



Reforzamiento con fibras de carbono en edificios educativos de la ciudad de México, con deformaciones estructurales por los efectos sísmicos del 2017

Carbon fiber reinforcement in educational buildings in Mexico City, with structural deformations due to the seismic effects of 2017

Tapia-Vargas, Mauricio¹

Baroja-Cruz, José Luis²

^{1,2} TECNM Tláhuac, Ciudad de México, México

¹mauricio.tv@tlahuac.tecnm.mx | <https://orcid.org/0009-0005-0724-3691>

²jose.baroja@tlahuac.tecnm.mx | <https://orcid.org/0009-0004-7182-0310>

Recibido el 24 de Junio del 2024, aprobado el 19 de Agosto del 2024



RESUMEN | Los efectos de deformación provocados por el sismo del 19 de septiembre de 2017, con una magnitud $M=7.1$, derivó en el debilitamiento estructural de más de 2000 planteles educativos (Gómez, 2020, p.7). Sin embargo, la alternativa de implementar fibras de polímeros sintéticos ha generado una nueva expectativa de vida para estos edificios; incrementándose su capacidad de carga hasta en 10 veces su valor original. Por ello, se analiza el comportamiento estructural de los edificios escolares construidos entre las décadas de los 70s a 90s, bajo la dirección del Comité Administrador del Programa Federal de Construcción de Escuelas (CAPFCE), verificando su capacidad de carga para los actuales requerimientos normativos y determinando su posible reforzamiento estructural por medio de fibras de carbono. Finalmente, se sugieren los criterios de refuerzo de sus elementos portantes (columnas), garantizando con ello la preservación de los inmuebles y la longevidad estructural en garantía de sus ocupantes.

PALABRAS CLAVE | CAPFCE, fibra-de-carbono, polímeros, reforzamiento-de-escuelas, sismo-2017.

ABSTRACT | The deformation effects caused by the earthquake of September 19, 2017, with a magnitude $M=7.1$, resulted in the structural weakening of more than 2000 educational establishments (Gómez, 2020, p.7). However, the alternative of implementing synthetic polymer fibers has generated a new life expectancy for these buildings; increasing its load capacity by up to 10 times its original value. Therefore, the structural behavior of school buildings built between the decades of the 70s and 90s, under the direction of the Administrative Committee of the Federal School Construction Program (CAPFCE), is analyzed, verifying their load capacity for the current regulatory requirements and determining their possible structural reinforcement by means of carbon fibers. Finally, the criteria for strengthening its load-bearing elements (columns) are suggested, thus guaranteeing the preservation of the buildings and the structural and use longevity, as a guarantee for their occupants.

KEYWORD | CAPFCE, carbon fiber, earthquake-2017, polymers, school-reinforcement.

Introducción

De acuerdo con el Servicio sismológico nacional de México, el martes 19 de septiembre de 2017, a las 13:14:40 PM, hora local, ocurrió un fuerte terremoto con una magnitud $M=7.1$.

El sismo se originó a más de 50 km de profundidad, dentro de la placa de Cocos, que se desplaza con un ángulo prácticamente horizontal en el centro del país, por debajo de la placa continental; y afectó el área central del territorio nacional, ocasionando daños severos, principalmente en la Ciudad de México (CDMX) y en los estados de Morelos, Puebla, Guerrero y México; dejando como consecuencia un total de 369 muertos, de los cuales 228 ocurrieron en la Ciudad de México; además de daños en construcciones, en la infraestructura y una pérdida económica estimada en \$490 millones de dólares. El epicentro sísmico fue cercano a la zona urbana de la Ciudad de México con una intensidad de movimiento del suelo muy alta, alcanzando aceleraciones máximas absolutas de hasta un 23% de la aceleración de la gravedad. Según la Secretaría de Desarrollo Agrario, Territorial y Urbano (SEDATU), un total de 60,800 construcciones resultaron con daños por el movimiento del suelo. En la CDMX, más de 2 mil edificios sufrieron algún daño (aunque el número reportado por los propietarios, en el portal del gobierno de México, excedió los 12 mil inmuebles). Por eventos similares, los reglamentos de construcciones para la Ciudad de México han evolucionado desde hace 75 años debido a importantes actividades sísmicas que han afectado a la ciudad como los sismos de 1957 y 1985 que impulsaron las Normas de Emergencia de los mismos años, y las versiones de 1976, 1987, 1993, 2004 y 2017 (Gómez, 2020, p.7).

A partir del análisis de las estadísticas de edificios dañados durante el sismo del 2017, se pudieron identificar los grupos de edificios que resultaron más vulnerables. Una de estas tipologías corresponde a edificios estructurados con elementos de concreto reforzado con columnas, traveses y losas planas, que fueron construidos antes de septiembre de 1985 (año del sismo que destruyó gran parte de la CDMX), principalmente en edificios educativos.

Las cifras oficiales publicadas por el gobierno de la ciudad, al 5 de julio de 2023 (6 años después de ocurrido el sismo), reportaron la rehabilitación de 226 escuelas, que representaban sólo un 12% de la reconstrucción total (CDMX, Secretaría de Obras y Servicios, 2023).

Si el proceso de reconstrucción y rehabilitación de los inmuebles educativos ha sido lento es por el empleo de sistemas constructivos tradicionales. Por esta razón, es importante la aceleración en el proceso de reforzamiento estructural y el incremento de la capacidad de carga de los edificios para satisfacer, en comportamiento y en seguridad, la normatividad vigente de la ciudad.

Otro factor importante por considerar es que, a partir de 1944, todos los edificios públicos destinados a la educación fueron diseñados y construidos por el CAPFCE. En su origen, este organismo surgió para ubicar cartográficamente la ubicación de predios destinados a aulas y



proyectar los espacios escolares requeridos en todo el territorio nacional. Es importante señalar que este organismo atendió gradualmente los Programas de infraestructura física educativa de todo el país, desde el nivel preescolar hasta el nivel superior (Martínez, 2018).

En enero de 1996, la Secretaría de Educación Pública (SEP) y el CAPFCE presentaron al Ejecutivo Federal una estrategia de transformación de los programas de infraestructura educativa, que se plasmó en el “Acuerdo para la Descentralización del CAPFCE”, fungiendo como organismo normativo independiente, de asistencia técnica y financiera para los organismos constructores de escuelas en todo el país.

En el año 2008, la presidencia de México emitió la Ley General de la Infraestructura Física Educativa y, con ello, se extinguió el CAPFCE, heredando 45 modelos prototipo de escuelas que, en su mayoría, son edificios construidos bajo los requerimientos estructurales vigentes de la época de su edificación, pero lejanos de las actualizaciones de seguridad normativa que se han generado y actualizado a partir de los sismos.

Por estas actualizaciones se estima que, actualmente, las calidades de los materiales y sus dimensiones estructurales podrían derivar en edificios inseguros que arriesguen a su población inmediata. Tal es la preocupación del gobierno de la CDMX de garantizar edificios seguros que, en diciembre de 2017, se publicó la primera Norma Técnica Complementaria (NTC) aplicable a edificios existentes (CDMX, Instituto para la Seguridad de las Construcciones, 2023, p.1439). De forma inédita, la CDMX publicó una norma para edificios con posibilidad de ser rehabilitados o reparados a partir de un diagnóstico estructural que verifique que su comportamiento estructural no compromete la integridad del inmueble, ni de sus ocupantes.

Formulación de objetivos:

- Primeramente, revisar el padrón de construcciones emitido por el Comité Administrador del Programa Federal de Construcción de Escuelas (CAPFCE, 2017) para clasificar, con base a los materiales de su construcción, los 45 prototipos publicados y establecer los edificios que fueron construidos con un sistema estructural de concreto.
- Posteriormente, analizar el comportamiento de los edificios de concreto bajo sus condiciones estructurales originales. Para ello se realizó una revisión de análisis de cargas utilizando el Reglamento de construcciones del Distrito Federal (ahora CDMX) de 1966, verificando las solicitaciones de carga por normas vigentes y establecer el déficit de capacidad de carga del edificio, previendo un posible estado límite de servicio o de falla.
- Si el edificio presentó, durante su revisión de capacidad de carga, una carencia de resistencia ante las nuevas solicitaciones de peso normativo, se calculó un sistema de reforzamiento para los elementos portantes del inmueble (columnas) por medio de adición de fibras de carbono que incrementaron la capacidad de carga en las nuevas solicitaciones exigidas por la norma vigente.



Metodología

Durante 2017, el CAPFCE publicó el catálogo de sus edificios educativos (CAPFCE, 2017) con la intención de dar a conocer los criterios estructurales empleados en sus inmuebles y facilitar el proceso de inspección ocular de escuelas, para obtener las Constancias de seguridad estructural de cada uno de sus edificios y garantizar su funcionamiento. Es importante señalar que, sin esa Constancia, los centros educativos no podían regresar a sus actividades habituales. Derivado de ello, el ISC publicó, a finales de 2017, una norma para rehabilitación de espacios educativos; por lo que la inspección de inmuebles escolares resultó una especialidad en el proceso de dictaminación estructural postsísmica. En dicho catálogo, las obras arquitectónicas se clasificaron en los siguientes rubros:

- 25 edificios prototipo con estructura en acero,
- 10 edificios prototipo con estructura de mampostería, y
- 10 edificios prototipo con estructura de concreto armado.

Estos 10 edificios prototipos fueron construidos durante tres décadas, iniciando en los 70s y, en todos los casos, las condiciones estructurales son similares entre ellos, como se muestra en la Tabla 1.

Tabla 1

Tabulador resumen de características generales de los 10 edificios prototipos con estructura de concreto CAPFCE

Prototipo de concreto	N. de niveles	Dimensión de tablero (en metros)		Dimensión de columna (en centímetros)		Año de construcción
		Ancho	Largo	Ancho	Largo	
1	2	3.19	8	25	45	1970
2	2	3.24	8	30	45	1985
3	2	3.24	8	30	45	1990
4	3	3.24	8	35	45	1970
5	3	3.24	8	25	45	1970
6	3	3.24	8	30	45	1985
7	3	3.24	8	30	45	1990
8	1	3.24	8	30	45	1990
9	1	3.24	8	30	45	1985
10	1	3.19	8	25	45	1970

Nota. A pesar de que los 10 edificios prototipo de CAPFCE presentan un rango de construcción de casi 20 años entre ellos, los criterios de dimensionamiento (entre ejes) es el mismo en todos los casos, así como el tamaño de los elementos portantes (columnas) con rangos de variación en su dimensión de 5 a 10cm.

Para recrear el comportamiento estructural estático original de los edificios, se consultó el Reglamento de construcciones para el distrito federal (ahora CDMX) de 1966, verificando distintas variables como la carga viva aplicada y los factores de carga asignados para el edificio. En el



artículo 225 de dicho reglamento, se indicaban las siguientes resistencias para efectos de flexión y compresión:

- $f_y = 1,265 \text{ kg/cm}^2$, para acero
- $F_c = 0.45 \text{ de } f'_c$, para concreto

La Tabla 2, indica los datos de la resistencia del concreto que deben ser considerados en el análisis estructural de los inmuebles existentes, acorde a la Norma técnica complementaria para rehabilitación de edificios de 2023 (CDMX, Instituto para la seguridad de las construcciones, 2023).

Tabla 2

Valores históricos de la resistencia a compresión de concreto f'_c en MPa (kg/cm^2)

Época	Cimentaciones	Vigas	Losas	Columnas	Muros
1900-1987	20 (200)	20 (200)	20 (200)	20 (200)	20 (200)
1987 - fecha	25 (250)	25 (250)	25 (250)	25 (250)	25 (250)

Nota. Las construcciones del CAPFCE comenzaron durante la década de los 70s y se concluyeron en los 90s, por lo que la resistencia del concreto para columnas, primordialmente, se estima en un valor de 200 kg/cm^2 y en 3 casos se estima una resistencia de 250 kg/cm^2 . Reproducido de “Norma técnicas complementarias de la ciudad de México, 2023,” por el Instituto para la Seguridad de las construcciones, 2023 (<https://www.isc.cdmx.gob.mx/directores-res/cursos-de-actualizacion-2022/normas-tecnicas-complementarias-2023>). Obra de Dominio Público.

Para ello, se realizó un modelo de análisis de transmisión de cargas (ver Tabla 3), en donde se observó que los elementos portantes de los edificios prototipos con estructura de concreto, tenían que resistir un peso (transmitido a la cimentación) de hasta 36 toneladas.

Tabla 3

Tabulador de transmisión de pesos y capacidad de carga en columnas de planta baja

Elemento estructural	Peso total del elemento (Kg)	N. de elementos	Peso total aplicado (kg)
Losa de concreto	4593.6	3	13,780.80
Impermeabilizante	63.8	1	63.80
Trabes de concreto	2372.7	3	7,118.10
Muro vitrificado	1662.6875	3	4,988.06
Columna	796.5	3	2,389.50
Peso del edificio			28,340.26
Carga viva azotea	1276	1	1,276.00
Carga viva entrepiso	3509	1	3,509.00
Peso total			33,125.26
1966		1.1	36,437.79

Nota: El análisis de pesos (canalización de cargas hasta la cimentación) se considera en su caso más extremo. Es decir, en edificios de hasta 3 niveles de construcción, con un factor de carga de 1.1, acorde al Reglamento de construcciones de 1966.



A partir del análisis de la capacidad de carga de las diferentes combinaciones de estructura en los edificios (y nos referimos a los diferentes tamaños de columnas, diferente número de entrepisos en los inmuebles y diferentes dimensiones en las crujiás de los edificios), se obtuvo que las columnas poseen una capacidad de carga que oscila entre las 29 y hasta las 41 toneladas (ver Tabla 4). El rango de valores dependió directamente de la dimensión de las columnas (de 25x45cm y de 35x45cm, respectivamente); además de la resistencia de concreto asignada según el año de construcción del inmueble (de acuerdo con la Tabla 2).

Tabla 4

Tabulador resumen de capacidades de carga por columna y por edificio prototipo

Prototipo de concreto	Ancho (cm)	Largo (cm)	Año de construcción	Resistencia de concreto (kg/cm ²)	Resistencia última (Kg)
1	25	45	1970	200	29,440.96
2	30	45	1985	200	34,300.96
3	30	45	1990	250	41,590.96
4	35	45	1970	200	39,160.96
5	25	45	1970	200	29,440.96
6	30	45	1985	200	34,300.96
7	30	45	1990	250	41,590.96
8	30	45	1990	250	41,590.96
9	30	45	1985	200	34,300.96
10	25	45	1970	200	29,440.96

Nota. En el tabulador destacamos que la capacidad de carga en las columnas dependió de la resistencia de concreto y de la aportación del acero de refuerzo, según el año de su construcción. Podemos apreciar que las construcciones edificadas en la década de los 70s poseen menor resistencia que los edificios más recientes.

Por lo tanto, para la solicitud de cargas indicadas en el Reglamento de construcciones del DF de 1966, todos los inmuebles educativos con estructura de concreto cumplieron con la seguridad estructural requerida por la época.

Sin embargo, para verificar la capacidad de carga en los edificios bajo los requerimientos estructurales actuales, se procedió al análisis de transmisión de pesos bajo la norma de construcción vigente de 2023 (ver Tabla 5). (CDMX, Instituto para la seguridad de las construcciones, 2023).



Tabla 5
 Tabulador de solicitudes de carga de la NTC 2023

Categoría de peso	Peso aplicado (Kg)	Factores de carga Normatividad 2023	Peso transmitido (Kg)
Peso del edificio	28,340.26	1.5	42,510.39
Peso de carga viva	5,742.00	1.7	9,761.40
			52,271.79

Nota: Posterior al sismo de México de 2017, la Norma Técnica Complementaria incrementó los factores de carga en un 50% para las cargas muertas y en un 70% para las cargas vivas. Si consideramos el valor indicado en el Reglamento de construcciones de 1966 con un factor de un 10%, podemos apreciar que las solicitaciones de resistencia en los elementos estructurales tuvieron un incremento significativo. Para nuestro estudio, pasamos de una resistencia de carga de 41 toneladas a 52 toneladas por cada columna.

En nuestro análisis, se observó que los edificios presentaron un déficit en su capacidad de carga, con equivalencia de un 20%, por lo que podrían ocasionar fallas ante cargas permanentes y sísmicas. El resultado obtenido se debió a diversos factores, por mencionar:

- Las secciones de concreto son menores para las solicitudes de carga exigidas por la nueva norma,
- La cantidad de acero dentro de las piezas es un porcentaje menor a lo requerido, y
- Por el cambio e incremento de los factores de carga en los edificios (considerados de alto riesgo estructural), pasando de 1.1 (en 1966) a 1.7 (en 2023) (CDMX, Instituto para la seguridad de las construcciones, 2023).

Desarrollo

La vida útil de los inmuebles depende, en gran medida, de los materiales utilizados, de las dimensiones de los elementos estructurales y de su región sísmica. Sin duda, el debilitamiento natural de los edificios provoca su abandono y demolición posterior, aunque posean un valor histórico o sean un hito en su contexto.

Para ello, hablando de reforzamiento de estructuras, existen diferentes métodos que tienen como fin la preservación de los inmuebles y la memoria colectiva de un lugar. Pero en época reciente, el reforzamiento con fibras de carbono ha tenido un auge por diversos factores, ya que no incrementa significativamente el peso de la construcción y tampoco incrementa el tamaño de los elementos intervenidos, es decir su sección.

Partiendo de la consideración de Gaspar y Guerrero (2020), la estructura reforzada con fibra de carbono presenta menos peso sísmico. La fibra de carbono resulta más eficiente con el paso del tiempo en comparación del encamisado tradicional, ya que en este último su proceso constructivo es más difícil.



Muchas estructuras necesitan una intervención para restablecer su capacidad de carga tras llegar al final de su vida útil o sufrir un evento catastrófico. El objetivo es crear seguridad para que la estructura pueda soportar de manera solvente cualquier demanda de resistencia excepcionalmente alta que pueda generarse. La fibra de carbono ofrece excelentes características para la asimilación de esfuerzos y no es particularmente vulnerable a los ataques externos, lo que la convierte en un método muy contemporáneo y útil para restaurar la capacidad de una estructura.

Las estructuras de concreto armado son diseñadas para cumplir ciertos requerimientos arquitectónicos, funcionales y de servicio, durante un período de tiempo sin que se generen gastos no previstos por reparación. Sin embargo, debido a la exposición de las estructuras a agentes climáticos, estas sufren deterioros inesperados antes del cumplimiento de su vida útil. Dentro de la disciplina de la ingeniería estructural, la evaluación de edificios es un tema de gran importancia en la actualidad. Debido al alto crecimiento de la industria de la construcción en las últimas décadas, daños provocados por desastres naturales, deterioro de los elementos estructurales, posibles incrementos de cargas, corrosión del acero estructural y errores en diseño o construcción. La evaluación estructural tiene como objetivo dar un diagnóstico confiable del estado en el cual se encuentra actualmente la estructura evaluada (Maldonado y Durán, 2013, p. 12).

En el artículo científico “Uso de telas poliméricas reforzadas con fibras (FRP) para la rehabilitación y refuerzo de infraestructura y edificaciones”, se presentan resultados en la rehabilitación sísmica de edificios de varios pisos, en la rehabilitación de tuberías de gran diámetro y en puentes. Y llegan a la conclusión que “existen guías de diseño relativamente completas para el diseño de sistemas de refuerzo a base de FRP, las cuales se fundamentan en criterios bien establecidos del diseño de elementos de concreto reforzado” (Vilca, 2017, p.11). Así mismo, los proyectos concluidos de rehabilitación permiten constatar que dichos sistemas presentan importantes ventajas sobre los métodos de rehabilitación más tradicionales.

En su momento, los inmuebles escolares planeados, diseñados y construidos por el CAPFCE cumplieron con las solicitudes normativas vigentes. Sin embargo, será importante establecer los criterios actuales de revisión, que permitan conocer el estado de las construcciones bajo los requerimientos estructurales señalados por la normatividad emitida durante el año 2023 y que, finalmente, se evalúe la posibilidad de implementar sistemas de polímeros (como las fibras de carbono) para incrementar la capacidad de carga y garantizar la continuidad de uso del edificio.

Resultados

En este caso, los edificios diseñados y construidos por el CAPFCE son construcciones que, antes del 2017, resultaban seguras ante las combinaciones de esfuerzos estructurales. Pero con la actualización de la Norma sísmica, corren el riesgo de ser edificios inseguros por su falta de resistencia y por la falta de sección de concreto que hoy requieren.



Ante la solicitación de cargas constructivas actualizadas, se hace necesario el reforzamiento de los edificios por métodos rápidos que devuelvan la integridad al inmueble y su reutilización por lo que se puede optar por un reforzamiento con fibras de carbono en sustitución de los encamisados de concreto (que son más lentos).

El incremento de la capacidad de carga de los elementos portantes (columnas) se puede ver potencializado por el número de pletinas (tiras) de fibra de carbono utilizadas y los espesores estandarizados empleados, incrementando la capacidad original del edificio sin aumentar excesivamente las dimensiones de los elementos estructurales originales.

Ante esta condición estructural (incumplir con la capacidad de carga en las columnas), se revisó la propuesta de adicionar fibras de carbono en forma de pletinas bajo las especificaciones de la marca SIKA Carbodur® (quien es el principal proveedor de fibra de carbono en México), para incrementar el área de acero a tensión y reformular la capacidad de carga del elemento a partir del dato técnico de la capacidad a tensión de la fibra, equivalente a 36 mil kg/cm², según se indica en el extracto de la ficha técnica del elemento (ver Tabla 6), (SIKA, 2022)

Tabla 6

Extracto de ficha técnica de pletina de fibra de carbono SIKA Carbodur®

Información Técnica®		
Resistencia a tracción del laminado	Valor Medio	3,100MPa (31,000kg/cm ²)
	Valor Mínimo	>2,800MPa (28,000 kg/cm ²)
	5% valor fractil	3,000 MPa (30,000kg/cm ²)
	95% valor fractil	3,600 MPa (36,000 kg/cm ²)
	*Valores declarados en la dirección longitudinal de las fibras de carbono	

Nota. Los valores indicados para resistencia a tracción de las pletinas de fibra de carbono oscilan entre 28 mil y hasta 36 mil kg/cm². Para el análisis, se optó por el valor menor indicado en la ficha técnica, equivalente a 28 mil kg/cm² para obtener un resultado conservador durante el proceso de cálculo. Reproducido de “Sika® CarboDur® S (Ficha técnica),” SIKA, 2022 (<https://mex.sika.com/es/construccion/repuracion-y-reforzamiento/reforzamiento-estructuralfibrasdecarbono/sika-carbodur-s.html>). Obra de Dominio Público.

Es importante destacar que la resistencia de la fibra de carbono oscila entre los 28 mil y los 36 mil kg/cm². Si se compara su resistencia contra el acero de refuerzo de una pieza de concreto convencional, con varillas de acero grado 42, el reforzamiento con fibras de carbono puede aportar a la pieza analizada un incremento de casi 10 veces su resistencia original.

Para el análisis de revisión de los elementos portantes de los edificios escolares, se estimó el empleo de la pletina más básica del catálogo de fibras de carbono de SIKA Carbodur®, que equivale a una tira de fibra de 5cm de ancho y 1.2mm de espesor, de acuerdo con la información obtenida de la ficha técnica del material (ver Tabla 7).



Tabla 7

Extracto de ficha técnica de pletina de fibra de carbono SIKA Carbodur®

Sika CarboDur S	Ancho disponible	Espesor	Área de la sección transversal
S512	5 cm	1.2 mm	0.60cm ²
S626	6 cm	2.6 mm	1.56cm ²
S1012	10 cm	1.2 mm	1.20cm ²

Nota. Después de realizar el análisis estructural, se concluyó que una columna de concreto armado con varillas grado 42 y con una resistencia inicial de 29 toneladas podría incrementar su capacidad de carga hasta 42 toneladas (un 144% más en su resistencia) reforzándose con una pletina de fibra de carbono. Si se incrementan dos pletinas de fibra de carbono se obtiene una capacidad de carga de hasta 56 toneladas (un 193% más en su resistencia); y puede llegar a una resistencia de hasta 83 toneladas (un 286% más en su resistencia) con la adición de 4 pletinas de fibra de carbono, que son capacidades de carga superiores a las que actualmente presentan las estructuras de concreto en los espacios escolares. Sin duda, ese incremento de capacidad genera una estructura más segura, inclusive en efectos sísmicos superiores a los registrados durante el 2017. Reproducido de “Sika® CarboDur® S (Ficha técnica),” SIKA, 2022 (<https://mex.sika.com/es/construccion/reparacion-y-reforzamiento/reforzamiento-estructural/fibrasdecarbono/sika-carbodur-s.html>). Obra de Dominio Público.

Finalmente, considerando la adición de las pletinas a los elementos estructurales portantes, podemos apreciar el incremento de la capacidad de carga de las columnas analizadas con un 53% de resistencia adicional (ver Tabla 8) y con una posible distribución de pletinas como se muestra en las figuras 1 y 2.

Tabla 8

Capacidad de carga máxima admitida por columna, a partir de la aplicación de pletinas de fibra de carbono

Resistencia a la compresión actual en el elemento (Kg)	Modelo Sika Carbodur®	N. de pletina	Incremento de resistencia (Kg)	Resistencia final del elemento (Kg)
29,440.00	S512	1	13,440.00	42,880.00
	S512	2	26,880.00	56,320.00
52,271.79	Ancho de pletina (cm)	3	40,320.00	69,760.00
	5	4	53,760.00	83,200.00
	Espesor (cm)			
	0.12			

Nota. A pesar de que el análisis estructural de las piezas de concreto armado consideran la adición de 1 o 3 pletinas, la recomendación normativa de la NTC para fibras de carbono sugiere que se realice en números pares por temas de simetría, por lo que las capacidades reales admitidas podrían ser de 56 mil kilogramos para una columna con 2 pletinas u 83 mil kilogramos para 4 pletinas.



Figura 1

Trazo de columna original y trazo con adición de 2 pletinas simétricas en el eje X.

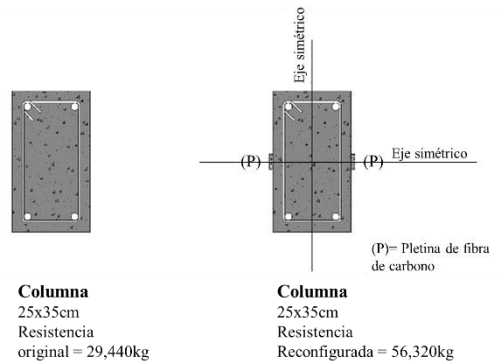
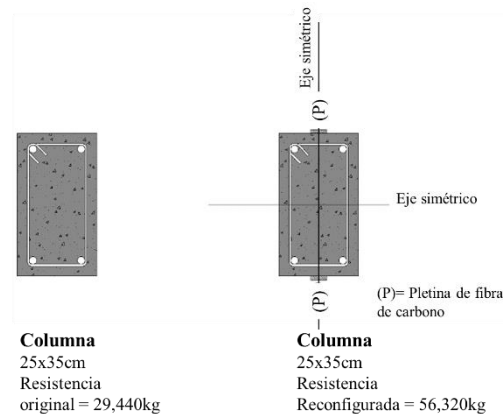


Figura 2

Trazo de columna original y trazo con adición de 2 pletinas simétricas en el eje Y.



Habría que reconocer que los reforzamientos de edificios con fibras de carbono sólo aplican en elementos de concreto, que se ubican en la superestructura y que siempre será posterior al proceso de dictaminación ocular y numérica de los edificios evaluados por especialistas en el tema.

Es decir, que el uso de las fibras de carbono no podrá aplicarse a sistemas de cimentación en edificios que presenten hundimientos diferenciales, ya que su función es incrementar la resistencia de los elementos de concreto armado de la superestructura sin generar una renivelación de los edificios. Finalmente, la NTC para Evaluación y rehabilitación de edificios existentes, en la fracción 9.8.2 *Requisitos de diseño*, señala que ningún elemento de concreto reforzado con fibras de carbono debe rebasar las siguientes proporciones: (CDMX, Instituto para la seguridad de las construcciones, 2023, p. 1641)

- Una cara plana del elemento, mayor a 900mm
- Una proporción entre ancho y largo del elemento mayor a 1:5

Para este estudio, ninguna sección estructural de concreto armado excedió los parámetros geométricos señalados por la norma; por lo que se puede considerar que los elementos revisados durante el estudio son factibles de reforzamiento con fibras de carbono.



Conclusiones

La toma de decisión sobre los edificios antiguos se encamina hacia dos rutas posibles: el reforzamiento estructural o la demolición parcial o total del inmueble. El costo por reforzamiento con fibras de carbono es mucho más elevado que el reforzamiento por encamisados de concreto, por lo que su participación en el proceso de reforzamiento tiene que ver con la economía y el valor histórico del inmueble.

La inversión inicial por el proceso de reforzamiento se debe diferir a un plazo de casi 20 años. Inclusive podría ser más económico (en el mismo periodo de tiempo) que un encamisado tradicional de concreto hasta en un 44% (Meza, 2016, p. 9).

La vida útil de un edificio oscila entre los 70 o más años dependiendo de la calidad de los materiales empleados y de su mantenimiento. Pero un factor que impera en ciudades sísmicas tiene que ver con la calidad del suelo y con actualizaciones de su reglamentación constructiva (y su aplicación obligatoria). Desafortunadamente, el suelo de la CDMX se ha visto fracturado en los últimos 7 años, debido a los temblores trepidatorios y a la extracción excesiva de agua de los mantos freáticos del suelo; derivando en suelos compresibles (en el mejor de los casos) o colapsables (en el peor de ellos). Los edificios construidos durante el siglo XX deberán ser valorados y monitoreados constantemente para evitar hundimientos diferenciales y fallas en un corto o mediano plazo.

Con base a lo anterior, se argumenta que, adicionar fibra de carbono a los edificios es una posibilidad de incrementar esa capacidad de carga y actualizar, tectónicamente, al inmueble. Indudablemente, la adición de fibras de carbono mejora el comportamiento estructural de los edificios, sin incrementar el peso muerto de los mismos, por lo que las condiciones de peso transmitido al suelo casi son las mismas que en su estado original. Los costos por la aplicación de la fibra de carbono son excesivos, en comparativa con los encamisados tradicionales de concreto, pero si es prorrateada la inversión a un lapso de 20 años, podría resultar mucho más económico que un refuerzo tradicional, ganando tiempo de vida útil del edificio que podría compensar el costo inicial de instalación de la fibra.

Y, finalmente, adicionar fibras de carbono en los edificios conservaría el patrimonio cultural arquitectónico de la ciudad, sin perder testigos de la historia urbana y sin perder las obras emblemáticas nacionales.

Sin embargo, sabemos que eso no es la única variable por considerar en el rescate de los edificios ya que, como se ha anotado, aún queda el suelo y sus fallas inherentes.



Recomendaciones

Si bien las estructuras de la Ciudad de México han sido revisadas a través de los dictámenes oculares obligatorios que solicita la norma actual, es necesario realizar una revisión constante de los inmuebles ya que, como se ha comentado, el suelo de la CDMX ha resultado sumamente agrietado. Para ello, el gobierno de México ha publicado atlas de riesgos y zonas de suelos colapsables que tendrán que ser analizados por los diseñadores estructurales y adelantarse a la falla estructural en los edificios.

La pérdida de capacidad de carga de un edificio de concreto puede tener su origen en distintos errores, inclusive errores que aparezcan desde la etapa de planeación y diseño arquitectónico del inmueble. Podría deberse a un error en el dimensionamiento de los elementos estructurales (error en las dimensiones de origen de las columnas, de las trabes y de sus losas), en un error por una mala selección del acero de refuerzo y de sus porcentajes balanceados, por la fractura de una pieza y la penetración de humedad y su afectación por la oxidación del acero de refuerzo. Por ello es importante aclarar que no sólo los edificios antiguos requieren reforzamiento, también puede suceder que inmuebles nuevos carezcan de criterios básicos de diseño y se obtengan edificios que, desde su origen, presenten estructuras fallidas.

Por recomendaciones de fabricantes, la fibra de carbono sólo se puede utilizar en climas con temperaturas templadas, ya que la temperatura máxima de servicio admisible es de hasta 50°C, por lo que en zonas con temperaturas extremas se deberá realizar reforzamiento de estructuras por métodos tradicionales (SIKA, 2022).

Tanto la producción de cemento (para el caso de los concretos) como la producción de fibra de carbono (para el caso de las pletinas) requieren grandes cantidades de agua para su obtención, por lo que ambos sistemas no son materiales sustentables. Sin embargo, por ser el proceso de colocación de fibras de carbono un sistema más rápido que los encamisados de concreto tradicionales, genera menos impacto ambiental en el sitio de su colocación.

Finalmente, el casi nulo incremento de peso por el reforzamiento con fibra de carbono garantiza que el sistema de cimentación no presente hundimientos por carga excesiva ni fallas por cortante en la interacción suelo-estructura.

Referencias

- CAPFCE, (2017). *Catálogo de estructuras CAPFCE*. SCRIBD. Recuperado el 12 de junio de 2024. <https://es.scribd.com/doc/291026925/Catalogo-de-estructuras-Capfce>
- CDMX, Instituto Para la Seguridad de las Construcciones. (2023). *Normas Técnicas Complementarias para la Ciudad de México 2023*. ISC. Recuperado el 10 de junio de 2024. <https://www.isc.cdmx.gob.mx/directores-res/cursos-de-actualizacion-2022/normas-tecnicas-complementarias-2023>



- CDMX, Secretaría de Obras y Servicios. (2023). *La educación es la prioridad social número uno de este Gobierno, cumplimos con la reconstrucción de 226 escuelas dañadas por el sismo de 2017*. SOBSE. Recuperado el 10 de junio de 2024. <https://obras.cdmx.gob.mx/comunicacion/nota/la-educacion-es-la-prioridad-social-numero-uno-de-este-gobierno-cumplimos-con-la-reconstruccion-de-226-escuelas-danadas-por-el-sismo-de-2017-marti-batres>
- Gaspar Lázaro, M., & Guerrero Yajahuanca, M. (2020). *Análisis comparativo entre encamisado y fibra de carbono para el reforzamiento estructural de viviendas, San Juan de Lurigancho 2020*. Repositorio Institucional – Universidad César Vallejo. Recuperado el 09 de junio de 2024. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/72417>
- Gómez Bernal, A. (2020). *Asignación de la vulnerabilidad sísmica de edificios de la Ciudad de México*. UAM Azcapotzalco. Recuperado el 10 de junio de 2024. <https://transparencia.cdmx.gob.mx/storage/app/uploads/public/603/44f/037/60344f0373bc4732608066.pdf>
- Maldonado Mora, D.A., & Durán Fernández, J. R. (2013). *Metodologías para la evaluación y reforzamiento estructural de edificios de hormigón armado mediante muros de corte y fibras de carbono*. PUCE. Recuperado el 09 de junio de 2024. <https://repositorio.puce.edu.ec/items/db8228fb-f53d-4fac-8ced-a39b03a07303>
- Martínez Figueroa, P. (2018). *El CAPFCE y su edificio sede*. Grupo MARQ. Recuperado el 11 de junio de 2024. <https://marq.mx/es/el-capfce-y-su-edificio-sede>
- Meza Aquino, M. (2016). *Análisis y comparación económica entre reforzamiento con ensanchamiento de sección de columna y reforzamiento con fibra de carbono en la estación de telecomunicación “Pacífico”-2016*. Repositorio Institucional – Universidad César Vallejo. Recuperado el 12 de junio de 2024. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/18421>
- SIKA. (2022). *Sika® CarboDur® S (Ficha técnica)*. SIKA Group. Recuperado el 12 de junio de 2024. <https://mex.sika.com/es/construccion/reparacion-y-reforzamiento/reforzamiento-estructuralfibrasdecarbono/sika-carbodur-s.html>
- Vilca Ames, J. A. (2017). *Diseño del Refuerzo Estructural de un Edificio Mediante Fibras de Carbono Aplicando la Norma E.030 2016 – Huaraz, 2017*. Repositorio Institucional – Universidad César Vallejo. Recuperado el 09 de junio de 2024. <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/13378>

