa dramáticamente con pequeños incrementos en la presión o el momento. A elevadas presiones, las deflexiones se aproximan a aquellas asociadas con la respuesta encontrada usando el momento de inercia agrietado, I_{cr} .

Para utilizar esta respuesta de la curva del muro para el diseño, las ecuaciones de diseño en el Código ACI 318-19(22), Sección 11.8, consideran dos revisiones distintas que representan el diseño de resistencia (Sección 11.8.3) y el servicio de deflexión (Sección 11.8.4). El objetivo del diseño de resistencia es para garantizar que los requerimientos mínimos de seguridad se cumplan. Debido a esto, la ecuación (11.8.3.1c) prescribe el uso de I_{cr} para calcular el momento de diseño factorizado, M_u . Este enfoque que a medida que el momento aplicado se aproxima al momento nominal de resistencia, el momento de inercia de la sección transversal se aproxima a I_{cr} como lo ilustra la Fig. 1.

Esta suposición de sección agrietada también garantiza un mecanismo de falla predecible y dúctil, que es una filosofía fundamental del diseño de hormigón.

En contraste, la deflexión de servicio estima la deformación fuera de plano del panel a un nivel de fuerza más bajo y evalúa la capacidad de servicio del panel usando un enfoque iterativo. Debido a estas diferencias, las ecuaciones de diseño de servicio poseen un formato conformado por dos partes (Tabla 11.8.4.1) para representar la curva bilineal de comportamiento observado asumiendo una sección sin grietas o parcialmente agrietada con un momento de inercia efectivo, I_e o I_{eff} .

El uso de I_{cr} para el diseño de resistencia es intencional, sería un error asumir I_e que puede ser sustituida casualmente para lograr una mayor precisión y eficiencia debido a las siguientes razones:

- Como se evidencia en la Fig. 1, la rigidez de la pared cae vertiginosamente al iniciar el agrietamiento. Si la rigidez de la pared se basa en una sección parcialmente agrietada consistente con I_{eff} ligeras imprecisiones en la carga calculada o en las propiedades de sección pueden llevar a imprecisiones significativas en las deflexiones calculadas y momentos de segundo orden asociados.
- La mayor parte de los ingenieros de diseño

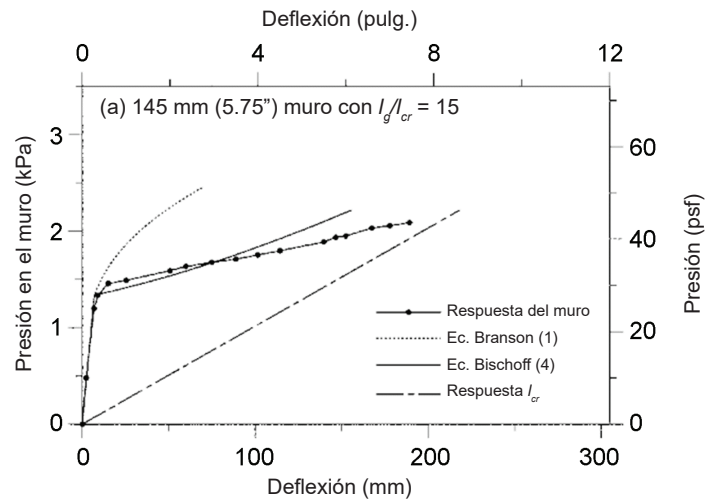


Fig.1: Comparación de la deflexión de pared usando diferentes métodos. Nótese que la "Ec. Branson" es la ecuación usada en ACI 318-99⁵ a la 318-05⁶, la Respuesta del muro "Wall Response", proviene de los datos de prueba de SEAOSC Slender Wall Task Group⁷ (desde Bischoff y Scanlon⁸).

y de programas de software comerciales usan un modelo bloque-esfuerzo basado en una sección completamente agrietada para el cálculo de la capacidad nominal de momento, M_n . Es importante ser coherente y utilizar una filosofía de agrietamiento completo tanto en el lado de la demanda como en el de la capacidad de la desigualdad $\phi M_n > M_u$ (Sección 4.6.2);

- Según la ASCE 7-16⁹ las fuerzas sísmicas en un nivel de diseño de terremoto son inferiores a los niveles esperados debido a los beneficios anticipados de la ductilidad del elemento para resistir sobrecargas: sin embargo, esto implica que es más probable que la sección del hormigón se agriete completamente de lo que sugieren el diseño de fuerzas, llevando potencialmente a una pérdida repentina de la rigidez fuera del plano; y
- Previo a un evento de diseño, un panel se verá afectado a tensiones ocasionadas por el levantamiento, limitaciones en la retracción de fraguado o contracción termal, u otras cargas previas. En consecuencia, no hay forma de garantizar que no se haya agrietado más allá de lo predicho solamente por el diseño de cargas.

A pesar de estas razones, algunos diseñadores (frecuentemente ayudados por software) han escogido usar I_{eff} o I_e para el diseño de resistencia en lugar de I_{cr} , lo cual podría llevar a diseños potencialmente inseguros.

Módulos de Ruptura

Tras las pruebas a escala real de paredes delgadas, se desarrollaron ecuaciones de diseño y finalmente fueron adoptadas por el Código de Construcción Uniforme (UBC) en la edición de 1988¹⁰. Cuando el Consejo Internacional de Códigos creó un único código nacional modelo en 2000, las disposiciones para paredes delgadas del UBC¹¹ de 1997 en parte fueron incorporadas en el ACI 318-99, que fue referenciado por la 2000 IBC¹². Para que la utilidad de las disposiciones del diseño de paredes delgadas se ajustase mejor al Código ACI, se cambiaron dos parámetros clave para alinearse con formulaciones bien establecidas. El primero fue reemplazar I_{cr} con el momento de inercia efectivo de Branson, I_e , para el diseño por serviciabilidad/funcionalidad/mantenimiento, lo cual subestimó las deflexiones por carga de servicio. El segundo fue aumentar el módulo de ruptura, f_r , a $7.5\sqrt{f'_c}$ para alinearse con la ecuación tradicional proporcionada en el Código ACI (consultar ACI CODE-318-19(22), Sección 19.2.3.1). Sin embargo, estos cambios crearon resultados de diseño inadecuados que no coincidían precisamente con los datos de prueba originales del Comité de Tareas sobre Paredes Delgadas ACISCC-SEAOSC². Las disposiciones del ACI 318-99 fueron corregidas en ACI 318-08¹³ y en ediciones futuras para mantener la fidelidad de las disposiciones de diseño originales del UBC después de que un Grupo de Tareas de Paredes Delgadas SEAOSC validara las inquietudes.

El módulo de ruptura predice el punto de transición en la curva bilineal entre las partes casi verticales (sin grietas) y casi horizontales (con grietas) de la curva. Los datos de prueba del Comité de Tareas sobre Paredes Delgadas ACISCC-SEAOSC² revelaron que el momento en la primera grieta, $M_{cr} = f_r \times S$, correspondía a un módulo de ruptura de $5.0\sqrt{f'_c}$ en lugar del comúnmente utilizado $7.5\sqrt{f'_c}$ en ACI 318 debido a la limitación interna de la retracción de fraguado

de las fuerzas de tracción. Para corregir esta diferencia, ACI 318 eligió colocar un factor de dos tercios en M_{cr} y Δ_{cr} para paredes delgadas en lugar de cambiar el factor de 7.5 a 5.0. No obstante, algunos ingenieros de diseño siguen enfrentando la opción de usar 5.0 versus 7.5 en algunos programas de software sin poder apreciar en su totalidad las consecuencias de su selección.

Dado este contexto, cuando sea solicitado especificar el módulo de ruptura por una hoja de cálculo o programa durante el proceso de diseño, es importante comprender si la metodología de diseño que se usa internamente va a realizar el ajuste de los dos tercios, o si se espera que los diseñadores realicen dicho ajuste por su cuenta. Cuando este tipo de confusión ha ocurrido, se han producido inexactitudes significativas durante el análisis.

Ejemplos de Problemas

El siguiente texto resume dos ejemplos suministrados en la ACI PRC-551.2-21, demostrando los efectos de utilizar erróneamente I_e para el diseño de resistencia en paredes delgadas y utilizando $7.5\sqrt{f'_c}$ para calcular I_e en las revisiones de resistencia. Las comprobaciones de servicio requeridas por el código no se abordan. Lectores están motivados a revisar el ACIPRC 551.3-21 para mayor detalle.

Ejemplo 1

Ejemplo B.1 en la ACI 551.2R, "Guía para el Diseño de Paneles de Hormigón Tilt-Up"¹⁶ es un panel de 6-1/4 pulgadas de espesor, 15 pies de ancho, 31 pies de alto (21 pies de longitud sin refuerzo) soportando tres vigas de cubierta, cada una con una carga de 2.4 kips (carga muerta, D) y 2.5 kips (carga viva de cubierta, L_r). Carga lateral en el panel es de 27.2 lb/ft² del viento (W). El panel esta reforzado con barras No. 6 aproximadamente espaciadas a 12 pulgadas de distancia, ubicadas en el centro del espesor del panel.

Siguiendo las disposiciones de paredes delgadas en la ACI 318 y utilizando correctamente I_{cr} para los efectos de segundo orden, el momento factorizado total en el panel para el caso de carga es $(1.2D + 1.6L_r + 0.5W)$ es 61.2 kip-ft, y la deflexión bajo cargas factorizadas, Δ_u , es 10.0 pulg. Varios

Tabla 1:
Resumen del Ejemplo 1. Valores para I_e (dos columnas de la derecha) ilustran resultados incorrectos.

ACI 318 Muro esbelto		I_e (Bischoff y Scanlon ⁸)	
I_g	3662 pulg. ⁴	I_e	-72 pulg. ⁴
I_{cr}	354 pulg. ⁴	$I_e \leq I_g$	3662 pulg. ⁴
I_g/I_{cr}	10.3	I_g/I_e	1.0
M_{cr}	46 kip·pie		—
ϕM_n	96 kip·pie		—
M_u	61 kip·pie	M_u	26 kip·pie
Δ_u	10.0 pulg.	Δ_u	0.4 pulg.

de los parámetros clave se resumen en la columna izquierda de la Tabla 1.

Si el mismo panel es analizado usando I_e en lugar de I_{cr} , los resultados varían drásticamente.

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^m \left[1 - \frac{I_{cr}}{I_g}\right]} \leq I_g \quad (\text{Eq. (4b) en Referencia 8})$$

Los resultados de este análisis se resumen en la columna de la derecha de la Tabla 1. Resultados similares se alcanzarían de igual forma si la ecuación del momento de inercia de Branson fuera utilizada.

Al comparar estas soluciones de diseño, se observa que se calcula un valor negativo para I_e . Esto ocurre porque el momento aplicado M_{ua} es menor que M_{cr} lo que indica que el panel no está agrietado. Por lo tanto, I_g es utilizado en vez de I_e o I_{cr} para el resto del análisis, a pesar de que I_g es diez veces el momento de inercia agrietado prescrito por las ecuaciones de la ACI 318. Usando $I_e = I_g$, el M_u resultante de la sección no agrietada es posteriormente se calcula que es 26 kip·ft, lo cual representa solo el 42% del momento de diseño requerido por la ACI 318 utilizando la suposición de una sección agrietada. La deflexión de 0.4 pulgadas es solo el 4% de las 10.0 pulgadas calculadas por la deflexión ACI 318. Aunque podría ser tentador argumentar que el uso de I_g está justificado porque M_{ua} es menor que M_{cr} , y el panel no está agrietado, esto puede direccionar a un diseño de panel significativamente deficiente, particularmente considerando las cuatro preocupaciones discutidas previamente. Si los valores de momento y deflexión reducidos

se utilizan para dimensionar el refuerzo, el panel será vulnerable a una pérdida repentina de rigidez fuera del plano si se agrieta antes, o durante, un evento de diseño, lo que resultaría en un aumento dramático de momentos $P-\Delta$ inesperados que exceden la capacidad del refuerzo.

Ejemplo 2

El ejemplo 2 es un panel de 6-1/4 de pulgadas de espesor, 8 pies de ancho, 30 pies de alto (28.0 pies de longitud sin refuerzo) que soporta una única carga lineal de 18.6 kips (D) y 31.8 kips (L_r). La carga lateral en el panel es de 23.0 lb/pie² del viento (W). Esta reforzada con barras No. 5 a una distancia de separación de 6 pulgadas en el centro de espesor.

En este ejemplo, I_e primero se utilizará para analizar el diseño propuesto y luego se verificará usando las ecuaciones prescritas de I_{cr} en la ACI 318.

Tabla 2:
Resumen de los resultados del ejemplo 2. Valores para I_e (las dos columnas de la izquierda) muestran resultados incorrectos.

I_e (Bischoff y Scanlon ⁸)		ACI 318 muro esbelto	
I_e	-44.0 pulg. ⁴	I_g	2197 pulg. ⁴
$I_e \leq I_g$	2197 pulg. ⁴	I_{cr}	192 pulg. ⁴
I_g/I_e	1.0	I_g/I_{cr}	11.4
	—	M_{cr}	26.7 kip·pie
	—	ϕM_n	47.3 kip·pie
M_u	17.8 kip·pie	M_u	-15.7 kip·pie
Δ_u	0.42 pulg.	Δ_u	-4.28 pulg.

La Tabla 2 resume los resultados de este análisis de panel y muestra los resultados de los cálculos basados (de manera incorrecta) en I_e contra I_{cr} . Nótese otra vez que I_e fue calculada como negativa, lo que indica inicialmente un panel sin grietas, por lo que se asume que I_e es igual a I_g .

Las dos columnas izquierdas en la Tabla 2 resumen los resultados de utilizar I_e (M_u de 17.8 kip·pie y deflexión de 0.42 pulgadas). Este análisis justifica incorrectamente el refuerzo asumido (barras No. 5 con un espaciado de 16 pulgadas en el centro del panel). Un diseñador experimentado

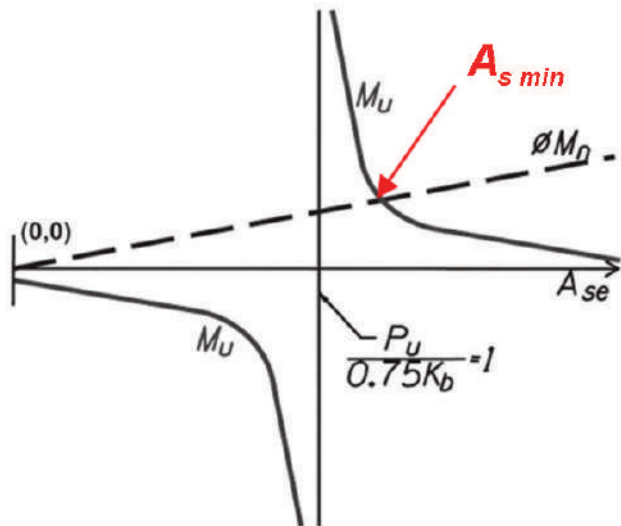


Fig. 2: Variación del momento factorizado y la capacidad del momento nominal a medida que aumenta el área de refuerzo de tensión efectiva (Fig. Ba en ACI 551.2R-1516)

sería muy cauto de esto porque es común que los paneles que soportan cargas pesadas lineales se refuercen con una "jaula" que incorpora barras en cada cara.

Las dos columnas de la derecha de la Tabla 2 muestran los parámetros calculados usando las disposiciones de la ACI 318, y estos resultados suscitan preocupaciones adicionales. M_u parece ser de $-15.7 \text{ kip}\cdot\text{pie}$, con una deflexión de -4.28 pulgadas. Los signos negativos en estos valores son señales de advertencia porque este es un panel simplemente apoyado y no debería existir momentos negativos.

Para ilustrar lo que está sucediendo en este caso, considérese la Fig. 2 donde se muestra una gráfica de M_u versus el área efectiva del acero, A_{se} . A bajos niveles de refuerzo aparece M_u erróneamente con un valor negativo y aumenta hacia una asíntota indicando una posible inestabilidad. La ACI 551.2R-15 señala que el área mínima de acero que se debe seleccionar es el punto donde la resistencia nominal a flexión, θM_n , interseca con un M_u positivo (refiérase a la flecha roja en la Fig. 2). Sin embargo, para este panel, θM_n es de $47.3 \text{ kip}\cdot\text{pie}$, lo que matemáticamente es mayor que cualquier M_u de $17.8 \text{ kip}\cdot\text{pie}$ calculada utilizando I_e o una M_u de $-15.7 \text{ kip}\cdot\text{pie}$ calculado usando la ACI 318. θM_n también es mayor que M_{cr} , lo cual es una disposición necesaria para el Código ACI 318-19(22), Sección 11.8.1.1c. Sin embargo, el diseño aún es inadmisibles.

Para obtener un M_u positivo significativo, la rigidez del panel, K_b , necesita incrementarse. Esto se logra más fácilmente aumentando el espesor del refuerzo ya sea colocando barras en cada cara del panel o simplemente aumentando el espesor del panel. Al usar refuerzo en cada cara, aquí el M_u apropiado basado en la metodología de la ACI 318 es aproximadamente de $61 \text{ kip}\cdot\text{ft}$ y evita una condición de sobre reforzamiento ($\rho < 0.6\rho_{bal}$) que resultaría si las barras centrales estuvieran espaciadas más cerca. Este es un diseño significativamente diferente al diseño que falsamente se mostró como adecuado cuando se verificó usando I_{cr} . El ejemplo de esta manera resalta los peligros de seguir ciegamente las ecuaciones e ignorar resultados inverosímiles. Si un M_u negativo es aceptado tal cual, el ajustar solo la cantidad de refuerzo no es probable que cambie sustancialmente el resultado erróneo.

Conclusiones

Las disposiciones para el diseño de muros delgados suministradas en el Código ACI 318-19(22), Sección 11.8, han sido empíricamente validadas utilizando datos obtenidos de pruebas de escala real. Si los diseñadores o sus programas de diseño emplean ecuaciones sustitutas o metodologías – ya sea usando inesperadamente disposiciones caducas de la ACI 318 o intencionalmente utilizando teorías alternativas en busca de una mayor precisión o eficiencia – el resultado podría ser paneles que no posean una resistencia o rigidez adecuada. Esto puede dar lugar a paneles que sean muy sensibles al agrietamiento y sean capaces de aumentos dramáticos e inesperados en los momentos $P\cdot\Delta$. Se alienta a los diseñadores a revisar sus cálculos y metodología de diseño considerando la intención de las disposiciones actuales de la ACI 318 y su base empírica subyacente. Si se utilizan ecuaciones o metodologías alternas, los diseñadores deben asegurarse de que se empleen de manera racional y sean consistentes con el comportamiento observado en un programa de pruebas a escala real. Si esto no es posible, el panel resultante puede ser vulnerable a una pérdida repentina de rigidez cuando el agrietamiento ocurre.

Referencias

1. 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.
2. ACI-SEAOSC Task Committee on Slender Walls, "Test Report on Slender Walls," J.W. Athey, ed., ACI Southern California Chapter and Structural Engineers Association of Southern California (SEAOSC), Los Angeles, CA, 1982, 134 pp.
3. Maguire, M., and Al-Rubaye, S., "Tilt-Up Partially Composite Insulated Wall Panels," Tilt-Up Concrete Association, Mount Vernon, IA, 2022, 399 pp.
4. ACI Committee 551, "Pitfalls of Deviating from ACI 318 Slender Wall Provisions—TechNote (ACI PRC-551.3-21)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2021, 12 pp.
5. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-99) and Commentary (ACI 318R-99)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 1999, 391 pp.
6. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (ACI 318R-05)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2005, 430 pp.
7. Ekwueme, C.; Lawson, J.; Pourzanjani, M.; Lai, J.S.; and Lyons, B., "UBC 97 and ACI 318-02 Code Comparison – Summary Report," SEAOSC Slender Wall Task Group, Jan. 2006, 47 pp.
8. Bischoff, P., and Scanlon, A., "Effective Moment of Inertia for Calculating Deflections of Concrete Members Containing Steel Reinforcement and Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement," ACI Structural Journal, V. 104, No. 1, Jan.-Feb. 2007, pp. 68-75.
9. ASCE 7-16, "Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures," American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2017, 800 pp.
10. "1988 Uniform Building Code," International Conference of Building Officials, Whittier, CA, 1989, 926 pp.
11. "1997 Uniform Building Code," Volume 2: Structural Engineering Design, International Conference of Building Officials, Whittier, CA, Apr. 1997, 492 pp.
12. "2000 International Building Code (IBC)," International Code Council, Falls Church, VA, 2000, 796 pp.
13. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2008, 465 pp.
14. Lawson, J., "Deflection Limits for Tilt-up Wall Serviceability," Concrete International, V. 29, No. 9, Sept. 2007, pp. 33-38.
15. Gilbert, R.I., "Deflection Calculations for Reinforced Concrete Structures – Why We Sometimes Get It Wrong," ACI Structural Journal, V. 96, No. 6, Nov.-Dec. 1999, pp. 1027-1032.
16. ACI Committee 551, "Design Guide for Tilt-Up Concrete Panels (ACI 551.2R-15)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2015, 72 pp.

Seleccionado por los editores para el interés del lector.



Trent Nagele, miembro de ACI, es ingeniero estructural y director sénior de VLMK Engineering + Design en Portland, Oregón, EE. UU. Es uno de los autores principales, junto con John Lawson y Jeff Griffin, de la nota técnica ACI PRC-551.3-21 publicada recientemente por el Comité 551 de ACI, Tilt Up Concrete Construction. Nagele recibió su maestría en ingeniería estructural y posee más de 27 años de experiencia en la práctica del diseño con una amplia gama de tipos de proyectos y construcciones. Ha sido parte del comité de revisión de varios documentos de Tilt-Up, incluido FEMA P-1026, "Diseño sísmico de edificios de pared rígida con diafragma flexible: un procedimiento alternativo", y "Engineering Tilt-Up" de la Tilt-Up Concrete Association. Publicaciones "Limit Design of Tilt-Up".



John Lawson, miembro de ACI, es profesor de Ingeniería Arquitectónica en la Universidad Estatal Politécnica de California (Cal Poly), San Luis Obispo, CA, EE. UU. él es miembro del Comité ACI 551, Construcción con hormigón inclinado. Con más de 25 años de experiencia en diseño, Lawson supervisó la ingeniería de más de 100 millones de pies cuadrados de construcción de edificios basculantes. Recibió su licenciatura en ingeniería arquitectónica de Cal Poly y su maestría en ingeniería estructural de la Universidad de Stanford, Stanford, CA. Es ingeniero estructural con licencia en California y Arizona.



Jeff Griffin, miembro de ACI, es gerente senior de proyectos de LJB Inc., Miamisburg, OH, Estados Unidos. Diseña y gestiona la construcción de edificios de oficinas, almacenes, militares y comerciales de uno o varios pisos. En sus 26 años de carrera, Griffin ha diseñado instalaciones con una variedad de materiales de construcción, pero tiene experiencia en el diseño de estructuras construidas con paneles de muro de hormigón inclinables colados en obra. Es ex presidente del Comité 551 de ACI, Construcción con hormigón inclinado. Griffin es un ingeniero profesional con licencia en 14 estados.

Título original en inglés: Tilt-Up Design Pitfalls

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



Traductor:
Cristian Valejo Delgado



Revisor Técnico:
Ing. Santiago Velez Guayasamin
MSc DIC

Preguntas y Respuestas

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

Barras de PRFV en elementos a compresión

P ¿Pueden utilizarse barras de polímero reforzado con fibra de vidrio (PRFV) en elementos a compresión?

R De acuerdo con los códigos y estándares de diseño norteamericanos actualmente en vigor, se permite el uso de barras de PRFV en elementos sometidos a cargas puramente axiales o a una combinación de compresión axial y flexión. También se han utilizado en muchos proyectos durante la última década, incluidos las pilas de puentes en Canadá, como se muestra en la Fig. 1. Sin embargo, existe una discrepancia en las declaraciones de los diferentes códigos de diseño y especificaciones de las guías con respecto a la contribución de las barras de PRFV a la capacidad de los miembros sometidos a cargas axiales o a la combinación de compresión axial y carga de flexión. Esta discrepancia se atribuye principalmente a los limitados estudios de investigación sobre el comportamiento a largo plazo de las barras de PRFV a compresión.

Respecto a esto, "las especificaciones de la guía de diseño de puentes para concreto reforzado con PRFV AASHTO LRFD"¹ y CSA S806:12 (R2021)² adoptan una postura conservadora, optando por no tener en cuenta la resistencia a compresión de los refuerzos de PRFV en los cálculos de diseño. El código 440.11-22, Sección 22.2.3.3, de la ACI adopta un enfoque más moderado, especificando que "El área de refuerzo de PRFV en compresión se tratará como si tuviera la misma resistencia y rigidez que el concreto en la zona de compresión circundante"³. CSA S6-19⁴

adopta una perspectiva diferente al reconocer la contribución de las barras de PRFV hasta una deformación de 0,002. Establece lo siguiente: "El refuerzo longitudinal de FRP puede utilizarse en elementos sometidos a una carga combinada de flexión y axial. Sin embargo, la resistencia a compresión de la armadura FRP se limitará a una tensión correspondiente a una deformación de 0,002 en el cálculo de la resistencia axial y a flexión ponderada de los elementos de concreto reforzado"⁴. Es interesante observar que este límite de deformación a compresión es equivalente a la deformación donde cede la armadura convencional de acero. Además, debe reconocerse que la orientación inicial para los límites de deformación por tensión de la armadura transversal de cortante para elementos de flexión en ACI 440.4R-04⁵ se basa en los límites de CAN/CSA-S6-00⁶ en ese momento. Los límites de deformación por tensión de la armadura transversal se aumentaron posteriormente a 0,004 en ACI 440.1R-06⁷ y CSA S6:19, y a 0,005 en CSA S806:12(R2021) y ACI CODE-440.11-22, en reconocimiento de que el límite de deformación basado en la fluencia de la armadura convencional de acero era demasiado conservador^{8,9}. Mistretta et al.⁹ han resumido la evolución histórica de las formulaciones para la resistencia a cortante del concreto reforzado con FRP en varios estándares internacionales.

El efecto de los límites de deformación a compresión más allá de 0,002 para la armadura longitudinal todavía puede estar con seguridad dentro del rango pseudoelástico de la mayoría del concreto; sin embargo, 0,002 es un límite conservador racional hasta que investigaciones adicionales puedan determinar un límite superior



Fig. 1 Uso de barras PRFV en pías de puentes en Canadá.

de deformación más representativo. Teniendo en cuenta que la armadura transversal de columnas puede funcionar como armadura de cizallamiento y como confinamiento de la armadura longitudinal bajo grandes esfuerzos de compresión, es necesario respetar las disposiciones de los códigos y especificaciones de diseño pertinentes sobre la separación máxima de la armadura transversal para evitar el fallo prematuro de la columna por compresión debido a la dilatación excesiva del concreto y/o al pandeo potencial de la armadura longitudinal. Los estudios experimentales disponibles indican que las barras de PRFV mejoran la resistencia de los elementos de concreto armado sometidos a cargas de compresión axial. La contribución de las barras de PRFV a la capacidad axial de las columnas, antes del desprendimiento del recubrimiento, suele situarse entre el 5% y el 10%, según Guérin et al¹⁰.

Los limitados datos existentes sobre la rigidez y la resistencia de las barras desnudas de PRFV bajo compresión pura sugieren que la resistencia a la compresión fluctúa entre el 50 y el 100% de la resistencia en tensión¹¹⁻¹⁵. Además, se ha observado que el módulo de elasticidad a la compresión fluctúa entre el 75 y el 120% del módulo de elasticidad en tensión¹¹⁻¹⁵. Por otra parte, Mirdarsoltany et al.¹⁵ concluyeron que excluir la resistencia a la compresión de las barras de PRFV de los procedimientos de diseño para miembros a compresión, como las columnas, es una práctica conservadora.

En resumen, las barras de PRFV pueden utilizarse en elementos a compresión. Sin embargo, los ingenieros de estructuras deben aplicar su criterio técnico a la hora de decidir el límite de deformación por compresión para la contribución de las barras de PRFV, con consideraciones adicionales para el área y el espaciado de los estribos de confinamiento.

Referencias

1. "AASHTO LFRD Bridge Design Guide Specifications for GFRP Reinforced Concrete," second edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2018, 121 pp.
2. CSA S806:12 (R2021), "Design and Construction of Building Structures with Fibre-Reinforced Polymers (Reaffirmed 2021)," Canadian Standards Association, Toronto, ON, Canada, 2012, 201 pp.
3. ACI Committee 440, "Building Code Requirements for Structural Concrete Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars—Code and Commentary (ACI CODE-440.11-22)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2022, 255 pp.
4. CSA S6:19, "Canadian Highway Bridge Design Code," Canadian Standards Association, Toronto, ON, Canada, 2019, 875 pp.
5. ACI Committee 440, "Prestressing Concrete Structures with FRP Tendons (ACI 440.4R-04)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2004, 35 pp.
6. CAN/CSA-S6-00 (R2005), "Canadian Highway Bridge Design Code (Reaffirmed 2005) (Withdrawn)," Canadian Standards Association, Toronto, ON, Canada, 2000, 754 pp.
7. ACI Committee 440, "Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars (ACI 440.1R-06)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2006, 44 pp.

8. Guadagnini, M.; Pilakoutas, K.; and Waldron, P., "Shear Resistance of FRP RC Beams: Experimental Study," *Journal of Composites for Construction*, V. 10, No. 6, 2006, pp. 464-473.
9. Mistretta, F.; Puppio, M.L.; Camata, G.; and Nanni, A., "Analytical and Experimental Shear Evaluation of GFRP -Reinforced Concrete Beams," *Materials and Structures*, V. 56, No. 10, Nov. 2023, pp. 1-21.
10. Guérin, M.; Mohamed, H.M.; Benmokrane, B.; Nanni, A.; and Shield, C.K., "Eccentric Behavior of Full-Scale Reinforced Concrete Columns with Glass Fiber-Reinforced Polymer Bars and Ties," *ACI Structural Journal*, V. 115, No. 2, Mar. 2018, pp. 489-499.
11. Khan, Q.S.; Sheikh, M.N.; and Hadi, M.N.S., "Tension and Compression Testing of Fibre Reinforced Polymer (FRP) Bars," FRPRCS-12/APFIS-2015: Joint Conference of the 12th International Symposium on Fiber Reinforced Polymers for Reinforced Concrete Structures (FRPRCS-12) and the 5th Asia-Pacific Conference on Fiber Reinforced Polymers in Structures (APFIS-2015), Nanjing, China, Dec. 14-16, 2015.
12. Deitz, D.H.; Harik, I.E.; and Gesund, H., "Physical Properties of Glass Fiber Reinforced Polymer Rebars in Compression," *Journal of Composites for Construction*, V. 7, No. 4, 2003, pp. 363-366.
13. Khorramian, K., and Sadeghian, P., "Material Characterization of GFRP Bars in Compression Using a New Test Method," *Journal of Testing and Evaluation*, V. 49, No. 2, 2021, pp. 1037-1052.
14. AlAjarmeh, O.; Manalo, A.; Benmokrane, B.; Schubel, P.; Zeng, X.; Ahmad, A.; Hassanli, R.; and Sarbella, C.-D., "Compression Behavior of GFRP Bars Under Elevated In-Service Temperatures," *Construction and Building Materials*, V. 314, Part A, Jan. 2022.
15. Mirdarsoltany, M.; Roghani, H.; Sadegh Tale Masoule, M.; Khodadadi, N.; Ghahremaninezhad, A.; and Nanni, A., "Evaluating GFRP Bars Under Axial Compression and Quantifying Load-Damage Correlation," *Construction and Building Materials*, V. 409, Dec. 2023.

Agradecimiento a Alireza Asadian y Borna Hajimiragha, MST Rebar Inc., Woodbridge, ON, Canada, y Steven Nolan, Florida Department of Transportation, Tallahassee, FL, USA, por proveer la respuesta a esta pregunta.

Título original en inglés: Concrete Q&A. GFRP Bars in Compression Members

La traducción de este artículo correspondió al Capítulo de Puerto Rico



*Traductora:
Nicole Mejía Borrero*



*Revisor Técnico:
José M. Mejía Borrero*

CONVOCATORIA 2023

CONCRETO

LATINOAMÉRICA

Desde 2023 puedes publicar tus artículos de investigación y casos de estudio en nuestra revista.

¡Es muy fácil!

Descarga la 1) Guía de Publicación y 2) Carta de Solicitud en estos códigos QR:

1



2



Una vez descargada la Guía, conocerás los requisitos para publicación y podrás llenar la solicitud, firmarla y enviarla a la Revista Concreto Latinoamérica a través del correo concretolatam@gmail.com

Tú solicitud y artículo serán evaluados para su publicación.





CONCRETO
LATINOAMÉRICA