

Nota Técnica de BarChip



Código Modelo 2010 y el Diseño de Estructuras de
Hormigón utilizando Fibra Macro Sintética BarChip

Revisión No. 2: Marzo de 2018

BarChip Inc.
The Synthetic Fibre Experts

www.barchip.com

Qué es el Código Modelo 2010

El Código Modelo Fib 2010 para estructuras de Hormigón es una recomendación integral para el diseño de Hormigón reforzado y pretensado. Se pretende que sea una base para futuros códigos para estructuras de Hormigón, por ejemplo. La próxima generación de Eurocódigo 2 (EC2).

También presenta nuevos desarrollos en cuanto a estructuras de Hormigón, materiales estructurales y nuevas ideas para lograr un comportamiento estructural y sostenible óptimo. La última edición de la versión final del Modelo de Código 2010 (MC2010), publicada en marzo de 2012 como boletines fib 65 y 65, incorpora fibras como refuerzo en los capítulos sobre materiales y verificación estructural.

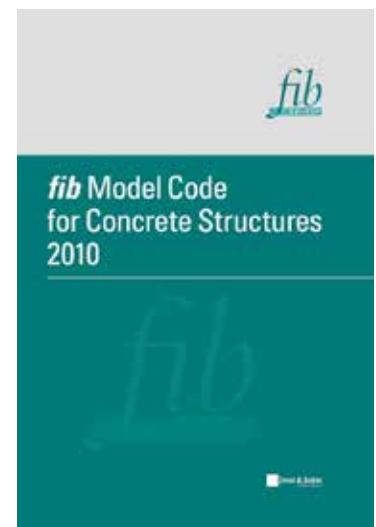
Las reglas en MC2010 se basan principalmente en la experiencia adquirida con Hormigón reforzado con fibra de acero. Por lo tanto, se percibe en el mercado como el ir a la guía de diseño de Hormigón

reforzado con fibra de acero. Sin embargo, también puede utilizarse para diseñar estructuras de Hormigón usando fibras macro sintéticas o de otro tipo.

MC2010 permite a los diseñadores tener un código de referencia que establece los criterios de rendimiento para las estructuras de FRC, pero hay que recordar que hay una serie de otros códigos de diseño y directrices disponibles para los diseñadores que pueden adaptarse mejor a la promoción de fibras macro sintéticas.

Los capítulos pertinentes de fibra de MC2010 son:

- 5.6 Fibras/Hormigón Reforzado con Fibra, cubriendo los aspectos del material y los valores de diseño
- 7.7 Verificación de la seguridad y facilidad de servicio de las estructuras de FRC, que abarcan aspectos de diseño estructural



Esencialmente MC2010 detalla cómo los diseñadores:

- **Realizan una prueba apropiada;**
- **Evalúan los resultados de la prueba; y**
- **Aplican los resultados de las pruebas a un diseño estructural.**



Image 1: MC2010 is not intended to be applied to slab on grade or shotcrete applications.

A qué aplicaciones se aplica el Código Modelo 2010?

MC2010 está destinado a ser aplicado a cualquier elemento estructural de Hormigón reforzado o pretensado. Sin embargo, no se pretende que se aplique a:

- Revestimientos provisionales de Hormigón proyectado;
- Losas sobre el terreno; y
- Aplicaciones en las que la adición de fibras apunta a una mayor resistencia a la contracción plástica, abrasión o impacto.

Para el Hormigón reforzado con fibra, la industria de revestimientos segmentados prefabricados es el mercado clave donde se puede utilizar este Código.

Cómo reaccionaron los diseñadores a Model Code 2010.

Muchos diseñadores de todo el mundo (predominantemente europeos) utilizan MC2010 como base para sus diseños estructurales, especialmente para el diseño de segmentos de túneles prefabricados reforzados con fibra. Sin embargo, hay una percepción de que el refuerzo de fibra sintética no se puede utilizar al diseñar con MC2010. Esta percepción se basa en la creencia de que;

- Las fibras macro sintéticas no cumplen **los requisitos de propiedades materiales** estipulados en MC2010
- Las fibras sintéticas macro no cumplen los **requisitos de rendimiento** estipulados en MC2010

Sin embargo, la fibra de BarChip puede satisfacer los requisitos de propiedad material y cumple con los requisitos de rendimiento, y por lo tanto es adecuado para su uso con MC2010. Estas dos declaraciones se abordarán a continuación.



“La fibra de BarChip puede satisfacer los requisitos de propiedad del material y cumple con los requisitos de rendimiento, y por lo tanto es adecuado para su uso con MC2010”

Requisitos de propiedades materiales del código modelo 2010

MC2010 está abierto a todos los materiales de fibra, siempre y cuando su comportamiento sea independiente del tiempo. Enumera los tipos de fibras que se pueden utilizar en el refuerzo de Hormigón, que incluyen acero, polímero, carbono, vidrio o fibras de materiales naturales. La referencia en todo el documento es sólo a “Fibras”. Así, en general, las fibras macro sintéticas de BarChip están cubiertas por el alcance de MC2010.

Los siguientes son dos advertencias importantes a los puntos anteriores, que pueden disuadir el uso de fibras macro

sintéticas por los diseñadores. MC2010 establece:

1. “Los materiales de fibra con un módulo de Young que está significativamente afectado por el tiempo y/o el fenómeno termo-higrométrico no están cubiertos por el Código Modelo”.
2. “En el caso de las fibras orgánicas o naturales, el comportamiento a largo plazo post-agrietamiento puede verse afectado por una fluencia adicional de las propias fibras.”

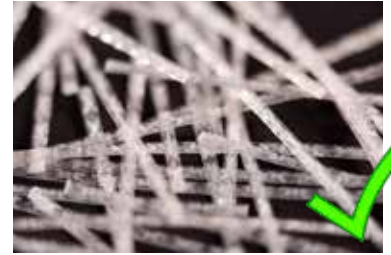


Image 2: La directriz de diseño de segmento de ITAtech FRC aplica igualmente las reglas de material y diseño de MC2010 a las fibras de acero y macro sintéticas.

Punto 1 - Fenómeno termo-higrométrico

Punto 1. El fenómeno termo-higrométrico significa que las propiedades del material pueden cambiar tanto con el tiempo como con la temperatura o la humedad. Esto, en cualquier caso, es un requisito general para materiales de refuerzo de Hormigón. Sin embargo, este párrafo es abierto en términos de lo que “significativamente” significa en realidad. Independientemente de esto, BarChip se ha demostrado en muchas aplicaciones y pruebas que no se ve afectado significativamente por el tiempo o la humedad. Esto se debe a que el polipropileno es inerte y duradero.

Cuando se especifican fibras macro sintéticas como refuerzo TR65 afirma que “las fibras macro sintéticas no serán afectadas significativamente por la humedad y no serán atacadas por los cloruros cuando se usan en estructuras marinas o aquellas sometidas a sales de deshielo” (TR 65 2007).

ASTM C1116 declara que “Fibras tales como poliolefinas (polipropileno y polietileno)... han demostrado ser duraderas en Hormigón.” (ASTM C 1116 2010).

Véase también la nota técnica del BarChip, «Durabilidad y rendimiento a largo plazo del FRC».

Como polímero, BarChip funciona de forma natural de forma diferente a temperaturas variables. Sin embargo, BarChip ha demostrado su rendimiento en entornos termo-críticos, como en los revestimientos de Hormigón proyectado de minas profundas, donde nunca se ha reportado ningún fallo. Esto demuestra que incluso cuando se expone a temperaturas más altas, el material compuesto funcionará según lo diseñado y las propiedades térmicas aisladas de la fibra de BarChip se harán subordinadas.

La única condición crítica con respecto a la pérdida de rendimiento de las fibras de polímero podría ser un aumento fuerte repentino de temperatura, por ejemplo. Durante el curso de un incendio en el túnel. Sin embargo, esta condición

extrema no se aplica a ninguna otra aplicación de la fibra BarChip. Una vez más, el rendimiento del compuesto reforzado con fibra no sólo depende del comportamiento de las fibras, sino que también se verá afectado por una serie de factores, como el diseño de la mezcla de Hormigón, la resistencia a la compresión, el grosor del miembro, la edad, etc.

Teniendo en cuenta esto, si un producto de Hormigón reforzado con fibra cumple los requisitos de rendimiento especificados con el tiempo, entonces su material de fibra **es adecuado para su uso con MC2010.**



Imagen 3: Rendimiento probado en servicio a través de un amplio rango de temperatura.

Punto 2 – Tracción de fluencia aislada

Punto 2: El punto crítico aquí tratado es la fluencia por tracción aislada de las fibras poliméricas. Sin embargo, este comportamiento aislado sólo puede ocurrir en sistemas determinados estáticamente (por ejemplo vigas estándar como ASTM C1609 o EN 14651) donde una única grieta se abriría y eventualmente conduciría a un fallo.

En realidad, esto nunca sucede, porque todas las estructuras están construidas con redundancia, es decir, son altamente estáticamente indeterminadas, de manera que los momentos y las tensiones pueden ser redistribuidos para evitar la localización y el fallo de la tensión antes mencionados.

Por lo tanto, las propiedades aisladas de fluencia por tracción de las fibras poliméricas (o cualquier otro material fibroso, por ejemplo, fibras de acero) se hacen subordinadas dentro del material compuesto de Hormigón en un sistema hiperestático regular, tal como un revestimiento de túnel. Los

revestimientos segmentales se diseñan generalmente para permanecer debajo del empuje del aro, de modo que la fluencia por tracción no pueda suceder. Por el contrario, las grietas potenciales de los casos de carga temporal podrían cerrarse con el tiempo debido a la fluencia de compresión del Hormigón.

Además, las recientes investigaciones del profesor Ian Gilbert demostraron que las fibras reducen las deformaciones en servicio dependientes del tiempo y reducen significativamente los anchos máximos de fisuras cuando se usan en combinación con barras de refuerzo convencionales en vigas determinadas estáticamente (Gilbert y Bernard 2015). Esto demuestra nuevamente que las propiedades aisladas del material de fibra se hacen auxiliares en aplicaciones estructurales reales.

Aparte de la deformación por fluencia bajo carga sostenida, el MC2010 también aborda el comportamiento a largo plazo del FRC agrietado, específicamente si “el

rendimiento a largo plazo se ve afectado por la fluencia/ruptura por fluencia” en el capítulo 5.6.2.

La investigación ha demostrado que la ruptura por fluencia es muy abrupta para el SFRC, similar al Hormigón liso, mientras que para el MSFRC es mucho más benigna, dando más signos de advertencia como un ancho de fisura creciente antes del fallo (Bernard 2014).

Los resultados revelaron que las FRS de acero con enganchado pueden fallar en flexión en menos de una hora cuando se someten a una carga sostenida de más del 70% de capacidad estática cuando los anchos de fisura inicial superan los 2,5 mm.

Véase también la Nota técnica del BarChip, “Comportamiento de fluencia de FRC” para más información.



Imagen 4: Un revestimiento de túnel segmentado está diseñado para estar en compresión, lo que significa que la fluencia por tracción aislada de refuerzo de fibra no es un factor.

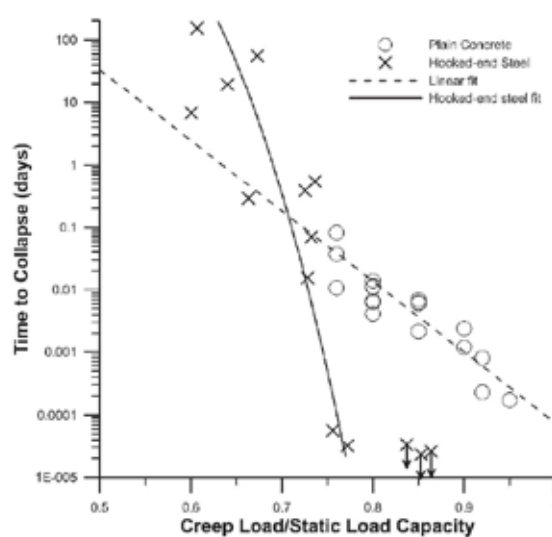


Imagen 5: Tiempo de colapso trazado en función de la relación de carga para especímenes de Hormigón liso probados por Zhou y paneles de acero con enganchado FRS [4].

Requisitos de desempeño del Código Modelo 2010



Imagen 6: Ensayo de viga entallada/mellada EN 14651

El rendimiento del FRC se obtiene mediante la prueba de vigas entalladas según EN 14651. Los valores de resistencia a la flexión residual se obtienen en diferentes etapas de apertura de boca de grieta (CMOD).

Para el diseño estructural los valores importantes son:

- **f_{R1}** a 0,5 mm CMOD. Este valor representa el estado límite de servicio (SLS) para controlar los anchos de fisura después de alcanzar la tensión elástica pico (LOP); También proporciona el intervalo de resistencia de la clase de rendimiento.

- **f_{R3}** a 2,5 mm CMOD. Este valor representa el estado límite último (ULS), es decir, la capacidad de carga en el límite de deformación máximo permisible.

MC2010 no especifica explícitamente valores mínimos para **f_{R1}** y **f_{R3}** . Sin embargo, para alcanzar la resistencia mínima residual de la clase **1a**, deben alcanzarse los siguientes valores:

$$- f_{R1k} \geq 1.0 \text{ MPa}$$

$$- f_{R3k} \geq 0.5 \text{ MPa}$$

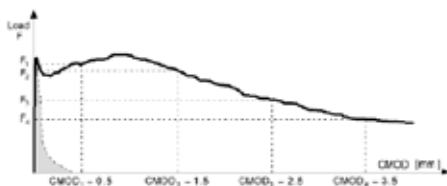


Figure 5.6-6: Typical load F - CMOD curve for plain concrete and FRC

Imagen 7: Curva típica de carga F - CMOD para Hormigón liso y FRC

Más importante aún, MC2010 requiere un rendimiento de ductilidad mínimo de FRC para uso estructural. Con el fin de sustituir total o parcialmente el refuerzo en el estado límite último, se dan dos requisitos de rendimiento:

$$1) \quad f_{R1k} / f_{Lk} > 0.4$$

$$2) \quad f_{R3k} / f_{R1k} > 0.5$$

Estos son requisitos de ductilidad para prevenir cualquier falla frágil.

En detalle, significan:

1. La relación entre las tensiones residuales en CMOD 0,5 mm y la tensión máxima (resistencia a la flexión) no debe ser inferior al 40%. Este criterio se aplica predominantemente para el control de la anchura de fisuras y tiene como objetivo proteger cualquier refuerzo de acero (barras o fibras), ya que las pruebas han demostrado que anchos de fisura tan bajos como 0,1 mm pueden dar lugar a la corrosión de la fibra de acero (Bernard 2015). Este criterio sobre la relación de ductilidad es a veces más difícil de cumplir con la fibra macro sintética que con las fibras de acero, debido a la caída después de la carga máxima, especialmente a dosis bajas. Sin embargo, dado que la corrosión no es un problema para la fibra de BarChip, podría

descartarse la necesidad de esta especificación.

En 2015, las pruebas en la Universidad de Sao Paulo en Brasil para los segmentos de la Línea 6 del Metro de Sao Paulo han demostrado que el BarChip 54 cumple este criterio ya a una tasa de dosis de 5,0 kg/m³ en Hormigón de 45 MPa, De Figueiredo et al., 2015).

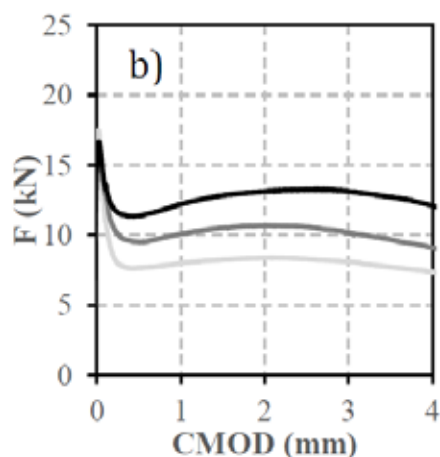


Imagen 8: Curvas BarChip 54 CMOD para la Línea 6 del Metro de Sao Paulo.

Dosis	Años	f'c	f _{LOP}	f _{R,1}	f _{R,1} /f _{LOP}	f _{R,2}	f _{R,3}	f _{R,3} /f _{R,1}	f _{R,4}
kg/m ³	Días	MPa	MPa	MPa		MPa	MPa		MPa
5.0			5.65	2.44	0.43	2.64	2.65	1.09	2.47
7.0	28	53	5.31	3.04	0.57	3.36	3.39	1.12	3.11
10.0			5.30	3.31	0.62	3.65	3.76	1.14	3.57

Tabla 1: Rendimiento del BarChip 54 para la Línea 6 del Metro de Sao Paulo, de Figueiredo et al. 2015.

- La relación entre las tensiones residuales en CMOD 2,5 mm y 0,5 mm no debe ser inferior al 50%. Este criterio tiene como objetivo evitar grandes caídas de rendimiento con el aumento de la amplitud de fisura, como puede ocurrir con las fibras cortas de acero. Este criterio normalmente nunca causa problemas para la fibra de BarChip.

Las fibras macro sintéticas de BarChip son capaces de satisfacer ambos requisitos de rendimiento para muchas aplicaciones y, por lo tanto, son adecuadas para su uso con MC2010.

Los resultados de las pruebas anteriores muestran relaciones de resistencia residual de aproximadamente 110%, que corresponden a la clase 'c' o 'd' respectivamente. Este aumento de ductilidad con desplazamiento es deseable para un diseño redundante.

Debe tenerse en cuenta que MC2010 no especifica un comportamiento general de endurecimiento por tensión de FRC. Esto es sólo el caso de elementos lineales sin refuerzo convencional y sin esfuerzos de compresión en la sección (capítulo 7.7.2), por ejemplo. En vigas simplemente soportadas para evitar el fallo debido a la localización de la deformación (grieta única).

“La fibra BarChip cumple con los requisitos de rendimiento estipulados en MC2010”

Consideración adicional con respecto al Código Modelo 2010

Modelo Código 2010 es un código de modelo, no un estándar



Imagen 9: Directrices de diseño alternativas para el diseño con refuerzo de fibra.

El Código Modelo 2010 no tiene en cuenta factores importantes de diseño para la vida útil

MC2010 aún no es un Código estandarizado, por lo que su uso en el diseño de estructuras de Hormigón no es obligatorio, sino que es una recomendación que puede o no ser adoptada. Sin embargo, es muy probable que Eurocode 2 adopte MC2010 en su próxima revisión. Durante esta revisión, y con más experiencia obtenida utilizando fibra macro sintética, podría ser que la adopción de MC2010 en EC2 disminuirá o al menos alterará los requisitos de material antes mencionados.

MC2010 abarca nuevas metodologías para el análisis estructural que el mercado abarcará:

- **“Verificación asistida por simulaciones numéricas”** - BarChip puede proporcionar un análisis de elementos finitos altamente calificado y especializado que es único en el mercado. Por lo tanto, nuestro desarrollo técnico está en línea con los códigos de diseño emergentes.
- **“Verificación asistida por pruebas”** - MC2010 proporciona una guía para la evaluación experimental de la respuesta de miembros estructurales. Los problemas especiales de diseño pueden ser estudiados experimentalmente y se puede aplicar una combinación de pruebas y verificaciones numéricas. BarChip invierte cada año una parte significativa de sus beneficios en R&D, con el fin de estudiar y demostrar el desempeño de BarChip FRC en aplicaciones especiales.

Por otro lado, existen otras directrices de diseño que se han utilizado con éxito hasta la fecha y por lo tanto se pueden utilizar en lugar de MC2010. Todas ellas se refieren a fibras macro sintéticas.

- *Guía para el diseño y construcción de estructuras de Hormigón reforzado con fibras CNR-DT 204/2006* (Las normas de diseño de esta guía italiana han sido adoptadas en gran medida por MC2010);
- *Guía para segmentos de Hormigón reforzado con fibras prefabricadas - Vol. 1: Aspectos de diseño*. ITAtech informe no. 7, 2016;
- *PAS 8810 Diseño de túneles - Diseño de revestimientos de túneles segmentados de Hormigón - Código de prácticas*. Institución de Normas Británicas, Reino Unido, 2016;
- *TR65 - Orientación sobre el uso de Hormigón reforzado con fibra macro sintética*, Sociedad de Hormigón, Reino Unido, 2007;
- *Suelos Industriales de Hormigón, 4ª edición*, Sociedad de Hormigón Reino Unido, 2013

MC2010 indica que las fibras sujetas a cambios dependientes del tiempo no están cubiertas por esta guía. Sin embargo, no se hace ninguna referencia al comportamiento compuesto con respecto a los cambios dependientes del tiempo. Por ejemplo, la fragilización del Hormigón reforzado con fibra de acero, lo que significa un cambio significativo en el modo de fallo con la edad y la pérdida de rendimiento perjudicial asociada no se menciona en MC2010.

MC2010 asume que las fibras de acero no se corroerán si se cumplen los parámetros de diseño, es decir, el Hormigón mantendrá los anchos de

fisura mínimos y protegerá la fibra de acero. Si el Hormigón se agrieta, las fibras de acero se corroerán muy rápidamente, especialmente si el agua o las sales se filtran a través de la grieta. Sin embargo, varios trabajos indican que la corrosión también ocurrirá en el Hormigón carbonatado, independientemente del agrietamiento.

El hormigón reforzado con fibras macro sintéticas de alto rendimiento no sufre efectos de fragilización, ni se corroen. Por lo tanto, son la opción preferida en muchas aplicaciones exigentes.

Véase también la nota técnica del BarChip, “Durabilidad y rendimiento a largo plazo del FRC”.

Conclusiones y recomendaciones

1. El BarChip de BarChip puede cumplir con los requisitos de material y diseño estipulados en MC2010.
2. El comportamiento dependiente del tiempo de las fibras macro sintéticas es irrelevante para la mayoría de los revestimientos del túnel que están diseñados para permanecer en compresión y, por tanto, la fluencia por tracción es inexistente.
3. La fibra de acero es más afectada por la fragilización en el tiempo que lo que la fibra macro sintética es por deslizamiento en los revestimientos del túnel.
4. MC2010 no aborda la corrosión del refuerzo de fibra de acero en amplitudes de fisuras comunes en la vida útil de un activo. Tampoco aborda el efecto perjudicial de la fragilización.
5. Otras pautas están disponibles para su uso.

Referencias

ASTM C 1116-C 1116M-10a (2010).

Especificación estándar para Hormigón reforzado con fibra

Bernard, E.S. (2014). “Ruptura progresiva de Hormigón proyectado reforzado con fibra de acero y macro sintética”, Séptimo Simposio Internacional sobre Hormigón Pulverizado - Uso Moderno de Hormigón Pulverizado Mezclado Húmedo para Uso Subterráneo, Sandefjord, Noruega, 16-19 de junio de 2014.

Bernard, E.S. (2015). Cambios dependientes de la edad en el rendimiento post-agrietamiento de revestimientos de Hormigón proyectado reforzado con fibras, Tecnología del espacio subterráneo y Tunelización 49, páginas. 241-248.

De Figueiredo, A.D., de la Fuente, A., Galobardes, I. (2015). Evaluación de la solución estructural para la producción de los segmentos de la futura línea 6 del metro de Sao Paulo (informe preliminar). Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad Politécnica de São Paulo, Brasil.

Gilbert, R. I. y Bernard, E. S. (2015). Análisis dependiente del tiempo de secciones de FRC macro-sintéticas con refuerzo de barra convencional, actas del Congreso Mundial de Túneles (WTC 2015) en Dubrovnik, Croacia, mayo de 2015

TR 65 (2007). Orientación sobre el uso de Hormigón reforzado con fibra macro sintética, Sociedad de Hormigón, Reino Unido

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 2018. TNMC_2018_2

www.barchip.com