

CONCRETO

LATINOAMÉRICA

VOLUMEN VI | NÚMERO 12 | DICIEMBRE 2025

Ganadores de la 11ª Edición Anual de los
Reconocimientos a la Excelencia en la
Construcción con Concreto del ACI

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

Representantes de los Capítulos ACI de Latinoamérica:

Argentina

Dr. Raúl Bertero

Colombia

Dra. Nancy Torres Castellanos
Dr. Fabián Augusto Lamus Báez

Costa Rica

Ing. Minor Murillo Chacón

Ecuador Centro y Sur

Ing. MSc. Santiago Vélez Guayasamín

Guatemala

Ing. Xiomara Sapón Roldán
Ing. Luis Álvarez Valencia

México Noreste

Dr. Alejandro Durán Herrera

México Noroeste

Ing. Raúl Alvarado Barbachano

México Centro y Sur

Mtro. Sergio Valdés Constantino

México Sureste

Mtro. Josseph Eli Mandujano Zavala

República Dominicana

Ing. Piero Roberto Caputo Rodríguez

Perú

Ing. Julio Antonio Higashi Luy

Puerto Rico

Ing. Anabel N. Merejildo



La vía express de 8.9 km (5.5 millas) de largo en las islas Mactan en Filipinas, conecta Cordova con la ciudad de Cebu, reduciendo los congestionamientos viales y promoviendo la actividad económica. Terminado recientemente, a pesar del reto que significó la pandemia de Covid 19 y el Super Tifón Rai, el proyecto requirió de 185 000 m³ de concreto (241 970 yd³) y el uso de tecnologías de punta en su construcción y pavimentación.

Las mezclas de concreto privilegiaron la sustentabilidad, durabilidad, reducción del tiempo de construcción y colocación, usando cemento Tipo II, cenizas volantes, aditivos super-acelerantes y materiales locales. Este proyecto fue reconocido con el segundo lugar en la categoría de Puentes de Concreto, durante la última gala de entrega de Reconocimientos a la Excelencia en Construcción con concreto del ACI el pasado mes de octubre. (Para más información ver revista Concreto Latinoamérica de noviembre de 2025 Artículo 2.)

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 Diciembre de 2025. El Instituto no se hace responsable por las declaraciones u opiniones expresadas en sus publicaciones. Las publicaciones del Instituto no pueden ni pretenden suplantar el entrenamiento técnico individual, responsabilidad o juicio del usuario o de quien provee y presenta la información. Con el propósito de difundir el conocimiento técnico del concreto, se autoriza la difusión de la presente edición a los Capítulos del ACI de habla hispana entre su membresía y grupos de interés, sin embargo, será necesaria la autorización del American Concrete Institute para reproducir total o parcialmente los contenidos de este número salvo que se hagan para uso personal o académico y sin fines comerciales. Todos los materiales originales en inglés, y contenidos en este número de Concreto Latinoamérica en español, están protegidos por las leyes de Derechos de autor y propiedad industrial, tanto nacionales como internacionales.

COMITÉ EDITORIAL

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

Presidente del Comité Editorial:

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

Editor en Jefe:

Ing. José Lozano y Ruy Sánchez

Editores Asociados:

Dr. Lucio Guillermo López Yépez
Dra. Margareth Josefina Dugarte Coll
Dr. Francisco René Vázquez Leal

Asesor Técnico:

Dr. Alejandro Durán Herrera

Traducción:

Lic. Iliana M. Garza Gutiérrez

Comité de Artículos Originales

Ing. Xiomara Sapón Roldán
Ing. Thyssen Won Chang

Revisión Editorial:

Lic. Iliana M. Garza Gutiérrez

Administración y Logística:

Lic. Ana Durán Herrera

Dirección Creativa:

MDG. Rosa Otilia Armendariz Solís

Diseño Gráfico:

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

REVISORES EDITORIALES

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

Ing. José Lozano y Ruy Sánchez
Lic. Iliana M. Garza Gutiérrez
Dr. Lucio Guillermo López Yépez

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



American Concrete Institute
Always advancing

¡Únete hoy!

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



CONTENIDO

- 1** | **Programa de Premios y Reconocimientos del ACI para 2026**
¡Envíe sus nominaciones ya!
- 2** | **Novedades en Tecnología. Cemento estructural LC3 de SCG**
La innovación con bajas emisiones de carbono impulsa la construcción sostenible
Por Chalermwut Snguanyat, Somchai Chitwarodom, Sakkarin Luangkamchorn, Oraya Assawanawachart y Pawat Sukprasert
- 3** | **Desafíos y oportunidades para el diseño sísmico del concreto estructural reforzado con barras GFRP**
Por Kent A. Harries, Carlos E. Ospina, M. Lee Marsh, Sergio M. Alcocer y Ravi Kanitkar
- 4** | **Cálculo de Deflexiones Utilizando el CÓDIGO-318-19 de ACI y Otros Más, Parte 5**
Extensión propuesta para el concreto presforzado.
Por Peter H. Bischoff, Wassim Nasreddine y Hani Nassif
- 5** | **Asociación Americana de Contratistas de Concreto. Construcciones de concreto masivo**
Posicionamiento # 49
- 6** | **Preguntas y Respuestas. Conceptos erróneos de GFRP – Parte 2**

CONVOCATORIA

CONCRETO LATINOAMÉRICA

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

*Descarga la Guía
de Publicación*



¡Escanea para
conocer los
requisitos!

*Llena la Carta
de Solicitud*



¡Escanea para
completar tus
datos!

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

Tu solicitud y artículo serán evaluados para su publicación.

01

Programa de Premios y Reconocimientos del ACI para 2026

¡Envíe sus nominaciones ya!

El Instituto Americano del Concreto (ACI) destaca las contribuciones y esfuerzos de sus miembros globales y de la industria del concreto a nivel mundial a través de su variado programa de premios y reconocimientos.

El ACI solicita nominaciones para el ciclo 2026.



Las nominaciones pueden provenir de cualquier fuente, incluyendo autonominaciones. Si usted conoce a alguna persona u organización merecedora de alguno de los reconocimientos, por favor, colabore con el ACI presentando una nominación en la categoría de premio correspondiente. Los galardonados serán invitados a asistir a la Convención de Otoño de 2026 del ACI en Atlanta, Georgia, EE. UU. o a la de Primavera de 2027 en Las Vegas, Nevada, EE. UU. para recibir su reconocimiento. Se aceptan nominaciones durante todo el año.

El plazo para la presentación de nominaciones termina el 15 de febrero de 2026 para:

Membresía Honoraria, el máximo honor del ACI, que se otorga a personas eminentes en su campo y a quienes prestan un servicio extraordinario y meritorio al Instituto. Los nominados son evaluados según su grado de:

- Haber ganado un reconocimiento notable por su servicio en cualquier campo de actividad alineado con los objetivos del Instituto;
- Haber realizado contribuciones significativas al ACI y/o a la industria del concreto;
- Haber hecho contribuciones que hayan beneficiado a su país; y
- Demostrar una influencia positiva en la industria conservando los más altos estándares de conducta, ética e integridad.

La **Medalla Arthur R. Anderson**, establecida en 1972 en reconocimiento al expresidente del ACI, Arthur R. Anderson, se otorga por contribuciones destacadas al avance del conocimiento del concreto como material de construcción. La familia de Arthur R. Anderson, junto con la empresa que fundó Anderson con su hermano, Concrete Technology Corporation, han seguido patrocinando la Medalla Arthur R. Anderson en su honor hasta 2025.

El **Premios a la Colaboración Internacional Michel Bakhoun** se estableció en 2024 y honra la memoria del profesor y miembro del ACI, Michel Bakhoun, ingeniero estructural, investigador y educador de renombre internacional. Este premio se otorga por contribuciones destacadas a colaboraciones internacionales para el avance del conocimiento sobre concreto armado y preesforzado, así como para el desarrollo y la aplicación de los códigos, especificaciones y guías del ACI a nivel mundial, en materia de innovaciones en el diseño y las prácticas de construcción de estructuras de concreto.

El **Premio al Constructor de Concreto Roger H. Corbetta** se estableció en 1972 en honor al expresidente del ACI, Roger H. Corbetta. Este premio se otorga a una persona u organización que, como constructor, haya realizado contribuciones significativas al progreso de los métodos de construcción con concreto.

El **Premio Henry L. Kennedy**, establecido en 1958, honra a Henry L. Kennedy, expresidente del ACI. Este premio se otorga por un servicio técnico o administrativo sobresaliente al Instituto. La selección para el Premio Kennedy se basa en una actividad o servicio relevante que haya enriquecido el prestigio del Instituto; un liderazgo destacado en el trabajo técnico, administrativo o en comités especiales; u otro servicio distinguido al Instituto.

El **Premio Clyde E. Kesler a la Educación**, establecido en 1974, honra a Clyde E. Kesler, expresidente del ACI y director asociado de Ingeniería Civil en la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign. Este premio se otorga por contribuciones destacadas en la educación en el amplio campo del concreto. (El nombre del premio era anteriormente Premio Joe W. Kelly).

El **Premio Robert F. Mast** fue establecido en 2021 por el Instituto en reconocimiento a Robert F. Mast, expresidente del ACI y miembro durante muchos años del Comité 318 del ACI, Código de Construcción de Concreto Estructural. El premio se otorga por contribuciones destacadas a los códigos y prácticas de diseño práctico, en particular en las áreas de concreto prefabricado y pretensado, y al avance de los conocimientos sobre concreto en otros áreas técnicas del diseño.

El **Premio Michael Thomas a la Durabilidad del Concreto**, establecido en 2023, honra a Michael D.A. Thomas, FACI, por su liderazgo imaginativo y sobresaliente en el fomento de la excelencia en la durabilidad del concreto. Este premio se otorga por contribuciones destacadas al avance del conocimiento relacionado con la durabilidad del concreto.

La **Medalla Henry C. Turner**, entregada desde 1927 en honor al expresidente del ACI, Henry C. Turner, se otorga por logros o servicios notables en la industria del concreto.

La **Medalla Charles S. Whitney**, fundada en 1961 por Ammann & Whitney, honra la memoria de Charles S. Whitney. Esta medalla se otorga por trabajos destacados de desarrollo de ingeniería en diseño o construcción con concreto.

El **Premio ACI a la Sostenibilidad del Concreto**, establecido en 2010, reconoce a personas o equipos que hayan contribuido a destacar el papel del concreto en la sostenibilidad. Las contribuciones notables pueden ser la demostración o mejora de las características sostenibles del concreto mediante la investigación, el diseño, la educación o la construcción, o el uso del concreto de formas innovadoras para contribuir a un entorno construido más sostenible.

El **Premio ACI a la Educación**, se estableció en 2015 para reconocer a una persona que haya realizado contribuciones notables al avance de las iniciativas del Comité de Actividades Educativas de ACI (EAC). Estas iniciativas incluyen documentos, videos u otros productos desarrollados por los comités del EAC; seminarios; seminarios web; cursos de la Universidad ACI; y otros programas desarrollados por el EAC o sus comités. Las contribuciones notables pueden ser, entre otras: liderazgo en el desarrollo de productos o programas del EAC, avances significativos o promoción del uso de productos o programas del EAC, y contribuciones a las actividades de los comités del EAC. Para este premio no se considerarán candidaturas recibidas mediante autonominación. *Los nominados no requieren ser miembros del ACI.*

El **Premio de Impacto del ACI**, establecido en 2014, reconoce a personas u organizaciones cuyo trabajo e iniciativas innovadoras han impulsado la misión, la visión y los objetivos estratégicos de ACI. Este premio reconoce prácticas innovadoras, programas transformadores o alianzas que marcan la diferencia en la industria del concreto, a nivel local o global. Ya sea mediante la mejora o el desarrollo de nuevos programas y/o productos, tecnología o actividades de divulgación de ACI, los galardonados son embajadores que contribuyen a forjar el futuro del concreto. (Anteriormente, el nombre del premio era Premio al Avance Estratégico de ACI). *Los candidatos nominados a este reconocimiento pueden ser personas, empresas, corporaciones u organizaciones afiliadas al ACI. Las nominaciones deben ser presentadas por un miembro o Capítulo del ACI.*

Los nominados al **Premio al Logro Profesional para Miembros Jóvenes del ACI** se evalúan por sus logros en participación activa en el capítulo local y a nivel nacional e internacional; por su servicio al avance de la industria; su experiencia demostrada en competencia técnica, carácter e integridad; su mentoría de estudiantes y jóvenes profesionales; y otras pruebas de mérito que hayan contribuido al logro de los objetivos del Instituto. *Para este reconocimiento no se considerarán las autonominaciones. Las personas nominadas deben ser miembros del ACI y no tener más de 35 años de edad.*

El plazo para la presentación de nominaciones termina el 31 de mayo de 2026 para:

La persona elegida como **Miembro “Fellow” del Instituto** deberá haber realizado contribuciones destacadas a la producción o el uso de materiales, productos y estructuras de concreto en las áreas de educación, investigación, desarrollo, diseño, construcción o gestión. La persona nominada debe ser miembro del ACI durante al menos 15 años, incluyendo 3 de los últimos 5 años.

Establecido en 2004, el **Premio de Certificación del ACI** reconoce a personas y organizaciones que han realizado contribuciones notables al avance de la certificación del ACI mediante su participación en las áreas generales de desarrollo, mantenimiento, entrega, promoción, especificación o cumplimiento de los requisitos para los programas de certificación del ACI. *No se considerarán las autonominaciones. El nominado debe ser miembro del ACI.*

El plazo para la presentación de nominaciones termina el 30 de junio de 2026 para:

El **Premio Walter P. Moore, Jr. al Logro Docente** reconoce a los nuevos docentes por su excelencia e innovación en la enseñanza del diseño, los materiales o la construcción de concreto. El premio honra al difunto Walter P. Moore Jr., FACI, exmiembro de la Junta Directiva de ACI, ingeniero estructural y educador en Texas. *No se considerarán las autonominaciones. El candidato nominado debe ser miembro de ACI y haber impartido docencia durante un máximo de 7 años calendario en todos los puestos docentes antes del 1 de enero de 2019.*

El plazo para la presentación de nominaciones termina el 10 de julio de 2026 para:

El **Premio a las Actividades del Capítulo** se fundó en 1975 para reconocer el servicio destacado en la promoción y el desarrollo de uno o más capítulos por parte de un miembro de ACI. Se anima a los directivos de los capítulos a presentar los formularios de nominación para sus capítulos locales. *El nominado debe ser miembro de ACI.*

Los formularios para las nominaciones se encuentran disponibles en: www.concrete.org/newsandevents/honorsandawards.aspx.

Para obtener más información sobre estos premios o los próximos premios, comuníquese con Rachel Belcher, Coordinadora de Premios de ACI, en ACIAwards@concrete.org.

Título original en inglés:
2026 ACI Honors and
Awards Program

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



*Traductor y
Revisor Técnico:*
Ing. Santiago Vélez
Guayasamín MSc DIC

Cemento estructural LC3 de SCG

La innovación con bajas emisiones de carbono impulsa la construcción sostenible

Por Chalermwut Snguanyat, Somchai Chitwarodom, Sakkarin Luangkamchorn, Oraya Assawanawachart, y Pawat Sukprasert

A través de la empresa Cement and Green Solutions, SCG Cement Co., Ltd. (SCG), un fabricante de materiales de construcción en Tailandia, se compromete a impulsar el sector de la construcción tailandés hacia un futuro sostenible como parte de la hoja de ruta hacia cero emisiones netas para 2050. Guiada por los principios de una economía baja en carbono y la responsabilidad ambiental, SCG está impulsando la innovación en productos, procesos y operaciones para lograr cero emisiones netas de gases de efecto invernadero para 2050. Una de las estrategias fundamentales de la empresa para alcanzar el objetivo de cero emisiones netas es el desarrollo de productos de bajo carbono, en particular el cemento. Esto implica el uso de combustibles alternos, como la biomasa y los combustibles derivados de residuos, así como fuentes de energía renovables, como la energía solar. SCG también se ha centrado en reducir el contenido de clinker en el cemento (Fig. 1).

La empresa ha implementado el cemento de piedra caliza, logrando una reducción de casi el 10% en las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) en comparación con el cemento Portland ordinario (CPO). SCG también ha desarrollado un cemento que incorpora tecnología de arcilla calcinada con piedra caliza, que actualmente reduce las emisiones de carbono en más de un 30%, con el objetivo de alcanzar una reducción de hasta el 50% en comparación con el CPO. La compañía está aumentando la producción y promoviendo la adopción del cemento de arcilla calcinada con piedra caliza (LC3) para diversas aplicaciones.

SCG es la primera empresa de Tailandia en desarrollar y producir con éxito LC3, lo que supone un paso adelante en los esfuerzos del país por promover materiales de construcción sostenibles.

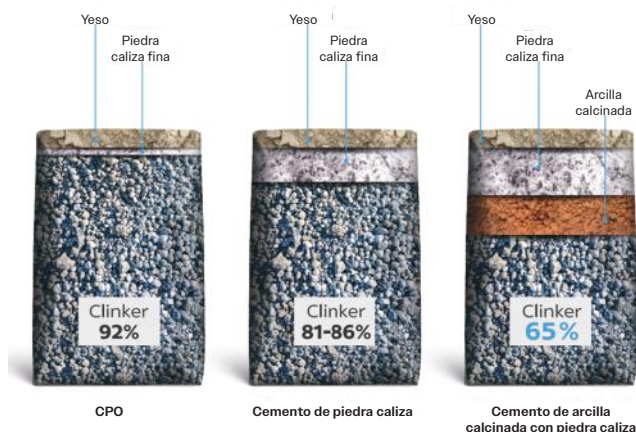


Fig. 1: Desarrollo del cemento bajo carbono SCG



Fig. 2: Horno rotatorio utilizado para calcinar arcilla



Fig. 3: La arcilla calcinada después de salir del horno es tanto de color rojizo (izquierda) como gris (derecha)

El LC3 es un cemento mezclado que incorpora materiales disponibles localmente para reducir el impacto ambiental sin comprometer el desempeño. La materia prima principal, la arcilla, se obtiene de las reservas minerales de SCG ubicadas en la región central de Tailandia, lo que garantiza una calidad constante y una cadena de suministro seguro. Esta arcilla rica en caolinita se somete a un proceso de activación térmica conocido como calcinación. Se introduce en un horno rotatorio (Fig. 2) y se calienta a una temperatura controlada de entre 700 y 800 °C (1 292 y 1 472 °F). En este rango, la estructura de la caolinita se transforma en una forma reactiva conocida como metacaolín. La arcilla calcinada sale del horno con unos característicos tonos rojizos y grises (Fig. 3), lo que indica que la activación se ha realizado correctamente.

Tras el proceso de calcinación, la arcilla activada se enfría y se muele finamente con clinker, yeso y piedra caliza. El proceso de molienda se optimiza para lograr una distribución uniforme del tamaño de las partículas, lo cual es fundamental para el desempeño y la trabajabilidad del cemento. La arcilla calcinada actúa como un material puzolánico, reaccionando con el hidróxido de calcio liberado durante la hidratación del cemento para formar hidratos de silicato de calcio (C-S-H) adicionales, que mejoran la resistencia y la durabilidad de la matriz del cemento. Mientras tanto, la piedra caliza fina interactúa químicamente con la alúmina presente en la arcilla, lo que contribuye a una ganancia temprana de resistencia mediante la formación de fases de carboaluminato. El efecto sinérgico entre la arcilla calcinada y la piedra caliza permite una reducción sustancial del contenido de clinker, una de las principales fuentes de emisiones de CO₂ en la producción tradicional de cemento.

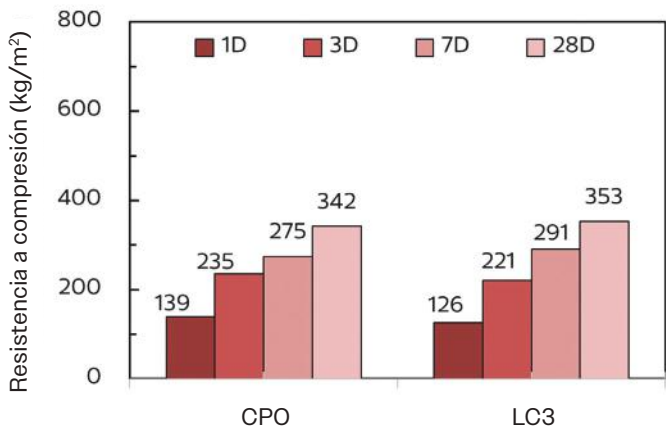


Fig. 4: Resistencia a la compresión del concreto de CPO y LC3 con una relación agua/aglutinante (a/a) de 0.60 y 20% de sustitución con ceniza volante. (Nota: 1 kg/m² = 0.14 psi)

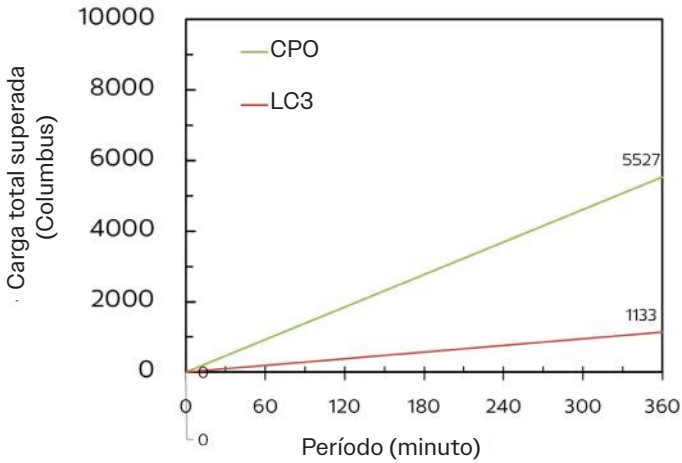


Fig. 5: Resultados de la prueba rápida de permeabilidad a los cloruros de concretos de CPO y LC3 con una relación a/a de 0.60 y 20% de sustitución con ceniza volante.

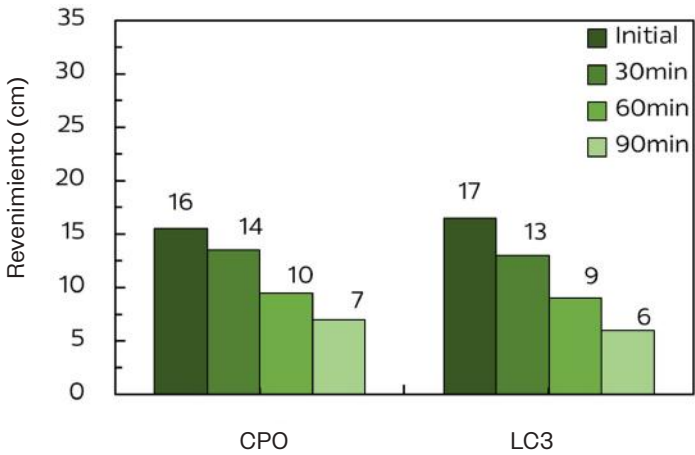


Fig. 6: Retención de la trabajabilidad del concreto CPO y LC3 con una relación a/a de 0.60 y 20% de sustitución con ceniza volante (Nota: 1 cm = 0.4 pulg.)

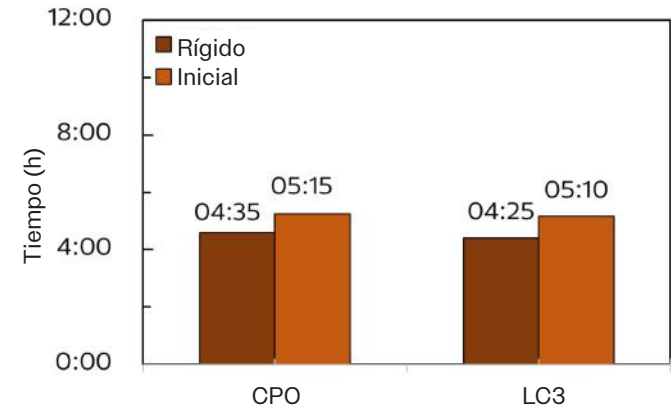


Fig. 7: Tiempo de fraguado de los concretos CPO y LC3 con una relación a/a de 0.60 y 20% de sustitución con ceniza volante.



Fig. 8: Instalación de una fachada decorativa de concreto LC3

El desempeño del concreto con LC3 ha sido ampliamente comprobado. En comparación con el CPO, el LC3 ofrece propiedades mecánicas equivalentes, incluyendo resistencia a la compresión a los 7 y 28 días (Fig. 4), módulo de elasticidad y deformación a largo plazo (Creep). También proporciona una mayor durabilidad con mejor resistencia a los cloruros (Fig. 5) y al sulfato, así como una menor contracción. Además, se pueden conseguir propiedades similares en estado fresco, como la retención de la trabajabilidad (Fig. 6) y el tiempo de fraguado, con el uso adecuado de aditivos para concreto (Fig. 7). En consecuencia, el uso de LC3 de SCG puede llevar a la reducción de las emisiones de carbono del concreto en más de un 30%. Desde 2024, el LC3 se ha utilizado en diversas aplicaciones no estructurales de concreto,

como andadores, revestimientos y fachadas decorativas, así como en aplicaciones estructurales como pavimentos de concreto. La Figura 8 muestra la instalación de una fachada decorativa producida con LC3. La combinación de concreto LC3 y fibras sintéticas también se utilizó como recubrimiento en un taller de laboratorio de concreto de SCG, que puede reducir aún más la huella de carbono de la estructura con concreto de CPO y refuerzo de acero que controla las grietas (Fig. 9). A partir de este año, SCG planea ampliar su uso en componentes estructurales, como vigas y columnas para viviendas de baja altura, para reforzar la confianza de los clientes en este nuevo cemento bajo en carbono y promover la descarbonización dentro de la industria del concreto y la construcción.



Fig. 9: Fibras utilizadas en el concreto LC3 y en el vaciado del concreto LC3 reforzado con fibras.

El tono tierra natural del cemento LC3 lo diferencia del cemento gris convencional (SCG define el color como “arcilla”). Aunque esta diferencia de color puede ser notable, se considera ventajosa en el diseño arquitectónico, especialmente en proyectos que enfatizan una estética natural y terrosa.

El concreto con LC3 fue seleccionado para las paredes y el interior de Harudot Khaoyai por Nana Coffee Roasters debido a su desempeño y color. Este café es el primer proyecto en Tailandia y en la región de la Asociación de Naciones del Sudeste Asiático (ASEAN) que utiliza LC3 para aplicaciones de acabado del concreto (Fig. 10). Las paredes tienen espesores que van de 70 a 100 mm (2.75 a 4 pulg.), con un volumen total de concreto de 115 m³ (150 yd³), utilizando 38 toneladas (42 t) de LC3.

El LC3 atrajo la atención del diseñador por su utilización en el diseño sostenible. La construcción mundial está cambiando hacia la construcción ecológica, y los fabricantes de cemento deben centrarse en la investigación y el desarrollo de cemento bajo en carbono para alinearse con esta tendencia. En el futuro, el LC3 se utilizará tanto en cementos como en elementos estructurales decorativos.

Chalermwut Snguanyat, miembro de ACI, es director de Tecnología del Concreto y la Construcción en SCG Cement Co., Ltd.



Somchai Chitwarodom es director de Tecnología del Cemento y el Mortero en SCG Cement Co., Ltd.

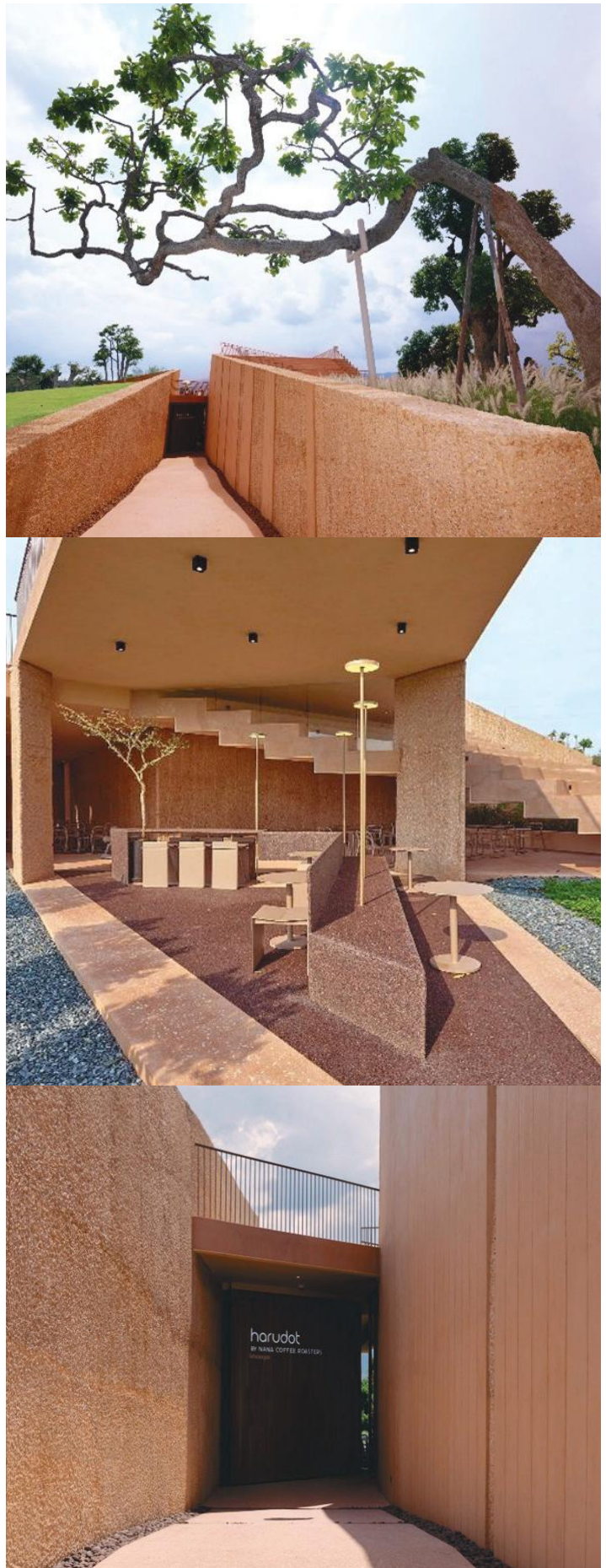


Fig. 10: Utilización del concreto LC3 en la construcción del Harudot Khaoyai de Nana Coffee Roasters en Tailandia.

Sakkarin Luangkamchorn es líder del Grupo de Desarrollo de Productos de Concreto en SCG Cement Co., Ltd.



Oraya Assawanawachart es la líder del Grupo de Clinker y Cemento de SCG Cement Co., Ltd.



Pawat Sukprasert es el gerente de Estrategia de Productos Decorativos de Marketing y Ventas de SCG Cement Co., Ltd.



Título original en inglés:
TechSpotlight.
SCG LC3 Structural Cement
Low-carbon innovation driving green construction

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



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



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

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

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

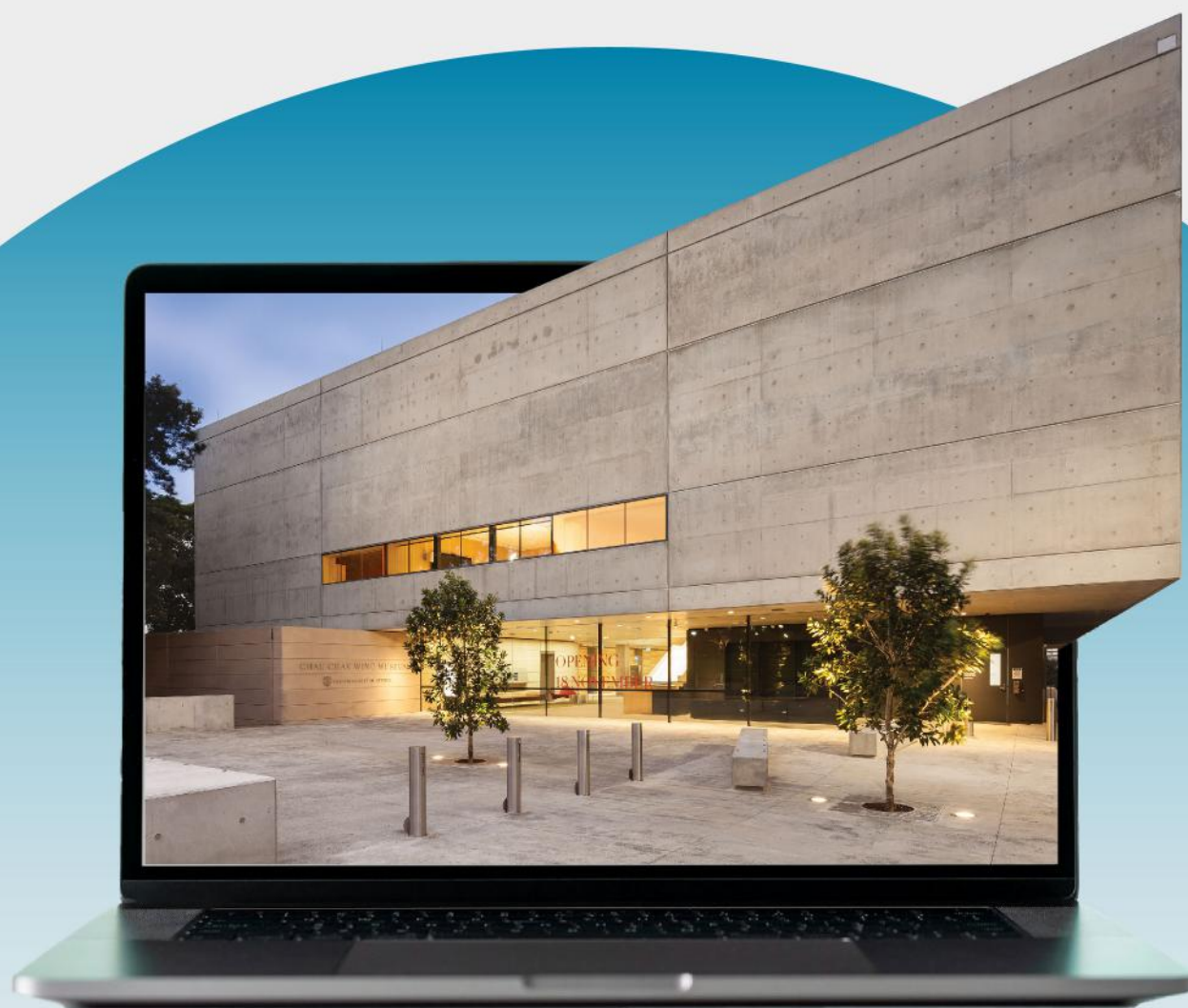
AQUÍ ENCUENTRAS...

PUBLICACIONES PASADAS

DIRECTORIO CAPÍTULOS ACI

NOTICIAS

EVENTOS



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

Desafíos y oportunidades para el diseño sísmico del concreto estructural reforzado con barras GFRP

Por Kent A. Harries, Carlos E. Ospina, M. Lee Marsh, Sergio M. Alcocer y Ravi Kanitkar

Concreto reforzado con GFRP en los códigos de construcción

En septiembre de 2022 se publicó el Código ACI 440.11-22: Requisitos del Reglamento para Concreto Estructural Reforzado con Barras GFRP. Su prefacio aclara que el código “depende del ACI 318-19 y adopta su numeración de capítulos y secciones”. Los capítulos 12 (diafragmas) y 18 (estructuras sismorresistentes) del ACI 318-19¹ se identifican como “No considerados” en 440.11-22, aunque se espera que se incluyan en futuras versiones conforme avance la investigación.

Como resultado, una limitación importante de la primera generación del ACI 440.11-22 es que, como dicta la sección 1.4.12, esta “no aplica al diseño y construcción de elementos en estructuras clasificadas como Categorías de Diseño Sísmico (SDC por sus siglas en inglés) D a F, o al diseño y construcción de elementos que forman parte del sistema [sísmico] de resistencia lateral para estructuras clasificadas como SDC B o C”.

Poco después de su publicación, el ACI 440.11-22 fue adoptado por referencia en el Código Internacional de la Edificación 2024 (IBC² por sus siglas en inglés), como el estándar prescrito para “concreto estructural reforzado internamente con GFRP” (Sección 1901.2.1.). El alcance de la adopción del IBC 2024 fue limitado únicamente a estructuras SDC A.

Durante los últimos 20 años se ha observado un incremento en el uso de barras de polímero reforzado con fibra de vidrio (GFRP, por sus siglas en inglés) para el refuerzo de estructuras de concreto. Sin embargo, la aplicación de este tipo de refuerzo en proyectos de infraestructura civil enfrenta desafíos asociados con el desempeño sísmico de las estructuras de concreto reforzado con GFRP (GFRP-RC). Actualmente, el GFRP-RC solo es permitido por el International Building Code (IBC)² 2024 para uso según ASCE/SEI 7-22³ en estructuras clasificadas en la Categoría de Diseño Sísmico (SDC) A. Una futura adopción del GFRP-RC en aplicaciones sísmicas es posible si se superan los desafíos asociados principalmente con el comportamiento elástico hasta la falla del material.

Una aproximación explorada en este artículo es el uso de refuerzo GFRP en elementos estructurales que no están destinados a formar parte del mecanismo inelástico (de fluencia) del sistema de resistencia ante fuerzas sísmicas (SFRS). La fluencia en tales elementos no es requerida ni deseada. El potencial del comportamiento inelástico se suprime utilizando principios de diseño por capacidad, haciendo de tales elementos componentes “protegidos por capacidad”.

Un objetivo principal de los comités ACI 440C (Código para concreto reforzado con FRP), responsable del Código ACI 440.11-22¹, y ACI 440 (Refuerzo de polímeros reforzados de fibra), responsable del desarrollo de guías, especificaciones y normas relacionadas al FRP, incluyendo la guía, ACI PRC-440.1-15,⁴ y especificaciones de construcción, ACI SPEC-440.5-22,⁵ es desarrollar disposiciones y provisiones del código que permitan un uso más amplio del GFRP-RC en aplicaciones de diseño sísmico. La presidente del Comité 440, María López, FACI, encargó a los autores proponer una hoja de ruta para desarrollar e implementar dichas disposiciones. Este artículo resume los hallazgos y recomendaciones derivados de este ejercicio, reportando los desafíos del desarrollo e implementación, como a su vez oportunidades para el diseño sísmico de GFRP-RC más allá del SDC A.

Limitación principal del GFRP-RC en el contexto del diseño sísmico

Fundamentos del ACI 318-19: La filosofía del diseño sísmico en ACI 318-19⁶ y ASCE/SEI 7-22³ proviene de la suposición de, y se apoya en, que la ductilidad inelástica del sistema estructural, donde el acero de refuerzo fluye de manera controlada en ubicaciones seleccionadas, para proveer resistencia necesaria y suficiente capacidad de deformación para un miembro de concreto reforzado para desarrollar la ductilidad establecida con base en el diseño del ACI-318-19 (Secciones 20.2.2.1 y 20.2.2.2.). Estas suposiciones están implícitas en el cálculo de la resistencia última de miembros y forman la base para la asunción de la limitada redistribución de fuerzas internas inherentes en todas las provisiones de diseño del ACI-318-19, sean sísmicas o no.

Sistemas de resistencia sísmica (SFRS): Aunque es de conocimiento que miembros GFRP-RC pueden desarrollar cierta capacidad de deformación más allá del rango puramente elástico cuando se someten a cargas sísmicas, aún no existen límites aceptados de deriva para estructuras reforzadas con GFRP. La definición de dichos límites en un marco de diseño basado en fuerzas (ASCE/SEI 7-22³) es difícil sin adoptar factores de modificación de respuesta (factores R) muy bajos (por ejemplo, menores a 2).

Un diseño basado en desplazamientos podría proporcionar un marco más adecuado para definir condiciones el desempeño estructural. Principalmente por esta razón, mientras el diseño para SDC B y C podría ser posible, es improbable que GFRP-RC sea adecuado para SFRS en estructuras clasificadas como SDC D o superiores, salvo que se complemente con acero en los componentes estructurales que activamente responden a fuerzas internas limitadas, como se asume por el factor R y tipo de SFRS escogido y proveer la disipación de energía asociada. Los elementos con GFRP serían empleados únicamente en elementos o componentes protegidos por capacidad.

Un segundo enfoque sería un GFRP SFRS no tradicional que es claramente demostrado a través de pruebas experimentales que posee la libertad de soportar deformaciones no lineales consistentes con las demandas de un SDC D o superior, y proveer con suficiente disipación de energía, cumpliendo con los principios principales de la capacidad sísmica.

Sistemas híbridos: Los autores aclaran que el ACI 440.11-22 sí permite sistemas estructurales híbridos: el SFRS con acero reforzado, y los componentes no sísmicos con GFRP-RC, para estructuras en SDC B y C. Sin embargo, el IBC 2024² solo permite GFRP-RC en SDC A.

Desafíos para implementar barras GFRP en aplicaciones sísmicas

El principal desafío en el diseño sísmico de GFRP-RC es la ausencia de disposiciones para diafragmas y para cortante por fricción. El ACI 440.11-22 indica en su Comentario del Capítulo R12 que “el diseño de diafragmas reforzados de GFRP de concretos colados en sitio es posible, siempre y cuando dichos diagramas posean suficiente rigidez para transferir fuerzas entre los elementos del sistema de resistencia lateral sin colectores, como puede ocurrir en estructuras de baja altura o en SDC A¹.” Dichos diafragmas “pueden ser tratados como muros horizontales en el cual el plano de diseño de resistencia al cortante es calculado similarmente al que se usa para el diseño cortante para muros de concreto reforzado con GFRP¹.”

En el contexto de diseño basado en fuerzas, no existen disposiciones estructurales que integren sistemas GFRP-RC dentro del marco sísmico del ASCE/SEI 7-22³. Es improbable que cualquiera este de acuerdo que las estructuras GFRP-RC sean equivalentes a estructuras con acero respecto a los factores de modificación (R), factores de amplificación de deflexión (C_d) o factores de sobre diseño (Ω_o). La Sección 12.2.1.1³ de ASCE/SEI 7-22 permite sistemas alternativos, lo cual proporciona una oportunidad para que el Código ACI-440.11-22 complemente dicha información. Por ejemplo, ASCE/SEI 74-23⁷ ha seguido este camino, prescribiendo factores de modificación de respuesta sísmica para el diseño de estructuras pultruidas de GFRP.

Existen muy pocas guías disponibles para el diseñador respecto al “diseño protegido por capacidad” de sistemas de concreto reforzado con GFRP (GFRP-RC) (véase el recuadro al final del artículo). La ASCE/SEI 7-22³ propone un enfoque de diseño basado en fuerzas, en el cual los factores R reducen las fuerzas determinadas elásticamente y los factores Ω_o incrementan posteriormente las fuerzas de diseño para ciertos elementos —como los colectores— que deberían estar protegidos por

capacidad. Sin embargo, no necesariamente se desarrolla un mecanismo plástico en este proceso de diseño actual y, además, no se verifica su formación. Sin identificar y cuantificar esta fuerza “fusible”, un verdadero diseño protegido por capacidad no es posible. Tampoco existe suficiente guía en ASCE/SEI 7-22³ ni en el Código ACI-318-19 que indique cuales elementos no forman parte del sistema de resistencia ante fuerzas sísmicas (SFRS) —aquellos que podrían diseñarse elásticamente en estructuras clasificadas como SDC B y C. Por lo tanto, no está claro cómo aplicar el Código ACI-440.11-22 a las categorías SDC B y C.

La “calibración” de las disposiciones no sísmicas del Código ACI-440.11-22 para que coincidan, en la medida posible, con el formato del Código ACI-318-19, ha estado basada principalmente en relaciones modulares (GFRP respecto al acero) y en límites de deformación empíricos para el diseño por resistencia. En muchos casos, no está claro si estas calibraciones pueden extenderse a aplicaciones sísmicas, incluidas aquellas en las cuales se utiliza un enfoque de diseño protegido por capacidad “nocional o conceptual”. Sin embargo, si se utiliza un enfoque formal de diseño protegido por capacidad, como ocurre con el diseño sísmico basado en desempeño (PBSD) o con enfoques similares al de ASCE/SEI 41-23⁸, garantizar un comportamiento elástico de los elementos protegidos por capacidad —incluidos aquellos reforzados con GFRP— constituiría un enfoque de diseño claro y racional.

Otros desafíos percibidos para la implementación son probablemente más fáciles de abordar mediante proyectos de investigación específicos; entre ellos se incluyen:

- Ensayos a escala real de estructuras GFRP-RC: Se han realizado numerosas pruebas de elementos y sub-ensambles GFRP-RC bajo cargas sísmicas simuladas. Sin embargo, no existen pruebas de una estructura GFRP-RC a escala real. Esto deja prácticamente sin evidencia experimental para examinar los distintos mecanismos de disipación de energía, así como la capacidad real de deriva de las estructuras GFRP-RC. La respuesta sísmica de una estructura en una prueba dinámica puede diferir de la observada en una prueba de subensamble;
- Ruptura por fluencia a largo plazo (creep-rupture): Aunque el ACI 440.11-22 limita el esfuerzo

sostenido a $0.30 f_{tu}$ (sección 24.6), este límite podría no ser suficiente para las condiciones únicas de resistencia bajo cargas sísmicas.

- Respuesta histerética del GFRP-RC: Cuando se someten a cargas cíclicas como elementos principales del SFRS, las columnas GFRP-RC y las conexiones viga-columna exhiben un comportamiento histerético “pinchado”, y las barras GFRP tienden a pandear prematuramente. Disposiciones destinadas a prevenir el pandeo de barras y a garantizar su estabilidad mediante límites objetivos de deriva lateral para las distintas categorías de diseño sísmico (SDC) ayudarían a mitigar esto.
- Anclaje y empalme mecánico de barras GFRP: Se requieren medios apropiados para anclar y empalmar barras GFRP, incluyendo una comprensión completa del deslizamiento de barras GFRP con respecto al concreto bajo carga cíclica; esto puede incluir empalmes con barras de acero o el desarrollo de anclajes especiales de GFRP.
- Uso “híbrido” de refuerzo GFRP y acero en un mismo miembro: Fundamentalmente, un miembro híbrido (distinto de un sistema estructural híbrido) tiene el potencial de proporcionar o restaurar la ductilidad necesaria para el diseño sísmico basado en fuerzas.⁹

Oportunidades y recomendaciones para los Comités ACI 440 y 440C y para la comunidad de diseñadores con FRP

Los autores recomiendan un enfoque prudente. Considerando los recursos frecuentemente limitados disponibles para la innovación, recomendamos primero habilitar aplicaciones particularmente prometedoras y desarrollar disposiciones sísmicas adecuadas para SDC B sin restricciones y, posteriormente, para SDC C. Ante la ausencia de evidencia experimental —especialmente en estructuras GFRP-RC a escala real— no consideramos que las disposiciones actuales basadas en fuerzas para SFRS en estructuras asignadas a SDC D o superiores sean viables, aunque debería considerarse permitir GFRP-RC en componentes que no formen parte del SFRS en SDC D.

Para permitir el alcance completo del Código ACI-440.11-22, el cual permite GFRP-RC en miembros que no forman parte del SFRS en edificaciones clasificadas como SDC B y C, se recomienda una documentación más completa que demuestre que las disposiciones de detallado existentes permiten derivas/deformaciones adecuadas en dichos miembros. Hay un número considerable de trabajos que parece respaldar esta afirmación, pero los detalles necesarios deben ser documentados y/o abordados sistemáticamente por ACI PRC-440.1-15 y por el Código ACI-440.11-22.

Diafragmas y cortante por fricción

Antes de ampliar el alcance del Código ACI-440.11-22, se requieren disposiciones para el diseño de diafragmas GFRP-RC y del cortante por fricción asociado para habilitar adecuadamente las estructuras asignadas a SDC A y promover un desempeño adecuado de los miembros que no forman parte del SFRS en SDC B y C. Los diafragmas GFRP-RC deberían ser elementos protegidos por capacidad (véase el recuadro siguiente). Los diafragmas que no requieren colectores pueden, de hecho, ser “tratados como un muro horizontal”, aunque podría ser apropiado establecer un límite inferior para el esfuerzo cortante máximo en el plano.

El Código ACI-440.11-22 limita el esfuerzo cortante en el plano en muros a $0.2 f'_c$ (en unidades psi). En la práctica canadiense¹⁰, por ejemplo, el esfuerzo cortante en diafragmas para diseño sísmico se limita a $0.078 f'_c$ (en unidades psi).

Protección de capacidad y diseño basado en el desempeño

Para su adopción inmediata en contextos específicos de estructuras, pueden identificarse aplicaciones para miembros y sistemas GFRP-RC que sean racionales y en las cuales el diseñador esté motivado a seleccionar barras GFRP en lugar de acero. Estos serán con frecuencia sistemas que ya se diseñan como “protegidos por capacidad” o esencialmente elásticos (es decir, se espera de manera inherente que su comportamiento permanezca dentro del rango elástico), y pueden incluir: cimentaciones en ambientes agresivos, estructuras de ingeniería ambiental (por ejemplo, algunos tanques, alcantarillas o vertederos), estructuras marinas, losas sobre terreno, muros de contención (si se diseñan para deslizarse), y otras estructuras que convencionalmente se diseñan de manera “elástica”.

Para avanzar el uso de GFRP-RC en aplicaciones sísmicas generales a largo plazo, se recomienda implementar un enfoque de diseño basado en desempeño. Dicho enfoque requeriría apartarse de la dependencia del Código ACI-318-19 para aplicaciones sísmicas y se beneficiaría de las recomendaciones desarrolladas por el Comité ACI 374, Diseño Sísmico Basado en Desempeño de Edificios de Concreto. Un enfoque de este tipo requiere una evaluación de capacidad de desplazamiento específica del proyecto, menos prescriptiva y más rigurosa (y explícita), que permita separarse del enfoque semi empírico del factor R de ASCE/SEI 7-22.³ Los miembros estructurales o acciones se clasificarían como controlados por fuerza o controlados por desplazamiento (similar a ASCE/SEI 41-23⁸) y se diseñarían con base en su función específica en la resistencia sísmica: acciones limitadoras de fuerza (disipadoras de energía) o acciones protegidas por capacidad, respectivamente.

En última instancia, el diseño sísmico con barras GFRP se beneficia más al formalizar un enfoque de diseño basado en desempeño y protegido por capacidad, el cual podría inicialmente limitarse a ciertos contextos estructurales; una estrategia de “frutos fáciles de alcanzar” para generar confianza y experiencia con disposiciones sísmicas para GFRP-RC.

Miembros híbridos reforzados

Los miembros reforzados de manera híbrida con acero y GFRP pueden ser una vía para lograr:

- a) un sistema protegido por capacidad;
- b) un “fusible estructural” dentro de una estructura GFRP-RC; o
- c) proporcionar (pseudo)ductilidad para continuar permitiendo el uso de un enfoque basado en fuerzas mediante factores R .

La investigación disponible sobre tales miembros es limitada en este momento,⁹ y es necesario priorizar los temas o aplicaciones críticas.

Sistemas estructurales híbridos

Habilitar cualquier enfoque “protegido por capacidad” requiere el desarrollo de sistemas estructurales híbridos (diferentes de los miembros con refuerzo híbrido). El Código ACI-318-25¹¹ identifica cómo se diseñan tales estructuras en su Sección de Comentarios R1.4.9: “En estructuras que contienen

miembros reforzados tanto con acero como con GFRP, el diseño de los miembros reforzados con acero se rige por [Código ACI-318-25]; el diseño de los miembros reforzados con GFRP se rige por ACI 440.11.”

La interacción entre los diferentes miembros de un sistema estructural híbrido es un área que requiere investigación. Existe una oportunidad para que los Comités ACI 440 y 440C llenen este vacío; nuevamente, esto podría beneficiarse de la identificación de aplicaciones apropiadas.

Conclusiones

Considerando gran parte de la discusión anterior, un objetivo principal a largo plazo podría ser desacoplar el Código ACI-440.11 del Código ACI-318. El concreto reforzado con GFRP (GFRP-RC)

es, en muchos aspectos —pero especialmente en aquellos relacionados con el diseño sísmico— fundamentalmente diferente del concreto reforzado con acero. El Código ACI-440.11 puede tener más similitudes con el concreto presforzado y postensado, en la medida en que estos sistemas presentan desafíos de ductilidad similares a los del GFRP.

El concepto de un “código dependiente” ha permitido un buen inicio para la primera versión del Código ACI-440.11, pero este concepto no es en última instancia apropiado para el GFRP-RC. Los autores consideran que la transición hacia una filosofía de diseño basado en desempeño y protegido por capacidad es probablemente el enfoque más adecuado para habilitar el uso del GFRP-RC en aplicaciones sísmicas.

¿Cómo podría ser un diseño basado en desempeño y protegido por capacidad?

Una representación esquemática de un enfoque de diseño protegido por capacidad se muestra en la Fig. 1.

Las cimentaciones (quizá aquellas en ambientes industriales corrosivos), por ejemplo, que están destinadas a permanecer “esencialmente elásticas” (Código ACI-318-19, Sección de Comentarios R18.13.1), ofrecen una posible vía de entrada para la introducción de un diseño protegido por capacidad:

1. Seleccionar un SFRS primario adecuado para la SDC deseada (B a F) y diseñarlo con el detallado dúctil apropiado.
2. Realizar un análisis “pushover” del SFRS para establecer el mecanismo plástico anticipado y la capacidad del SFRS.
3. Escalar las fuerzas del SFRS utilizando el factor de sobrerresistencia (Ω_0) para identificar las fuerzas de diseño en la cimentación.
4. Diseñar la cimentación para estas fuerzas “mejor estimadas”.

En lugar de simplemente aplicar $R = 1$, este enfoque identifica el mecanismo plástico y, por tanto, el “fusible” que debe detallarse para que sea dúctil.

Debe quedar claro que este enfoque da lugar a un sistema estructural híbrido, en el cual el “fusible” es dúctil (y, por lo tanto, con mayor probabilidad reforzado con acero; por ejemplo, el SFRS disipativo en la Fig. 1), y el elemento protegido por capacidad (la cimentación en este ejemplo) es GFRP-RC (por ejemplo, los componentes no disipativos en la Fig. 1).

Este enfoque es similar al promovido por ASCE/SEI 41-23⁸ para el reforzamiento sísmico.

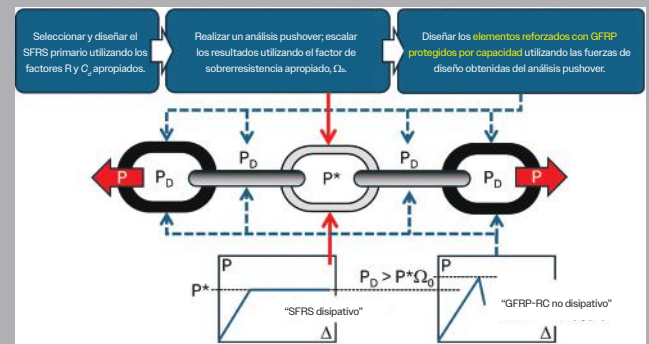


Fig. 1: Diseño protegido por capacidad (adaptado de la Referencia [2])

Aviso

Este artículo se basa en un informe presentado al Comité ACI 440 durante la Convención de Concreto – Primavera 2025, en Toronto, Ontario, Canadá. El contenido de este artículo representa las opiniones colectivas de los autores y no necesariamente las de los Comités ACI 440 y 440C.

Referencias

1. ACI Committee 440, "Building Code Requirements for Structural Concrete Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars—Code and Commentary (ACI CODE 440.1I-22)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2023, 260 pp.
2. 2024 International Building Code (IBC), International Codes Council Inc., Washington, DC, 2024, 753 pp.
3. ASCE/SEI 7-22, "Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures," American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2022, 1036 pp.
4. ACI Committee 440, "Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars (ACI 440.1R-15)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2015, 84 pp.
5. ACI Committee 440, "Construction with Glass Fiber-Reinforced Polymer Reinforcing Bars—Specification (ACI SPEC-440.5-22)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2022, 10 pp.
6. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary (ACI 318R-19)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019, 623 pp.
7. ASCE/SEI 74-23, "Load and Resistance Factor Design (LRFD) for Pultruded Fiber Reinforced Polymer (FRP) Structures," American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2023, 110 pp.
8. ASCE/SEI 41-23, "Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings," American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2023, 752 pp.
9. Devaraj, R.; Olofinjana, A.; and Gerber, C., "Making a Case for Hybrid GFRP-Steel Reinforcement System in Concrete Beams: An Overview," Applied Sciences, V. 13, No. 3, Article No. 1463, Jan. 2023, 23 pp.
10. CSA A23.3:24, "Design of Concrete Structures," CSA Group, Toronto, ON, Canada, 2024, 342 pp.
11. ACI Committee 318, "Building Code for Structural Concrete—Code Requirements and Commentary (ACI CODE-318-25)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2025, 702 pp.
12. Paulay, T., and Priestley, M.J.N., Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings, John Wiley and Sons, Inc., 1992, 768 pp.

Kent A. Harries, FACI, es Profesor de Ingeniería Estructural y Mecánica en la Universidad de Pittsburgh, Pittsburgh, PA, EE. UU. Es presidente del Comité ACI 440S, Código para la Reparación y Rehabilitación de Concreto con Polímeros Reforzados con Fibra, y ha estado activo en la comunidad ACI 440 durante 30 años.



Carlos E. Ospina, FACI, es Senior Principal y vicepresidente en Simpson Gumpertz & Heger (SGH) en Houston, TX, EE. UU., donde supervisa el diseño y el apoyo durante la construcción de proyectos de infraestructura marina, la mayoría ubicados en regiones de alta sismicidad. Es expresidente del Subcomité ACI 318-F, Cementaciones, y miembro de los Comités ACI 318, Reglamento de Concreto Estructural, y ACI 440, Refuerzo con Polímeros Reforzados con Fibra. Ha participado en el desarrollo de disposiciones reglamentarias para estructuras de concreto reforzado con FRP durante más de 20 años.



M. Lee Marsh es Technical Fellow en Ingeniería Sísmica en WSP USA, con más de 40 años de experiencia. Es presidente del Subcomité ACI 341E, Bridge Codes-Support, y brinda asistencia a la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) en el desarrollo y soporte de su Guía de Especificaciones para el Diseño Sísmico de Puentes mediante LRFD basada en desplazamientos.



Sergio M. Alcocer, FACI, es Profesor en la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) y en The University of Texas at San Antonio, San Antonio, TX. Es presidente del Comité Conjunto ACI-ASCE 352, Joints and Connections in Monolithic Concrete Structures, y del Subcomité ACI 318-H, Disposiciones Sísmicas.



Ravi Kanitkar es Ingeniero Consultor y Cofundador de KL Structures, LLP. Es presidente del Subcomité ACI 440-F, FRP-Repair-Strengthening, y miembro de los Comités ACI 369, Seismic Repair and Rehabilitation, y ACI 440, Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement.



Título original en inglés: Challenges and Opportunities for the Seismic Design of Structural Concrete with GFRP Bars

La traducción de este artículo correspondió al Capítulo México Noroeste



Traductor:
**Est. Emiliano
Martínez Villalobos**



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

Cálculo de Deflexiones Utilizando el CÓDIGO-318-19 de ACI y Otros Más, Parte 5

Extensión propuesta para el concreto presforzado.

Por Peter H. Bischoff, Wassim Nasreddine y Hani Nassif

Partes 1 a 4 de esta serie de artículos¹⁻⁴ introducen y evalúan la nueva expresión para I_e adoptada primero por el CÓDIGO ACI-318-19⁵ para calcular la deflexión del concreto reforzado (no presforzado). La expresión revisada para I_e no corresponde a miembros de concreto presforzados agrietados y el CÓDIGO ACI-318-19 utiliza el enfoque desarrollado por Branson⁶ para este tipo de miembros.

El trabajo de Bischoff et al.⁷ propone extender el enfoque del CÓDIGO ACI-318-19 para el concreto reforzado, de manera que incluya concreto presforzado. El planteamiento propuesto resumido en la Fig. 1, se desarrolló para calcular la deflexión inmediata de miembros presforzados Clase T y Clase C que se agrietan bajo carga de servicio (consulte el CÓDIGO-318 de ACI, Sección 24.5.2, para la clasificación de miembros presforzados). En este enfoque, la deformación por la fuerza de presfuerzo excéntrica (calculada mediante el uso de una excentricidad efectiva e_e y momento de inercia efectivo I_e) se resta de la deformación por la carga (calculada utilizando I_g). Esto se parece mucho al procedimiento utilizado para calcular la deflexión de un miembro presforzado no agrietado, en el que e_g (la excentricidad de la fuerza de presfuerzo relativa al centroide de la sección bruta [no agrietada]) e I_g se utilizan para calcular la contraflecha, además I_g se utiliza para calcular la deflexión debida a la carga (pero con una diferencia para un miembro agrietado, tal como se observa adelante).

Si bien la curvatura de un miembro presforzado agrietado se obtiene al restar la curvatura efectiva provocada por la fuerza de presfuerzo excéntrica de la curvatura causada por la carga, el cálculo directo de la deflexión se basa conservadoramente en la curvatura neta⁷, tal como se demuestra con un ejemplo posterior en este artículo. Para un miembro o miembros continuos con excentricidad variable del

presfuerzo, podría ser favorable calcular la deflexión integrando la curvatura. Calcular la deflexión de forma directa (sin integración) también se ve afectada por el tipo de carga. En el Apéndice está disponible un ejemplo extra para un miembro con excentricidad variable, al que se puede acceder en la versión en línea de este artículo en www.concreteinternational.com.

$$I_e = I_g \quad \text{y} \quad e_e = e_g \quad \text{para} \quad M_a \leq \lambda_{cr} M_{cr}$$

Para $M_a > \lambda_{cr} M_{cr}$

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \left(\frac{\lambda_{cr} M_{cr}}{M_a} \right)^2 \left(1 - \frac{I_{cr}}{I_g} \right)}$$

$$e_e = \left(\frac{\lambda_{cr} M_{cr}}{M_a} \right) \left(\frac{I_e}{I_g} \right) e_g + \left[1 - \left(\frac{\lambda_{cr} M_{cr}}{M_a} \right) \right] \left(\frac{I_e}{I_{cr}} \right) e_{cr}$$

$$M_{cr} = (f_r + f_{pe}) I_g / y_t$$

$$\lambda_{cr} = \left(\frac{2}{3} \right) + \left(\frac{\rho_p}{\rho + \rho_p} \right) \left(\frac{1}{3} \right)$$

Fig. 1: Revisión propuesta para el Código ACI-318-19, Sección 24.2.3.9

Resumen de las Partes del Artículo

Parte 1	Introducción al cálculo de deflexiones inmediatas y dependientes del tiempo
Parte 2	Nueva Expresión para I_e y Razones del Cambio
Parte 3	Impacto de los Cambios Realizados
Parte 4	Ejemplo de Deflexión – Losa Continua
Parte 5	Extensión Propuesta para Concreto Presforzado

Comportamiento del Concreto Presforzado

La Figura 2 ilustra el efecto del presforzado en la relación momento-curvatura para los miembros a flexión de concreto. El presforzado excéntrico incrementa el momento de agrietamiento y causa una deflexión ascendente inicial (contraflecha) para dar una respuesta más rígida en cargas de servicio. La fuerza de presfuerzo axial también da por resultado una sección parcialmente agrietada con una respuesta $E_{cl'cr}$ no lineal que converge gradualmente (bajo carga en incremento) con la respuesta E_{clcr} que corresponde a una sección completamente agrietada (no presforzada). Más importante aún, la respuesta E_{clcr} agrietada se compensa por la respuesta E_{clcr} no agrietada (donde el momento M_i identifica el punto de intersección de la respuesta E_{cltr} y cambia la respuesta E_{clcr}). La respuesta E_{clcr} se muestra en la Fig. 2 como justo debajo del momento de agrietamiento M_{cr} , pero puede encontrarse sobre M_{cr} para niveles más altos de presfuerzo.⁸

El cálculo de la deflexión se simplifica utilizando la respuesta E_{clcr} en lugar de $E_{cl'cr}$.^{7,9} Esto evita la dificultad de localizar el eje neutro y después la ubicación del centroide que no coincide con el eje neutro para una sección parcialmente agrietada. Otras simplificaciones incluyen aproximar el momento de inercia I_{tr} no agrietado con un momento de inercia bruto I_g y utilizar la fuerza de presfuerzo efectiva P_e en lugar de la fuerza de descompresión ficticia (presfuerzo) $P_o = f_{dc}A_{ps}$ descrita por Nilson.¹⁰ La fuerza de presfuerzo se mueve hasta el centroide para análisis, lo que da por resultado un momento de presfuerzo excéntrico $P_o e_{cr} \approx P_e e_{cr}$, donde e_{cr} es la excentricidad del acero de presfuerzo relativo al centroide de la sección agrietada (ubicada en el eje neutro para la sección completamente agrietada).

El esfuerzo de descompresión f_{dc} se define como el esfuerzo en el tendón correspondiente a esfuerzo cero en el concreto a nivel de los tendones presforzados y A_{ps} es el área de refuerzo de tensión longitudinal. La fuerza de presfuerzo efectivo es $P_e = f_{se}A_{ps}$, donde f_{se} es el esfuerzo efectivo en el refuerzo presforzado después de todas las pérdidas, incluyendo contracción y el flujo plástico. El momento de más agrietamiento relacionado con el presfuerzo es $M_{cr} = (f_r + f_{pe}) I_g / y_t$, donde f_{pe} es el esfuerzo de compresión en el concreto en la cara a tensión precomprimida que es el resultado de la fuerza de presfuerzo efectivo P_e que actúa sobre la sección deforme y por tanto, también responde por las pérdidas de flujo plástico y contracción.

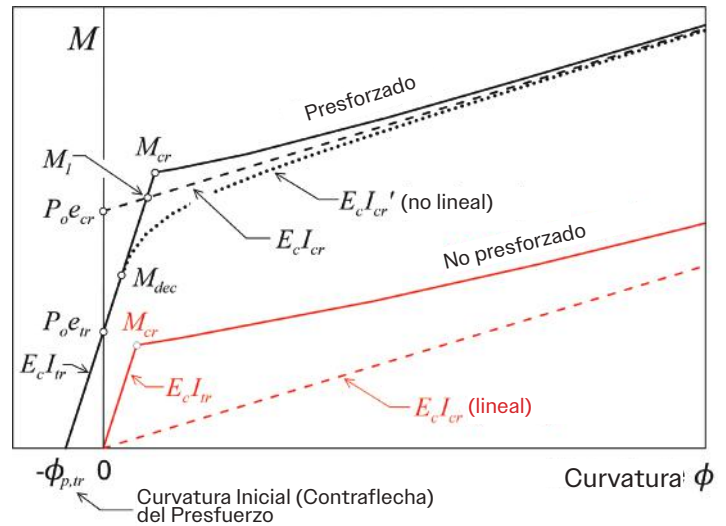


Fig. 2: Gráficas comparativas de relaciones momento-curvatura para miembros a flexión presforzados y reforzados (no presforzados)

Extensión del Modelo a Concreto Presforzado

La deformación de un miembro de concreto presforzado agrietado se modela agregando un momento de endurecimiento por tensión $\Delta M_{ts} = \beta_{ts} \Delta M_{cr} \leq \Delta M_{cr}$ en la respuesta E_{clcr} agrietada, tal como se ilustra en la Fig. 3.^{7,9} Esto es similar al planteamiento utilizado para concreto reforzado (no presforzado) descrito en la Parte 2 de la serie de artículos,² a excepción de que la respuesta E_{clcr} se cambió hacia arriba en relación con la respuesta E_{cltr} no agrietada. El desarrollo del modelo para concreto presforzado replica los pasos tomados en la Parte 2 de la serie de artículos² para concreto reforzado.

El momento M_a para la curvatura correspondiente a ϕ_a se define como

$$M_a = E_c I_{cr} (\phi_a + \phi_{p,cr}) + \beta_{ts} \Delta M_{cr} \quad (1a)$$

El reordenamiento de los términos conduce a

$$\phi_a = \frac{M_a}{E_c I_{cr}} \left[1 - \beta_{ts} \left(\frac{\Delta M_{cr}}{M_a} \right) \right] - \phi_{p,cr} \quad (1b)$$

Sustituyendo

$$\Delta M_{cr} = M_{cr} (1 - I_{cr} / I_{tr}) - E_c I_{cr} (\phi_{p,cr} - \phi_{p,tr})$$

en la ecuación (1b) da

$$\phi_a = \frac{M_a}{E_c I_{cr}} \left[1 - \beta_{ts} \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right) \left(1 - \frac{I_{cr}}{I_{tr}} \right) \right] - [\beta_{ts} \phi_{p,tr} + (1 - \beta_{ts}) \phi_{p,cr}] \quad (1c)$$

lo que conduce a la curvatura $\phi_a = M_a / (E_{cle}) - \phi_{pe}$ para un momento de inercia I_e efectivo y una curvatura efectiva de presfuerzo ϕ_{pe} , se define como

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \beta_{ts} \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right) \left(1 - \frac{I_{cr}}{I_{tr}} \right)} \quad (2a)$$

y

$$\phi_{pe} = \beta_{ts} \phi_{p,tr} + (1 - \beta_{ts}) \phi_{p,cr} \quad (2b)$$

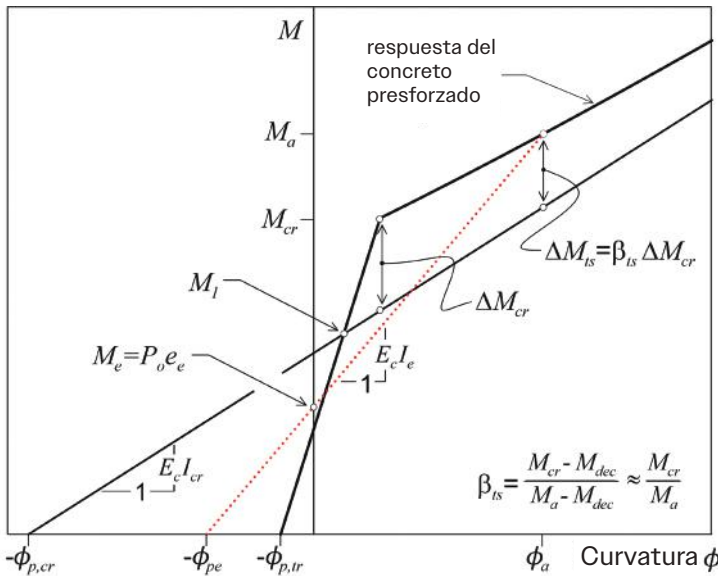


Fig. 3 Respuesta del modelo del miembro presforzado con endurecimiento por tensión

La curvatura del presfuerzo de una sección no agrietada $\phi_{p,tr}$, se da por $\phi_{p,tr} = P_o e_{tr} / (E_c I_{tr})$, y la curvatura del presfuerzo de una sección completamente agrietada se da por $\phi_{p,cr} = P_o e_{cr} / (E_c I_{cr}) \cdot \Delta M_{ts}$ disminuye con la carga mayor después del agrietamiento, utilizando un factor de endurecimiento por tensión asumido $\beta_{ts} = M_{cr} / M_a$ que se sustituye en la ecuación (2a) y (2b). Más, los términos para la sección transformada no agrietada (I_{tr} , $\phi_{p,tr}$, y e_{tr}) se transforman con los términos para una sección bruta (no agrietada) (I_g , $\phi_{p,g}$, y e_g) para dar expresiones de diseño simplificadas para I_e y ϕ_{pe} .

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^2 \left(1 - \frac{I_{cr}}{I_g} \right)} \quad (3a)$$

$$\phi_{pe} = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right) \phi_{p,g} + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right) \right] \phi_{p,cr} \quad (3b)$$

Se toma un paso final al establecer $P_o e_e = (E_c I_e) \phi_{pe}$ para definir una excentricidad efectiva e_e . Haciendo otra simplificación aproximando P_o con P_e (básicamente calculando el esfuerzo de descompresión f_{dc} con el presfuerzo efectivo f_{se}), donde $\phi_{p,g} = P_e e_g / (E_c I_g)$ y $\phi_{p,cr} = P_e e_{cr} / (E_c I_{cr})$, conduce a

$$e_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right) \left(\frac{I_e}{I_g} \right) e_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right) \right] \left(\frac{I_e}{I_{cr}} \right) e_{cr}$$

Entonces la curvatura se calcula como $\phi_a = (M_a - P_e e_e) / (E_c I_e)$. La Figura 4 ilustra la respuesta del miembro calculada cuando la respuesta $E_c I_{cr}$ se encuentra ya sea debajo o sobre el momento de agrietamiento.

Restricción de la Contracción por Refuerzo no Presforzado

El momento de agrietamiento $M_{cr} = (f_r + f_{pe}) I_g / y_t$ no se reduce para un miembro completamente presforzado (FP [por sus iniciales en inglés]) (donde la sección no incluye refuerzo no presforzado). Esto se debe a que la contracción y el flujo plástico ya se tomaron en consideración con el esfuerzo efectivo f_{se} en el acero de presfuerzo utilizado para establecer la fuerza de presfuerzo efectiva P_e y el esfuerzo de compresión subsecuente f_{pe} en la cara a tensión precomprimida (que a su vez se utiliza para calcular M_{cr}). No obstante, se necesita un momento de agrietamiento reducido $\lambda_{cr} M_{cr}$ para un miembro presforzado reforzado con refuerzo adicional no presforzado (definido como parcialmente presforzado [PP] en este artículo) para responder por los esfuerzos de tensión que se desarrollan en el concreto por la restricción a la contracción mediante el refuerzo no presforzado.¹¹ El factor de reducción

$$\lambda_{cr} = \left(\frac{2}{3} \right) + \left(\frac{\rho_p}{\rho + \rho_p} \right) \left(\frac{1}{3} \right)$$

varia entre 2/3 para un miembro de concreto reforzado (no presforzado) (idéntico al Código ACI 318-19 para concreto no presforzado) y 1 para un miembro FP. La substitución del momento de agrietamiento reducido en la ecuación (3) entonces da

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \left(\frac{\lambda_{cr} M_{cr}}{M_a} \right)^2 \left(1 - \frac{I_{cr}}{I_g} \right)} \quad (4a)$$

$$\phi_{pe} = \left(\frac{\lambda_{cr} M_{cr}}{M_a} \right) \phi_{p,g} + \left[1 - \left(\frac{\lambda_{cr} M_{cr}}{M_a} \right) \right] \phi_{p,cr} \quad (4b)$$

$$e_e = \left(\frac{\lambda_{cr} M_{cr}}{M_a} \right) \left(\frac{I_e}{I_g} \right) e_g + \left[1 - \left(\frac{\lambda_{cr} M_{cr}}{M_a} \right) \right] \left(\frac{I_e}{I_{cr}} \right) e_{cr} \quad (4c)$$

Las propiedades de la sección bruta (I_g , $\phi_{p,g}$, e_g) se utilizan para un miembro no agrietado cuando $M_a \leq \lambda_{cr} M_{cr}$.

Evaluación

Los detalles completos sobre el nivel de precisión de este planteamiento basados en la comparación con una extensa base de datos de pruebas que utiliza los resultados de 180 vigas de 23 estudios se proporcionan en otra parte.⁷ Estas vigas tenían formas rectangulares, de una sola T o tenían forma de I; estaban soportadas de manera sencilla; tenían un perfil de tendón recto presforzado con excentricidad constante y estaban sujetas a dos cargas de puntos colocados simétricamente.¹¹ La Figura 5 muestra una amplia variabilidad de resultados de estas pruebas, tal como se espera, donde las deflexiones experimentales Δ_{exp} (incluyendo peralte y peso propio del miembro) se comparan con los valores calculados Δ_{calc} utilizando el procedimiento descrito en el ejemplo de deflexión. La deflexión se sobreestima por una cantidad moderada en promedio, con una relación de predicción de deflexión media ($\Delta_{calc}/\Delta_{exp}$) igual a 1.24 cuando los valores de deflexión se calculan directamente (basándose en los cálculos de curvatura neta, tal como se muestran en el ejemplo). La curvatura de integración (basada en I_e y en e_e calculada en cada sección junto con el tramo del miembro) disminuye la relación media $\Delta_{calc}/\Delta_{exp}$ a un valor de 1.06. Al utilizar la fuerza de presfuerzo de descompresión P_o y las propiedades de la sección transformada no agrietada para determinar M_{cr} , I_e , y e_e se mejora aún más la predicción de deflexión.⁷

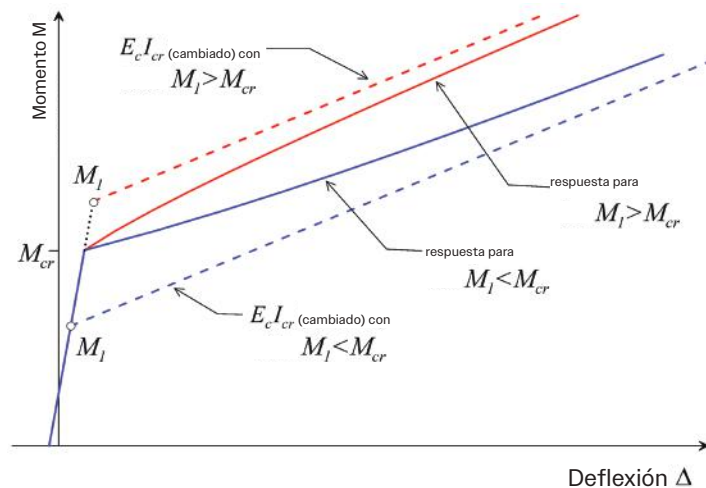


Fig. 4: Opciones de respuesta presforzada calculada.

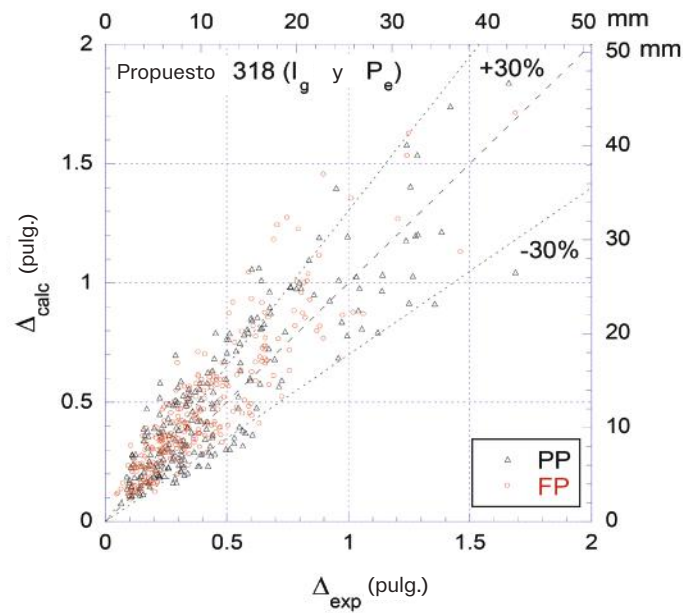


Fig. 5: Calculado versus deflexiones experimentales para vigas completamente presforzadas (FP) y parcialmente presforzadas (PP) (utilizando la base de datos compilada en la Referencia 11)

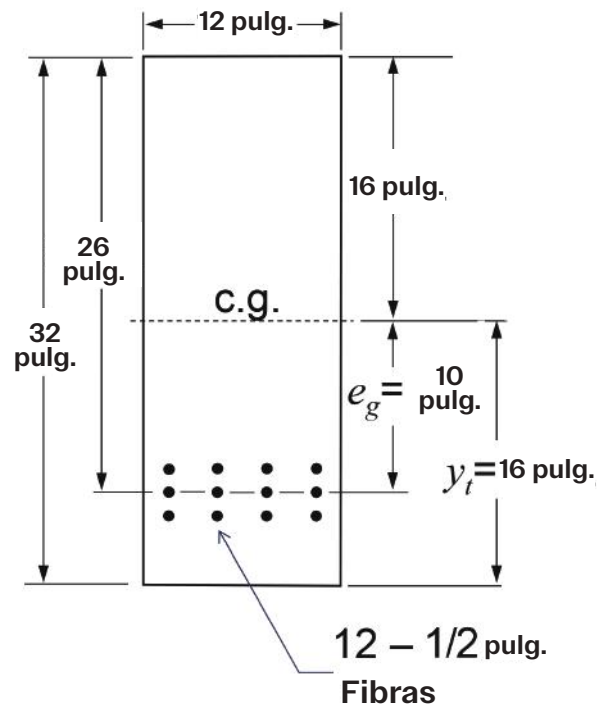


Fig. 6: Detalles del ejemplo de viga presforzada.

Ejemplo de Deflexión Presforzada

El ejemplo 5.2.2.5 tomado del PCI Design Handbook 2020¹² y basado en el Ejemplo 1 del documento PCI de Mast¹³ se utiliza para demostrar el planteamiento propuesto para calcular la deflexión inmediata de una viga presforzada soportada de forma sencilla agrietada bajo carga de servicio. La viga presforzada es rectangular, tal como se ilustra en la Fig. 6 y presforzada con doce fibras 270K de ½ pulgada de diámetro colocadas a una profundidad efectiva $d_p = 26$ pulgadas. El tramo $l = 40$ pies, $f'_c = 6\,000$ psi, y $E_c = 57\,000 \sqrt{f'_c} = 4\,415$ ksi para dar $n_p \rho_p = E_p/E_c = 6.46$ (asumiendo $E_p = 28\,500$ ksi).

Las cargas y los momentos a mitad de vano son los siguientes:

Peso propio = $150 \text{ lb/pies}^3 \times (12/12) \text{ pies} \times (32/12) \text{ pies} \div 1\,000 =$

0.40 kip/pies

Carga muerta superimpuesta = 1.0 kp/pies

Carga muerta total = 1.4 kp/pies

Carga viva = 1.25 kip/pies

$M_D = 1.4 \times 40^2/8 = 280 \text{ kip-pies} = 3360 \text{ kip-pulg.}$

$M_L = 1.25 \times 40^2/8 = 250 \text{ kip-pies} = 3000 \text{ kip-pulg.}$

$M_a = M_D + M_L = 530 \text{ kip-pies} = 6360 \text{ kip-pulg.}$

Los detalles de la fuerza de presfuerzo son los siguientes:

$A_{ps} = 12 \times 0.153 = 1.836 \text{ pulg.}^2$

$p_p = A_{ps}/(bd_p) = 1.836/(12 \times 26) = 0.0059$

(más $p = 0$ porque no hay refuerzo presforzado)

$f_{pu} = 270 \text{ ksi}$

Nivel de presfuerzo inicial = $0.75 f_{pu}$ y pérdida calculada de 20% da $f_{se} = (1 - 0.20)(0.75)(270) = 162.0 \text{ ksi}$

$P_e = 1.836 \times 162.0 = 297.4 \text{ kip}$

Las propiedades de la sección son las siguientes:

$A_g = 384 \text{ pulg.}^2$ e $I_g = 32\,768 \text{ pulg.}^4$

$y_t = 16 \text{ pulg.}$ y $e_g = 26 - 16 = 10 \text{ pulg.}$ (ver Fig. 6)

$f_{pe} = P_e/A_g + (P_e \times e_g)/I_g = 297.4/384 + (297.4 \times 10)/$

$16/32\,768 = 2.227 \text{ ksi}$

$f_r = 7.5 \sqrt{f'_c} = 7.5 \sqrt{6000} = 581 \text{ psi}$

$M_{cr} = (f_r + f_{pe}) I_g / y_t = (0.581 + 2.227) 32\,768 / 16 = 5\,750 \text{ kip-pulg.}$

$\lambda_{cr} = (2/3) * [0.0059/(0 + 0.0059)](1/3) = 1.0$ y

$\lambda_{cr} M_{cr} = 5750 \text{ kip-pulg.}$

$n_p \rho_p = 6.46 \times 0.0059 = 0.038$

$$k_{cr} = \sqrt{(n_p \rho_p)^2 + 2(n_p \rho_p)} - (n_p \rho_p) = \sqrt{(0.038)^2 + 2 \times 0.038} - 0.038 = 0.240$$

$c_{cr} = k_{cr} \times d_p = 0.240 \times 26 = 6.24 \text{ in.}$ y $e_{cr} = 26 - 6.24 = 19.76 \text{ in.}$

(el centroide está ubicado en el eje neutral porque la sección está completamente agrietada.

$$I_{cr} = b(c_{cr})^3/3 + n_p A_{ps} (d_p - c_{cr})^2 = 12 \times (6.24)^3/3 + 6.46 \times 1.836 \times (26 - 6.24)^2 = 5\,603 \text{ pulg.}^4$$

Utilizando la aproximación PCI¹² para

$$I_{cr} = n_p A_{ps} d_p^2 \left(1 - 1.6 \sqrt{n_p \rho_p}\right)$$

$$I_{cr} = 6.46 \times 1.836 \times 26^2 \times \left(1 - 1.6 \sqrt{0.038}\right) = 5517 \text{ in.}^4$$

Esta aproximación funciona razonablemente bien para p_p hasta más o menos 0.5% pero puede subestimar I_{cr} significativamente a relaciones de refuerzo más altas.¹¹

Los cálculos de deflexión son de la siguiente forma:

La sección está agrietada bajo carga muerta completa más carga de servicio viva con

$$M_a = 6360 > \lambda_{cr} M_{cr} = 5750 \text{ kip-in.}$$

$$\lambda_{cr} M_{cr} / M_a = 0.904$$

$$I_e = \frac{5603}{1 - (0.904)^2 (1 - 5603/32,768)} = 17,373$$

$$e_e = 0.904 \times \left(\frac{17,373}{32,768}\right) \times 10 + (1 - 0.904) \times \left(\frac{17,373}{5603}\right) \times 19.76 = 10.67$$

La curvatura ϕ_a en M_a se calcula como

$$\phi_a = \frac{M_a/(E_c I_e) - P_e \times e_e/(E_c I_e)}{(6360 - 297.4 \times 10.67)/(4415 \times 17,373)} = 41.55 \times 10^{-6} \text{ 1/}$$

Al referirnos a la Fig. 7, la curvatura neta $\phi_{net} = \phi_a + \phi_{p,g} = \phi_D + \phi_L$

con $\phi_{p,g} = P_e \times e_g / (E_c I_g) = 297.4 \times 10 / (4\,415 \times 32\,768) = 20.56 \times 10^{-6} \text{ 1/pulg.}$

y $\phi_D = M_D / (E_c I_g) = 3\,360 / (4\,415 \times 32\,768) = 23.22 \times 10^{-6} \text{ 1/pulg.}$

$\therefore \phi_{net} = (41.55 + 20.56) \times 10^{-6} = 62.11 \times 10^{-6} \text{ 1/pulg.}$

y $\phi_L = \phi_{net} - \phi_D = (62.11 - 23.22) \times 10^{-6} = 38.89 \times 10^{-6} \text{ 1/pulg.}$

Deflexión neta $\Delta_{net} = K_M \phi_{net} \ell^2$ (con $K_M = 5/48$ para una distribución parabólica asumida de curvatura tal como se ilustra en la Figura 7.

$\Delta_{net} = 5/48 \times 62.11 \times (40 \times 12)^2 \times 10^{-6} = 1.491 \text{ pulg.}$

$\Delta_a = \Delta_{net} - \Delta_{p,g} = 1.491 - 0.592 = 0.899 \text{ pulg.}$

con $\Delta_{p,g} = K_p \phi_{p,g} \ell^2 = (1/8) \times 20.56 \times (40 \times 12)^2 \times 10^{-6} =$

0.592 pulg. $K_p = 1/8$ para un miembro con soporte sencillo con tendones rectos que tengan excentricidad constante.

Deflexión de carga viva $\Delta_{i,L} = \Delta_{net} - \Delta_{i,D}$ con $\Delta_{i,D} = (5/48) \phi_D \ell^2$.

$\Delta_{i,D} = (5/48) \times (23.22 \times 10^{-6}) \times (40 \times 12)^2 = 0.557 \text{ in.}$

y $\Delta_{i,L} = 1.491 - 0.557 = 0.934 \text{ pulg.}$ Alternativamente,

$$\Delta_{i,L} = K_M \phi_L \ell^2 = \left(\frac{5}{48} \right) \times (38.89 \times 10^{-6}) \times (40 \times 12)^2 = 0.933 \approx 0.934 \text{ in.}$$

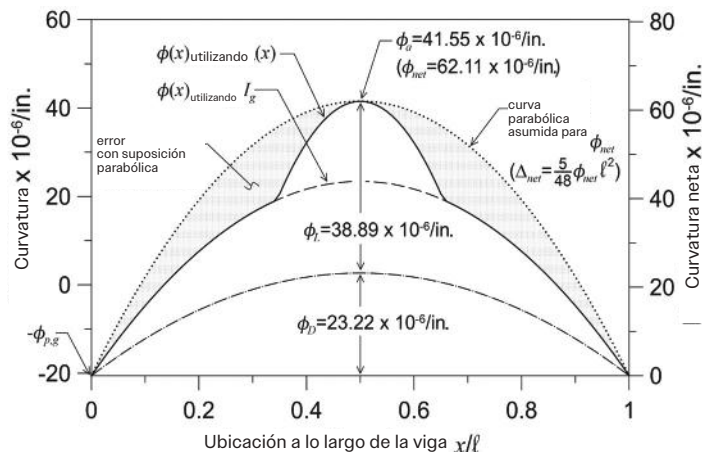


Fig. 7: Distribución de curvatura para ejemplo de viga.

El valor estimado de $\Delta_{i,L} = 0.934 \text{ pulg.}$ sobreestima la deflexión de carga viva en 36% en comparación con un valor de 0.688 pulg. obtenido al integrar la curvatura, mientras que el valor para $\Delta_a = 0.899 \text{ pulg.}$ sobreestima la deflexión en aproximadamente la misma cantidad en comparación con el valor de 0.653 pulg. cuando la curvatura está integrada. El área sombreada en la Fig. 7 representa el error al calcular la deflexión con la curvatura neta aproximada por una curva parabólica (asumiendo que la carga se distribuye de manera uniforme).

Aproximar la curvatura neta con una respuesta de distribución lineal (de forma triangular con $\phi_{net} = 62.11 \times 10^{-6} \text{ 1/pulg.}$ en el ápice ubicado a la mitad del vano) da valores de $\Delta_{i,L} = 0.635 \text{ pulg.}$ y $\Delta_a = 0.600 \text{ pulg.}$, que subestima la deflexión en aproximadamente 8% en cada caso, en comparación con integrar la curvatura.

La comparación también puede hacerse con el planteamiento más exacto basándose en P_o y las propiedades de la sección transformada no agrietada (I_{tr} , $\Delta_{p,tr}$, y e_{tr}) utilizadas para determinar M_{cr} , I_e , y e_e .

El esfuerzo de descompresión

$$f_{dc} = f_{se} + n_p \left(\frac{P_e}{A_g} + \frac{P_e (e_g)^2}{I_g} \right) = 172.9$$

y la fuerza de presfuerzo de descompresión $P_o = f_{dc} \times A_{ps} = 317.4 \text{ kip}$ para dar un momento de agrietamiento más alto $M_{cr} = 6\,065 \text{ kip-pulg.}$ (que actúa sobre la sesión transformada no agrietada). El momento de agrietamiento más alto disminuye considerablemente la deflexión calculada de la carga viva (de 0.934 pulg. a 0.690 pulg. utilizando la aproximación parabólica para la curvatura neta) debido a la proximidad más cercana del momento de carga de servicio $M_a = 6\,360 \text{ kip-pulg.}$ al valor mayor del momento de agrietamiento (incrementando de 5\,750 a 6\,065 kip-pulg.). Los valores calculados de deflexión de carga viva varían entre 48 y 70% del límite del Código-318 de ACI de $\ell/360 = 1.33 \text{ pulg.}$ para este ejemplo, dependiendo del curso en el procedimiento utilizado para calcular la deflexión.

Completamente presforzado (FP): miembro presforzado únicamente con refuerzo presforzado

Parcialmente presforzado (PP): miembro presforzado con refuerzo presforzado y no presforzado

Resumen

El planeamiento del Código-318-19 de ACI para calcular la deflexión inmediata del concreto reforzado (no presforzado) se amplía para incluir concreto presforzado cargado sobre el momento de agrietamiento (miembros presforzados Clase T y Clase C). Se utiliza un modelo mecánico racional como la base para agregar un componente de endurecimiento por tensión (en este momento de caso) en la respuesta E_{elcr} agrietada que se cambia hacia arriba en relación con la respuesta E_{elg} no agrietada debido a la fuerza de presfuerzo excéntrica. El enfoque propuesto resumido en la Fig. 1 para concreto presforzado incluye un momento efectivo de inercia I_e y excentricidad efectiva e_e de la fuerza de presfuerzo cuando el miembro se agrieta. I_g y e_g se utilizan para un miembro no agrietado. El momento de agrietamiento se reduce con un factor de reducción λ_{cr} para responder por los esfuerzos de tensión que se desarrollan en el concreto por la restricción a la contracción por el refuerzo no presforzado cuando está presente. Los procedimientos están presentes para calcular la deflexión directamente basándose en la curvatura neta (utilizando un valor uniforme asumido de I_e y e_e en la sección crítica) y comparado con la deflexión calculada al integrar la curvatura (utilizando I_e y e_e calculados en cada sección a lo largo del vano del miembro). La respuesta de carga-deflexión bilineal PCI también se considera en el ejemplo extra.

Deflexión calculada directamente basándose

en la curvatura ϕ neta:

$$\phi_s = \frac{M_s - P_e e_e}{E_c I_e}$$

$$\phi_{p,s} = \frac{P_e e_e}{E_c I_e}$$

$$\phi_{net} = \phi_s + \phi_{p,s}$$

$$\phi_{net} = \phi_D + \phi_L$$

$$\phi_D = \frac{M_D}{E_c I_e}$$

$$\phi_L = \phi_{net} - \phi_D$$

$$\Delta_{net} = K_M \phi_{net} \ell^2$$

$$\Delta_{p,s} = K_P \phi_{p,s} \ell^2$$

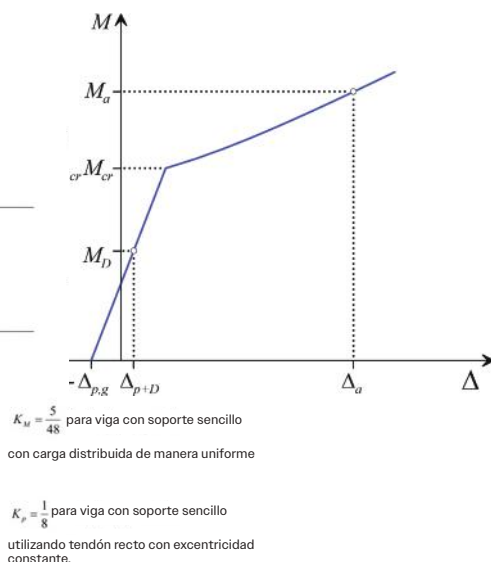
$$\Delta_s = \Delta_{net} - \Delta_{p,s}$$

$$\Delta_{L,D} = K_M \phi_D \ell^2$$

$$\Delta_{L,s} = \Delta_{net} - \Delta_{L,D}$$

or

$$\Delta_{L,s} = K_M \phi_L \ell^2$$



Reconocimientos

Se agradecen mucho los comentarios y sugerencias esclarecedores de Rex Donahey durante la redacción de esta serie de artículos (Partes 1 a 5).

Referencias

1. Bishoff, P.H., "Computing Deflections Using ACI CODE-318-19 AND Beyond, Part 1," Concrete International, V.47, No. 2, Feb. 2025, pp. 47-50.
2. Bishoff, P.H., "Computing Deflections Using ACI CODE-318-19 AND Beyond, Part 2," Concrete International, V.47, No. 3, Mar. 2025, pp. 51-54.
3. Bishoff, P.H., "Computing Deflections Using ACI CODE-318-19 AND Beyond, Part 3," Concrete International, V.47, No. 4, Apr. 2025, pp. 47-50.
4. Bishoff, P.H., "Computing Deflections Using ACI CODE-318-19 AND Beyond, Part 4," Concrete International, V.47, No. 5, May 2025, pp. 62-65.
5. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary (ACI 318R-19)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019, 624 pp.
6. Branson, D.E., Deformation of Concrete Structures, McGraw-Hill, New York, NY, 1977, 546 pp.
7. Bishoff, P.H.; Nasreddine, W.; and Nassif, H., "Proposed ACI 318 Equations for Immediate Deflection of Prestressed Concrete Members," ACI Structural Journal, V. 122, No. 6, Nov. 2025, pp. 127-139.
8. Bishoff, P.H.; Naito, C.J.; and Ingaglio, J.P., "Immediate Deflection of Partially Prestressed Concrete Flexural Members," ACI Structural Journal, V. 115, No. 6, Nov. 2018, pp. 1683-1693.
9. Bishoff, P.H., "Deformation Model for Reinforced and Cracked Prestressed Concrete," ACI Structural Journal, V. 119, No. 1, Jan. 2022, pp. 243-254.
10. Nilson, A.H., "Flexural Stresses After Cracking in Partially Prestressed Beams," PCI Journal, V. 21, No. 4, July-Aug. 1976, pp. 72-81.
11. Nasreddine, W.; Obeidah, A.; Bishoff, P.H.; and Nassif, H., "Assessment of Deflection Prediction Models for Cracked Prestressed Concrete Beams," ACI Structural Journal, V. 120, No. 6, Nov. 2023, pp. 167-179.
12. PCI, PCI Design Handbook: Precast and Prestressed Concrete, seventh edition, Precast/Prestressed Concrete Institute, Chicago, IL, 2010, 804 pp.
13. Mast, R.F., "Analysis of Cracked Prestressed Concrete Sections: A Practical Approach," PCI Journal, V. 43, No. 4, July-Aug. 1998, pp. 80-91.

Recibido y revisado de conformidad con las políticas de publicación del Instituto.

Peter H. Bishoff, FACI, es Catedrático Emérito en Ingeniería Civil en la Universidad de New Brunswick, Fredericton, NB, Canadá. Es miembro de los Comités ACI 224, Agrietamiento; 435, Deflexión de Estructuras de Construcción en Concreto; 440, Refuerzo de Polímero Reforzado con Fibra; y 440C, FRP Código de Construcción en Concreto Reforzado. Recibió el Reconocimiento de Diseño ACI en 2014, ASCE T.Y. Reconocimiento Lin en 2020 por un trabajo de ACI Structural Journal relacionado con la deflexión del concreto presforzado y el Reconocimiento ACI Symposium Volumes en 2025. Sus intereses de investigación incluyen el comportamiento de capacidad de servicio de las estructuras de concreto.



Wassim Nasreddine es miembro de ACI y Asociado de Investigación en Rutgers, La Universidad Estatal de Nueva Jersey, New Brunswick, NJ, Estados Unidos de Norteamérica. Es miembro de los Comités ACI 435, Deflexión de Estructuras de Construcción en Concreto y 440, Refuerzo de Polímero Reforzado con Fibra. Recibió el Reconocimiento ACI Symposium Volumes en 2025. Sus intereses de investigación incluyen comportamiento de miembros de concreto presforzado, materiales de concreto innovadores y reforzamiento y reacondicionamiento de estructuras de concreto.



Hani Nassif, FACI, es Catedrático de ingeniería estructural en Rutgers. La Universidad Estatal de Nueva Jersey. Es ex miembro del Comité de Actividades Técnicas de ACI (TAC); Jefe del Comité ACI 549, Productos Cementicios Delgados Reforzados y Ferrocemento; Vicepresidente del Subcomité ACI 440-I, Concreto Presforzado FRP; y es miembro de los Comités ACI 209, Fluencia y Contracción en Concreto; 343, Diseño de Puentes de Concreto; 348, Confiabilidad y Seguridad Estructural; 435, Deflexión de Estructuras de Construcción en Concreto; 440, Refuerzo de Polímero Reforzado con Fibra; y 444, Monitoreo de la Salud Estructural. Recibió los Reconocimientos Arthur J. Boase y el ACI Symposium Volumes, ambos en 2025. Su investigación se centra en concreto estructural y en el uso de materiales cementicios y compuestos avanzados.



Título original en inglés: Computing Deflections Using ACI Code-318-19 and Beyond, Part 5

Proposed extension to prestressed concrete

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



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



Revisión Técnica:
**Dr. Esteban Astudillo
de la Vega**

Construcciones de concreto masivo

Posicionamiento # 49



La colocación de concreto masivo requiere especial atención a los requisitos de diseño y a las consideraciones de construcción para manejar adecuadamente el aumento de la temperatura interna del concreto y los esfuerzos térmicos que pueden provocar agrietamiento.

Los contratistas de concreto de la ASCC reconocen que, cuando se especifica concreto masivo, el éxito del proyecto depende de una definición clara de los elementos de concreto masivo y de los límites de temperatura, incluyendo la coordinación temprana de todos los involucrados y establecer los requisitos de un plan de control térmico específico para el proyecto y su optimización.

El Código ACI 301-20: Especificaciones para la construcción con concreto (Specifications for Concrete Construction) exige que los documentos contractuales designen las partes del trabajo que se construirán como concreto masivo. Además, según la Sección 8.1.3 sobre concreto masivo, las especificaciones deben proporcionar límites para la temperatura máxima del concreto (T_{max}) y la diferencia de temperatura (T_{diff}) entre la superficie del concreto y el núcleo.

Los límites predeterminados son una T_{max} de 160 °F y una T_{diff} de 35 °F; sin embargo, la Sección 8.1.3 en la lista de requisitos opcionales permite especificar límites alternativos de T_{max} y T_{diff} mayores a los valores predeterminados.

Debe presentarse un plan de control térmico junto con los diseños de las mezclas de concreto evaluadas y las consideraciones adecuadas para implementar durante la construcción, con el fin de cumplir con los límites de temperatura especificados. El Código ACI 301-20, Sección 8.1.4, indica cuál es la información que debe incluirse en un plan de control térmico.

La colaboración temprana entre diseñadores, contratistas, consultores y productores de concreto premezclado beneficia el desarrollo de requisitos de especificación logrables para el control de temperatura y las medidas de mitigación para el concreto masivo. Las recomendaciones de ASCC siguientes están alineadas con las mejores prácticas de la industria para el diseño y construcción de elementos de concreto masivo, siguiendo los principios documentados en los requisitos ACI 301-20, los documentos de durabilidad ACI 201 y los documentos de concreto masivo ACI 207, y alineadas con CSA A23.1:24, Normas para materiales de concreto y métodos de construcción con concreto. (*Standards for Concrete Materials and Methods of Concrete Construction*).

Los diseñadores deben evaluar la combinación de las dimensiones de los elementos con el tipo y cantidad de materiales cementantes para designar partes de la estructura como concreto masivo que requerirán un plan de control térmico. La definición de concreto masivo según ACI 207.1-21: Guía para colocar concreto masivo (*Mass Concrete—Guide*) puede variar y debe considerarse al redactar las especificaciones.

Los diseñadores deben evaluar la posibilidad de especificar requisitos para las mezclas de concreto masivo que permitan el uso de materiales cementantes que generen menor calor, y evitar requisitos prescriptivos que puedan limitar la optimización de las proporciones de la mezcla de concreto. Alternativamente, puede ser necesario el pre-enfriamiento del concreto usando agua fría, hielo o nitrógeno líquido, o el post-enfriamiento con tuberías embebidas para colocaciones masivas especiales. No todas estas opciones son siempre factibles.

Los diseñadores también deben evaluar el impacto sobre los requisitos de temperatura en aplicaciones que requieren desempeño especial (por ejemplo, alta resistencia) o parámetros de durabilidad (por ejemplo, aire incluido), ya que los productores de concreto pueden usar contenidos más altos de materiales cementantes para estos concretos.

Los diseñadores deben considerar especificar una edad de aceptación para la resistencia mayor a 28 días; por lo tanto, se recomienda que la edad de aceptación sea no menor a 56 días en la mayoría de los casos, y pueda extenderse a no menos de 90 días

para casos especiales. La selección de diferentes técnicas de ensayo (por ejemplo, madurez o curado por coincidencia puede ser beneficiosa). (El curado por coincidencia es un método de control de calidad del concreto donde las muestras, ya sean cilindros o cubos, se curan bajo las mismas condiciones reales que experimenta el concreto colocado en obra)

Las oportunidades para optimizar la aplicabilidad de los requisitos de concreto masivo dependen del entendimiento de las propiedades y el desempeño del concreto masivo para la obra. El aumento de temperatura de la mezcla propuesta para concreto masivo, por ejemplo, puede evaluarse mediante modelado, pruebas y/o monitoreo de un prototipo. También se pueden especificar alternativas a los límites de temperatura como se describe a continuación.

La temperatura máxima en las colocaciones masivas suele limitarse a 160 °F para proteger el concreto de problemas de durabilidad como la formación retardada de etringita (DEF). El uso de un mayor porcentaje de materiales cementantes suplementarios (SCM), por ejemplo, $\geq 25\%$ de ceniza volante Clase F, $\geq 35\%$ de ceniza volante Clase C o $\geq 35\%$ de cemento escoria, puede minimizar el riesgo de DEF hasta 185 °F.

El agrietamiento térmico en colocaciones masivas generalmente resulta de diferencias de temperatura grandes e incontroladas o del choque térmico en la superficie del concreto. Un límite fijo de 35 °F es un límite conservador que no reconoce las propiedades del concreto. El concreto puede resistir mayores esfuerzos térmicos conforme madura y gana resistencia.

Los planes de control térmico pueden optimizarse usando, por ejemplo, un enfoque incremental como un diferencial de temperatura escalonado o un límite de diferencia de temperatura basado en desempeño (PBTDL por sus siglas en inglés), permitiendo límites diferenciales mayores conforme el concreto desarrolla resistencia.

Especificar límites de diferencia de temperatura que reflejen las propiedades del concreto, como el PBTDL o límites escalonados—por ejemplo: 35 °F durante los primeros 3 días, 45 °F hasta los 7 días y 55 °F después de 7 días—puede ser una alternativa para optimizar la ejecución del plan de control térmico.

El plan de control térmico debe considerar los impactos de las medidas de mitigación en el programa

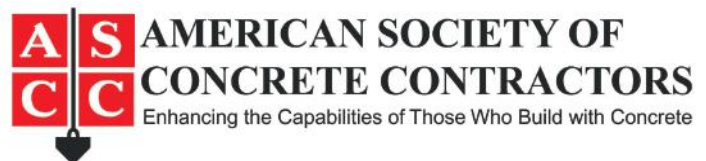
de construcción, la constructibilidad del esquema y la secuencia de colocación, el aislamiento superficial, la remoción del aislamiento según las condiciones ambientales y las alternativas de pre-enfriamiento/post-enfriamiento.

Los miembros de ASCC reconocen que los estándares de la industria para el control térmico del concreto masivo no eliminan el riesgo de agrietamiento, dado el alcance limitado de los límites de temperatura especificados. Los planes de control térmico mitigan el riesgo de fisuración térmica, pero el concreto masivo bajo control térmico puede presentar grietas debido a restricciones externas, secado, contracción autógena y/o química, cambios volumétricos y condiciones geométricas de restricción inherentes al elemento y fuera del alcance especificado.

Los miembros de ASCC trabajarán con los miembros del equipo del proyecto para encontrar soluciones que cumplan con la calidad especificada del trabajo, optimicen el cronograma del proyecto y reduzcan costos mientras se minimizan los riesgos inherentes a las colocaciones de concreto masivo.

Para cualquier pregunta, contacte a su contratista de concreto ASCC o llame a la Línea de ayuda técnica de ASCC al 1-800-331-0668.

Esta declaración de posición de la Asociación Americana de Contratistas de Concreto (American Society of Concrete Contractors) es presentada por los editores para el interés del lector. Las opiniones expresadas no son necesariamente las del American Concrete Institute. Se invita a los lectores a enviar sus comentarios.



Título original en inglés:
American Society of Concrete Contractors
Position Statement #49.
Mass Concrete Construction

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



Traductora:
**Ing. Maria Jesús
Domínguez Ramos**



Revisor Técnica:
**Dr. Josseph Eli
Mandujano Zavala**

Conceptos erróneos de GFRP – Parte 2

Existen muchos materiales de diseño en la “caja de herramientas” de un ingeniero estructural que deben evaluarse según las condiciones estructurales y ambientales en consideración: concreto, acero de refuerzo convencional, presfuerzo, e incluso acero estructural y madera. Como ingenieros, sabemos que ni siquiera el concreto es ideal para todas las estructuras. Del mismo modo, las barras de refuerzo de Polímero reforzado con fibra de vidrio- GFRP (por sus siglas en inglés) no pueden utilizarse en todas las aplicaciones de concreto reforzado. No debemos temer a la innovación, ya que esta expande las posibilidades, y cada vez se desarrollan más investigaciones con ese propósito. También se han logrado muchos avances en aceros especiales, con y sin recubrimiento, para el refuerzo del concreto.

En esta serie de artículos en formato de preguntas y respuestas, intentaremos aclarar algunas preguntas y malentendidos comunes sobre las barras de refuerzo de GFRP. Estas se comparan con las barras de acero para ofrecer una referencia basada en un material con el que el lector probablemente esté más familiarizado.

Agradecemos el apoyo brindado para esta serie por el American Composites Manufacturers Association (ACMA) – FRP Rebar Manufacturers Council, y por NEx: An ACI Center of Excellence for Nonmetallic Building Materials.

P1. *Trazabilidad: Una vez que las barras lleguen al sitio del proyecto, ¿cómo podré identificar qué productos corresponden a cuáles?”*

R1. Los compradores de barras de refuerzo GFRP pueden solicitar en su orden de compra o en los documentos contractuales que el fabricante proporcione un certificado de análisis (COA) para las barras, garantizando la calidad y el cumplimiento con las especificaciones de materiales de ASTM International (ASTM D7957/D7957M¹ o D8505/D8505M²) en el momento de la adquisición. El COA incluye tanto los resultados de los ensayos como los valores mínimos de referencia. Además, cada barra tendrá marcas impresas para permitir la verificación con estos COA. Cada barra está claramente marcada con la especificación ASTM, el tamaño nominal, el nombre del fabricante y el número de lote, lo que permite una identificación y trazabilidad sencilla para resolver cualquier duda. Esto asegura que siempre sepas qué productos se tienen en obra, y es equivalente a un certificado de molino (mill cert) en el caso del acero de refuerzo.

¿Se permite usar barras de refuerzo de acero y barras de refuerzo GFRP juntas en la misma estructura o en el mismo elemento estructural?

P2.

R2. Las disposiciones actuales del Código ACI-440.1R-22 establecen que los elementos estructurales individuales deben diseñarse utilizando barras de refuerzo GFRP o barras de acero, pero no ambas dentro del mismo elemento. Dentro de una misma estructura, algunos elementos pueden diseñarse con barras GFRP y otros con barras de acero, siempre y cuando se sigan las disposiciones correspondientes. Para enfatizar esta distinción, el diseño de elementos que utilicen simultáneamente barras de refuerzo GFRP y barras de acero en un mismo miembro estructural no está cubierto ni por el Código ACI-440.1R-22 ni por el Código ACI-318-19. Es posible que esto se permita en futuras versiones del código, ya que actualmente se están llevando a cabo investigaciones sobre elementos resistentes a fuerzas sísmicas que combinan ambos tipos de refuerzo. Además, es importante señalar que no existe ningún problema en mezclar barras GFRP con barras de acero, ya sean revestidas o sin revestir, desde la perspectiva de interacción entre metales disímiles (como sí ocurre con algunas combinaciones de barras de acero), debido a que el GFRP es completamente no ferroso.

P3. *Sostenibilidad: ¿Existe algún beneficio en términos de carbono incorporado al usar barras de refuerzo GFRP? Parece que debería haber alguno según lo que sé sobre los métodos de producción.*

R3. Las Reglas de Categoría de Producto (Product Category Rules, PCR, por sus siglas en inglés) para el desarrollo de Declaraciones Ambientales de Producto (Environmental Product Declarations, EPD, por sus siglas en inglés) de barras de refuerzo de polímero reforzado con fibra (fiber-reinforced polymer, FRP, por sus siglas en inglés) se han publicado recientemente para Norteamérica, mientras que otras regiones del mundo cuentan con PCR alternativas. Con esto en mente, la American Composites Manufacturers Association (ACMA) ha lanzado un generador de EPD para facilitar su elaboración dentro de la industria de los compuestos. Varios fabricantes de barras de refuerzo de polímero reforzado con fibra de vidrio (glass-fiber-reinforced polymer, GFRP, por sus siglas en inglés) ya han publicado EPD a nivel mundial, y otros se encuentran en proceso gracias al apoyo de ACMA. Los compradores u otras partes interesadas pueden contactar al fabricante para obtener la EPD específica de su producto. Aunque resulta tentador comparar EPD entre productos, y estas comparaciones pueden dar una idea de la escala relativa, no deberían hacerse comparaciones directas, ya que los productos no se desarrollaron bajo las mismas PCR (como es el caso entre acero y GFRP). Dicho esto, se puede obtener una idea aproximada por pie lineal. Dado que el peso de las barras GFRP es aproximadamente entre un tercio

y una cuarta parte del peso de una barra de acero del mismo tamaño, y considerando que el diseño de un elemento estructural puede no permitir una sustitución uno a uno, las comparaciones pueden ser complicadas. En una comparación material a material, basada en una longitud de un pie de barras del mismo tamaño, bajo un análisis cuna a puerta (módulos A1-A3) y dentro del mercado norteamericano, las barras GFRP podrían ofrecer entre un 10% y un 50% de reducción en emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), dependiendo del fabricante usado en la comparación. Las comparaciones a nivel del diseño del elemento estructural indican que la diferencia entre GFRP y acero probablemente se sitúa dentro de un ± 10 a 15% para diseños comunes de concreto reforzado, según las consideraciones estructurales específicas.

Tabla 2.4a — Límites sobre el número permitido de pisos para edificios con rociadores automáticos, sin requerimiento de resistencia al fuego según el tipo de construcción.

	II-B	III-B (excepto muros exteriores)	V- B
Reuniones	3	3	2
Negocios	4	4	3
Educación	3	3	2
Mercantil	5	5	2
Residencial R-1, R-2	5	5	3

Fig. 1: Tabla 2.4a de la Referencia 7

Tabla 2.4b — Límites sobre el área permitida de edificios con rociadores automáticos, sin requerimiento de resistencia al fuego según el tipo de construcción.

	II-B	III-B (excepto muros exteriores)	V- B
Reuniones	34 000 ft ² (3 160 m ²)	34 000 ft ² (3160 m ²)	22 000 ft ² (2 040 m ²)
Negocios	92 000 ft ² (8 550 m ²)	76 000 ft ² (7 060 m ²)	36 000 ft ² (3 340 m ²)
Educación	58 000 ft ² (5 390 m ²)	58 000 ft ² (5 390 m ²)	38 000 ft ² (3 530 m ²)
Mercantil	50 000 ft ² (4 640 m ²)	50 000 ft ² (4 640 m ²)	36 000 ft ² (3 340 m ²)
Residencial R-1, R-2	64 000 ft ² (5 950 m ²)	64 000 ft ² (5 950 m ²)	28 000 ft ² (2 600 m ²)

Fig. 2: Tabla 2.4b de la Referencia 7

Además, se lograrían beneficios adicionales en las etapas de transporte y construcción (módulos A4 y A5, donde la reducción de peso contribuye significativamente en transporte y manejo), así como en la durabilidad de las estructuras, como (por ejemplo, en puentes con vida útil de 100 años y menores costos de mantenimiento).

Las entradas/datos para la etapa de uso (módulo B), la etapa de fin de vida (módulo C) y las consideraciones más allá de los límites del sistema, como el reciclaje y la reutilización (módulo D), dependen de cada proyecto. Esto dificulta su cuantificación y, hasta la fecha, las discusiones se han mantenido a un nivel cualitativo. Actualmente existen esfuerzos en la industria para reciclar tanto la resina como la fibra de los compuestos, con la expectativa de que estos procesos alcancen madurez antes de que se requieran para el concreto reforzado con GFRP.

En Estados Unidos, la fabricación de acero utiliza un alto contenido de reciclado y métodos de producción con hornos de arco eléctrico (EAF, por sus siglas en inglés), lo que la convierte en una de las más limpias del mundo. A nivel global, no todas las barras de refuerzo de acero se fabrican mediante estos métodos, por lo que las comparaciones pueden variar considerablemente según la región.

P4. *Temperaturas elevadas e incendios: ¿Cuáles son exactamente las limitaciones de las estructuras de concreto reforzado con GFRP en lo que respecta a incendios y temperaturas elevadas?*

R4. Según la Sección 4.11 del Código ACI-440.11-22, las barras de refuerzo GFRP no pueden utilizarse en estructuras que requieran una temperatura de servicio elevada o una clasificación de resistencia al fuego, a menos que se demuestre mediante cálculos o ensayos que la resistencia al fuego del elemento es adecuada y que esto sea aprobado por la autoridad correspondiente. Recordemos que en la especificación del material se requiere una temperatura de transición vítrea (T_g) mínima, y que esta es la temperatura T_g a la cual el compuesto pasa de una consistencia sólida y rígida a una menos rígida, basada en el módulo del material. El Código ACI-440.11-22 limita la temperatura de servicio de los elementos reforzados con barras GFRP a 185° (85°C). El documento ACI/NEx MNL-6(23)⁷ describe las limitaciones del International Building Code (IBC) en las Tablas 2.4a y 2.4b (ver Fig.1 y Fig. 2,

respectivamente), con la siguiente orientación: las clasificaciones de resistencia al fuego generalmente se requieren para columnas de concreto reforzado, losas elevadas, vigas y muros estructurales en tipos de edificaciones que exigen resistencia estructural al fuego (por ejemplo, edificios de gran altura, escuelas y hospitales). Elementos como losas apoyadas sobre el terreno y zapatas generalmente no requieren resistencia al fuego. Además, hay muchos tipos de edificios comunes que no requieren clasificaciones de resistencia estructural al fuego. Se está llevando a cabo una investigación significativa sobre el comportamiento al fuego del concreto reforzado con GFRP (Fig. 3) para el próximo ciclo del Código ACI-440.11. Los estudios han mostrado que la resina



Fig. 3: Investigación en curso dirigida por Mark Green, de Queen's University, y Hamzeh Hajjloo, de Carleton University, sobre concreto reforzado con GFRP bajo condiciones de incendio
(Fotos cortesía de MST Rebar Inc.)

se degrada dentro del concreto, pero las fibras permanecen y, si existe un anclaje suficiente en una zona fría (es decir, un área donde no haya fuego), el desempeño puede ser adecuado para cumplir con las clasificaciones de resistencia al fuego requeridas.

P5. *Disposiciones sísmicas: Entiendo que existen limitaciones para el uso de barras de refuerzo GFRP en regiones de alta sismicidad, ¿es correcto?*

R5. El Prefacio del Código ACI-440.11-22 establece que las disposiciones de diseño cubren el diseño de miembros de concreto reforzado con GFRP en estructuras asignadas a la Categoría de Diseño Sísmico (SDC, por sus siglas en inglés) A, y el diseño de miembros de concreto reforzado con GFRP en SDC B y C, siempre y cuando esos miembros no estén designados como parte del sistema resistente a fuerzas sísmicas. Actualmente se está realizando investigación con el objetivo de ampliar estas disposiciones⁸.

El Código ACI-440.11-22 no incluye disposiciones de diseño para miembros estructurales de concreto en estructuras ubicadas en SDC D, E y F.

P6. *Limitaciones: ¿Debería preocuparme por usar barras de refuerzo GFRP a la luz de las limitaciones que el Código está imponiendo sobre su uso?*

R6. La respuesta corta es “no”. Casi todas las “nuevas” tecnologías tienen límites en el Código, especialmente cuando se incluyen por primera vez como materiales aceptables, e incluso mucho después de eso. Aunque el Código ACI-318-19 (del American Concrete Institute, ACI, por sus siglas en inglés) no especifica una resistencia máxima para el concreto, varias disposiciones de diseño sí establecen un límite equivalente a $f'_c = \sqrt{100}$, lo que en la práctica limita la resistencia máxima del concreto a 10 000 psi. Además, la Tabla 20.2.2.4(a) del Código ACI-318-19 establece límites máximos para la resistencia de fluencia del acero de refuerzo en distintas condiciones de carga y aplicaciones estructurales. Estos límites son de 60, 80 o 100 ksi para diferentes aplicaciones sísmicas, de flexión, corte y torsión.

P7. *Actualmente no es disponible la opción de empalmes mecánicos o barras con cabeza en GFRP. ¿Se están desarrollando estas soluciones? ¿Y por qué cosas como el doblado en sitio todavía no son posibles?*

R7. La industria ha trabajado arduamente durante las últimas décadas para completar un código de diseño para puentes (a través de AASHTO) y edificios (a través de ACI), junto con las especificaciones de materiales correspondientes (a través de ASTM International). Con esas normas ya establecidas, la investigación continúa en varias áreas prometedoras, principalmente empalmes mecánicos, barras con cabeza y la posibilidad de doblar barras GFRP después de su producción. Varios fabricantes y universidades en Estados Unidos y Canadá están trabajando en el desarrollo de un sistema de acoplamiento/empalme mecánico para barras GFRP. El documento ICC-ES “AC552: Criterio de aceptación para sistemas mecánicos de empalme para barras reforzadas con fibra de vidrio” (*Acceptance Criteria for Mechanical Splice Systems for Fiber Reinforced Polymer (FRP) Bars*)⁹ fue aprobado en 2023. Idealmente, y para mantener la naturaleza no corrosiva del GFRP, estos acopladores deberían ser no metálicos. Sin embargo, se están realizando ensayos para calificar barras GFRP con acopladores metálicos comercialmente disponibles, lo cual podría ser una opción a más corto plazo.

Las barras con cabeza también son de disponibilidad limitada. La norma CSA S807:19¹⁰ incluye algunas disposiciones para la fabricación de barras con cabeza, pero aún no se han desarrollado estándares más amplios. Este será un campo para futuros avances. Además, en relación con la capacidad de doblar barras GFRP, se está desarrollando la producción de barras GFRP utilizando resinas termoplásticas. A diferencia de las resinas termoestables, que curan y no se pueden ablandar de forma que permitan una manipulación a nivel de producción, las resinas termoplásticas tienen una estructura polimérica más flexible y podrían permitir dicha manipulación. Esto permitiría doblar las barras GFRP después de fabricadas, ya sea en una planta de prefabricación o incluso en campo. Es importante señalar que la posibilidad de doblar barras después de su producción requeriría controles de calidad rigurosos. Sin embargo, este es un desarrollo posible, al igual que todos los mencionados anteriormente, y representa un gran potencial para la industria.

Referencias

1. ASTM D7957/D7957M-22, "Standard Specification for Solid Round Glass Fiber Reinforced Polymer Bars for Concrete Reinforcement," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2022, 5 pp.
2. ASTM D8505/8505M-23, "Standard Specification for Basalt and Glass Fiber Reinforced Polymer (FRP) Bars for Concrete Reinforcement," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2023, 8 pp.
3. ACI Committee 440, "Building Code Requirements for Structural Concrete Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars—Code and Commentary (ACI CODE-440.1I-22)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2023, 260 pp.
4. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary (ACI 318R-19) (Reapproved 2022)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019, 624 pp.
5. NSF 1125-25, "Fiber Reinforced Polymer Composite Products – Rebar or Dowel Bars," NSF International, Ann Arbor, MI, Oct. 2025, 27 pp.
6. CRSI, "Environmental Product Declaration: Steel Reinforcement Bar," Concrete Reinforcing Steel Institute, Schaumburg, IL, Sept. 2022, 13 pp.
7. ACI/NEx, "MNL-6(23): Recommended Practice Guidelines for FRP Bars in Pre-Engineered Projects," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2023, 80 pp.
8. Harries, K.A.; Ospina, C.E.; Marsh, M.L.; Alcocer, S.M.; and Kanitkar, R., "Challenges and Opportunities for the Seismic Design of Structural Concrete with GFRP Bars," Concrete International, V. 47, No. 12, Dec. 2025, pp. 29-33
9. ICC-ES, "AC552: Acceptance Criteria for Mechanical Splice Systems for Fiber Reinforced Polymer (FRP) Bars," ICC Evaluation Service, LLC, Brea, CA, Oct. 2023, 6 pp.
10. CSA S807:19 (R2024), "Specification for Fibre-Reinforced Polymers," CSA Group, Toronto, ON, Canada, 2019, 67 pp.

Agradecimientos a Danielle Kleinhans, FACI, Directora de Ingeniería y Desarrollo de Negocios en Mateenbar Composite Reinforcements, LLC, Charlotte, Carolina del Norte, EE. UU., por proporcionar las respuestas a estas preguntas.

Las preguntas de esta columna fueron formuladas por usuarios de los documentos del ACI y han sido respondidas por personal del ACI o por uno o más miembros de los comités técnicos del ACI. Las respuestas no representan la posición oficial de ningún comité del ACI. Los comentarios deben enviarse a lacey.stachel@concrete.org

Título original en inglés:
**Concrete Q&A.
GFRP Misconceptions—Part 2**

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



Traductor:
**Est. Sebastian
Agüero Ricatti**



Revisión Técnica:
**Ing. Minor Murillo
Chacón**

FELIZ NAVIDAD Y UN PRÓSPERO AÑO 2026

PARA TODOS NUESTROS LECTORES, COLABORADORES Y AMIGOS.

Ha llegado el mes de diciembre y en breve estaremos iniciando el año 2026, con todos sus retos y oportunidades. Es ahora el momento de disfrutar en familia estas fiestas, reflexionar sobre lo logrado en este año que termina y establecer metas y objetivos para el que viene. A lo largo de más de cinco años, hemos establecido un vínculo importante entre ACI en Latinoamérica y la industria. Cada mes nuestro impacto en las comunidades crece, y ahora el reto es incrementar esa presencia durante el año venidero y continuar colaborando con el ACI para difundir el conocimiento en el mundo de habla hispana.

Asimismo, el trabajo en equipo en este proyecto ha fortalecido el vínculo entre los miembros de los distintos Capítulos del ACI en Latinoamérica, el Comité Editorial y todas las personas involucradas en la realización de la revista, generando un valioso espacio de colaboración y amistad entre todos. Enhorabuena. Vale la pena destacar como un logro importante de este 2025 el contar finalmente con una página de internet propia (www.acilatinoamerica.com), en la que nuestros lectores e interesados pueden encontrar el acervo completo de todos los números de la revista. Esto brinda un potencial mucho mayor para la difusión del conocimiento, al permitir la consulta de artículos y temas de interés independientemente de su fecha de publicación. Para 2026 buscaremos aprovechar plenamente el potencial de comunicación que la página nos ofrece para compartir experiencias, logros, eventos y proyectos de cada Capítulo de Latinoamérica, además de continuar con la publicación oportuna de nuestra revista.

En esta temporada, queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todos nuestros lectores por acompañarnos a lo largo de este 2025. Cada edición que llega a sus manos es fruto de un esfuerzo colectivo que busca inspirar, informar y fortalecer a la comunidad del concreto y del ACI, así como a la industria de la construcción en toda nuestra región.

Agradecemos profundamente a los colegas y compañeros de los Capítulos de ACI en Latinoamérica por su gran contribución y pasión dedicadas a este proyecto mes con mes. Gracias a ustedes, Concreto Latinoamérica es y seguirá siendo un espacio de referencia técnica para nuestra industria. Queremos agradecer también a los miembros del Comité Editorial por su trabajo y tiempo dedicados a la elaboración de la revista, a los revisores técnicos y editoriales, y a todos los que de una u otra forma participan en este proyecto. De manera muy especial, agradecemos el apoyo de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Autónoma de Nuevo León y su área de Enlace Interinstitucional, Comunicación e Imagen por el soporte que nos brindan en la elaboración mensual de la revista.

Finalmente, deseamos que para todos esta Navidad traiga paz y grandes momentos de unión familiar y amistad. Que el 2026 llegue cargado de salud, bienestar y, en el ámbito profesional, nuevos proyectos, soluciones innovadoras y oportunidades para seguir construyendo, literal y figuradamente, un mejor futuro en concreto para América Latina.

¡FELICES FIESTAS Y PRÓSPERO AÑO NUEVO!

atentamente

COMITÉ EDITORIAL

Revista Digital Concreto Latinoamérica



CONCRETO
LATINOAMÉRICA