

Nota Técnica BarChip



Durabilidad y rendimiento a largo plazo
De Hormigón Proyectado Reforzado con Fibra

Revisión No. 2: Marzo 2018

BarChip Inc.
The Synthetic Fibre Experts

www.barchip.com

Introducción

La durabilidad de las estructuras de hormigón es una consideración importante para los ingenieros y propietarios de activos que tienen que justificar el gasto público y por lo tanto la viabilidad y longevidad de los activos. Seguiría que un activo más durable con una vida de diseño más larga y menos mantenimiento serían más rentable y más deseable.

La construcción y la investigación existentes muestran que hay problemas importantes con el uso de hormigón reforzado con acero, lo que puede dar lugar a una pérdida de rendimiento significativa con el tiempo, dando como resultado situaciones en las que la estructura de hormigón diseñado ya no puede alcanzar su vida de diseño objetivo. Estos problemas de rendimiento se relacionan con:

- Corrosión de barras de acero o fibras causadas por el medio agresivo que introduce grietas en el hormigón;
- Un fenómeno conocido como fragilización, que disminuye el rendimiento del hormigón reforzado con fibra de acero con el tiempo, mientras el hormigón envejece.

Los trabajos de reparación de la estructura de hormigón mucho antes de la vida de diseño especificada, darán un costo adicional para el propietario debido a la pérdida de ingresos y el costo de las obras para rehabilitar la estructura.

El beneficio de la durabilidad a largo plazo del hormigón reforzado con fibra macro sintética BarChip en contraste con la alta tasa de corrosión de la barra de acero y/o fibra en hormigón agrietado y siendo inmune a la fragilización es un indicador de desempeño clave para el mercado de construcción.

Corrosión del Refuerzo de Acero

Uno de los principales factores que afectan la durabilidad de las estructuras de hormigón es la corrosión del refuerzo de acero.

Se acepta que la alta alcalinidad de la pasta de cemento, combinada con la cubierta de hormigón para el refuerzo proporcione una pasivación natural contra la corrosión, sin embargo esta aseveración se basa en la suposición de que el hormigón no será afectado por la carbonatación o el agrietamiento. Además, podría haber un riesgo más alto de lo normal, como para los túneles de agua y servicios públicos, los túneles submarinos o la construcción en zonas como el Medio Oriente, donde el medio ambiente terrestre es generalmente más agresivo.

Considere por ejemplo, en Estados Unidos, un estudio realizado por las

Agencias de Carreteras Federales (FHWA, por sus siglas en inglés) mostró que el costo directo de la corrosión se estimó en 276.000 millones de dólares (Virmani et al., 2002). Aproximadamente 120.000 millones de dólares se gastaron anualmente en el mantenimiento del envejecimiento y el deterioro de la infraestructura, que incluye 583.000 puentes que necesitan obras de corrección de la corrosión.

En 2016, la Asociación Nacional de Ingenieros de Corrosión (NACE, por sus siglas en inglés) publicó un informe exhaustivo en el que se estima que el costo global anual de la corrosión es de 2.5 billones de dólares, con un costo de 451.000 millones de dólares USA (Koch et al 2016) describiendo en qué medida significativa la corrosión afecta a la





infraestructura del hormigón.

Independientemente de los esfuerzos preventivos (que son sustanciales) el refuerzo de acero en el hormigón, sigue siendo probable de que sufra de corrosión. Las razones prominentes de esto son;

- Agrietamiento del hormigón;
- Carbonatación y neutralización de la cubierta protectora del hormigón;
- Ingreso de cloruros u otros químicos en el hormigón a lo largo del tiempo, reduciendo la alcalinidad y promoviendo la corrosión del acero;
- Combinaciones de lo anterior.

En hormigón agrietado, la corrosión del refuerzo como resultado de estos factores puede conducir a una pérdida de rendimiento durante tan poco como siete meses (Bernard 2004). Esto se debe principalmente a una pérdida de una sección de acero causada por la corrosión que conduce a una “falla frágil inducida por la corrosión” (Kosa y Naaman, 1990).

La corrosión es menos probable que ocurra en el hormigón no agrietado, sin embargo, se ha visto que la fragilidad, también conocida como pérdida de resistencia post-agrietamiento en edad tardía, reduce el rendimiento post-agrietamiento del SFRC hasta en un 50% (Bernard, 2015b).



Imagen 1: El agrietamiento en el hormigón conduce a la penetración de materiales corrosivos, dando como resultado una rápida corrosión del refuerzo de acero.

Durabilidad del hormigón reforzado con fibra: Corrosión

1

1970's: Los investigadores identifican que el agrietamiento en hormigón conduce a la corrosión rápida del refuerzo del acero.

Con la introducción de las fibras de acero en la década de 1970 una cantidad considerable de investigación se llevó a cabo en su durabilidad y resistencia a la corrosión. Al igual que el refuerzo de acero convencional, se demostró que en el hormigón no fisurado el refuerzo de fibra de acero mostró poco deterioro. Las fibras incrustadas dentro de los primeros milímetros de la pasta de superficie se corroían, dejando marcas de herrumbre superficiales extensas, sin embargo la expansión de volumen no fue suficiente para causar el agrietamiento y la integridad estructural se mantendría.

Al mismo tiempo, las investigaciones publicadas a principios de los años setenta mostraron que el comportamiento hormigón reforzado con fibra de acero (SFRC) fue afectado significativamente por la corrosión (Aufmuth et al., 1974, Morse y Williamson 1977). Además de estos informes, Halvorsen et al. (1976) reportaron que las anchos de fisura tan pequeñas como 0,05 mm en hormigón reforzado con fibra de acero son susceptibles a la corrosión y concluyeron que no había un ancho de fisura máximo permisible en el que no ocurra la corrosión del hormigón reforzado con fibra de acero.

2

1990's: Kosa y Naaman muestran que;

1. La corrosión conduce a una reducción en el diámetro de la fibra, dando como resultado una gran pérdida de rendimiento.
2. Las fibras sintéticas no sufren de corrosión.

Kosa y Naaman (1990) realizaron pruebas de exposición en más de 1.200 especímenes de hormigón reforzado con fibra sometidos a condiciones de exposición cíclica. Los resultados mostraron que;

- **La corrosión de la fibra de acero resultó en una reducción en el diámetro de la fibra**, que fue el principal responsable de las pérdidas de resistencia.

adecuada y, a su vez, baja permeabilidad, ya que se demuestra que los especímenes con alta permeabilidad sufrieron reducciones de diámetros mayores que aquellos con baja permeabilidad.

Kosa et al. (1991) continuaron su trabajo comparando la durabilidad de cuatro compuestos representativos de cemento reforzados con fibra sometidos a niveles crecientes de exposición en solución de cloruro de sodio, uno de los cuales era una fibra sintética de polipropileno (PP). Este fue uno de los primeros estudios comparativos de las fibras de acero y fibras PP. Confirmando el estudio anterior, los resultados mostraron que;

- Los especímenes estándar expuestos durante 6 meses mostraron una reducción en el diámetro medio mínimo de la fibra del 5-11%, que aumentó a 12-29% después de 10 meses.
- Se observó que una reducción de aproximadamente un 30% en un diámetro mínimo de fibra condujo a una reducción de la resistencia del 40-50%.
- Después de 6 meses de exposición, los especímenes estándar mostraron una reducción de los 5-20% en pico de tensión y resistencia modificados, aumentando a 8-27% de reducción después de 10 meses.
- Aunque todos los especímenes saturados durante 6 meses sufrieron una corrosión severa que variaba entre el 5-70% del diámetro de la fibra, no se observó ningún agrietamiento inducido por la corrosión en la superficie el espécimen antes de la carga.

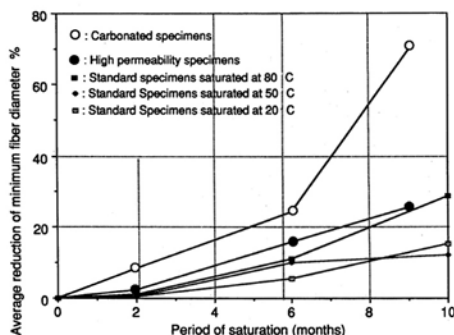


Figura 1: Relación entre la reducción promedio del diámetro mínimo de la fibra y el período de saturación de los especímenes de flexión (Kosa y Naaman, 1990).

Los investigadores también observaron que el efecto de la corrosión sobre el diámetro mínimo de la fibra cambia gradualmente el tipo de fallo del material compuesto de la típica extracción dúctil de la fibra a la ruptura de la fibra o “**falla frágil inducido por la corrosión**” (Kosa y Naaman, 1990).

Esta investigación es de particular importancia para FRC para los revestimientos de túneles, ya que destaca los efectos de la carbonatación, que es una preocupación importante para los túneles que estarán sujetos a grandes cantidades de emisiones de vehículos.

También se destaca en esta investigación la importancia de lograr una compactación

Esto sugiere que el aspecto superficial no es una indicación del rendimiento de la muestra. Por comparación, “los especímenes reforzados con fibras de polipropileno expuestos a condiciones de corrosión similares como las muestras reforzadas con fibra de acero no mostraron ninguna reducción significativa en el pico de tensión y resistencia” (Kosa et al., 1991).

“...no es realista esperar una vida útil de 100 años ... en ambientes agresivos con fibra de acero”

Un estudio a largo plazo de más de 18 años realizado por Hannant (1999) confirmó que los materiales compuestos reforzados con fibra de polipropileno conservan su ductilidad y su resistencia a lo largo de mucho tiempo sin cambios significativos. Los especímenes hechos de mortero fino con capas de películas PP fibrilladas fueron expuestos a diferentes condiciones de almacenamiento: bajo el agua, aire de laboratorio y naturalmente erosionado. Los resultados de este estudio mostraron que;

- La resistencia y fuerza del material compuesto se mantuvo independientemente de la condición de exposición;
- El módulo de tracción de Young de especímenes naturalmente erosionados y no agrietados y almacenados en agua son similares después de 18 años, es decir, no hubo ningún daño de helado-

descongelación al refuerzo PP. Los especímenes erosionados pre-agrietados mostraron el mismo valor que los especímenes almacenados en agua debido a la curación autógena;

- La resistencia de la unión entre PP y la matriz no fue relativamente afectada por la condición de exposición o tiempo hasta 18 años, es decir, el modo de fallo del compuesto no cambia con el tiempo.

Concluyendo, el modo de trabajo (o modo de falla) no cambia con la edad ya que no hay un cambio significativo en la unión entre PP y la matriz de cemento. Por lo tanto, el compuesto conserva la fuerza y la resistencia con el tiempo. Esto contrasta con el hormigón reforzado con fibra de acero, donde los efectos de fragilización cambian el modo de falla y conducen a pérdidas significativas de rendimiento con la edad (véase la página 8).

3

1999: Los estudios a largo plazo de la durabilidad por Hannant confirman que la fibra del PP conserva funcionamiento en ambiente del álcali.

En la década de los 2000's la investigación se emprendió para probar la durabilidad de FRC en entornos de servicio del mundo real. Nordström (2000, 2001) llevó a cabo pruebas de exposición de especímenes de hormigón proyectado reforzado con fibra de acero (SFRC) en túneles reales de carretera sujetos a salpicaduras de agua del tráfico.

Nordström confirmó la investigación anterior de que la corrosión de las fibras de acero resultó en una disminución en el diámetro de la fibra en la abertura de la grieta y que la corrosión aumentó a medida que aumentaba el ancho de la grieta.

Se observó que esta corrosión localizada en las grietas reducía enormemente el rendimiento de la grieta posterior del hormigón proyectado reforzado con fibra.

El mismo autor publicó recientemente una evaluación del hormigón proyectado reforzado con fibra de acero agrietado después de 17 años con exposiciones de campo (Nordström 2016). El informe concluye que no es realista esperar una vida útil de 100 años con una capacidad de carga retenida, especialmente en ambientes agresivos con fibras de acero.

4

2000's: Nordström confirma las investigaciones de laboratorio anteriores en un entorno real y muestra que la pérdida de sección de fibra está directamente relacionada con el ancho de la fisura.

2016: Concluye que el SFRC no puede retener capacidad de carga en ambientes agresivos.



Figura 2: Pérdida de diámetro de la fibra como resultado de la corrosión en las grietas (Nordström, 2001)

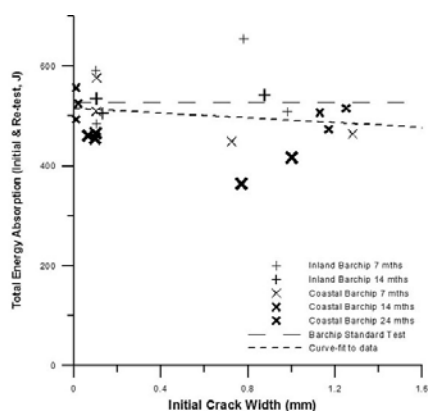
2000's: Bernard confirma;

1. Amplitudes de fisura superiores a 0,1 mm conducen a una corrosión significativa
2. La corrosión de las fibras de acero resulta en una falla frágil de rotura
3. La fibra macro sintética no sufre de corrosión

Figura 2: El rendimiento post-agrietamiento del hormigón proyectado reforzado con fibra macro sintética BarChip no se ve afectado por la exposición o la corrosión, sin embargo el hormigón proyectado reforzado con fibra de acero sufre una pérdida sustancial de rendimiento después de tan solo 7 meses (Bernard, 2004).

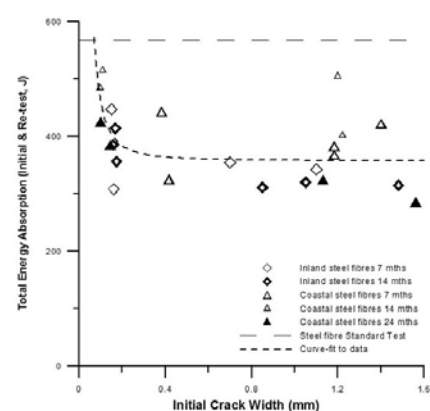
El efecto del ancho de la fisura en la durabilidad del hormigón proyectado reforzado con fibra también fue examinado por Bernard (2004). Las pruebas de exposición se llevaron a cabo en hormigón proyectado reforzado con fibra macro sintética y hormigón reforzado con fibra de acero en zonas costeras e interiores durante un período de dos años. Las pruebas demostraron que;

- El hormigón proyectado reforzado con fibra de acero en los lugares interiores y costeros sufrió corrosión, lo que sugiere que el suministro de oxígeno puede tener un efecto significativo debido a la presencia de iones cloruro;
- Los anchos de fisura superiores



a 0,1 mm en especímenes de hormigón proyectado reforzado con fibra de acero dieron lugar a tasas sustanciales de deterioro;

- Al igual que Kosa y Naaman (1990), **Bernard también observó que la falla frágil inducida por corrosión era evidente.** Durante el tiempo de exposición, el mecanismo de fallo del hormigón proyectado reforzado con fibra de acero cambió de una extracción dúctil a un modo de falla frágil en el sitio de la corrosión; y
- Por el contrario, los especímenes de hormigón proyectado reforzado con fibra macro sintética no mostraron signos de pérdida de rendimiento durante dos años en ninguno de los sitios de exposición.



2010's: Investigación de Kaufmann;

1. Confirma que las fibras macro sintéticas no sufren de corrosión
2. Identifica que las fibras sintéticas de baja calidad material pueden sufrir de fallas frágiles

Estudios recientes también confirman este trabajo de investigación anterior. Kaufmann (2014) llevó a cabo ensayos sobre especímenes de hormigón proyectado reforzado con fibras de acero pre-agrietadas y fibras macro sintéticas, sometidos a exposición cíclica, con el objetivo de simular diversos entornos de túneles. Kaufmann encontró que;

- Después de un año de exposición, la corrosión causó que tanto la carga máxima como la energía de ruptura de los especímenes de fibra de acero se redujeran en comparación con los especímenes no expuestos (no agrietados) (paneles EFNARC);
- La disminución media de la carga máxima para los conjuntos de fibras de acero expuestos a una solución de cloruro de sodio fue del 47%, mientras que la disminución media con una absorción de energía de 25 mm fue del 52%;

- Se demostró que las fibras de polímero resistían ambientes agresivos y en la mayoría de los casos no se observó una caída significativa en la capacidad de carga; y
- La corrosión de las fibras de acero resultó en una **“falla frágil inducida por la corrosión”** de los especímenes.

Kaufmann registró además, tal vez por primera vez en la literatura, las diferencias en el rendimiento mecánico de diferentes tipos de fibras macro sintéticas. Kaufmann demostró que;

- Las fibras de polímero de baja calidad material pueden sufrir daños tales como la división durante el proceso de aplicación.
- El hormigón proyectado reforzado con fibras poliméricas de mala calidad y propiedades mecánicas podría sufrir efectos de fragilización.

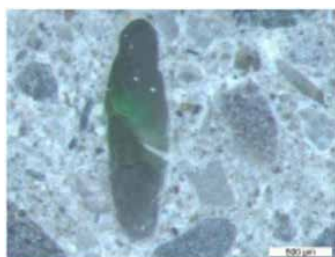


Imagen 3: Las fibras sintéticas de mala calidad pueden sufrir de fallas y daños mecánicos como fisuración (arriba) y división (al fondo) durante las operaciones de proyección de hormigón (Kaufmann 2014)



Corrosión de las fibras de Acero



Formación de grietas en Hormigón
Proyectado reforzado con fibras



Corrosión in situ del refuerzo de acero

Lo presentado aquí es sólo una muestra de los numerosos trabajos de investigación que demuestran los efectos de la corrosión sobre la durabilidad de FRC. La evidencia apoya la conclusión de que si bien la corrosión del refuerzo de la fibra de acero se espera en el hormigón agrietado, las fibras macro sintéticas de calidad no sufren pérdidas de rendimiento resultantes de la corrosión.

La evidencia de Kaufmann (2014) sugiere que las fibras macro sintéticas de mala calidad material también pueden sufrir de fragilización y daño por impacto durante la aplicación, pero que las fibras macro sintéticas de alto rendimiento y calidad no lo harán. Esto confirma que sólo debe usarse fibra macro sintética de alta calidad diseñada específicamente para refuerzo de hormigón.

La directriz de la British Tunneling Society sobre túneles establece que la fibra macro sintética debe tener una resistencia mínima a la tracción de 500 MPa y un módulo de elasticidad superior a 10 GPa (British Tunneling Society, 2010).

“...la corrosión de las fibras de acero resultó en una falla frágil inducido por la corrosión ...”

Fragilización

El término “Fragilización” de hormigón reforzado con fibra representa la pérdida de rendimiento dúctil debido a un cambio significativo en su modo de falla a medida que el hormigón obtiene naturalmente resistencia con la edad.

La investigación sobre el rendimiento a largo plazo del hormigón reforzado con fibra de acero ha revelado que, a medida que el hormigón envejece y su fuerza aumenta, la fragilización puede ocurrir (Bernard, 2008). Este fenómeno se produce cuando la resistencia creciente del hormigón y la dureza de la pasta hacen que el mecanismo de fallo del hormigón reforzado con fibra de acero cambie de un fallo de extracción dúctil a un modo de falla frágil causado por la fractura de fibras, como se representa en la Figura 3.

Este mecanismo de fallo cambia porque la resistencia de unión entre el hormigón y la fibra excede la capacidad de resistencia a la tracción de la fibra, mientras que la resistencia de unión debe permitir siempre que la fibra se retire del hormigón de una manera dúctil.

Una mezcla típica de hormigón proyectado incorpora aglutinantes puzolánicos, lo que aumenta la ganancia de resistencia con el tiempo del hormigón proyectado y, en consecuencia, el rendimiento del hormigón proyectado reforzado con fibra de acero se reduce con la edad. La mayoría del hormigón proyectado utilizado para los revestimientos de túneles requiere humo de sílice y/o ceniza volante por razones de trabajabilidad, cohesión y durabilidad, lo que significa que la ganancia de resistencia con el tiempo es inherente.

El efecto de la fragilización no sólo se relaciona con el hormigón proyectado. Se encuentra en cualquier hormigón donde el diseño de mezcla incorpora aglutinantes puzolánicos y se produce ganancia de edad tardía. Muchos túneles segmentarios están diseñados para una alta durabilidad frente a ataques químicos utilizando hasta 70% de escoria granulada molida de alto horno como aglutinante, por ejemplo en el MRT de Singapur. La consecuencia lógica es la ganancia de resistencia

post-endurecimiento o de edad tardía, y por lo tanto la fragilización.

Se supone ampliamente que el curado al vapor de los segmentos del túnel impide el endurecimiento posterior de la matriz del hormigón. Sin embargo, pocos datos sobre esto están disponibles ya que las pruebas en edades tardías son infrecuentes. En contraste, King y Hebert (2008) reportan un aumento del 28% en la resistencia compresiva de 28 a sólo 56 días de edad del hormigón autocompactante para los segmentos de túnel San Vicente Pipeline curados al vapor.

Numerosos trabajos de investigación se han escrito sobre los efectos de la ganancia de resistencia con el tiempo en el rendimiento del hormigón

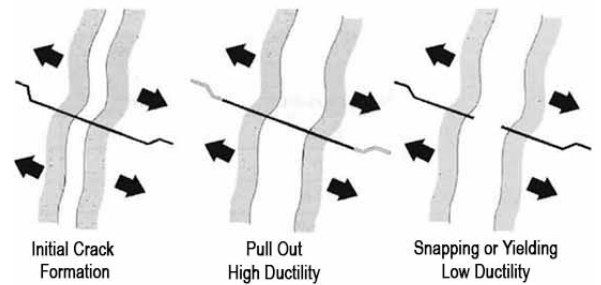


Figura 3: Mecanismos de falla post-agrietamiento para hormigón reforzado con fibra de acero con enganchado (Bernard, 2008).

proyectado reforzado con fibra de acero. Banthia y Trottier (1995), Farstad (1999), Bernard y Hanke (2002) y DiNoia y Rieder (2004) concluyeron que a medida que la resistencia del hormigón aumentaba con el tiempo, el mecanismo de fallo del hormigón proyectado reforzado con fibra de acero cambiaba de extracción dúctil a falla frágil.

La figura 4 muestra un cambio significativo en el comportamiento frágil con la edad de los especímenes reforzados con fibra de acero, donde en contraste las fibras macro sintéticas producen un aumento en el rendimiento post-agrietamiento y la capacidad de absorción de energía (resistencia). Un estudio posterior de Bernard (2008) confirma estos hallazgos con ensayos

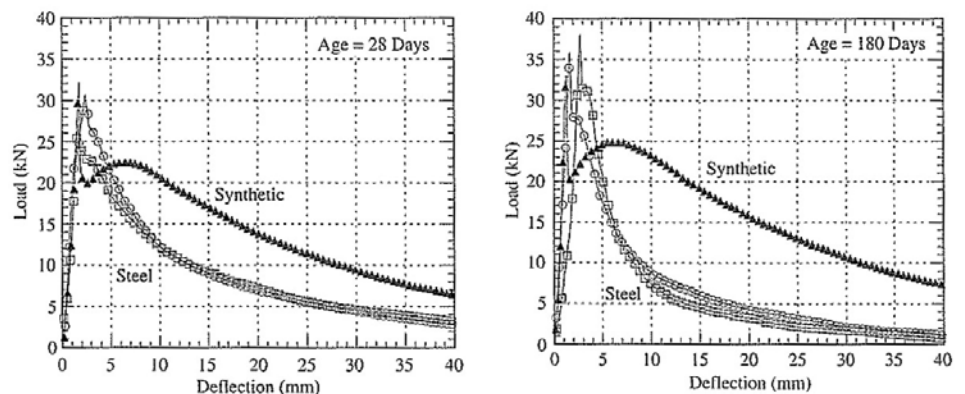


Figura 4: DiNoia y Rieder (2004) - “A medida que aumenta la edad de 7 a 180 días, la disminución de la capacidad de carga en función de la deflexión ocurre más rápidamente con el aumento de la edad... A los 180 días, la caída en la carga la capacidad de carga es muy dramática (para el hormigón proyectado reforzado de fibra de acero)”.

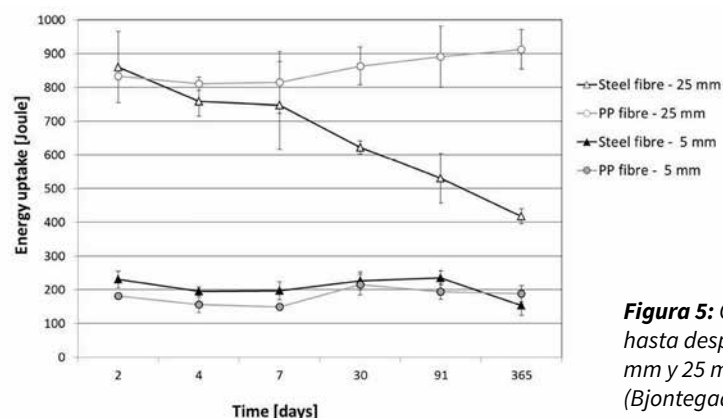


Figura 5: Captación de energía hasta desplazamiento de 5 mm y 25 mm versus tiempo (Bjontegaard et al., 2014)

de panel realizadas a los tres años de edad. Esta investigación indica que el efecto de la fragilización sobre la ductilidad fue más importante que la corrosión y que las pruebas estándar de 28 días para el control de calidad no podían garantizar un rendimiento satisfactorio en edades posteriores.

Estos hallazgos son corroborados por investigaciones más recientes de Bjøntegaard et al. (2014), que demostraron que la ductilidad media (capacidad de absorción de energía) de los paneles de SFERS disminuyó de 621 Joules a los 30 días a 530 Joules a los 91 días (-15%) y a 417 Joules después de un año (-33%). Por el contrario, los paneles MSFRS producen un aumento de 863 J a los 30 días, a 912 J después de un año. El hormigón proyectado tenía una resistencia de cubo de 50MPa a los siete días y post endurecimiento desarrolló una resistencia de cubo de 90 MPa después de un año, produciendo una ganancia de resistencia del 80%.

Recientemente se ha propuesto que las fibras de acero de mayor resistencia son capaces de superar los efectos de la fragilización. La industria de la fibra de acero declaró en una entrevista con el Diario de Túneles “Es un alambre de alto carbono, muy, muy fuerte y caro, pero es lo que se necesita con hormigón de alta resistencia. **Si usted tiene un hormigón de alta resistencia y fibras regulares, las fibras se rompen.**” (Smith, 2013). Por el contrario, esto plantea la pregunta de por qué el cliente debe pagar aún más por las fibras de acero cuando no se enfrentarían a este problema utilizando fibras macro sintéticas de alta calidad.

La investigación publicada recientemente por Bernard (2014 y 2015a) muestra que la fragilización ocurrirá en resistencias nominales de hormigón tan bajas como 40 MPa e indica que la fibra de acero de alto carbono no es inmune a ella. Se ha confirmado que el comportamiento de las fibras de acero enganchado de uso común en FRC destinadas a estructuras de túneles puede cambiar con el tiempo desde un modo de extracción de alta energía a un modo de ruptura de baja energía (Bernard 2014). El cambio a un modo de comportamiento post-agrietamiento basado en ruptura se asocia con una caída sustancial en la resistencia residual en anchos de fisura máximos superiores a 2,0 mm en un ensayo realizado en vidas ASTM C 1609, dando una pérdida de

“Si usted tiene hormigón de alta resistencia y fibras regulares, las fibras se rompen.”

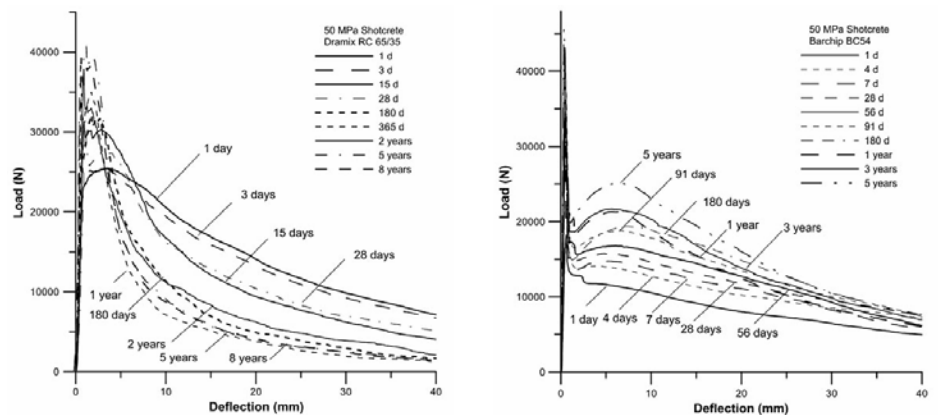


Figura 6: Ensayos realizados por Bernard (2015a), que muestran un aumento en el rendimiento de las fibras de acero a baja deflexión con la edad, pero una dramática disminución en deflexiones mayores (izquierda), en comparación con las fibras macro sintéticas que aumentan el rendimiento en todas las deflexiones con la edad. (derecha).

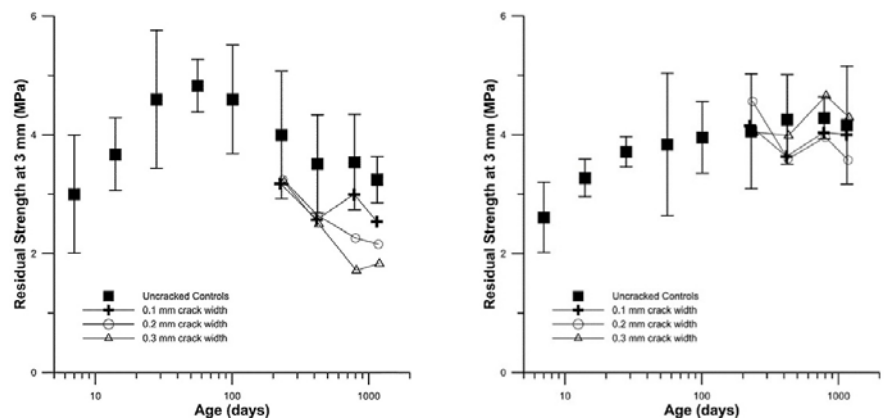


Figura 7: Resultados de la resistencia residual en edades diferentes hasta tres años para las vigas ASTM C 1609 reforzadas con 40kg/m3 de Dramix RC-65/60-BN (izquierda) y 8kg/m3 de BarChip 54 (derecha) (Bernard, 2015b).

rendimiento residual de hasta 50%.

Por lo tanto, es aconsejable que los diseñadores también soliciten pruebas a edad tardía, ejemplo: Un mínimo de 90 días de edad, para comprender mejor el rendimiento a largo plazo del hormigón reforzado con fibra.

Las investigaciones adicionales de Bernard (2015b) examinaron cómo la fragilización y la corrosión pueden combinarse para degradar el rendimiento del acero FRC con el tiempo. Los ensayos revelaron que anchos de fisura tan pequeños como 0,10 mm dieron como resultado la corrosión de las fibras de acero, lo que plantea de nuevo la cuestión de límites de anchos de fisura aceptables para el SFRC.

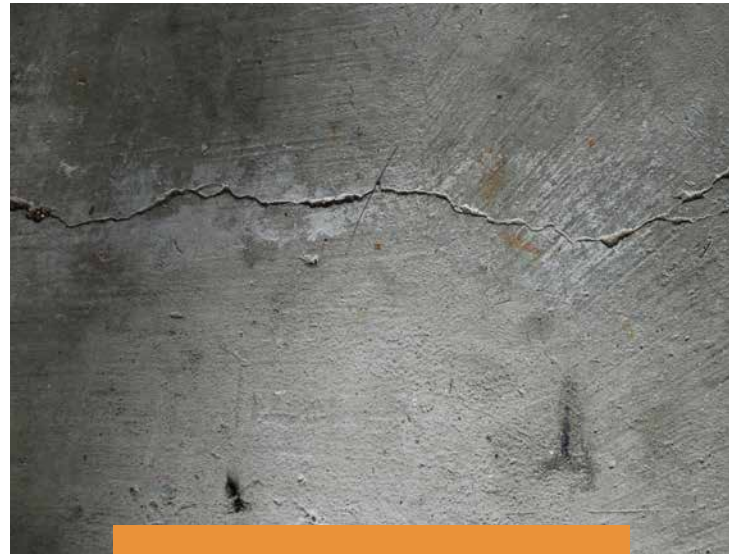
Los anchos de fisura de sólo 0,30 mm dieron como resultado una pérdida de rendimiento del 60% durante un período de tres años de exposición debido al efecto combinado de fragilización y corrosión. En contraste, los resultados indican que pueden existir grietas de hasta 0,30 mm de ancho máximo en miembros macro sintéticos de FRC sin ningún efecto perjudicial sobre el comportamiento estructural post-agrietamiento (Figura 7).

Ni la corrosión ni la fragilidad se producen en hormigón reforzado con fibra macro sintética de alta calidad, por lo que el rendimiento a largo plazo permanece cercano o mejor que el rendimiento medido de 28 días, incluso para anchuras de fisura de hasta 0,30 mm en entornos agresivos.

Conclusiones

Estos estudios de investigación, junto con otros, proporcionan una serie de ideas clave sobre la durabilidad y el rendimiento a largo plazo de hormigón reforzado con fibra, que son:

1. Las fibras macro sintéticas de polipropileno de alta calidad, como BarChip, no sufren los efectos de la corrosión y mantienen el rendimiento independientemente de las condiciones de exposición conocidas, incluso en fisuras de gran amplitud;
2. Los especímenes de hormigón reforzado con fibras de acero no agrietadas, en gran parte no son afectados por la corrosión, sin embargo, una vez que se forman grietas, el deterioro del rendimiento como resultado de la corrosión es rápido;
3. La corrosión de la fibra de acero produce una pérdida de diámetro de la fibra en la abertura de la grieta. La velocidad y la cantidad de corrosión aumentan a medida que aumenta el ancho de fisura;
4. El ancho de fisuras superiores a 0,10 mm conducen a tasas significativas de deterioro de la fibra de acero como resultado de la corrosión, debido a que el ancho de fisura afecta al tiempo de inicio de la corrosión;
5. La corrosión del refuerzo de fibra de acero resulta en un cambio significativo del modo de fallo, pasando de un fallo de extracción dúctil a un fallo de rotura frágil, causando una rápida pérdida de resistencia. Esto se conoce como falla frágil inducida por la corrosión;
6. La fragilización del hormigón reforzado con fibra de acero ocurre debido a la ganancia de resistencia con el tiempo, haciendo que la unión entre la matriz del hormigón y la fibra supere la resistencia a la tracción de las fibras, cambiando el mecanismo de fallo de una extracción dúctil a una falla frágil causada por la ruptura de las fibras. Esto se conoce como fallo inducido por fragilización;
7. Se ha demostrado que la fragilización ocurre tan pronto como a los 30 días de edad y en un hormigón con una resistencia nominal de hasta 40 MPa, y se ha demostrado que reduce el rendimiento post-agrietamiento hasta en un 50%;
8. Las fibras macro sintéticas de alta calidad, como BarChip, no se ven afectadas por la ganancia de resistencia de hormigón con el tiempo. En contraste, muestran un mejor rendimiento con la edad. Sin embargo, un estudio indica que las fibras sintéticas de baja calidad pueden verse afectadas por efectos de fragilización;
9. Las fibras de BarChip se pueden utilizar como una alternativa a los refuerzos de acero con beneficios asociados significativos tales como durabilidad mejorada, costos reducidos y mayor sostenibilidad;
10. La fibra de BarChip es una opción de refuerzo mucho más amistosa y sostenible con el medio ambiente, ya que la huella de carbono para la fibra de BarChip es significativamente menor que la del refuerzo de acero.



Casi todos los hormigóns se fisuran, independientemente del diseño o las medidas preventivas



Las fibras macro sintéticas BarChip nunca sufrirán los efectos de la corrosión

Los efectos de la fragilización en el rendimiento a largo plazo pueden ser aún más graves que la corrosión



Aufmuth, R.E., Naus, D.J., Williamson, G.R., 1974. "Efecto de entornos agresivos sobre hormigón reforzado con fibra de acero", Laboratorio de Investigación de Ingeniería de Construcción, Informe Técnico M-113, Champaign, Illinois, noviembre de 1974.

Banthia, N., & Trottier, J.F., 1995. "Hormigón Reforzado con Fibras de Acero Deformatas, Parte II: Caracterización de la dureza", Diario de Materiales, V.92, No. 2, Mar.-Abr. 1995, págs. 146-154.

Bernard, E.S. & Hanke, S.A., 2002. "Comportamiento dependiente de la edad en Hormigón Proyectado Reforzado con Fibras", Cuarto Simposio Internacional sobre Hormigón Pulverizado, Davos, Suiza, 22-26 de septiembre, págs. 11-25.

Bernard, E.S., 2004. "Durabilidad del Hormigón Proyectado Reforzado con Fibra agrietada", Hormigón Proyectado: Más Desarrollos de Ingeniería, Bernard (ed.), Págs. 59-66, Taylor & Francis, Londres.

Bernard, E.S., 2008. "Fragilidad de hormigón proyectado reforzado con fibra", Revista de Hormigón Proyectado, verano de 2008, Asociación Americana de Hormigón Proyectado, Farmington Hills, MI, EE.UU.

Bernard, E.S., 2013. "Una revisión de los requisitos de prueba de hormigón proyectado para el proyecto hidroeléctrico de Cheves, Perú". Informe de Referencia: 13 - EMS -012 Cheves Hydro, preparado para EPC Sudamérica Ltd.

Bernard, E.S., 2014. "Cambios dependientes de la edad en el comportamiento post-agrietamiento del Hormigón Reforzado con Fibra para segmentos de túnel", 15ª Conferencia Australiana de Tunelización 2014, Sydney, 17-19 de septiembre, págs. 229-235.

Bernard, E.S., 2015a. "Cambios dependientes de la edad en el rendimiento post-agrietamiento de los revestimientos de hormigón proyectado reforzado con fibra", Tecnología del espacio Subterráneo y Tunelización 49 (2015), Elsevier, págs. 241-248.

Bernard, E.S., 2015b. "Efecto de la Exposición en el Desempeño post-agrietamiento de FRC para Segmentos de Túneles", Actas del Congreso Mundial de Túneles 2015, Dubrovnik, Croacia.

Bjontegaard, O., Myren, SA, Klemtsrud, K., Kompen, R., 2014. "Hormigón Pulverizado Reforzado con Fibra (CPRF): Capacidad de Absorción de Energía de 2 días a un Año", Séptimo Simposio Internacional sobre Hormigón Pulverizado, Sandefjord, Noruega, 16-19 de junio, págs. 88-97.

Sociedad Británica de Tunelización, 2010. Especificación para Tunelización. Tercera edición

DiNoia, TP y Rieder, KA, 2004. "Resistencia del hormigón proyectado reforzado con fibra en función del tiempo, desarrollo de resistencia y tipo de fibra de acuerdo con ASTM C1550-02", Hormigón Proyectado: Más Desarrollos de Ingeniería, Bernard (ed.), págs. 127-135, Taylor y Francis, Londres.

Farstad, T., 1999. "Hormigón pulverizado reforzado con fibra de acero - influencia de la resistencia del hormigón y el contenido de fibra", Actas del tercer simposio internacional sobre hormigón pulverizado, Noruega, 26-29 de septiembre.

Halvorsen, G.T., Kesler, C.E., Robinson, A.R. y Stout, J.A., 1976. Durabilidad y propiedades físicas del hormigón reforzado con fibra de acero. Urbana, IL: Departamento de Ingeniería Civil, Universidad de Illinois.

Hannant, D. J. 1999. Los efectos de la edad hasta 18 años bajo diversas condiciones de exposición sobre las propiedades de tracción de las propiedades de hormigón reforzado con fibra de polipropileno. Materiales y estructuras, vol. 32, marzo de 1999, págs. 83-88.

Hoff, G., 1987. "Durabilidad del hormigón reforzado con fibra en un ambiente marino severo", Departamento del Ejército, Durabilidad del Hormigón - Conferencia Internacional Katharine y Bryant Mather SP-100, American Concrete Institute, págs. 997-1041.

Kaufmann, J.P., 2014. "Rendimiento de la durabilidad de hormigón proyectado reforzado con fibra en un entorno agresivo", Actas del Congreso Mundial de Túneles 2014, Cataratas del Iguazú, Brasil, pag. 279.

King, M., Hebert, Chr., 2008. "Revestimiento segmentario del túnel del acueducto de San Vicente", Revista de Tunelización Mundial, marzo de 2008, número 6.

Koch, K., Varney, J., Thompson, N., et al., 2016. "Medidas Internacionales de Prevención, Aplicación y Economía de Estudios de Tecnologías de Corrosión", Asociación Nacional de Ingenieros de Hormigón.

Kosa, K. y Naaman, A.E., 1990. "Corrosión de Hormigón Reforzado con Fibra de Acero", Materiales ACI, 87 (1), Ene-Feb, págs. 27-37.

Kosa, K., Naaman, A.E. y Hansen, W., 1991. "Durabilidad de mortero reforzado con fibra", Materiales ACI, 88 (3), May-Jun, págs. 310-319.

Morse, D.C., Williamson, G.R., 1977. "Comportamiento de corrosión del hormigón fibroso de acero", Departamento del Ejército, Laboratorio de Investigación de Ingeniería de Construcción, Informe Técnico M-217, Champaign, Illinois, mayo de 1977.

Nordström, E., 2000. "Corrosión de las fibras de acero en las grietas - Durabilidad del hormigón pulverizado", Tesis de Licenciatura, Universidad Tecnológica de Lulea

Nordström, E., 2001. "Durabilidad del hormigón proyectado reforzado con fibra de acero con respecto a la corrosión", Hormigón proyectado: Desarrollos de Ingeniería, Bernard (ed.), Págs. 213-217, Swets & Zeitlinger, Lisse.

Nordström, E., 2016. "Evaluación después de 17 años con exposiciones de campo de hormigón proyectado reforzado con fibra de acero agrietado". Fundación de Investigación de Ingeniería de Rocas, BeFo Rapport 153 Estocolmo, ISSN 1104-1773 (en sueco)

Sinclair Knight Merz, 2013. "Hormigón Elasto Plástico - BarChip 48 y 54 Huellas de Carbono". Australia.

Smith, K., 2013. "Desarrollos de Hormigón Pulverizado", Diario de Túneles, Mar. 2013, págs. 10-18.

Virmani, Y.P., Payer J.H., Koch, G.H et al., 2002. "Costos de corrosión y estrategias preventivas en los Estados Unidos", Departamento de Transporte de los Estados Unidos, Administración Federal de Carreteras, Publicación No. FHWA-RD-01-156.

BarChip Inc.

Nuestra Visión

BarChip tiene una visión simple - revolucionar el mundo del refuerzo de Hormigón proyectado. Durante más de 100 años la tecnología de refuerzo de Hormigón proyectado apenas ha cambiado. Nos propusimos crear un nuevo refuerzo para el siglo XXI. Hemos creado el refuerzo de fibra sintética BarChip.

Nuestro Proceso

Creemos que las relaciones comerciales a largo plazo sólo pueden ser sostenidas por el compromiso de proporcionar productos y servicios de la más alta calidad. Nos cercioramos de entender su Hormigón, de saber los requisitos del funcionamiento y de trabajar con usted para conseguir el diseño correcto y los resultados adecuados del funcionamiento.

Su Producto

Cuando trabaja con BarChip, sabe que su activo de Hormigón se ha reforzado con los últimos estándares de ingeniería. Nunca sufrirá de corrosión. Será más barato y más rápido de construir.

Será más seguro y seguirá realizando durante toda su vida de diseño.

BarChip Inc.

info@barchip.com

Australia: +61 1300 131 158

N. America: +1 704 843 8401

EMEA: +353 (0) 1 469 3197

Asia: +65 6835 7716

S. America: +56 2 2703 1563

Brazil: +55 19 3722 2199



BarChip Inc.
The Synthetic Fibre Experts

Los distribuidores se encuentran en otras regiones. Para obtener más información, visite www.barchip.com.

Descargo de responsabilidad: Esta información se ha proporcionado como una guía para el rendimiento solamente, para condiciones específicas y supervisadas. Se aconseja al usuario realizar su propia evaluación y utilizar los servicios de profesionales para determinar la idoneidad del producto para cualquier proyecto o aplicación en particular antes del uso comercial. ISO 9001: 2008. © BarChip Inc. 2018. TNDUR_2018_2.

www.barchip.com