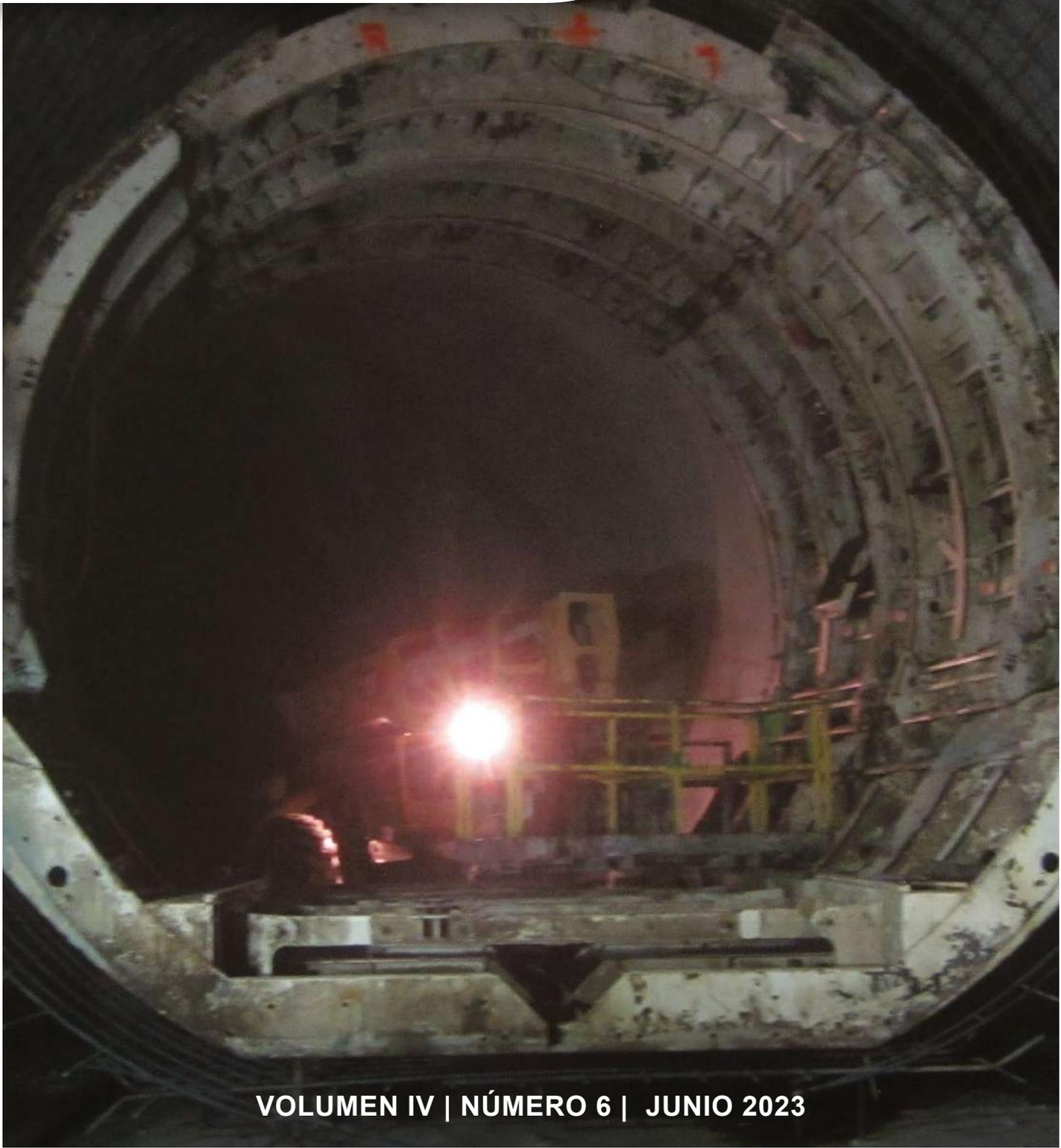


# CONCRETO

LATINOAMÉRICA



VOLUMEN IV | NÚMERO 6 | JUNIO 2023

# CONCRETO

## LATINOAMÉRICA

Volumen IV - Número 6  
Junio de 2023

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

## CONTENIDO

1

### El Corazón de la Innovación en SPARK, Arabia Saudita

Traducción y revisión técnica a cargo del Capítulo: Ecuador Centro y Sur

2

### Diseño de Revestimiento de Túnel, Parte 1: Consideraciones de Diseño

Traducción y revisión técnica a cargo del Capítulo: México Noroeste

3

### Una formaleta para concreto sostenible, ajustable y reusable

Traducción y revisión técnica a cargo del Capítulo: Colombia

4

### Preguntas y Respuestas. Diseñando programas de apuntalamiento/ reapuntalamiento para un proyecto acelerado

Traducción y revisión técnica a cargo del Capítulo: México Noreste

## COMITÉ EDITORIAL:

### Presidente del Comité Editorial:

Dr. Jorge Maurilio Rivera Torres

Presidente de la Sección Noreste de México del ACI.(2022-2024)

### Editor en Jefe:

Ing. José Lozano y Ruy Sánchez

### Editores Asociados:

Dr. Lucio Guillermo López Yépez

Dra. Margareth Josefina Dugarte Coll

Dr. Francisco Rene 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. Julián Capetillo Castillo

LDG. Anakaren Lozano González

Hannia Annett Molina Frías

---

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

### Diseño Editorial: Comunicación e

Imagen Institucional FIC-UANL

---

### Cualquier asunto relacionado con la publicación

contactarse a :

Correo: concretolatam@gmail.com

Tel: +52 81 2146 4907

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 Junio del 2023. El Instituto no se hace responsable por las declaraciones u opiniones expresadas en sus publicaciones. Las publicaciones del instituto no pueden ni pretenden suplantar el entrenamiento técnico individual, responsabilidad o juicio del usuario o de quien provee y presenta la información. Con el propósito de difundir el conocimiento técnico del concreto, se autoriza la difusión de la presente edición a los Capítulos del ACI de habla hispana entre su membresía y grupos de interés, sin embargo, será necesaria la autorización del American Concrete Institute para reproducir total o parcialmente los contenidos de este número salvo que se hagan para uso personal o académico y sin fines comerciales. Todos los materiales originales en inglés, y contenidos en este número de Concreto Latinoamérica en español, están protegidos por las leyes de Derechos de autor y propiedad industrial, tanto nacionales como internacionales.

## Representantes de los Capítulos ACI de Latinoamérica:

**Argentina**  
**Colombia**  
**Costa Rica**  
**Ecuador Centro y Sur**  
**Guatemala**

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

Dr. Raúl Bertero  
Dra. Nancy Torres Castellanos  
Ing. Minor Murillo Chacón  
Ing. MSc. Santiago Vélez Guayasamín  
Ing. Luis Alvarez Valencia  
Ing. Xiomara Sapón Roldán  
Dr. Jorge Maurilio Rivera Torres  
Ing. Oscar Ramírez Arvizu  
Arq. Arturo Rodríguez Jalili  
Mtro. Joseph Eli Mandujano Zavala  
Ing. Jorge L. Quirós  
Ing. Julio Antonio Higashi Luy  
Ing. Anabel N. Merejildo



*Fotografía que muestra el soporte de concreto lanzado sobre la superficie natural, así como el acero de refuerzo para el recubrimiento de concreto del túnel. Debido a la interacción entre el terreno natural y el recubrimiento, se genera una capacidad estructural que puede soportar las cargas, y permite incluso, en casos especiales, construir dicho recubrimiento sin acero de refuerzo, sin comprometer la seguridad y estabilidad de la estructura. La construcción de túneles es muy utilizada en ingeniería civil para obras de transporte, suministro de agua o drenajes, conducción de otro tipo de servicios como gas, energía, etc., y para fines militares. Para más información consulte el artículo 2 "Diseño de recubrimiento de túneles parte 1" de este número de la revista Concreto Latinoamérica.*

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

Dr. Francisco René Vázquez  
Dr. José Valdez Aguilar  
Ing. MC. Francisco David Anguiano Pérez  
Dr. Alejandro Durán Herrera

# ¡Únete Hoy!

Conoce tu capítulo local ACI

300 + Capítulos profesionales  
y estudiantiles.

[www.concrete.org](http://www.concrete.org)



American Concrete Institute  
*Always advancing*



# El Corazón de la Innovación en SPARK, Arabia Saudita

*El primer tablero de puente reforzado con barras GFRP en el GCC.*

*Por by Eid H. Bader, Julien M. Saade, Muhammad K. Rahman, Oscar D. Salazar Vidal, Sami A. Al-Abduljabbar, Muhammad S. Hameed, y Zaid N. El Majali*

King Salman Energy Park (SPARK), una ciudad industrial en Arabia Saudita, es un proyecto de desarrollo multimillonario que se presenta como un ecosistema industrial y un centro energético que atraerá y albergará a organizaciones energéticas vibrantes e internacionalmente reconocidas. SPARK también es un importante contribuyente a la iniciativa Visión 2030 de Arabia Saudita en sus esfuerzos por apoyar los objetivos de diversificación del Reino. Como parte de estos esfuerzos, SPARK ha anunciado la implementación de múltiples soluciones de construcción altamente innovadoras y sostenibles. Las barras de polímero reforzado con fibra de vidrio (GFRP, por sus siglas en inglés), como refuerzo en estructuras de concreto, son una de estas tecnologías líderes para ayudar a SPARK a obtener la certificación Plata de Liderazgo en Diseño Energético y Ambiental (LEED).

La ciudad industrial consta de tres zonas principales, que incluyen una comunidad industrial, una comunidad no industrial y una zona logística. La ciudad está estratégicamente ubicada a lo largo

de la propuesta Línea de Cooperación del Golfo (GCC, por sus siglas en inglés), también conocida como Ferrocarril del Golfo, que conectará los seis estados miembros del GCC en el este de Arabia para facilitar el acceso y el comercio con los mercados locales, regionales e internacionales.

El puente SPARK (Fig. 1) se construyó en Buqayq para dirigir el tráfico vehicular hacia la entrada principal de la ciudad industrial. Construido en 2020, el puente de 71 m (233 pies) de largo, con vigas de concreto pretensadas y prefabricadas y una losa de concreto reforzada con barras GFRP, es el primero de su tipo en el GCC. Ubicado a solo 24 km (15 millas) de la costa del Golfo Árabe, el puente está expuesto a duras condiciones ambientales caracterizadas por una alta salinidad ambiental, alta humedad y arenas de dunas contaminadas con sal arrastrada por el viento. En tal ambiente, las barras GFRP eliminan el riesgo de futuros deterioros del concreto debido a la corrosión.



**Fig 1: Puente Spark después de su finalización.**

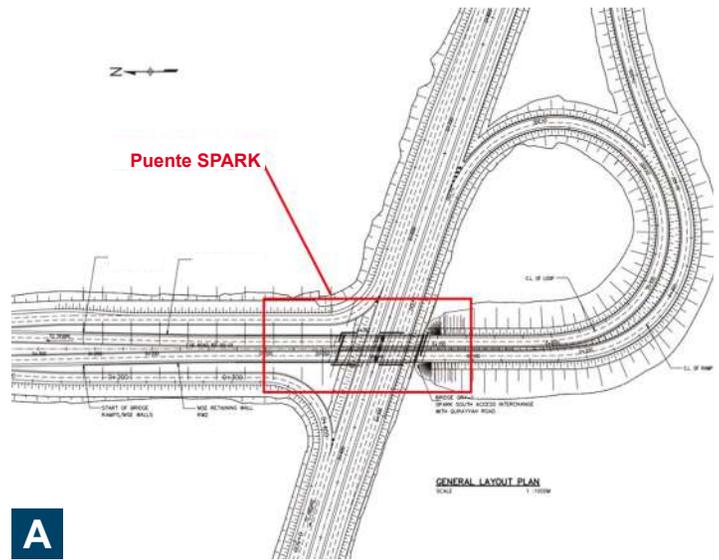
En los Estados Unidos hay más de 617,000 puentes tradicionales, de los cuales 259,000 (42%) tienen al menos 50 años de antigüedad, y 46,154 (7.5%) se consideran estructuralmente deficientes<sup>1</sup>. Los costos de rehabilitación estimados para estos puentes ascienden a 125 mil millones de dólares<sup>1</sup>. Las duras condiciones ambientales y el deterioro climático prevalentes causan la corrosión del refuerzo de acero, lo que lleva a grietas y daños en estructuras de concreto armado como pavimentos de concreto, cimientos, aceras y puentes. Para construir infraestructuras más duraderas y sostenibles que puedan resistir condiciones adversas de exposición, se pueden utilizar materiales no metálicos libres de corrosión, como barras de polímero reforzado con fibra de vidrio (GFRP), como una alternativa viable, más duradera y sostenible al refuerzo de acero<sup>2</sup>.

Actualmente, en América del Norte existen más de 267 puentes diseñados y construidos utilizando barras de polímero reforzado con fibra (FRP, por sus siglas en inglés) - 65 en los Estados Unidos y 202 en Canadá<sup>3</sup>.

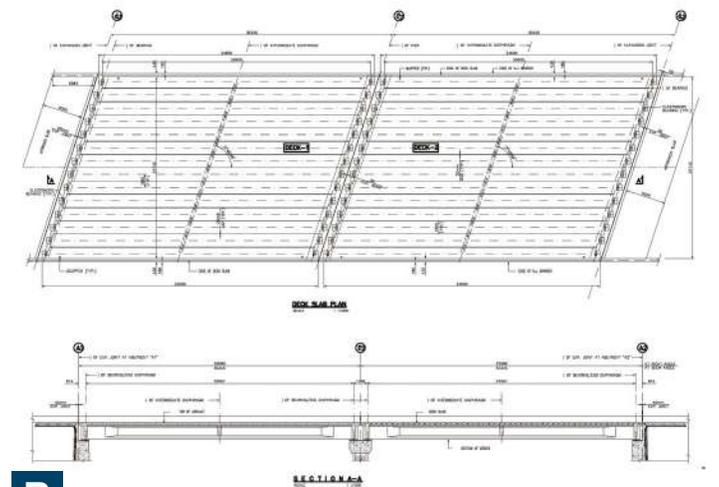
Para avanzar en el conocimiento y la aplicación de materiales de construcción no metálicos, incluido el refuerzo GFRP, Saudi Aramco colaboró con ACI para establecer NEx: un Centro de Excelencia de ACI para Materiales de Construcción No Metálicos. Varios fabricantes globales de barras GFRP, incluido IKK Mateenbar, son miembros activos de NEx.

## Equipo del Puente SPARK

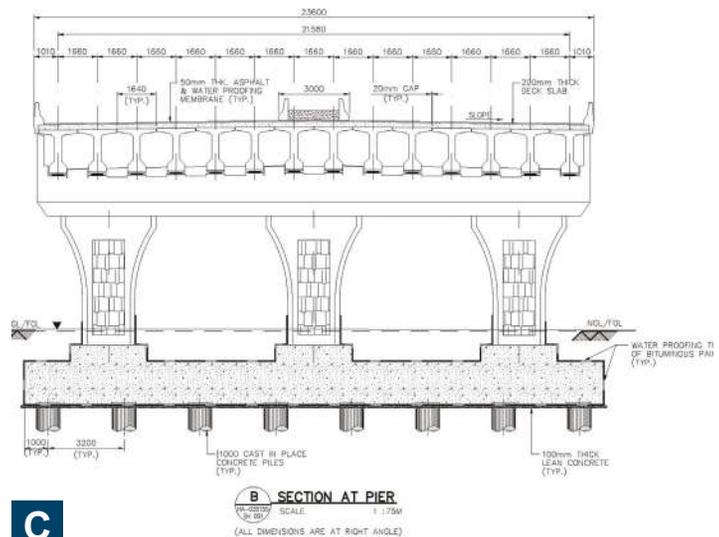
La ciudad industrial está siendo desarrollada, operada y gestionada por Saudi Aramco y la Autoridad Saudita de Ciudades Industriales y Zonas de Tecnología (MODON, por sus siglas en inglés). El Departamento de Servicios de Consultoría de Saudi Aramco (CSD) participó en el desarrollo de paquetes de ingeniería de diseño y especificaciones para el puente. El Equipo de Gestión de Proyectos (PMT, por sus siglas en inglés) de Saudi Aramco fue responsable de supervisar todos los aspectos relacionados con la construcción del puente y garantizar el cumplimiento de las últimas normas de ingeniería y especificaciones de materiales establecidas por Saudi Aramco. El diseño estructural del puente



**A**



**B**



**C**

**Fig 2: Planos del diseño del puente: (a) Plano maestro del proyecto; (b) Vista en planta del puente; (c) Vista de la sección (de referencia 10).**

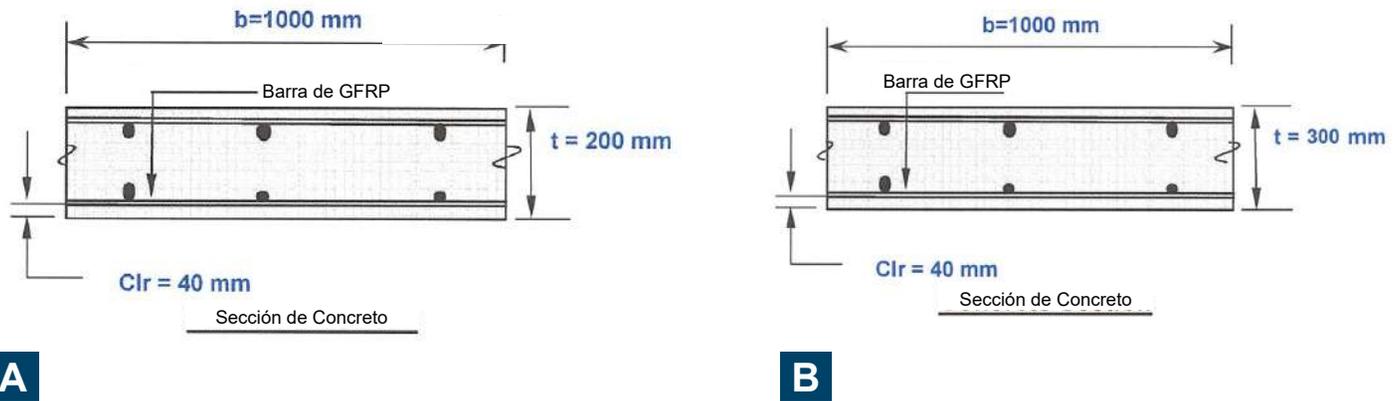


Fig 3: Sección transversal: (a) Piso del Puente; (b) Losa de aproximación (de referencia 10).

SPARK fue realizado por Saudi Arabian Parsons Ltd. (SAPL), una firma de diseño internacional especializada en ingeniería civil, arquitectura y gestión de proyectos. La construcción del puente fue llevada a cabo por Shihb Al-Jazira Contracting Company (SAJCO), una empresa de construcción especializada en ofrecer soluciones de construcción de alta calidad para una amplia gama de proyectos civiles. El fabricante de las barras GFRP para el proyecto fue IKK Mateenbar, un destacado productor de barras GFRP ubicado en Dammam, Arabia Saudita. IKK Mateenbar era conocido anteriormente como Pultron Composites.

## Refuerzo de concreto

En Arabia Saudita, se utiliza predominantemente el refuerzo recubierto de epoxi (ECR, por sus siglas en inglés), que cumple con las últimas normas del Ministerio de Transporte (MOT) para puentes. Saudi Aramco está liderando el camino en Arabia Saudita al mostrar los beneficios y ventajas de utilizar barras GFRP en lugar de ECR. El uso de materiales no metálicos en entornos corrosivos elimina los costos de mantenimiento y aumenta la vida útil de las estructuras de concreto en más de 100 años. Estas ventajas se alinean con los objetivos de Visión 2030 de Arabia Saudita de utilizar materiales más sostenibles para diversificar la economía del reino y reducir el consumo de energía para disminuir las emisiones totales de CO<sub>2</sub>.

## Normas de Saudi Aramco

Saudi Aramco publicó una especificación de barras de polímero reforzado con fibra (FRP, por sus siglas en inglés) (12-SAMSS-027<sup>4</sup>) en 2017. Esto fue seguido por una norma de ingeniería (SAES-Q-001<sup>5</sup>) que incorpora barras de FRP como reemplazo directo de las barras de acero de refuerzo y ECR en entornos corrosivos. Se exigió el uso de barras de FRP en varias aplicaciones estructurales no críticas, que incluyen losa de cimentación, canales de drenaje superficial, aceras, pavimentos de concreto y durmientes de tuberías. La norma también permite el uso de barras de FRP en uniones de juntas en pavimentos de concreto y aplicaciones de losa de cimentación para limitar la restricción de movimientos de expansión y contracción, como sustituto del acero, las barras recubiertas de epoxi y las barras de acero inoxidable. La norma también permite ajustes en el diseño de la mezcla de concreto, el recubrimiento de concreto y las medidas de protección de la durabilidad del concreto para aprovechar aún más los beneficios del uso de refuerzo de FRP. SAES-Q-001, publicada en 2023<sup>6</sup>, ha expandido el uso del refuerzo de FRP a todas las condiciones de exposición al concreto, excepto en la construcción de fosas de azufre.

## Conversión a Barras GFRP

El Departamento de Servicios de Consultoría de Saudi Aramco (CSD) propuso inicialmente el uso de ECR en el diseño del puente SPARK en 2017. Para promover el uso de materiales no metálicos en aplicaciones estructurales, el CSD amplió el uso de barras GFRP al incluirlas en la superestructura del puente, sabiendo que es un componente estructural crítico expuesto a una amplia variedad de cargas dinámicas de vehículos. Posteriormente, el diseño se revisó para incluir refuerzo de GFRP en la etapa de diseño detallado como reemplazo del ECR tradicional en la plataforma del puente, las losas de aproximación y las barreras. Se eligieron barras GFRP con ranuras helicoidales para ser utilizadas en el proyecto.

## Diseño estructural

El puente SPARK fue diseñado utilizando las Especificaciones de Diseño de Puentes AASHTO LRFD para Concreto Reforzado con GFRP<sup>7</sup>, ACI 440.1R-15<sup>8</sup>, ASTM D7957/D7957M-17<sup>9</sup> y 12-SAMSS-027<sup>4</sup>.

El puente SPARK es un puente de dos tramos de cuatro carriles, con una luz libre de 35.6 m y un ancho de 23.6 m (Figura 2). La superestructura del puente consta de 14 vigas pretensadas de concreto en forma de "bulb-tee" adyacentes y una plataforma de concreto reforzado colado in situ. La losa de aproximación del puente mide 5.26 m. El área total del puente es de 1917 m<sup>2</sup>. La plataforma de concreto armado y las losas de aproximación tienen un espesor de 200 mm y 300 mm, respectivamente, y están reforzadas con barras GFRP, como se muestra en la Figura 3. Los criterios de diseño para el puente por la AASHTO LRFD<sup>7</sup> y las cargas vivas vehiculares como lo indica el Manual de Diseño de Carreteras MOT (HDM, por sus siglas en inglés)<sup>11</sup>, incluyen:

### Carga del camión

- Eje delantero con dos ruedas a 40 kN (9,000 lb) y otros ejes con dos ruedas a 130 kN (29,225 lb), y
- Distancia del eje delantero al eje central de 4,300 mm (170 pulg.) y distancia del eje central al eje trasero de 4,300 a 9,000 mm (354 pulg.);

### Carga en el carril

- Carga uniformemente distribuida de 20 kN/carril/m (1,370 lb/carril/pie), y
- Carga de borde de 150 kN (11,240 lb)/carril para momento y 220 kN (49,460 lb)/carril para cortante;

Carga hipotética por eje único de 320 kN (71,940 lb);

- Resistencia del hormigón de 35 MPa (5,080 psi) para la losa del tablero de la superestructura, las barreras de New Jersey (NJ) y la losa de aproximación;
- Barras de GFPR con módulo de elasticidad a la tracción de 40 GPa (5,800 ksi) y resistencia a la tracción de 550 MPa (79,770 psi);
- Contenido de cemento de 400 kg/m<sup>3</sup> (674 lb/ yd<sup>3</sup>); - Cubierta de hormigón de 40 mm (1.5 in.) para el tablero del puente y la losa de aproximación y de 50 mm (2 in.) para la barrera NJ; y
- Límite de contracción y anchura de fisura térmica de 0.513 mm (0.020 pulg.)<sup>7</sup>.

Para cumplir con los requisitos mínimos de servicio y resistencia a flexión, la plataforma del puente se reforzó con dos capas (superior e inferior) de barras GFRP de 16 mm espaciadas a 100 mm de distancia como refuerzo principal. Las barras de distribución superior e inferior eran barras GFRP de 16 mm espaciadas a 125 mm de distancia. Para la losa de aproximación, que es una losa apoyada en el terreno, se proporcionaron dos capas de refuerzo principal GFRP de 22 mm espaciadas a 100 mm y refuerzo de distribución GFRP de 19 mm espaciado a 125 mm de distancia. Se cumplieron los requisitos de refuerzo mínimo para la temperatura del concreto y la retracción. También se diseñó una barrera de puente con una altura de 1.1 m utilizando barras GFRP.

El refuerzo principal de 13 mm (n.º 4) de GFPR espaciado a 125 mm y el refuerzo horizontal de 13 mm a una separación de 150 mm fueron suficientes para resistir las cargas aplicadas. Las barras de GFPR no fueron usadas en las barreras de NJ por falta de tiempo y retrasos en la adquisición.

## Durabilidad

El puente SPARK fue originalmente diseñado con refuerzo recubierto de epoxi (ECR) para lograr una vida útil de 75 años, según el estándar de diseño de puentes de AASHTO<sup>7</sup>. Sin embargo, las condiciones ambientales adversas en la región hicieron que el uso de ECR fuera desfavorable, ya que las losas de la plataforma son más propensas a desarrollar grietas más anchas con el tiempo, lo que puede provocar la corrosión del acero. La frecuente ocurrencia de tormentas de arena y el agua altamente contaminada con sal en las áreas alrededor del puente expondrían la estructura de concreto a altas cantidades de cloruros y sulfatos, que pueden penetrar en el concreto y llegar a áreas del acero donde el recubrimiento de epoxi se ha rayado durante el manejo e instalación. Debido a que la corrosión concentrada puede ocurrir en dichas áreas, se utilizaron barras de GFRP en varios componentes del puente para eliminar los costos de mantenimiento relacionados con la corrosión y garantizar una vida útil de más de 100 años para la plataforma del puente.

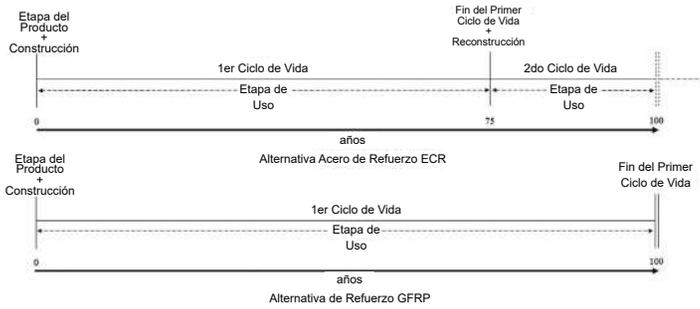
Varillas de refuerzo				
Aplicaciones	ECR*, tonelada	GFRP†, tonelada	Variación, tonelada	Ahorros, %
Losa del tablero del puente	90.0	30.0	60.0	67
Losa de aproximación	20.0	7.0	12.9	64
Total	110.0	37.0	72.9	66
Volumen de concreto, m3				
Losa del tablero del puente	370.0	335.0	35.0	10
Losa de aproximación	80.0	75.0	5.0	6
Total	450.0	410.0	40.0	9

\*La profundidad del hormigón de la opción ECR es de 300 mm para la losa de aproximación y de 220 mm para el tablero del puente.  
†La profundidad del hormigón con opción de GFRP es de 300 mm para la losa de aproximación y de 200 mm para el tablero del puente.

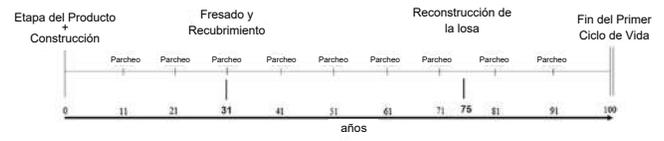
Nota: 1 tonelada = 1.1 ton; 1 m<sup>3</sup> = 1.3 yd<sup>3</sup>

## Comparación de costos iniciales

En términos de costos directos totales en el sitio, la opción de barras de GFRP ofreció ahorros de costos iniciales de aproximadamente el 2% en comparación con la opción de ECR. Las barras de GFRP permitieron reducciones en el recubrimiento de concreto y una menor resistencia del concreto, lo que resultó en una reducción total de 40 m<sup>3</sup> en la cantidad de concreto. Si bien estos ahorros fueron modestos, los ahorros adicionales de costos indirectos asociados con la instalación de barras de GFRP incluyeron reducidos requerimientos de personal y reducidos costos de alquiler para grúas de elevación. Un estudio similar realizado para otro proyecto de Saudi Aramco con barras de GFRP, el Canal de Mitigación de Inundaciones de Jazan, mostró altos ahorros de costos iniciales de más del 21%<sup>2</sup>.



**A**



**B**

Fig. 4: Ciclo de vida del proyecto: (a) vida útil; y (b) programa de mantenimiento (de la Referencia 12).

## Ciclo de vida del proyecto

Se realizó un análisis del ciclo de vida para este proyecto por SAPL, utilizando el programa de software Life-365 (Versión 2.2.3), diseñado para estimar la vida útil y los costos del ciclo de vida de estructuras de concreto armado expuestas a cloruros. Se investigaron varias alternativas utilizando el modelo, incluyendo acero tradicional, ECR y barras de acero inoxidable. En ese momento, el modelo Life-365 no incluía barras de GFRP. En un estudio más reciente, se realizó una comparación del ciclo de vida del proyecto en 2019 para un puente en Florida, EE. UU., utilizando el programa Life-365, como se muestra en la Figura 4<sup>12</sup>. Los resultados de este estudio se utilizaron como base para una comparación de costos directos entre las barras de GFRP y las barras de ECR (Figura 5) para el proyecto del puente SPARK. Se utilizaron precios locales en Arabia Saudita para el mantenimiento de la corrosión y las medidas de parcheo como base para la comparación de costos durante un período de 100 años (ver tabla 2).

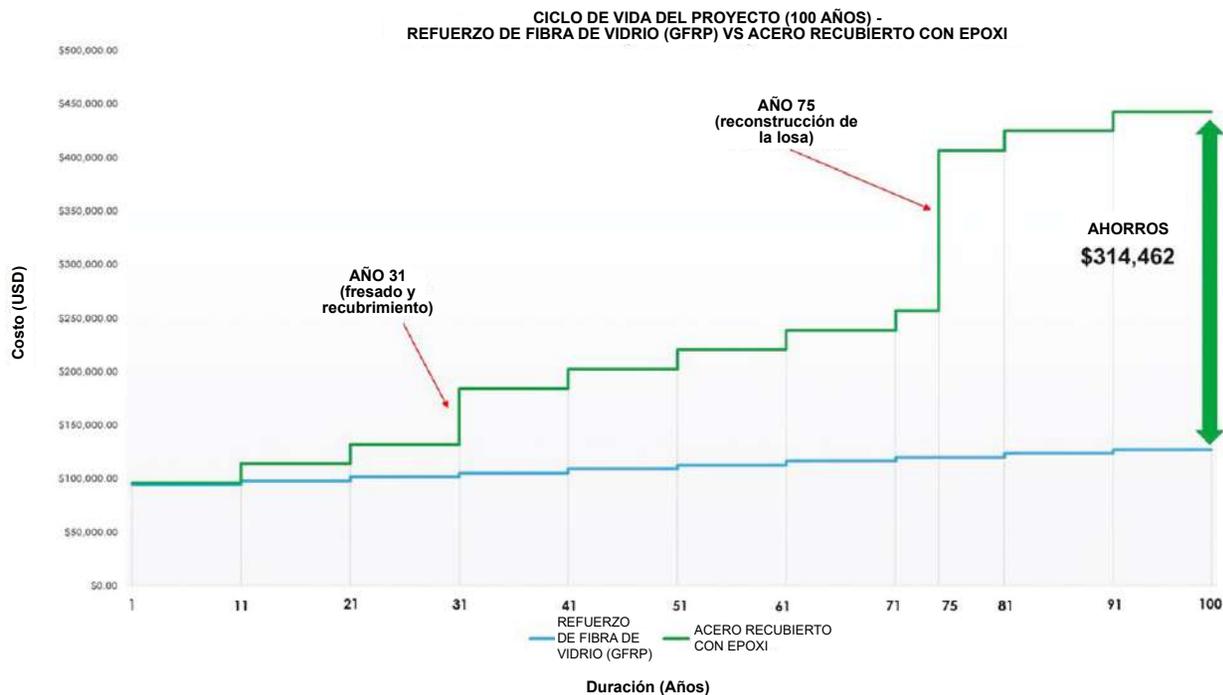


Fig. 5: Comparación de la proyección del costo del ciclo de vida del proyecto entre GFRP y ECR durante 100 años.

Según las normas de AASHTO, se asume que la opción de ECR y la opción de acero convencional tendrían la misma vida útil de 75 años<sup>7</sup>. Para la opción de ECR, se requerirá un costo atribuido al mantenimiento proactivo cada 10 años, con fresado y una capa de recubrimiento requeridos en el año 31 y recubrimiento en el año 75. El costo de mantenimiento proactivo cada 10 años se atribuirá a tener que reparar el 10% (192 m<sup>2</sup>) del área total de la superficie del puente en cada ciclo. La opción de barras de GFRP ofrece una vida útil de 100 años<sup>12</sup>. Se incluirá un costo atribuido al mantenimiento proactivo cada 10 años, basado en las reparaciones que se realizarán en el 2% (39 m<sup>2</sup>) del área de superficie de concreto, como medida conservadora para reparar las grietas según sea necesario. Por lo tanto, se prevé un ahorro de poco más de 314,462 USD con la opción de GFRP en el período de 100 años.

Año	Mantenimiento	GFRP, USD	ECR, USD	Ahorros, USD
11	Parcheo	3637*	18,183†	16,365
21	Parcheo	3637	18,183	16,365
31	Fresado y recubrimiento (mitad de la vida útil prevista para ECR)	3637	51,678‡	16,365
41	Parcheo	3637	18,183	49,860
51	Parcheo	3637	18,183	16,365
61	Parcheo	3637	18,183	16,365
71	Parcheo	3637	18,183	16,365
75	Final de los 75 años de vida de diseño para ECR	0	150,053§	150,053
81	Parcheo	3637	18,183	16,365
91	Parcheo	3637	18,183	16,365
100	Fin de la vida de diseño	-	-	-
Total		32,733	347,195	314,462

**Tabla 2. Comparación de los costos del ciclo de vida del proyecto durante 100 años a precios de mercado en Arabia Saudita en 2020.**

USD = Dólares americanos

\*Costo de mantenimiento: 2% de la superficie del tablero del puente cada 10 años para la opción GFRP

†Costo de mantenimiento: 10% de la superficie del tablero del puente cada 10 años para la opción ECR<sup>13</sup>

‡Costo por un área total de 1914 m<sup>2</sup> (20,602 ft<sup>2</sup>)

§ Costo de demolición más costo de construcción de un nuevo tablero de puente (acero, concreto, mano de obra y costo de fresado y recubrimiento), durante 25 años hasta el año 100.

## Conclusiones

El éxito de la construcción de la primera plataforma de puente reforzada con barras de GFRP en el GCC fue el resultado de un esfuerzo coordinado, defensa y cooperación técnica entre las partes interesadas en la cadena de suministro y el desarrollo y alineación con estándares internacionales. Esta implementación ha demostrado que el uso de barras de GFRP es una solución rentable y sostenible para la construcción de plataformas de puentes en los agresivos entornos del GCC.



**Fig. 6: Instalación de barras de GFRP y colocación de concreto en el puente SPARK. proyección del costo del ciclo de vida del proyecto entre GFRP y ECR durante 100 años.**

## Resumen

El puente SPARK fue construido en 2020 para apoyar y dirigir el tráfico vehicular hacia la entrada principal de la ciudad industrial. La plataforma del puente y las losas de aproximación para el puente fueron construidas con barras de GFRP en lugar de refuerzo de acero tradicional (Figura 6). Se espera que el refuerzo no metálico reduzca los costos de mantenimiento asociados a la exposición en el duro entorno existente en la ubicación del puente y aumente la vida útil del puente en más de 100 años.

Las barras de GFRP han demostrado ser una opción económica en comparación con las ECR en términos de costo inicial, tal y como presentan los resultados de este estudio. Desde la construcción del puente SPARK, el ACI CODE-440.11-22<sup>14</sup> ha publicado un nuevo código de diseño para las barras de GFRP y se espera que proporcione un mayor ahorro en el diseño y los costes de los puentes que se construyan en el futuro.

## Referencias

1. "Infrastructure Report Card – Bridges," American Society of Civil Engineers, Reston, VA, 2021, [www.infrastructurereportcard.org](http://www.infrastructurereportcard.org). (última consulta el 20 de Abril, 2023)
2. Villen Salan, E.A.; Rahman, M.K.; Al-Ghamdi, S.; Sakr, J.; Al-Zahrani, M.M.; and Nanni, A., "A Monumental Flood Mitigation Channel in Saudi Arabia," *Concrete International*, V. 43, No. 10, Oct. 2021, pp. 33-41.
3. "FRP-RC Design - Part 1," FDOT Transportation Symposium, Florida Department of Transportation, Tallahassee, FL, 2019, pp. 28-29.
4. 12-SAMSS-027, "Fiber-Reinforced Polymer Bar Materials for Concrete Reinforcement," Saudi Aramco, Jazan, Saudi Arabia, 2017, 8 pp.
5. SAES-Q-001, "Criteria for Design and Construction of Concrete Structures," Saudi Aramco, Jazan, Saudi Arabia, 2018, 22 pp.
6. SAES-Q-001, "Criteria for Design and Construction of Concrete Structures," Saudi Aramco, Jazan, Saudi Arabia, 2023, 22 pp.
7. "AASHTO LRFD Bridge Design Guide Specifications for GFRP-Reinforced Concrete," second edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC, 2018, 121 pp.
8. 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, 88 pp.
9. ASTM D7957/D7957M-17, "Standard Specification for Solid Round Glass Fiber Reinforced Polymer Bars for Concrete Reinforcement," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, 5 pp.
10. "SPARK Design Package," Saudi Arabian Parsons Ltd., Saudi Arabia, 2019.
11. "Highway Design Manual: Volume 3 – Structural Design Specifications," Ministry of Transport and Logistic Services, Riyadh, Saudi Arabia, 2013, pp. 6-12.
12. Cadenazzi, T.; Dotelli, G.; Rossini, M.; Nolan, S.; and Nanni, A., "Life-Cycle Cost and Life-Cycle Assessment Analysis at the Design Stage of a Fiber-Reinforced Polymer-Reinforced Concrete Bridge in Florida," *Advances in Civil Engineering Materials*, V. 8, No. 2, Feb. 2019, pp. 128-151.

13. Life Cycle Analysis and Assessment in Civil Engineering: Towards an Integrated Vision: Proceedings of the Sixth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering (IALCCE 2018), 28-31 October 2018, Ghent, Belgium, R. Caspeele, L. Taerwe, and D. Frangopol, eds., CRC Press, London, UK, 2018, 604 pp.

14. ACI Committee 440, "Building Code Requirements for Structural Concrete Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars—Code and Commentary (ACI CODE-440.11-22)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2023, 260 pp.

Seleccionado por el interés del lector por los editores.



El miembro de ACI **Eid H. Bader** se incorporó a IKK Mateenbar en 2019 como Gerente de Ingeniería de Ventas para liderar los esfuerzos de expansión de la empresa conjunta en Arabia Saudita y el CCG. Anteriormente trabajó para Fluor Canada Ltd. como Especialista Asociado en Ingeniería de Diseño apoyando proyectos de producción de gas en Alberta, Canadá. Bader también trabajó para Ontario Power Generation, una central de generación de energía nuclear que opera estaciones nucleares en Toronto, ON, Canadá. Es licenciado en Ingeniería Civil por la Universidad Metropolitana de Toronto, Toronto, ON, con especialidad en corriente estructural. Obtuvo su MBA en la Universidad de Warwick, Coventry, Reino Unido. Es miembro de la Sociedad Canadiense de Ingeniería Civil (CSCE).



**Julien M. Saade** se incorporó a IKK Mateenbar en 2017 como Business Development Manager (BDM) regional y mundial. Su experiencia previa en Dubái, EAU, se remonta a 2015, cuando trabajó como BDM para VSL International centrándose en el desarrollo de negocio para apoyos/juntas de dilatación de puentes y barras postensadas en la región de Oriente Medio. También trabajó para Eiffage-Ævia, París, Francia, como ingeniero técnico de ventas (apoyos y juntas de dilatación). En 2012, obtuvo su título de ingeniero civil en la École Polytechnique Universitaire de l'Université Clermont, Aubière Francia. Recibió su doctorado de la LGCGE, Norte de Francia, en colaboración con Structure & Rehabilitation en París, Francia. Su trabajo de tesis condujo al desarrollo de dos nuevos métodos para la reparación de estructuras con materiales FRP.



Miembro de ACI **Muhammad K. Rahman** es investigador y miembro de la facultad en el Centro de Investigaciones Interdisciplinarias para Construcción y materiales de construcción en King Universidad Fahd de Petróleo y Minerales (KFUPM), Dhahran, Arabia Saudita, y es Vicepresidente del Capítulo ACI de la provincia Este de Arabia Saudita. Recibió su doctorado en ingeniería estructural y ha realizado varios proyectos de investigación patrocinadas por Saudi Aramco y otros clientes como investigador principal. Su investigación actual se centra en refuerzo no metálico en el concreto.



**Oscar D. Salazar Vidal**, miembro de ACI, es Consultor de Ingeniería en el Departamento de Servicios de Consultoría de Saudi Aramco, División de Ingeniería No Metálica. Cuenta con 30 años de experiencia en materiales no metálicos y revestimientos para la edificación y la construcción y aplicaciones de petróleo y gas, abarcando un amplio espectro de actividades, incluyendo el despliegue de nuevas tecnologías, sostenibilidad, análisis de fallas, desarrollo de normas y selección de materiales. Es miembro del Comité 440 de ACI, Refuerzo de polímeros reforzados con fibra; y de los Comités Internacionales D30, Materiales compuestos, y F42, Tecnologías de fabricación aditiva, de ASTM. Obtuvo un máster en Ciencias de los Polímeros en la Universidad de Akron (OH, EE. UU.) y es ingeniero profesional autorizado en Canadá.



**Sami A. Al-Abduljabbar** es especialista en materiales de Ingeniería Civil del Departamento de Servicios de Consultoría de la División de Ingeniería Civil y Estructural de Saudi Aramco. Es Presidente del Comité de Normas del Comité Civil. Cuenta con 23 años de experiencia en materiales de Ingeniería Civil para la edificación y la construcción, incluida la elaboración de normas y especificaciones de Saudi Aramco para estructuras de concreto, diseño de pavimentos flexibles y sistemas de drenaje de aguas pluviales en conformidad con códigos internacionales como ACI, AASHTO y ASCE. Obtuvo un máster en Ingeniería Estructural Civil en la KFUPM. Es ingeniero profesional licenciado por el Consejo Nacional de Examinadores de Ingeniería y Topografía.



**Muhammad S. Hameed** es ingeniero estructural Senior en Saudi Arabian Parsons Ltd. (SAPL) y cuenta con más de 20 años de experiencia en diseño de ingeniería estructural, revisión y apoyo técnico a equipos de construcción. Tiene una amplia experiencia en el diseño de diversas estructuras, especialmente diferentes tipos de puentes, de acuerdo con los requisitos de los códigos nacionales e internacionales. Ha participado como diseñador principal en nombre de SAPL para el uso de barras de GFRP en tableros de puentes adoptados para el proyecto SPARK. Es licenciado en Ingeniería Civil y tiene un máster en Ingeniería Estructural.



**Zaid N. El Majali** es Jefe de Proyecto Senior y Representante del Contratista en el proyecto SPARK y trabaja para Shihb Al-Jazira Contracting Company (SAJCO) desde hace 10 años. Cuenta con 21 años de amplia experiencia en la ejecución de proyectos de infraestructuras, incluidos los proyectos 04-ARAMCO. Está especializado en la ejecución de proyectos con el estándar de calidad y seguridad de Aramco, así como en la rentabilidad bajo controles presupuestarios. Participa en la gestión y el control de proyectos, centrándose en la planificación eficaz y el control de costos. Es licenciado en Ingeniería Civil y posee la certificación de Gestión de Proyectos (PMP).

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

*Título: El Corazón de la Innovación en SPARK, Arabia Saudita.  
El primer tablero de puente reforzado con barras GFRP en el GCC.*



*Traductor y Revisor Técnico:  
Ing. Santiago Velez Guayasamin,  
MSc DIC*

# Diseño de Revestimiento de Túnel, Parte 1: Consideraciones de Diseño

Por Gary Brierley, Joseph Kleiny Randall W. Poston

Requisitos actuales del Código ACI-318-19(22), "Requisitos del Código para Concreto Estructural",<sup>1</sup> y del Código ACI-350-20, "Requisitos del Código para Estructuras de Ingeniería Ambiental",<sup>2</sup> se relacionan casi exclusivamente con estructuras sobre el nivel del suelo. Sin embargo, las estructuras sobre el nivel del suelo son fundamentalmente diferentes de los revestimientos de túneles (Fig. 1), que son estructuras típicamente curvas colocadas en contacto directo y restringidas por el terreno circundante. Esta diferencia puede generar una gran cantidad de confusión y sobre conservadurismo en el diseño de revestimientos de túneles. En este artículo, se utiliza el término "tierra" para referirse colectivamente tanto al suelo como a la roca. Las diferencias entre los túneles de suelo y los de roca se discuten con más detalle en la Parte 2.

El objetivo principal de este artículo es mostrar cómo se pueden diseñar y analizar revestimientos de túneles curvos de manera razonable y racional, que sea consistente con el comportamiento de los revestimientos de túneles. La Parte 1 presenta consideraciones de diseño en revestimientos de túneles y una breve historia de los mismos. La Parte 2 ofrecerá recomendaciones para el análisis de túneles y propone cambios en los cálculos de capacidad de ACI para aprovechar el comportamiento beneficioso de los revestimientos de túneles.

## Interacciones entre Momento/Empuje y Terreno/Revestimiento

Los revestimientos de túneles curvos se benefician de un proceso conocido como interacción momento/empuje, mediante el cual la estructura puede generar momentos y empujes simultáneamente, creando un alto grado de capacidad estructural para todo tipo de secciones transversales de concreto. Por ejemplo, todos hemos visto imágenes de estructuras curvas y arqueadas que han sobrevivido durante cientos de años sin el beneficio de ninguna armadura de acero.

Una estructura curva de concreto en contacto directo con el terreno también se beneficia de dos interacciones independientes e igualmente beneficiosas entre terreno/revestimiento: la acción de arco y la restricción de movimiento. En este contexto, la acción de arco es el término utilizado para describir el revestimiento del túnel y el terreno circundante actuando juntos como



Fig 1: Revestimientos de túneles curvos

una estructura compuesta, lo que significa que las cargas impuestas al revestimiento por el terreno circundante pueden ser soportadas tanto por el revestimiento como por el terreno, dependiendo de la distribución de deformación. Por ejemplo, si el revestimiento del túnel tiende a moverse en una cierta área, las cargas impuestas al revestimiento en esa área se redistribuirán hacia el terreno y serán soportadas por este.

La restricción de movimiento se refiere a la capacidad del terreno para restringir el revestimiento, evitando que este desarrolle grandes momentos. En una estructura sobre el nivel del suelo, como un sistema de losa elevada en un edificio, las cargas impuestas a la losa provocan la deflexión de la misma y generan esfuerzos de tracción que deben contrarrestarse con acero de refuerzo. Sin embargo, si esa losa se coloca en contacto directo con el suelo, la magnitud del momento desarrollado en la losa prácticamente es inexistente en comparación con las losas elevadas. En el caso de los revestimientos curvos de concretos colados en el lugar y colocados en contacto directo con el suelo, esta forma de restricción ocurre tanto radial como circunferencialmente alrededor de todo el perímetro del revestimiento. De hecho, los modelos de interacción terreno/revestimientos basados en viga/resorte y elementos finitos han mostrado reducciones de momentos de hasta dos órdenes de magnitud para revestimientos curvos de concreto en contacto directo con una masa rocosa, lo cual se discutirá más detalladamente en la Parte 2.

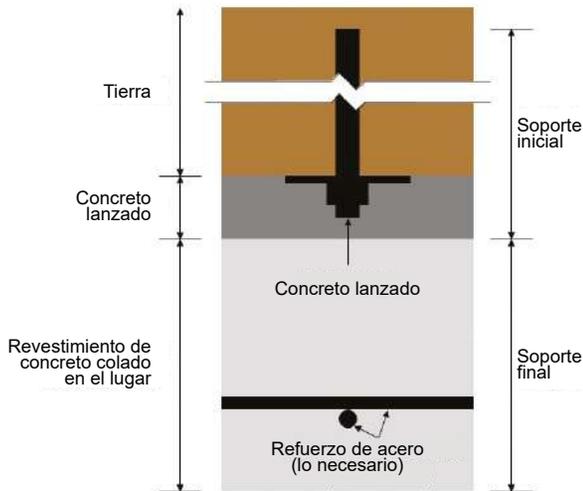
Debido a estas beneficiosas interacciones terreno/revestimiento, incluso los revestimientos curvos de concreto sin refuerzo generalmente tienen la capacidad estructural suficiente para ser perfectamente seguros y estables. Esto es válido para casi todas las condiciones de carga del terreno, excepto en casos de terreno extremadamente débil, condiciones de terreno compresibles o expansivos que generan intensas presiones del suelo, deformaciones del terreno inducidas por sismicidad causadas por terremotos o altas presiones internas de fluidos, que son bastante raras para la mayoría de los revestimientos de túneles.

Los túneles subterráneos se utilizan en una amplia variedad de proyectos de infraestructura civil, especialmente en entornos urbanos densamente poblados. Por ejemplo, las siguientes instalaciones civiles pueden requerir excavaciones de túneles:

- Transporte: autopistas, ferrocarriles, metros y peatonales.
- Agua: suministro de agua, drenaje, alcantarillado e hidroeléctricas.
- Servicios públicos: gas, electricidad, agua y comunicación.
- Varios: defensa civil, aplicaciones militares, instalaciones de almacenamiento y bodegas de vino.

Para crear estos túneles, se requieren diversos procedimientos de diseño y construcción con el fin de garantizar la seguridad y estabilidad de la apertura en el terreno. Los túneles deben cumplir con requisitos operativos y de servicio específicos, y generalmente se espera que tengan una larga vida útil. Se debe tener en cuenta la durabilidad, el acceso para el mantenimiento, y la posibilidad de incendios, condiciones de congelación y ataques químicos, y el revestimiento del túnel es fundamental para todas estas consideraciones.

También se debe considerar qué tipos de revestimientos se pueden construir en el espacio altamente confinado asociado con muchos túneles. Históricamente, los revestimientos de túneles han utilizado madera, ladrillos, bloques de roca, concreto simple, segmentos de hierro colado y costillas de acero. A partir de la década de 1950, se introdujeron pernos de roca y concreto lanzado, seguidos de los revestimientos prefabricados de concreto con pernos y juntas, compatibles con varios tipos de máquinas perforadoras de túneles (TBM, por sus siglas en inglés). Las TBMs también aumentaron la velocidad de avance diaria en los proyectos de túneles y disminuyeron drásticamente la cantidad de perturbaciones causadas al terreno, en comparación con la perforación y voladura con escudos de cara abierta.



**Fig. 2: Ilustraciones de los soportes iniciales y los componentes del revestimiento final para un túnel:**  
 (a) sección esquemática; y (b) foto que muestra el soporte y refuerzo de concreto lanzado y encofrado para el revestimiento.

## Tipos de revestimientos

Los revestimientos de túneles se pueden clasificar en dos categorías básicas: revestimientos de una pasada y revestimientos de dos pasadas. Existen dos formas básicas de revestimientos de una pasada: tubería empujada y concreto lanzado. El empuje de tuberías, también conocido como micro tunelización, se utiliza típicamente para túneles con diámetros inferiores a 10 pies (3 metros), y se han diseñado varios tipos de tuberías especialmente para ese propósito, incluyendo revestimientos prefabricados de concreto segmentados. La tubería debe resistir las fuerzas de empuje impuestas por la TBM, lo que significa que la tubería debe estar reforzada con acero o estar compuesta por este material. Después de la instalación, la tubería empujada debe ser inyectada con lechada de cemento para proporcionar una estructura arqueada estable que pueda resistir grandes cargas externas del terreno y presiones internas y externas del agua. El concreto lanzado se puede utilizar como un revestimiento de una sola pasada en roca o suelos estables, como arcilla rígida. Después de la excavación, el concreto lanzado se puede colocar en capas a medida que avanza el túnel hasta que el concreto lanzado tenga el grosor suficiente para servir como revestimiento final. El concreto lanzado puede ser reforzado con fibras para proporcionar un control adicional de la contracción y capacidad estructural.

Los revestimientos de dos pasadas implican la instalación de soportes iniciales (Fig. 2), seguido de la construcción del revestimiento final. Para el soporte inicial de túneles en suelos, es común utilizar costillas de acero, encofrado de madera y tela filtrante. Para túneles en roca, el soporte inicial puede ser proporcionado mediante pernos y mallas de roca, concreto lanzado y/o costillas de acero para formaciones de roca más inestables. Independientemente del método utilizado, los soportes iniciales deben crear una abertura segura y estable lo suficientemente grande para la construcción de las instalaciones terminadas.

## Revestimientos finales

Los revestimientos finales generalmente consisten en concreto colocado en el lugar (cast-in-place), concreto lanzado o tuberías. El concreto colocado en el lugar es el revestimiento más común para túneles y cavernas, y puede ser simple o reforzado con barras, malla de alambre o fibras. En general, la función principal del refuerzo en los revestimientos de concreto es controlar las grietas por contracción durante el curado, con un aumento modesto en la capacidad de momento. El concreto lanzado es simplemente otra forma de concreto colocado en el lugar que, una vez curado, tiene las mismas propiedades que el concreto colocado detrás de un encofrado. A diferencia de los revestimientos de concreto con encofrado, el concreto lanzado no requiere de inyecciones de relleno para asegurar que el revestimiento esté en buen contacto con el suelo expuesto o el revestimiento inicial.

También es posible instalar tuberías en el túnel, que una vez instaladas, se rellenan completamente contra el suelo o el soporte inicial. Los revestimientos finales proporcionados por tuberías tienen muchas ventajas en comparación con el concreto colocado en el lugar, incluyendo el hecho de que las tuberías son prefabricadas utilizando procedimientos de colado cuidadosamente controlados. Los túneles diseñados para ser presurizados típicamente utilizan tuberías de acero soldadas.

Uno de los objetivos más importantes de este artículo es establecer el concepto de que los materiales y las características dimensionales del revestimiento final se establecen principalmente por sus requisitos funcionales, no por su capacidad estructural. Por ejemplo, simplemente no es factible colocar menos de 8 pulgadas (203 mm) de concreto entre un encofrado de acero y el suelo circundante, por lo que esos revestimientos suelen tener un espesor de 10 a 12 pulgadas (254 a 305 mm). Los revestimientos de concreto lanzado pueden ser más delgados, pero los requisitos de servicio y durabilidad para la mayoría de los túneles requerirían, una vez más, al menos 8 pulgadas de concreto lanzado para un revestimiento final.

De manera similar, el proceso de instalación de tuberías y revestimientos segmentados significa que generalmente se crean con materiales de alta resistencia y tolerancias ajustadas. En otras palabras, las características del revestimiento final anterior serán determinadas por los requisitos funcionales del túnel, no por su capacidad para soportar cargas del suelo.

Las prácticas modernas de construcción de túneles limitan en gran medida la cantidad de carga del suelo impuesta al revestimiento final debido a la mínima perturbación del suelo durante la excavación, la instalación de revestimientos iniciales seguros y estables, o ambos. Por lo tanto, se ha vuelto posible "diseñar" las características básicas del revestimiento final en función de sus requisitos funcionales y luego "analizar" ese revestimiento para asegurarse de que pueda soportar de manera segura las cargas del suelo a las que estará sometido. Este proceso es contrario al diseño de edificios de concreto armado y estructuras ambientales, donde el diseño generalmente sigue el proceso de análisis. Como se mencionó anteriormente, la predominancia de los requisitos funcionales del túnel es el caso para casi todas las condiciones de carga del suelo.

## Cargas del suelo para revestimientos de túneles

A lo largo de los años, se han desarrollado una cantidad asombrosa de varios métodos para estimar las cargas del suelo causadas por la excavación de túneles, pero el hecho es que los efectos de la carga del suelo en el comportamiento de los revestimientos de túneles se pueden "analizar" una vez que se han determinado las características del revestimiento del túnel tal como se construyó. Muchos ingenieros estructurales ignoran las contribuciones positivas que brinda el soporte inicial a la estabilidad del revestimiento, pero es un hecho que todas las aberturas subterráneas deben ser seguras y estables antes de la instalación del revestimiento final. Esto cambia las cargas del suelo que el revestimiento final debe resistir.

## Acción de arco

Es un hecho bien establecido que tanto las cargas del suelo como las cargas de roca exhiben "acción de arco" cuando se excava una abertura. En esencia, el suelo circundante a la abertura se deforma y moviliza fuerzas de fricción y corte que tienden a estabilizar el suelo en las proximidades de la abertura. Esto significa que un túnel excavado a gran profundidad en roca de buena calidad puede ser completamente seguro y estable sin la necesidad de ningún revestimiento de túnel. Sin embargo, la roca de mala calidad o los suelos pueden requerir esfuerzos considerables para garantizar la estabilidad antes de la instalación del revestimiento final.

La Sección I de la publicación de 1946, "Excavación de túneles en roca con soportes de acero", ofrece un primer intento de documentar el concepto de "acción de arco". En ese tratado, Proctor, White y Terzaghi proporcionaron una discusión sobre varios tipos de estructuras rocosas y cómo esas estructuras rocosas podían imponer diferentes cantidades de carga y/o presión del suelo sobre un revestimiento de túnel. La parte "Introducción a la geología de túneles" de Karl Terzaghi resume el concepto de acción de arco según el tipo de suelo de la siguiente manera:

"En roca perfecta o casi perfecta, no se requiere ningún soporte a menos que se encuentre con fenómenos de salto. En roca estratificada o moderadamente fisurada, pero por lo demás intacta, el soporte del túnel cumple su propósito si es capaz de soportar una carga de roca moderada. En roca triturada, las condiciones de carga son similares a las que se encontrarán al excavar a través de arena; y en zonas de descomposición de roca, son similares a las de los túneles en arcilla. La excavación en arcilla puede ser muy fácil o muy difícil, dependiendo del carácter y grado de compactación de la arcilla. Se encuentran igualmente una amplia gama de condiciones al excavar a través de roca descompuesta. El comportamiento de los peores tipos de roca descompuesta se indica con los términos de roca estrujante y roca expansiva".

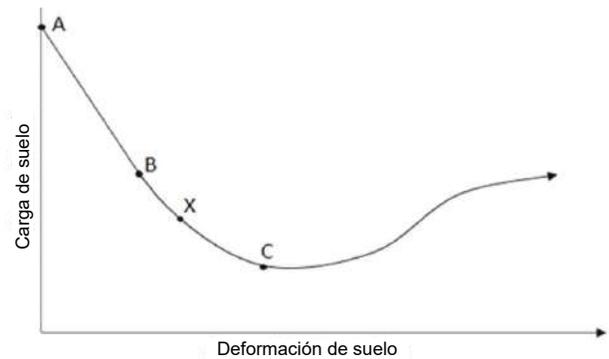


Fig 3: Revestimientos de túneles curvos para el revestimiento.

Después de una extensa discusión sobre la mecánica de cómo se desarrollan las cargas de roca durante la construcción de túneles, Terzaghi clasificó las condiciones del suelo con respecto a la estimación de las cargas del suelo para proyectos de túneles, lo cual todavía se hace referencia en la actualidad:

- Roca intacta con pocas juntas o grietas;
- Roca estratificada con planos de estratificación;
- Roca moderadamente fisurada;
- Roca en bloques y con planos de separación;
- Roca triturada con características principalmente de fricción;
- Roca estrujante con propiedades similares a la arcilla; y
- Roca expansiva resultante de la expansión volumétrica.

Aunque la discusión de Terzaghi sobre la carga del suelo fue útil y pertinente para los métodos de excavación de túneles utilizados hasta 1946, esos métodos están en su mayoría desconectados de los métodos de excavación de túneles utilizados en la actualidad. A partir de la década de 1950, el uso extensivo de pernos de anclaje y concreto lanzado revolucionó el soporte inicial del terreno. El uso de tuneladoras de avance y rozadoras revolucionó la excavación del terreno al reducir radicalmente el grado de perturbación del terreno y la cantidad de carga del suelo que se podía movilizar debido a la construcción del túnel. En respuesta, se desarrolló el concepto de una curva de reacción del terreno, como se muestra en la Fig. 3.

El punto A representa el régimen de esfuerzo en el terreno antes de cualquier excavación de túneles. A medida que el túnel se acerca al punto A, el terreno comienza a moverse frente a la cara de excavación, distribuyendo así el esfuerzo del terreno en su lugar lejos de la abertura. Esta distribución de esfuerzos es aproximadamente elástica hasta que alcanza el punto B, donde las deformaciones inelásticas reducen aún más las cargas del suelo. Sin embargo, estas deformaciones inelásticas pueden resultar en una reducción de la capacidad del terreno para soportarse a sí mismo.

Más allá del punto C, el terreno se ha desestabilizado y la carga del suelo comienza a aumentar. En esencia, por lo tanto, los soportes iniciales están destinados a controlar las deformaciones del terreno en algún punto entre los puntos A y C (punto X) utilizando la amplia variedad de técnicas mencionadas aquí:

- Para roca: nervaduras de acero, pernos de anclaje en roca, concreto lanzado, refuerzo con tablestacado, consolidación de inyección, desagüe y congelación del terreno; y
- Para suelos: nervaduras de acero, barras de anclaje inyectadas, concreto lanzado, refuerzo con *forepoling*, inyección química, inyección de mortero a presión, desagüe, congelación del terreno, aire comprimido y/o tuneladoras de avance con cara presurizada.

## Factores adicionales

El requisito funcional de las diversas formas de soporte inicial mencionadas anteriormente es producir una abertura subterránea segura y estable dentro de la cual se pueda construir la instalación final. La estabilidad del terreno producida por el soporte inicial es permanente, ya que cualquier aumento en la carga del suelo solo puede ocurrir si se permite que el terreno experimente una deformación adicional, lo cual no ocurre una vez que se instala el revestimiento final. En efecto, la cantidad de carga del suelo que se impondrá en el revestimiento final es una función de la cantidad de deformación del terreno durante su construcción. Si esa deformación del terreno se detiene mediante el revestimiento inicial, no es

posible que la carga del suelo aumente más allá de lo experimentado durante la construcción del túnel, con las siguientes excepciones:

- Presiones del agua subterránea: las presiones del agua subterránea se pueden controlar durante la construcción permitiendo que el terreno se drene, utilizando desagües de construcción y/o utilizando aire comprimido o una forma de excavación con presión en la cara. Las presiones del agua subterránea reducirán la cantidad de resistencia por fricción desarrollada en el terreno durante la construcción, pero estas presiones del agua subterránea se reimpondrán después de la construcción del revestimiento final. Curiosamente, esta condición de carga es aproximadamente uniforme alrededor del perímetro del túnel y, a menos que sea de gran magnitud, en realidad es beneficiosa en términos de generar esfuerzos de compresión en el revestimiento que ayudan a contrarrestar cualquier esfuerzo de tracción causado por momentos en el revestimiento.
  - Terreno expansivo: la expansión es el aumento en el volumen del terreno causado por las partículas de arcilla altamente activas que absorben agua. Las presiones de expansión generalmente se vuelven manejables después de pequeñas deformaciones, pero no siempre, y se requiere pruebas de laboratorio para determinar la relación entre la presión de expansión y la deformación del terreno.
  - Terreno comprimible: el terreno comprimible es un terreno tan débil que se ha desestabilizado por el peso de su sobrecarga, lo que hace que se debilite aún más y sea más propenso a imponer cargas en las paredes del túnel debido a las deformaciones del terreno. Históricamente, era extremadamente difícil controlar el terreno comprimible, pero ahora existen técnicas de excavación secuencial y tuneladoras de avance con cara presurizada para minimizar el impacto de una condición de terreno comprimible.

- Deformaciones inducidas por sismos: los movimientos fuertes del terreno se proyectan en todas las direcciones desde la fuente de un terremoto, tanto transversalmente como longitudinalmente a lo largo del túnel. Aunque generalmente no es posible hacer que un revestimiento de túnel sea lo suficientemente resistente para resistir estos movimientos del terreno, el fenómeno de interacción terreno/revestimiento discutido en detalle en la Parte 2 de este artículo suele ser suficiente para limitar el daño en un revestimiento de túnel causado por deformaciones del terreno inducidas por sismos.

## Resumen

Numerosos esfuerzos de investigación basados en una amplia variedad de sistemas de clasificación del terreno se han desarrollado desde la Referencia 3 de 1946, y está más allá del alcance de este artículo discutir los resultados de esos esfuerzos. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, la carga del terreno en sí misma casi nunca es el mecanismo de control para el tipo de revestimiento de túnel que debe diseñarse como parte de la instalación final.

Los revestimientos finales de túneles generalmente se diseñan para cumplir con los requisitos funcionales, de servicio y durabilidad a largo plazo, en lugar de resistir condiciones de carga interna o externa intensas. Una vez que se ha diseñado un revestimiento final basado en esas consideraciones, se puede analizar ese revestimiento para asegurarse de que tenga la capacidad estructural suficiente para soportar de manera segura las cargas del suelo esperadas después de la construcción. La segunda parte de este artículo abordará el análisis del revestimiento del túnel y presentará recomendaciones para la modelización y los cálculos de capacidad.

## Referencias

1. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI CODE-318-19(22)) and Commentary (Reapproved 2022)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019, 624 pp.
2. ACI Committee 350, "Code Requirements for Environmental Engineering Concrete Structures (ACI 350-20) and Commentary (ACI 350R-20)," American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2020, 544 pp.
3. Proctor, R.V.; White, T.L; and Terzaghi, K., "Rock Tunneling with Steel Supports and Introduction to Tunnel Geology," The Commercial Shearing and Stamping Co., Youngstown, OH, 1946, 271 pp.

Seleccionado por el interés del lector por los editores.



**Gary Brierley** cuenta con más de 50 años de experiencia en el diseño y construcción de proyectos de túneles. Su tesis doctoral abordó el rendimiento estructural del revestimiento del túnel para la estación de metro Dupont Circle en Washington, DC, EE. UU., y ha escrito más de 200 artículos y publicaciones sobre aberturas subterráneas. En 2014, recibió el premio Distinguished Alumnus de la Universidad de Illinois. Obtuvo su licenciatura en ingeniería civil de la Universidad de Tufts en Medford, MA, EE. UU., en 1968, y su maestría y doctorado de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign, Urbana, IL, EE. UU., en 1970 y 1975, respectivamente.



**Joseph Klein**, miembro de ACI, es ingeniero senior en Pivot Engineers en Austin, TX, EE. UU., y su experiencia profesional se centra en la evaluación y reparación de estructuras de concreto. Es miembro de los comités ACI 132, Responsabilidad en la construcción de concreto; 348, Confiabilidad y seguridad estructural; 437, Evaluación de resistencia de estructuras de concreto existentes; y 444, Monitoreo de salud estructural. Obtuvo su licenciatura y maestría en ingeniería civil en la Universidad de Texas en Austin, Austin, TX, en 2013 y 2015, respectivamente.



**Randall W. Poston**, FACI y ex presidente de ACI, es un principal senior en Pivot Engineers, Austin, TX. Durante los últimos 37 años, se ha dedicado a la evaluación, reparación y refuerzo de cientos de estructuras. Es presidente de la Junta de Normas de ACI y miembro del Comité ACI 318, Código de construcción de concreto estructural, del cual fue presidente durante el ciclo del Código de 2014; y los subcomités ACI 318-D, Miembros, y 318-N, Sostenibilidad. Poston obtuvo su licenciatura, maestría y doctorado en ingeniería civil en la Universidad de Texas en Austin, Austin, TX.

La traducción de este artículo correspondió al Capítulo de México Noroeste

*Título: Diseño de Revestimiento de Túnel, Parte 1: Consideraciones de Diseño*



**Traductora:**  
**Arq. Ana Regina Caballero Pérez**



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

# CONVOCATORIA 2023

# CONCRETO

## LATINOAMÉRICA

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

**¡Es muy fácil!**

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

1



2



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

**Tú solicitud y artículo serán evaluados para su publicación.**



# Una formaleta para concreto sostenible, ajustable y reusable

por Mo Ehsani

Las columnas circulares se utilizan con frecuencia en la construcción de edificios y puentes. Los contratistas a menudo necesitan construir bases circulares para soportar postes de luz y torres de transmisión. En algunos países en desarrollo con costos laborales más bajos, son comunes formaletas hechas de madera o acero. Durante décadas en Norte América, el tipo de encofrado de cimentación más utilizado han sido tubos de cartón. Sin embargo, existen limitaciones para estos productos populares, que incluyen:

- **Tamaño:** los tubos de cartón están disponibles en diámetros fijos y redondeados, como 8, 12, 18, 24, 36 y 48 pulgadas (200, 300, 450, 600, 900 y 1,200 mm). Se deben comprar tubos de diferentes tamaños dependiendo del tamaño de las columnas. No se consiguen diámetros diferentes a los indicados, lo que afecta la capacidad de elección del ingeniero de diseño en cuanto al tamaño de las columnas;
- **Transporte:** los tubos son voluminosos y requieren mucho espacio durante el transporte. Esto es particularmente una preocupación para las columnas y zapatas de mayor diámetro, forzando al contratista a considerar encofrados de acero en secciones que deben ensamblarse en el sitio;
- **Almacenamiento:** el espacio requerido para almacenar estos encofrados en bodegas o en lugares de trabajo pueden aumentar los costos;
- **Resistencia al agua:** los tubos de cartón pueden dañarse y distorsionarse por la lluvia. Protegerlos en los lugares de trabajo debido a las inclemencias del tiempo aumenta su costo. Este también es un problema cuando el nivel freático es alto, porque se puede dañar la parte del tubo que se inserta en un pozo excavado donde se supone que se va a colar la columna;
- **Acabado de la superficie:** una vez que se retira el tubo de cartón, deja una marca en espiral. En muchas columnas expuestas, los requisitos arquitectónicos exigen pulirlos, agregando costo al proyecto;
- **De un solo uso:** los tubos se pueden usar solo una vez, después de lo cual se deben destruir y enviar a un vertedero; y
- **Falta de sostenibilidad:** los factores anteriores señalados conducen una gran huella de carbono debido al transporte, almacenamiento, acabado y eliminación de los tubos de un solo uso.

Se ha desarrollado un sistema de encofrado que utiliza Polímeros Reforzados con Fibra (FRP) como una solución alternativa.

## Formaleta de laminado FRP

La formaleta laminada de FRP (FLF por Formaleta Laminada con Fibra) se fabrica en rollos de hasta 102 pulgadas (2,590 mm) de ancho. Usando un equipo especial, las fibras de vidrio se impregnan con resina de vinil éster y se someten a calor y presión para hacer laminados muy delgados con un espesor uniforme, que varía de 0.045 a 0.075 pulgadas (1 a 2 mm), dependiendo del producto. Un rollo típico puede incluir 500 pies (152 m) de FLF (Fig. 1). El peso superficial de los laminados varía de 0.31 a 0.51 lb/ft<sup>2</sup> (1.5 a 2.5 kg/m<sup>2</sup>), respectivamente. Las propiedades mecánicas de los laminados y las normas ASTM que aplican se enumeran en la Tabla 1.

La superficie acabada del laminado es muy lisa, lo que lleva a un coeficiente estático de fricción  $\mu_s$ , de 0.18. A pesar de que esta superficie de baja fricción proporciona un acabado suave para las columnas, no afecta adversamente la resistencia de la formaleta.

## Mecanismo de funcionamiento

El funcionamiento del FLF se basa en los principios de fricción de correas, como se describe más adelante en este artículo. El laminado se suministra en rollos de varios cientos de pies de largo (Fig. 1(a)). Para crear una formaleta tubular, se corta del rollo una longitud de laminado de alrededor de dos o tres veces el perímetro del tubo. A partir de un extremo del laminado, se marca una distancia igual al perímetro del tubo deseado (Fig. 1(b)). Después, el laminado se enrolla; Se puede usar un trozo de cinta adhesiva para asegurar el extremo del laminado en la ubicación marcada. Si es factible, es preferible pasar la cinta adhesiva a lo largo de toda la costura (altura completa de la formaleta), como se muestra en la Fig. 1 (c). El resto del laminado se enrolla sobre sí mismo. Para evitar que se desenrolle de la bobina, se pueden atar algunos pedazos de cordel alrededor de la bobina laminado (Fig. 1(d)). Alternativamente, el extremo se puede asegurar con algunos pedazos de cinta adhesiva. Nótese que la cinta o el cordel no está sometido a carga alguna, y su única función es impedir que el laminado enrollado se desenrolle.

El comportamiento de este producto se basa en el principio de fricción de correas. Como se muestra en la Fig. 2(a), cuando se coloca una tira o una correa envuelta alrededor de una superficie que tiene  $\mu_s$ , parte de la fuerza de tensión aplicada a un extremo de la correa es resistida por la fricción. Asumiendo un ángulo de contacto total,  $\beta$ , el diagrama de cuerpo libre de un contacto el elemento  $\Delta\theta$  se muestra en la Fig. 2(b). El equilibrio de fuerzas en las direcciones horizontal y vertical conducen a

$$\sum F_x = 0: (T + \Delta T) \cos \frac{\Delta\theta}{2} - T \cos \frac{\Delta\theta}{2} - \mu_s \Delta N = 0$$

$$\sum F_y = 0: \Delta N - (T + \Delta T) \sin \frac{\Delta\theta}{2} - T \sin \frac{\Delta\theta}{2} = 0$$

Combinando las dos ecuaciones para eliminar  $\Delta N$  y dividiendo por  $\Delta\theta$  se obtiene

$$\frac{\Delta T}{\Delta\theta} \cos \frac{\Delta\theta}{2} - \mu_s \left( T + \frac{\Delta T}{2} \right) \frac{\sin \frac{\Delta\theta}{2}}{\frac{\Delta\theta}{2}} = 0$$

En el límite, cuando  $\Delta\theta$  tiende a cero

$$\frac{\Delta T}{\Delta\theta} - \mu_s T = 0$$

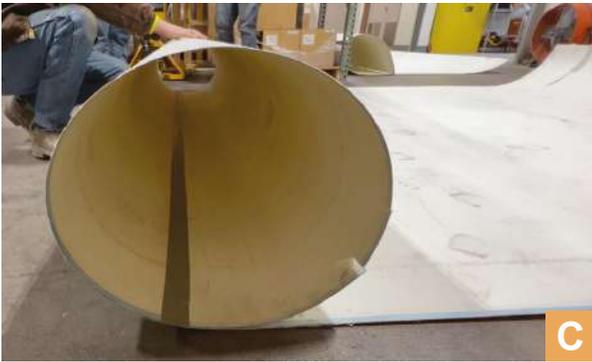
Separando las variables e integrando entre  $\theta = 0$  y  $\beta$

$$\ln \frac{T_2}{T_1} = \mu_s \beta \text{ or } \frac{T_2}{T_1} = e^{\mu_s \beta}$$

Las fuerzas que actúan sobre la formaleta se determinan con la presión lateral ejercida por el hormigón fresco, que a su vez depende de varias variables, tales como la tasa de colocación, el método de consolidación, la temperatura y otros factores. Sin embargo, la presión hidrostática que se muestra en la Fig. 3 (a) es un modelo conservador para la mayoría de las aplicaciones.



**Fig 1: Creación de una formaleta tubular:**  
 (a) Rollo de FLF;  
 (b) Marcación del perímetro  
 (c) Enrollado del laminado; y  
 (d) Aseguramiento con cuerdas



Propiedades	Método de ensaye	Unidades Imperiales	Unidades métricas
Esfuerzo flexionante	ASTM D907 <sup>1</sup>	1.91 X 104 psi	132 MPa
Módulo de flexión	ASTM D790	6.0 X 106 psi	4,137 Mpa
Esfuerzo de tensión	ASTM D 638 <sup>2</sup>	1.0 x 104 psi	69 Mpa
Módulo de tensión	ASTM D 638	5.2 x 105 psi	3,585 Mpa
Resistencia al impacto Izod	ASTM D 256 <sup>3</sup>	4.5 ft-lb/in. ranurado	0.24 J/mm
Coefficiente de expansión térmica lineal	ASTM D696 <sup>4</sup>	1.7 x 10-5 in/in/°F	31µm/m/°C
Absorción de agua en 24 hrs.	ASTM D570 <sup>5</sup>	0.3% a 77°F	0.3% a 25°C

**Tabla 1. Propiedades típicas físicas de la formaleta laminada con fibra (FLP).**

En la FLF, la fuerza de fricción está presente sólo entre las capas del laminado. Por lo tanto, como se muestra en la Fig. 3(b),  $\beta$  se mide desde el principio de la segunda capa de laminado. Es decir que, para un sistema completo de dos capas,  $\beta = 360$  grados, y si el tubo está hecho de un laminado que se envuelve tres veces,  $\beta = 720$  grados. En este caso, La fuerza normal para crear fricción es causada por la presión hidrostática del hormigón en la formaleta.

Mirando el desarrollo anterior, es claro que si  $\beta = 0$  grados (no superposición), entonces el cambio en la fuerza  $T_1$  será debido a la fricción entre el hormigón fresco y el laminado. Sin embargo, se puede ignorar conservadoramente esta fricción, entonces  $T_1 = T_2$ . A medida que aumenta el ángulo  $\beta$ , Las fuerzas de fricción se desarrollan entre las capas superpuestas de laminado y la fuerza  $T_1$  disminuye exponencialmente, como se muestra en la Fig. 4. Para una FLF de tres capas,  $\beta = 720$  grados y la fuerza en el laminado se reduce en un 90%. Teniendo en cuenta esta rápida caída en la fuerza de tensión, y la alta resistencia del laminado, está claro que el número de capas de una FLF contribuye principalmente a la rigidez de la formaleta más que a su resistencia.

Los laminados en sí son muy fuertes, y para la mayoría de las aplicaciones, una sola capa puede resistir las tensiones tangenciales generadas en la formaleta. Por ejemplo, suponiendo una columna de 8 pies (2.4 m) de altura con un peso unitario de 145 lb/ft<sup>3</sup> (2,323 kg/m<sup>3</sup>), la presión hidrostática en la base de la formaleta será 1,160 psf (55.5 kPa). Suponiendo que el diámetro de la formaleta,  $D$ , es de 36 pulgadas, como se muestra en la Fig. 3(c), esta presión será resistida por dos fuerzas de tensión,  $T$ , en la FLF. En este caso, considerando una altura unitaria de la formaleta, la fuerza de tensión en una sola capa de laminado será  $T = 145$  lb (645 N). Un laminado de espesor de 0.060 pulgadas (1.5 mm) tiene una resistencia a la rotura de 600 libras/pulgada (105 N/mm 2,670 N/pulgada) de ancho de laminado, que es significativamente mayor que  $T$  calculado anteriormente. Esto demuestra que la construcción de FLF con dos o tres capas de laminado está destinado principalmente a mejorar la rigidez del tubo porque la resistencia a la tracción de un una sola capa de laminado es mucho más de la que se necesita para confinar la presión hidrostática.

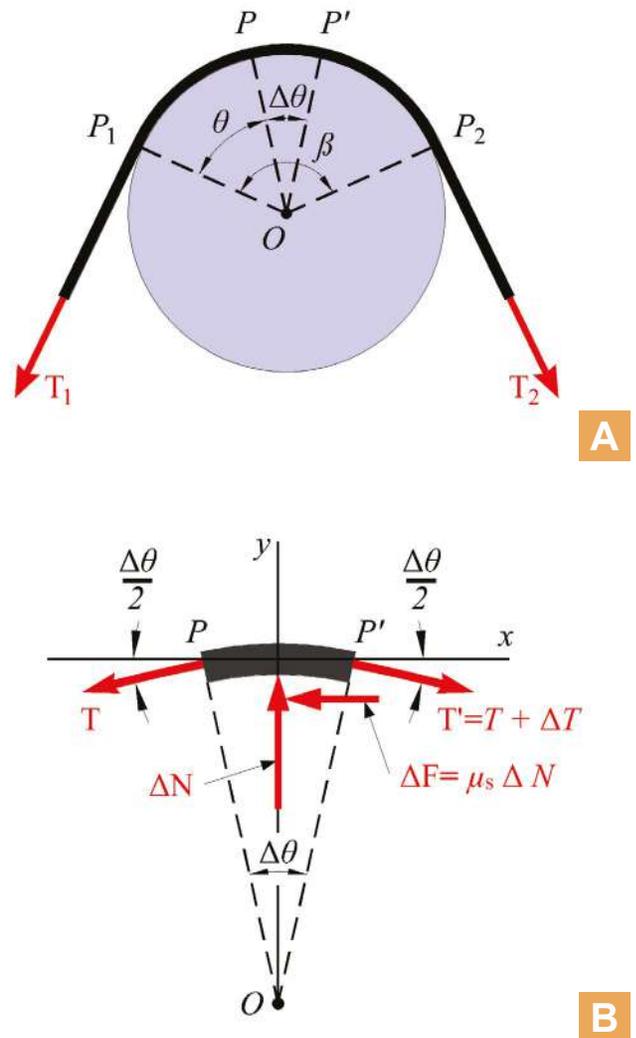


Fig. 2: Fricción en correas: (a) Fuerzas en correa o tira enrollada alrededor de una superficie; (b) Diagrama de cuerpo libre.

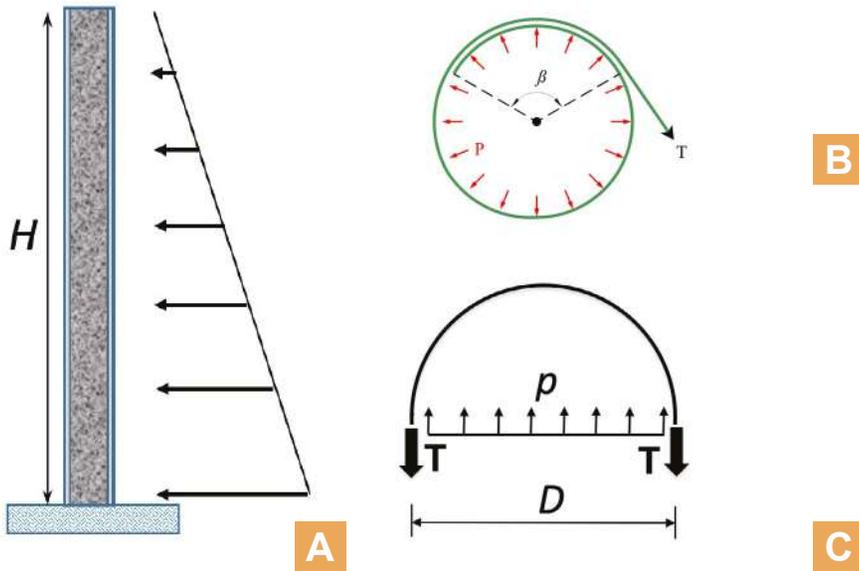


Fig. 3: Fuerzas en la formaleta: (a) Presión hidrostática; (b) Presión interna; (c) Fuerzas resistidas por el FLF.

## Ensayo de presión

Para determinar la idoneidad de este sistema para resistir presiones internas, se llevó a cabo la siguiente prueba (Fig. 5). Una pieza de 9.5 pies (2.9 m) de largo de 0.06 pulgadas (1.5 mm) de espesor de laminado se cortó de un rollo largo. Este laminado se enrolló para crear un tubo de tres capas con un diámetro de 12 pulgadas y una longitud de 8.5 pies (2.4 m). El extremo libre del laminado fue asegurado con unos pocos pedazos cortos de cinta para asegurar que el diámetro del tubo no pudiera cambiar libremente.

El globo que se muestra en la Fig. 5(a) es un dispositivo que se utiliza con frecuencia en la reparación interna de cañerías. Esta unidad era de aproximadamente 6 pies (1.8 m) de largo. El globo se desinfló y se introdujo dentro de la formaleta conectado a un cable (Fig. 5 (b)). Una vez dentro de la FLF, el globo se conectó a una manguera de aire y se infló gradualmente

(Fig. 5(c)) a una presión de 3,300 libras por pie cuadrado (158 kPa). Esto es casi tres veces superior a la presión calculada en el ejemplo anterior, y es significativamente mayor que cualquier presión prevista en el campo. De este modo, a pesar de que no había ninguna señal de falla, la prueba se detuvo en ese punto para evitar daños al globo. Se enfatiza que las tres correas colocadas alrededor del tubo, visibles en la figura, estuvieron sueltas en todo momento. Ellas nunca resistieron la presión interna, y su único propósito era brindar seguridad adicional en caso de que la formaleta fallara.

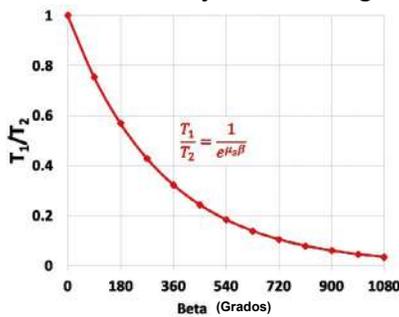


Fig. 4: Decrecimiento de T1 con el aumento del número de capas.

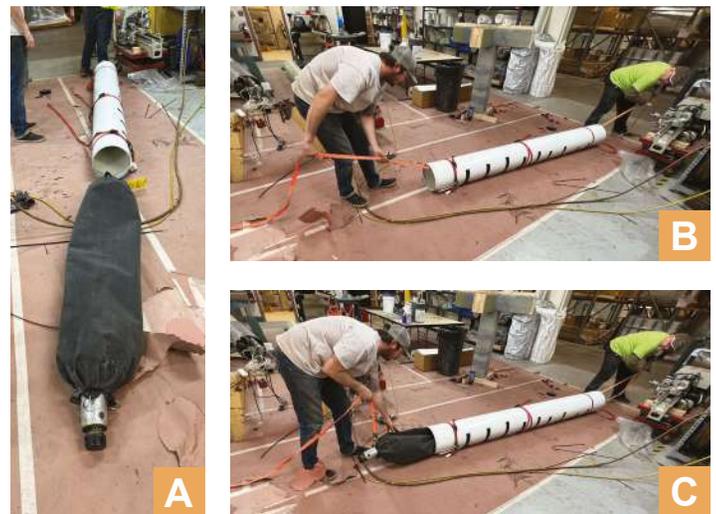


Fig. 5: Ensayo de presión del FLF: (a) globo; (b) Inserción del globo dentro del tubo; (c) inflado del globo.

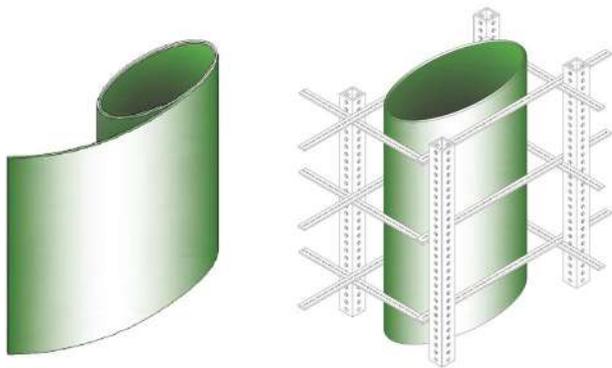
## Aplicación de campo

Una demostración del uso de FLF se muestra en la Fig. 6, donde se fundió una columna circular hueca con un diámetro exterior de 18 pulgadas y un diámetro interior de 12 pulgadas. La Figura 6(a) muestra la configuración en la que un tubo de 12 pulgadas hecho del mismo laminado se utiliza para crear la cavidad dentro del columna.

Después de instalar la jaula de refuerzo, se coloca el FLF de 18 pulgadas de diámetro y el espacio entre los dos tubos se llena con concreto. Este tubo estaba compuesto de tres capas de laminado, como se muestra en Fig. 1. Nótese que los cuatro lazos que se muestran alrededor del FLF no resisten carga alguna, solo aseguran que el diámetro del tubo permanece sin cambios mientras se rellena con hormigón.

Después de que el concreto fragua, se quitan los lazos, y el laminado puede despegarse (Fig. 6(c)). El laminado se lava y se limpia antes de guardarlo para uso futuro (Fig. 6(d)). Una vista de primer plano de la columna (Fig. 6(e)) muestra el acabado liso de la columna sin las marcas en espiral que típicamente dejan los tubos de cartón.

Aunque esta demostración se ha enfocado en columnas circulares, la FLF se puede utilizar para crear tubos de infinitas formas y tamaños. La única limitación es asegurarse de que el radio de curvatura permisible del laminado en las esquinas



**Fig. 7:** Las FLF se pueden usar para producir formaletas no circulares en un amplio rango de formas y tamaños.



**Fig. 6:** Aplicación en sitio: (a) refuerzo de acero instalado (b) FLF colocada y llena de concreto; (c) remoción del laminado después de fraguado el concreto; (d) limpieza y almacenamiento del laminado para uso futuro (e) superficie de concreto lisa y sin marcas en espiral.

de un tubo no excede el límite permisible. Estos radios son una función del espesor del laminado pero por lo general están alrededor de 1 a 2 pulgadas (25 a 50 mm). Una de esas formas no circulares se muestra en la Fig. 7. En este caso, el laminado es enrollado para formar una elipse. Para asegurarse que el tamaño total de la elipse no cambia durante la colocación de concreto, se puede usar un marco para soportar la FLF. Los soportes horizontales ajustables, conocidos como abrazaderas de tijera para formar columnas están disponibles en la mayoría de casas de suministro de encofrados. Estas abrazaderas deben instalarse de manera que toquen el vértice y el córtice de la elipse. Los laminados son bastante fuertes y duraderos y con el cuidado adecuado, soportarán muchos usos. Como se muestra en la Fig. 8, el laminado tiene dos caras, A y B, y dos extremos, 1 y 2. En la configuración curva que se muestra en esta figura, el lado B2 estará en contacto con el hormigón y lo más probable es que se raye después de varios usos. En ese momento, el laminado se puede enrollar de tal forma que el lado B1 sea el interior del tubo y esté en contacto con concreto. Asimismo, se pueden fabricar tubos con las regiones A1 y A2 estando dentro y en contacto con el hormigón. Entonces,

efectivamente, el número total de veces que cada laminado se puede utilizar es cuatro veces el número de usos de cada configuración.

## Resumen

La FLF se puede enrollar en el sitio en cualquier tamaño y forma, incluidas formas no circulares. Esto reduce significativamente el espacio de almacenamiento y costos de transporte. Es resistente al agua y a la lluvia y se puede utilizar 50 o más veces. Todas estas características resultan en un producto ambientalmente sostenible.

Visite [www.MoTubes.com](http://www.MoTubes.com) para más información.

## Referencias

1. ASTM D790-17, "Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2017, 12 pp.
2. ASTM D638-22, "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2022, 16 pp.
3. ASTM D256-23, "Standard Test Methods for Determining the Izod Pendulum Impact Resistance of Plastics," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2023, 20 pp.
4. ASTM D696-16, "Standard Test Method for Coefficient of Linear Thermal Expansion of Plastics Between -30°C and 30°C with a Vitreous Silica Dilatometer ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, 5 pp.
5. ASTM D570-22, "Standard Test Method for Water Absorption of Plastics," ASTM International, West Conshohocken, PA, 2022, 4 pp.

Seleccionado por los editores por interés de los lectores

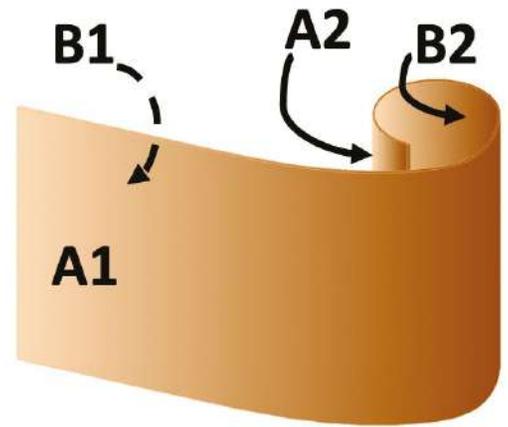


Fig. 8: La FLF se puede enrollar en cuatro configuraciones para maximizar su uso.



**Mo Ehsani**, FACI, es Presidente de QuakeWrap, Inc., Tucson, AZ, EE. UU., y Profesor Emérito del Centenario en Ingeniería Civil de la Universidad de Arizona, Tucson, AZ. Este innovador en el campo de la reparación y rehabilitación de estructuras con productos de polímero fibrorreforzado, cuenta con 20 patentes relacionadas con estas técnicas.

La traducción de este artículo correspondió al Capítulo de Colombia

*Título: Una formaleta para concreto sostenible, ajustable y reusable*



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

## Preguntas y Respuestas

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

### Diseñando programas de apuntalamiento/ reapuntalamiento para un proyecto acelerado

**P** *Estamos en el proceso de diseñar los programas de apuntalamiento y reapuntalamiento para la construcción de un edificio alto de placas planas de concreto reforzado con un calendario muy ajustado. ¿Dispone el ACI de guías y/o recomendaciones para los procedimientos de construcción que puedan ayudarnos a cumplir los requisitos del proyecto acelerado?*

**R** Piense primero en la seguridad. La rapidez y la economía de la construcción vendrán después. En primer lugar, establezca un lugar de trabajo seguro para su personal. A continuación, desarrolle un plan de apuntalamiento/reapuntalamiento adecuado para garantizar la seguridad de la estructura. El ACI 347.2R-17<sup>1</sup> proporciona una guía práctica para desarrollar programas de construcción seguros y económicos que incluyan operaciones de apuntalamiento y reapuntalamiento. El código ACI 318-19(22)<sup>2</sup> requiere que el contratista proporcione al encargado de la obra, si se le solicita, los cálculos estructurales y los datos de resistencia del concreto utilizados en la planificación e implementación de las operaciones de apuntalamiento/ reapuntalamiento.

#### Economía

La economía en la construcción de cimbras de concreto comienza con el diseño estructural/arquitectónico del edificio, la máxima reutilización de las cimbras y los materiales de apuntalamiento, y un diseño de cimbra adecuado, pero no excesivo. Para maximizar la reutilización del equipo de cimbrado y la velocidad de construcción, las cimbras deben retirarse lo antes posible y reinstalarse rápidamente para la siguiente planta. La eliminación de cimbras y puntales requiere un análisis de ingeniería, y este análisis debe tener en cuenta tanto la distribución de la carga de construcción como la capacidad de carga de la estructura de soporte en los primeros años de vida. Si el soporte proporcionado es insuficiente, lo mejor que puede esperarse es una serie de losas y vigas desviadas con grietas radiales alrededor de las columnas (Fig. 1); el peor resultado es un colapso local que desencadene un colapso progresivo en toda la altura del edificio.



*Fig. 1: Losa de concreto con grietas radiales debidas a un soporte insuficiente durante la construcción de un edificio.*

## Diseño

Un diseño adecuado de apuntalamiento/reapuntalamiento requiere un conocimiento profundo de las cargas de diseño de servicio, las cargas de construcción y su trayectoria de distribución dentro del edificio parcialmente terminado y, lo que es más importante, la comprensión del comportamiento y la resistencia de las losas de concreto a edad temprana. Un procedimiento de diseño de apuntalamiento/reapuntalamiento incluye:

- Analizar la distribución de la carga de construcción. Tener en cuenta la redistribución de la carga de postensado si el proyecto lo contempla;
- Evaluar la capacidad de carga, incluyendo los límites de deflexión y agrietamiento de las primeras losas. Acotar las cargas de construcción dentro de los límites de carga y capacidad de servicio de la losa ajustando el número de niveles de losa apoyados y el momento de la remoción; y
- Diseño de cimbras y sistemas de apuntalamiento para soportar las cargas máximas de construcción.

## Distribución de las cargas de construcción

El ACI 347.2R-17 sugiere un método de análisis elástico para evaluar la distribución de la carga de construcción. Sin embargo, se recomienda tener cuidado al utilizar un método de análisis elástico, ya que tiende a subestimar las cargas de construcción en los pisos superiores, en función de la rigidez relativa entre las losas y el sistema de apuntalamiento.

## Requisitos de resistencia de las losas

A una edad temprana, el concreto es susceptible de agrietarse por tensión. Una falla del concreto debida a una deficiencia en la resistencia a la tensión, y consecuentemente a una baja resistencia al cortante, es el tipo más serio de falla de una losa, porque la mayoría de las fallas por cortante son anticipadas con poca o ninguna anticipación. Además, las grietas por tensión causadas por una carga de construcción excesiva en el concreto a edad temprana, pueden contribuir a deformaciones imprevistas no recuperables. El alcance del agrietamiento inicial del concreto depende de la magnitud de la contracción temprana, la magnitud de las cargas de construcción y la edad del concreto cuando se aplican las cargas, lo que a su vez afecta al programa de apuntalamiento y reapuntalamiento. Además, las deformaciones por flujo plástico, a la larga aumentan porque los efectos del flujo plástico dependen de la magnitud del esfuerzo resultante de las cargas aplicadas, con respecto a la resistencia del concreto. Los requisitos del Código ACI 318-19(22) sobre el espesor mínimo de las losas no toman en cuenta los efectos del flujo plástico y la contracción, así como los efectos de las cargas de construcción transitorias en las deformaciones a largo plazo. Por lo tanto, cuando se aplican incorrectamente grandes cargas de construcción a una losa de concreto a una edad temprana, el espesor de la losa y el agrietamiento no pueden utilizarse como protección contra las deformaciones excesivas. Una vez que los elementos de concreto se agrietan durante la construcción, permanecerán agrietados durante toda la vida útil de la estructura a menos que se realicen reparaciones. Por lo tanto, se recomienda la coordinación entre el ingeniero de diseño y el ingeniero encargado de la cimbra para comprobar las deflexiones de la losa durante la construcción.

Las deflexiones deben comprobarse utilizando la sección de concreto agrietada también bajo cargas de construcción, y no sólo bajo cargas de servicio.

El agrietamiento y las deformaciones excesivas de las losas de concreto son una gran preocupación en la construcción de edificios altos. Tenga en cuenta que este problema suele producirse durante los meses de invierno, cuando la resistencia del concreto se desarrolla a un ritmo más lento, a menos que se suministre calor.

Scanlon y Suprenant presentan un método de cálculo simplificado para estimar las deformaciones de losas bidireccionales en edificios de varias plantas.<sup>3</sup> El método permite a los usuarios investigar los efectos de las dimensiones de las losas, las cargas de diseño y los escenarios de apuntalamiento/reapuntalamiento en las deformaciones a largo plazo.

## Remoción temprana de la cimbra

El ACI 347R-14(21)<sup>4</sup> recomienda que la determinación del plazo para retirar la cimbra se base en el efecto resultante en el concreto. Tales efectos incluyen sobrecarga, agrietamiento y deflexiones. Retirar la cimbra a tiempo requiere un desarrollo más rápido de la resistencia del concreto y losas más resistentes. Considere el uso de una mezcla de concreto con un desarrollo de resistencia temprana alto, así como características de contracción mínimas. Puede que valga la pena compensar el costo entre la mezcla de concreto y un cronograma de construcción más rápido. Además, un aumento de las cargas vivas de diseño puede compensar el costo del apuntalamiento extensivo, en comparación con el costo del acero de refuerzo adicional.

Para más información sobre el diseño del cimbrado y las operaciones de construcción, incluyendo una discusión de los procedimientos de apuntalamiento/reapuntalamiento y ejemplos de análisis, consulte el ACI SP-4.<sup>5</sup>

## Referencias

1. Multistory Buildings (ACI 347.2R-17),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2017, 22 pp.
2. ACI Committee 318, “ACI CODE-318-19(22): Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary (Reapproved 2022),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2019, 624 pp.
3. Scanlon, A., and Suprenant, B.A., “Estimating Two-Way Slab Deflections,” Concrete International, V. 33, No. 7, July 2011, pp. 29-34.
4. ACI Committee 347, “Guide to Formwork for Concrete (ACI 347R-14) (Reapproved 2021),” American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014, 36 pp.
5. Johnston, D.W., “Formwork for Concrete,” SP-4(14), eighth edition, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2014, 512 pp.

Gracias a Pericles C. Stivaros, FACI, Vicepresidente e Ingeniero Estructural Senior de GEI Consultants, Inc., Huntington Station, NY, EE.UU., por responder a esta pregunta.

La traducción de este artículo correspondió al Capítulo de México Noreste

*Título: Preguntas y Respuestas.  
Diseñando programas de apuntalamiento/  
reapuntalamiento para un proyecto acelerado*



*Traductor:*  
*Lic. Iliana Margarita  
Garza Gutierrez*



*Revisor Técnico:*  
*Dr. Alejandro Durán  
Herrera*



**CONCRETO**  
LATINOAMÉRICA