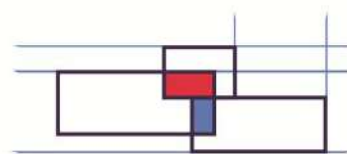


SEPTIEMBRE DE 2025

HORMIGÓN CON FIBRAS DE ACERO



CLÚSTER
DE LA EDIFICACIÓN

ISBN: 978-84-09-75913-2

ÍNDICE

1	PRESENTACIÓN DEL GRUPO	5
2	OBJETIVO	6
3	FIBRAS DE ACERO Y COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO	7
3.1	FIBRAS DE ACERO	7
3.2	IMPORTANCIA DE LA FORMA DE LA FIBRA DE ACERO	9
3.3	IMPORTANCIA DEL DIÁMETRO DE LA FIBRA DE ACERO	10
3.4	IMPORTANCIA DE LA LONGITUD DE LA FIBRA DE ACERO	11
3.5	IMPORTANCIA DE LA RESISTENCIA DEL ALAMBRE DEL ACERO	12
3.6	IMPORTANCIA DE LA RELACIÓN DE ESBELTEZ DE LA FIBRA DE ACERO	12
3.7	COMPORTAMIENTO DE LA FIBRA DE ACERO	13
3.8	FIBRAS SUELTAS.....	16
3.9	FIBRAS ENCOLADAS O PEGADAS	17
3.10	FIBRAS GALVANIZADAS	17
3.11	ACABADO.....	18
3.12	CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN	19
3.13	CONTROL DE FISURA	19
3.14	COMPORTAMIENTO POST-FISURA - COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO (HRFA)	22
3.15	IMPACTO	23
3.16	COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO A LARGO PLAZO	24
3.17	CORTANTE	25
3.18	RESISTENCIA AL FUEGO	26
3.19	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA.....	27
4	VENTAJAS DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO	28
4.1	REDUCCIÓN DE LA MANO DE OBRA.....	28

4.2	AHORROS ECONÓMICOS	28
4.3	AHORROS EN EJECUCIÓN	29
4.4	AHORROS EN TRANSPORTE	29
4.5	FLEXIBILIDAD Y ADAPTABILIDAD	29
4.6	AHORROS EN HUELLA DE CARBONO	30
5	NORMATIVA AMBIENTAL EN ESPAÑA	31
5.1	ANTECEDENTES	31
5.2	ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA (LIFE CYCLE ANALYSIS – LCA).....	31
5.3	DECLARACIÓN AMBIENTAL DE PRODUCTO (ENVIROMENT PRODUCT DECLARATION – EPD)	32
5.4	CERTIFICACIÓN Y NORMATIVA.....	33
5.5	NUEVAS FIBRAS	36
6	DISEÑO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO.....	37
6.1	CAPACIDAD A FLEXIÓN	37
7	EJEMPLO DE CÁLCULO DE DISEÑO Y DE HUELLA DE CARBONO DE PANEL ARQUITECTÓNICO Y ESTRUCTURAL	38
7.1	PROTOTIPO DE ANÁLISIS	38
7.1.1	PANEL DE FACHADA PARA EDIFICIO DE VIVIENDAS	38
7.1.2	PANEL DE FACHADA PARA EDIFICACIÓN INDUSTRIAL.....	42
7.1.3	CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DE LOS PROTOTIPOS DE PANELES.....	45
7.2	ANÁLISIS ECONÓMICO Y DE HUELLA DE CARBONO.....	45
7.2.1	PANEL EDIFICACIÓN INDUSTRIAL:	46
7.2.2	PANEL EDIFICACIÓN RESIDENCIAL:.....	49
7.2.3	COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS	52
8	CONTROL DE CALIDAD	53
8.1	CALIDAD DE LA FIBRA	53
8.2	CALIDAD DEL HORMIGÓN	54

8.3	CONTROL DE RESISTENCIA POST-FISURA.....	54
8.4	CONTROL DEL PROCESO	55
8.4.1	ORIENTACIÓN DE LA FIBRA.....	56
8.4.2	VARIABILIDAD ESTADÍSTICA DE ENSAYOS	56
8.4.3	MÉTODO DE MEZCLADO.....	57
9	CONCLUSIONES.....	59

1 PRESENTACIÓN DEL GRUPO

El grupo de trabajo del Clúster de la Edificación que ha realizado este documento está compuesto por las siguientes entidades:



2 OBJETIVO

Comunicar e informar al mercado de la construcción acerca de las soluciones para paneles arquitectónicos y estructurales con el refuerzo de fibras de acero para edificios con prefabricados y sus ventajas en el ahorro de huella de carbono.

- Tipos de fibras de acero y comportamiento del hormigón reforzado con fibras de acero
- Ventajas del hormigón reforzado con fibras de acero
- Normativa ambiental en España relacionada con hormigón reforzado con fibras de acero
- Diseño del hormigón reforzado con fibras de acero y ejemplo de cálculo de diseño y de huella de carbono de panel arquitectónico y estructural
- Control de calidad

3 FIBRAS DE ACERO Y COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO

A diferencia del refuerzo de acero tradicional, las fibras de acero son un refuerzo discontinuo, orientado tridimensionalmente, isotrópico o anisotrópico, una vez mezclado con el hormigón. Hay una gran variedad de tipos de fibras disponibles. Pueden estar hechas de diferentes materiales, con diferentes formas y tamaños.

El efecto de las fibras sobre las propiedades del hormigón varía en la misma medida de sus características particulares. Por lo tanto, el hormigón reforzado con fibras de acero nunca debe simplificarse a un "hormigón con fibras de acero", sino que debe verse como un material que está compuesto de un de hormigón correctamente diseñado, un tipo determinado de fibra y la cantidad correspondiente de fibras para cumplir con los requisitos deseados. Una vez que se tienen todos los componentes en la proporción adecuada puede llamarse "hormigón reforzado con fibras de acero".

En la mayoría de los países, si no en todos, la industria del hormigón puede suministrar hormigones reforzados con fibras de acero que son aptos para el uso previsto. Sin embargo, las propiedades del material deben definirse empleando una especificación elaborada particularmente para cada proyecto, por lo que el diseñador tiene la responsabilidad especial de detallar las propiedades requeridas del material, pero evitar “alternativas improvisadas”.

Disponer de suficiente información básica sobre las fibras de acero y su efecto en el hormigón ayudará a preparar especificaciones técnicamente correctas y económicamente atractivas.

3.1 FIBRAS DE ACERO

Las fibras de acero se pueden dividir en cinco grupos, según su método de fabricación:

- Grupo I: alambre trefilado
- Grupo II: láminas cortadas
- Grupo III: extraídas
- Grupo IV: alambre trefilado en frío y cortadas
- Grupo V: trozadas a partir de bloques

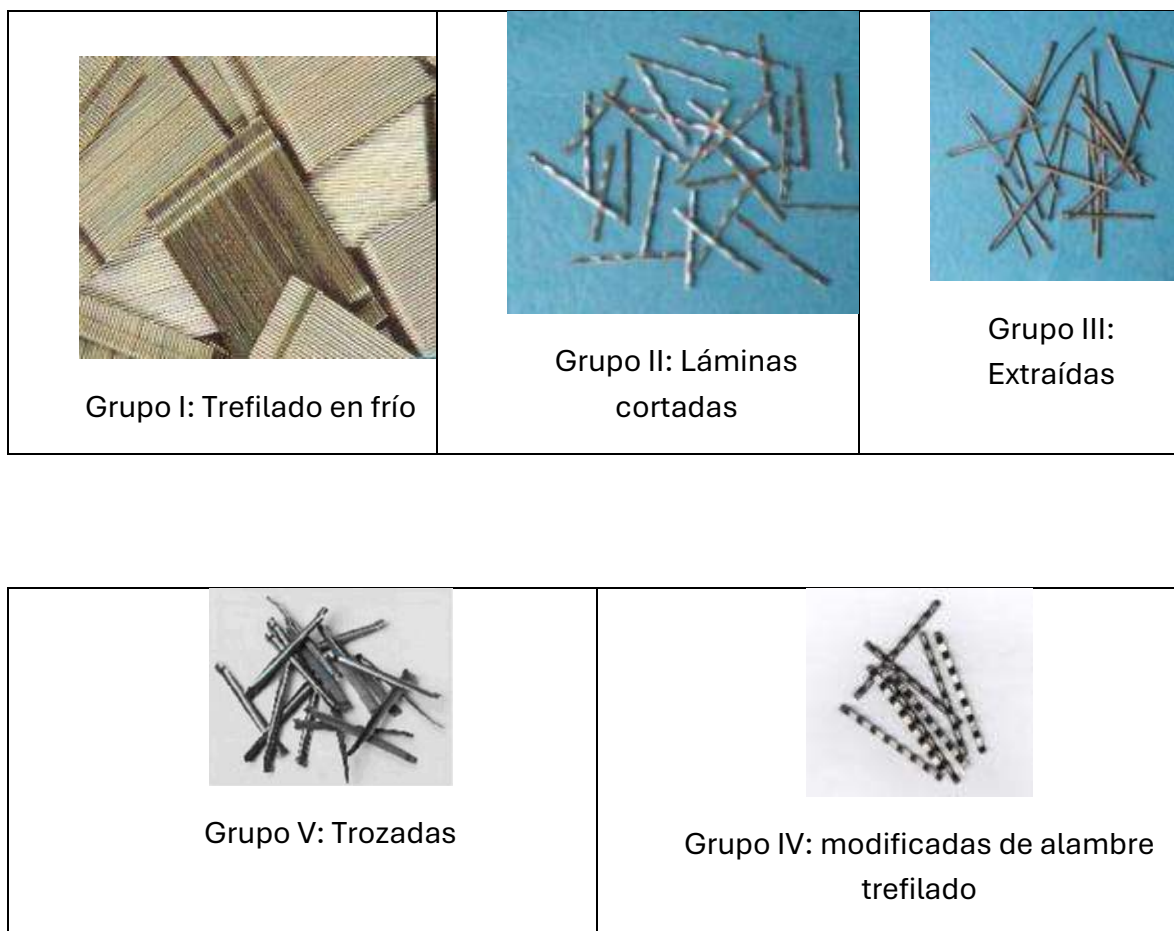


Figura 1. Grupos de fibras según el método de fabricación

La gran mayoría de las fibras de acero que se utilizan hoy en día pertenecen al grupo I. Las fibras de los grupos II y IV se siguen utilizando en cantidades considerables. Las fibras de los grupos III y V desempeñan un papel menos importante a escala mundial. Dicha distribución puede estar fundamentada en el rendimiento que las fibras del grupo I proporcionan al hormigón.

Dado que la mayoría de las fibras de acero usadas e investigadas se centran en el grupo I, este documento se centra en las consideraciones para este grupo.

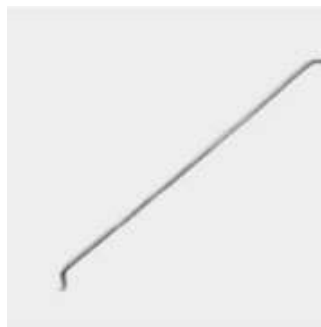
Como cualquier refuerzo, es importante proporcionarlo tanto como sea necesario en una sección, pero comparar las fibras basándose únicamente en la dosis no conduce

a las conclusiones correctas. La razón es que hay diferentes factores que influyen en el rendimiento de la fibra:

- Forma:
 - Recta
 - Con bordes en los ganchos
 - Ondulada
 - Rizada
 - Retorcida
 - Con borde cónico.
- Longitud:
 - Habitualmente entre 13 - 60 mm.
- Diámetro:
 - Frecuentemente entre 0,4 mm a un máximo de 1,3 mm.
- Resistencia a la tracción de alambre de acero:
 - Para las fibras de acero en el mercado existe un amplio rango de resistencias, siendo las más comunes desde 800 hasta 3200 N/mm².



Fibra corta, sin
anclaje, suelta



Fibra larga, con
anclaje simple, suelta



Fibra ondulada, con
anclaje, suelta

Figura 2. Diferentes formas de fibras de acero

3.2 IMPORTANCIA DE LA FORMA DE LA FIBRA DE ACERO

La forma de una fibra de acero permite la interacción mecánica-con el hormigón. La variación de ésta determinará su anclaje al hormigón, y a su vez, cambiará la forma de la curva de carga-deformación del hormigón reforzado con fibras de acero.

En el mercado existen fibras metálicas con varios tipos de terminaciones (ver imagen 3). Las fibras que tienen mayor anclaje consiguen un mejor desempeño en el hormigón. No obstante, esta característica debe estar acompañada de los otros factores de

desempeño de la fibra. Se puede tener un muy buen anclaje (como las fibras onduladas, o las que tienen cuatro dobleces en las puntas), pero si no se acompaña con un alambre capaz de elongarse y de alta resistencia a la tracción, las fibras se romperán y el fallo del hormigón será frágil (ver imagen 4).



Figura 3. Diferentes tipos de anclaje de fibras de acero

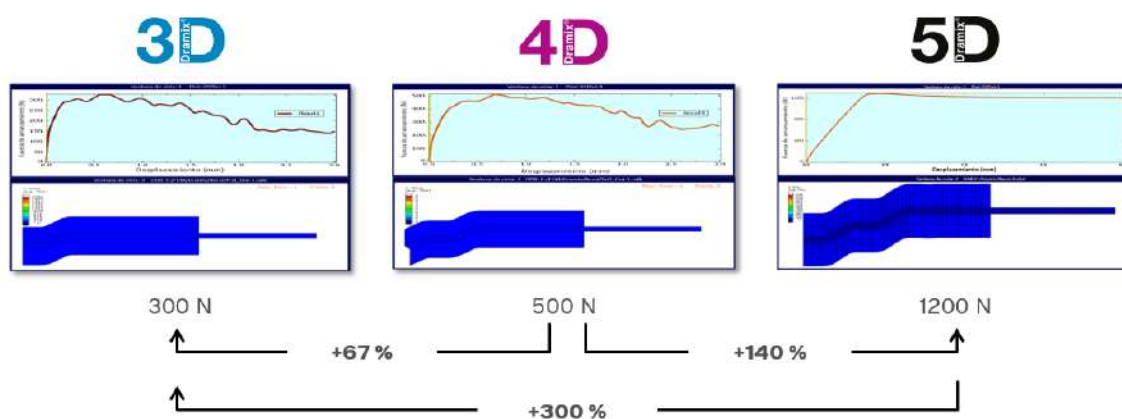


Figura 4. Relación entre el tipo de anclaje y las resistencias del hormigón y el acero

3.3 IMPORTANCIA DEL DIÁMETRO DE LA FIBRA DE ACERO

Tomemos por ejemplo 1 kg de acero dentro de un metro cúbico de mezcla de hormigón. Si empezamos a partir este kilo de acero en mitades y lo seguimos dividiendo varias veces, observaremos que empieza a dispersarse más el refuerzo en la mezcla y a quedar mejor distribuido. Este es el principio que se usa en las fibras de acero, se toma una dosificación en kilos y al usar diámetros más pequeños habrá más fibras dispersas. Por ejemplo, en la tabla 1 vemos que, en diferentes referencias de fibras, entre menor sea el diámetro mayor es la cantidad de fibras por kilo.

Tabla 1. Diferentes tipos de fibras de acero en cuanto a longitud, diámetro, resistencia de alambre y relación de esbeltez

Tipo de Fibra	Longitud L (mm)	Diámetro d (mm)	Relación de esbeltez L/d	Fibras por Kg	Resistencia del Alambre (N/mm ²)
3D 80/60GG	60	0,75	80	+4500	+1200
3D 65/35GG	35	0,55	65	+14000	+1500
4D 80/60GG	60	0,75	80	+4500	+1500
5D 65/60GG	60	0,90	65	+3000	+2000
3D 80/30GGP	30	0,38	80	+35000	+2800

3.4 **IMPORTANCIA DE LA LONGITUD DE LA FIBRA DE ACERO**

En el mundo de los prefabricados existen muchos tipos de elementos, de paredes delgadas o de paredes gruesas, La versatilidad de las fibras de acero es tal que se pueden acomodar a todo tipo de espesor gracias a su longitud. Para paredes delgadas se usan normalmente fibras cortas, y para paredes gruesas, fibras largas.

Pero el factor de la longitud de la fibra de acero también influye en otro aspecto sobre el comportamiento del hormigón. La longitud ideal de una fibra es aquella que cubra dos veces el tamaño máximo del agregado de la mezcla de hormigón, razón por la que existen diferentes longitudes. En la imagen 5 se observa como la resistencia cae al no usar una fibra adecuada según el diámetro máximo del árido.

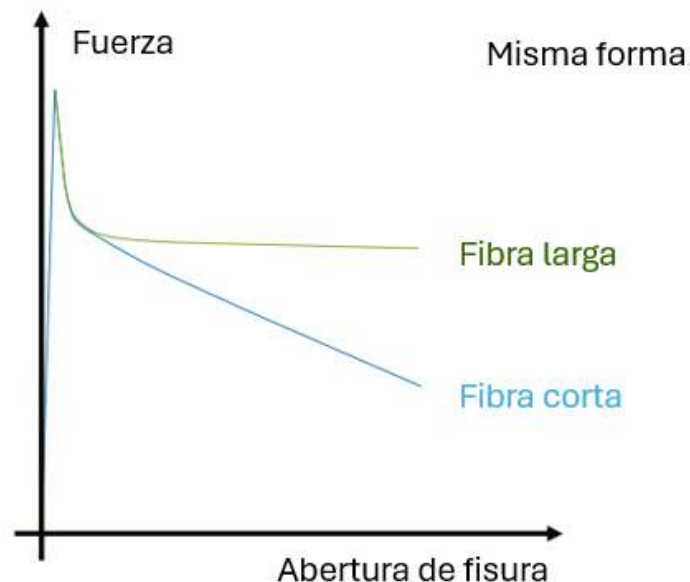


Figura 5. Comportamiento de la fibra de acero con respecto a la longitud

3.5 IMPORTANCIA DE LA RESISTENCIA DEL ALAMBRE DEL ACERO

Las fibras de acero, al ser un refuerzo de aporte estructural, también tiene que aportar características equivalentes a un refuerzo de barras de acero, en específico resistencia a la tracción y ductilidad.

Como se observa en la imagen 6, también existen diferentes resistencias de alambres de acero. Dependiendo del uso del elemento prefabricado se recomienda usar una fibra con mejor resistencia de alambre y ductilidad.

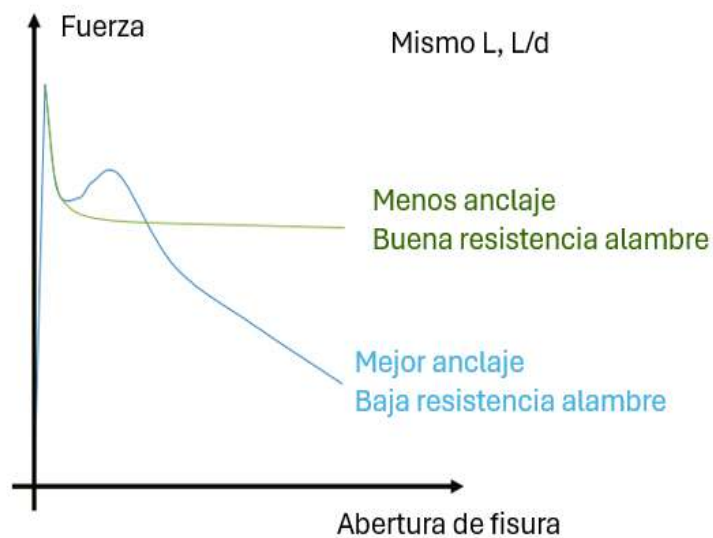


Figura 6. Comportamiento de la fibra de acero con respecto a la resistencia del alambre

3.6 IMPORTANCIA DE LA RELACIÓN DE ESBELTEZ DE LA FIBRA DE ACERO

Una forma de asegurar el comportamiento de las fibras y verificar su desempeño es a través de la relación de esbeltez. Este número adimensional es la división entre la longitud y el diámetro. Mientras, mayor sea esta relación, es decir, cuanto más delgada y larga sea una fibra, mejor será su comportamiento en el hormigón.

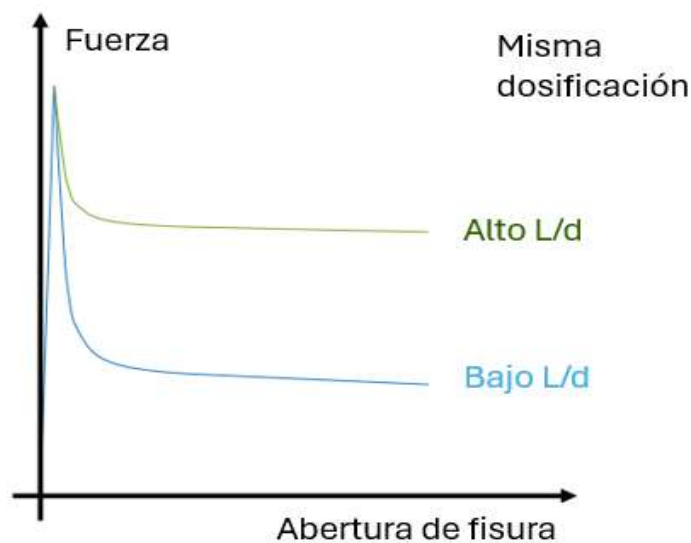


Figura 7. Comportamiento de la fibra de acero con respecto a relación de esbeltez

A veces se afirma que las fibras largas y delgadas con una relación de esbeltez elevada son más propensas a formar bolas en el hormigón y que no es posible mezclarlas en dosis más altas. Esto no se puede dar por sentado, como lo demuestra el notable historial de las fibras con una relación de aspecto elevada.

Por supuesto, hay algo de verdad en esa afirmación. Una relación L/d elevada se corresponde con una enorme cantidad de fibras individuales y una gran longitud total de alambre (imagen 7). Todo este alambre tiene que colocarse en algún lugar de la matriz de hormigón y, por lo tanto, requiere más atención al diseño de la mezcla. Pero comparar fibras de fácil mezcla de 40 kg/m^3 (relación L/d baja) con fibras de alto rendimiento de 40 kg/m^3 (relación L/d alta) sería comparar peras con manzanas. En lugar de fibras mezcla fácil de 40 kg/m^3 , es posible que solo se necesiten 20 kg/m^3 o incluso 15 kg/m^3 de fibras de alto rendimiento para lograr el mismo resultado. En este contexto, las cosas se pueden ver desde un ángulo diferente.

3.7 COMPORTAMIENTO DE LA FIBRA DE ACERO

Ahora hablemos de la combinación de los factores anteriormente descritos con la mezcla de hormigón. El comportamiento del hormigón reforzado con fibras de acero se observa en las curvas de esfuerzo-deformación de ensayo de viga a flexo-tracción del ensayo EN 14651. En cada curva se observa que el hormigón se fisura y luego inicia el trabajo de las fibras brindando tenacidad o resistencia residual. Este aporte en la resistencia después de la primera fisura puede ser en flexión ablandamiento o en flexión endurecimiento.

Para elementos prefabricados siempre las soluciones recomendadas serán en flexión endurecimiento. En la Imagen 8 vemos este desempeño, donde a medida que se amplían la fisura el hormigón reforzado con fibras de acero mantiene o gana resistencia.

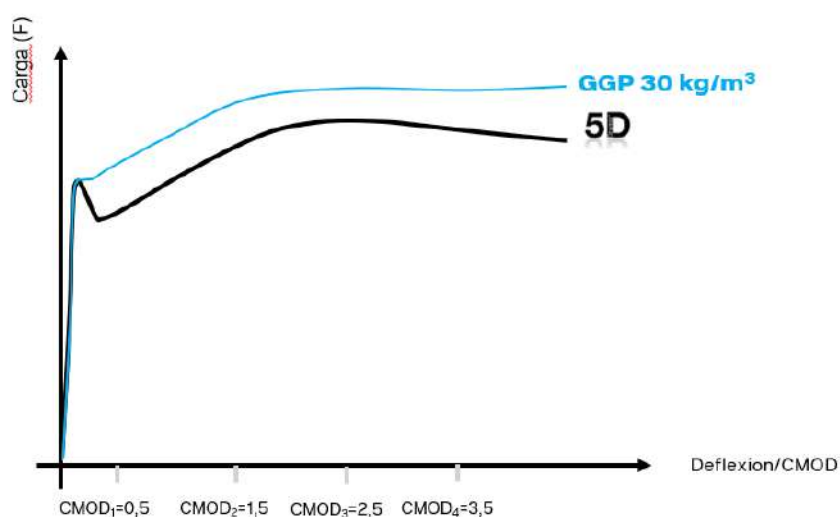


Figura 8. Forma cualitativa de las relaciones de tensión-apertura de fisuras en hormigón con fibras de acero con comportamiento de endurecimiento por deformación (Ensayo EN 14651)

Cabe aclarar que a medida que se dosifique más fibra o se use una mayor resistencia del hormigón, el comportamiento del material compuesto mejorará.

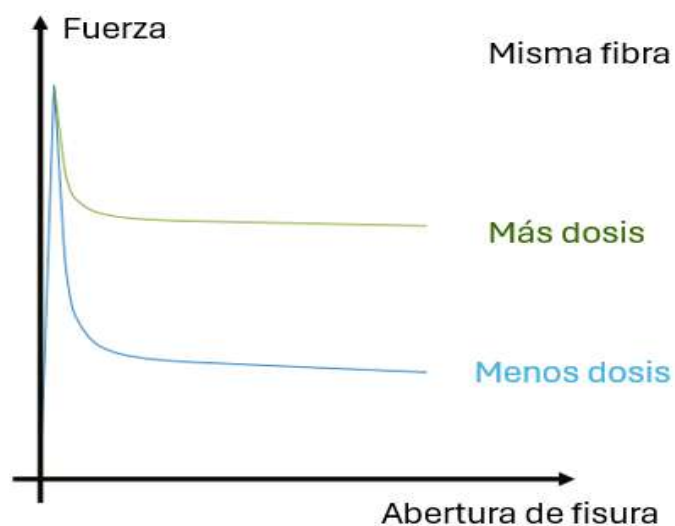


Figura 9. Comportamiento de la fibra de acero con respecto a la dosificación

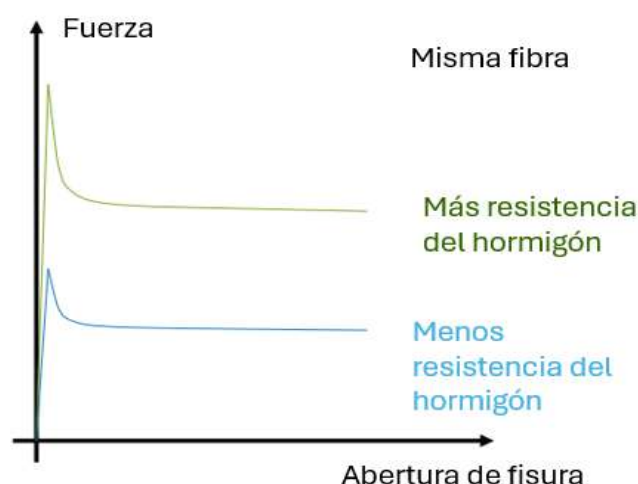


Figura 10. Comportamiento de la fibra de acero con respecto a la resistencia del hormigón

En la imagen 6 tenemos el caso de una combinación de factores donde existe buen anclaje, pero no buena resistencia del alambre de acero. El mecanismo como las fibras refuerzan el hormigón es: las fibras deben extraerse lentamente de la matriz de hormigón o anclarse perfectamente a él. El sistema de anclaje, normalmente ganchos en los extremos, debe deformarse y proporcionar una resistencia sostenida a la extracción. Como la deformación por rotura del alambre de fibra de acero es relativamente baja, debe evitarse la rotura de las fibras, ya que de lo contrario la rotura será frágil y, por lo tanto, la tenacidad y la ductilidad se reducen demasiado rápido.

Otro parámetro importante es la resistencia del hormigón. Si la resistencia del hormigón es baja y el anclaje y la resistencia del alambre es alto, se romperá el cono de adherencia de las fibras en los bordes y se generará una falla frágil (imagen 9). También tenemos este mismo tipo de falla si la resistencia del hormigón es alta (superior a 40 MPa) y se usa una fibra de menos anclaje y menos resistencia de alambre.

Para el problema de fragilización del hormigón reforzado con fibras de acero en el caso de hormigón de alta resistencia se han desarrollado fibras de alta resistencia del alambre. La forma de la fibra no suele variar con respecto a las fibras de resistencia normal, pero la resistencia a la tracción es superior a 2500 MPa. Estas fibras se utilizan en hormigón de alta resistencia e incluso en hormigones de ultra resistencia.

Para calidades de hormigón como UHPC o RPC es posible utilizar fibras de alta resistencia sin ningún anclaje mecánico adicional, pero una fibra con anclaje proporcionará mayor capacidad de soporte de carga.

Siempre es importante elegir el tipo de fibra adecuado y optimizar la composición del hormigón y el procedimiento de mezclado. Para esto se debe consultar al especialista de diseño idóneo, que conozca el comportamiento del hormigón reforzado con fibras.

3.b. Fibras encoladas o sueltas

Las fibras en general vienen siendo usadas desde hace siglos, pero a partir de la década de los 40 se empezó a investigar sobre su comportamiento con el hormigón. Estas investigaciones han generado que ellas evolucionen en el tiempo.

Al principio, por motivos de producción, las fibras de acero que se disponían eran sueltas, pero a partir de la década de los años 70 ya se introdujeron innovaciones que facilitaran el mezclado, como son las fibras encoladas o pegadas en haces.

Las innovaciones y mejoras en el producto han continuado, como se contará en el capítulo 5.f.

3.8 **FIBRAS SUELTAS**

“Suelta” es la forma típica de suministro de fibras con una relación de esbeltez relativamente baja, por ejemplo, $l/d \leq 50$ (Imagen 11). En este rango de esbeltez es difícil esperar que se formen bolas u otras dificultades relacionadas con la trabajabilidad. Un ejemplo es el tipo de fibra de “mezcla fácil” 3D 45/50BL, que ofrece una longitud de 50 mm con una relación de aspecto nominal de 45. Sin embargo, debido a la baja relación de aspecto, su nivel de comportamiento puede considerarse básico.



Figura 11. Ejemplo de fibras de acero sueltas (mejorar foto)

Sin embargo, los usuarios tienden a evitar utilizar fibras sueltas con una relación de aspecto superior a ~ 70 por una serie de razones prácticas, por ejemplo, un riesgo persistente de formación de bolas o erizos; además, requiere más tiempo y esfuerzo en comparación con otras formas de suministro.

3.9 **FIBRAS ENCOLADAS O PEGADAS**

Para evitar la posible formación de erizos que se producen al añadir fibras sueltas con una relación de aspecto alta (y, por lo tanto, de mejor rendimiento), se ha desarrollado la tecnología de fibras pegadas. Después de añadir fibras de acero pegadas al hormigón, los haces/encoles se distribuyen uniformemente en el nivel "macro". La mezcla continua permite que las fibras individuales se separen rápidamente para que puedan distribuirse de forma homogénea en el nivel "micro".



Figura 12. Ejemplo de paquetes/haces de fibras de acero pegadas

Las fibras de acero pegadas se pueden añadir directamente desde la bolsa a un camión mezclador o mezclador central, o indirectamente a través de una cinta transportadora o con equipos de dosificación automática.

3.10 **FIBRAS GALVANIZADAS**

Cuando se galvanizan fibras de acero, la superficie del hormigón se mantiene libre de manchas de óxido debido a la corrosión de las fibras visibles, o de partes de fibras, en la superficie. Esto es de particular importancia cuando se necesita una superficie libre de corrosión, por ejemplo, en elementos prefabricados. Un problema potencial con las fibras de acero galvanizado es que el recubrimiento de zinc, al entrar en contacto con la pasta de cemento, puede provocar la formación de gas hidrógeno.

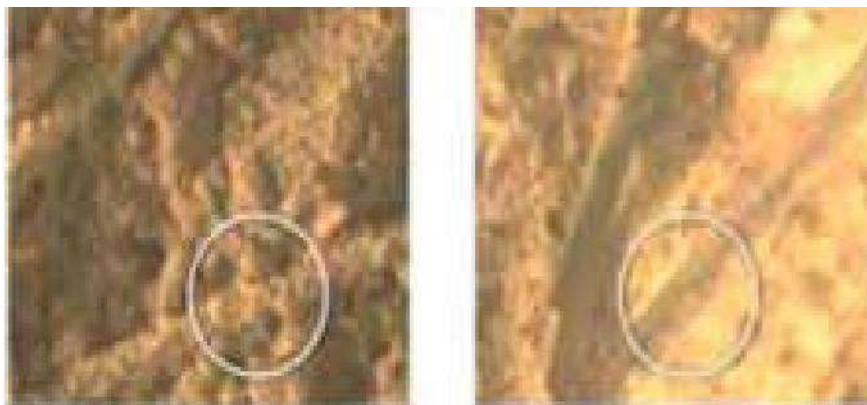


Figura 13. Superficie esponjosa y porosa alrededor de fibras de acero recubiertas de zinc sin inhibidor (izquierda), superficie lisa alrededor de fibras con inhibidor (derecha)

Las fibras de acero recubiertas de zinc se entregan en forma de haces/encoles de fibras pegadas. El pegamento contiene un inhibidor exclusivo y respetuoso con el medio ambiente que protege el revestimiento de zinc contra la reacción química con los componentes alcalinos del hormigón. Sin protección, la calidad y el rendimiento del hormigón serían sustancialmente inferiores debido a:

- Un espectro de fibras visibles en la superficie del hormigón.
- Una superficie de hormigón porosa debido a las burbujas.
- Una pérdida de durabilidad debido a la formación de gas.
- Una falta de adherencia que conduce a una resistencia reducida después de la fisuración.

3.11 ACABADO

Como el refuerzo de fibras se encuentra en toda la matriz del hormigón es natural que queden fibras expuestas en la superficie. Para mitigar este efecto se verifica el proceso de compactación del hormigón y se recomienda qué fibra es la más adecuada para minimizar la cantidad de fibras en superficie. Una de las mejoras de las fibras de acero fue añadir un recubrimiento galvanizado como se describió en el punto anterior.

En la imagen 14 se observa la diferencia en acabado con una fibra de acero brillante, susceptible a la corrosión versus a una fibra con protección galvanizada.



Figura 14. Superficie de panel reforzado con fibra de acero brillante (izquierda) versus superficie con fibra galvanizada (derecha) después de 360 horas en cámara salina

3.12 CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN

Ya se ha indicado que el hormigón reforzado con fibras de acero es distinto en sí mismo. Simplemente mezclar fibras de acero en cualquier hormigón probablemente no utiliza todos los efectos positivos que éstas pueden proporcionar. Según el tipo y la cantidad de fibras, puede ser necesario realizar ajustes en el diseño de la mezcla de hormigón. Por ejemplo:

- Aumentar el contenido de cemento
- Aumentar el contenido de finos.
- Ajuste de la curva de gradación de áridos.
- Empleo de plastificante y/o superplastificante.

Se recomienda buscar asesoría con el proveedor de la fibra para verificar si se deben realizar ajustes a la mezcla.

3.13 CONTROL DE FISURA

Una de las principales características del hormigón reforzado con fibras de acero es su capacidad de transferir esfuerzos sobre una sección fisurada. Esto es distinto al hormigón simple, que pierde toda su capacidad de carga una vez fisurado. Al igual que el acero de refuerzo convencional (malla o barra), las fibras de acero actúan como refuerzo.

Las fibras de acero absorben los esfuerzos desde las primeras etapas de la fisura, por lo que se libera menos energía de fisura. Cuanto más largas sean las fibras y mayor sea

la cantidad (número de fibras) disponible en una matriz de hormigón, mayor será la cantidad de fibras que puentean una fisura.

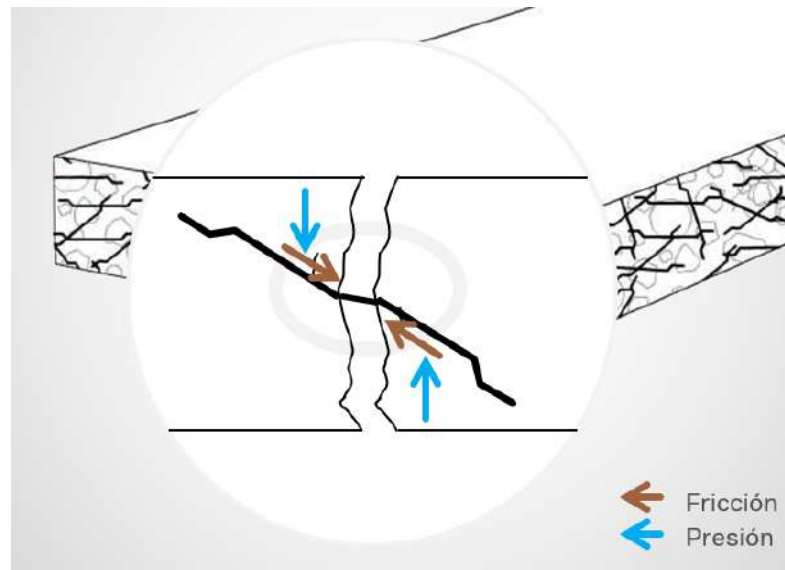


Figura 15. Fibras de acero que forman puentes entre grietas

Es bien sabido que las fibras de acero tienen un efecto muy positivo sobre la formación de fisuras y su propagación. La distancia entre las fibras de acero es mucho menor que la separación habitual entre las barras de refuerzo. A diferencia del hormigón armado, las fibras se distribuyen por toda la sección. Por lo tanto, no existe un espacio de hormigón sin refuerzo. Además, las tensiones en la raíz de una fisura se pueden detectar más rápidamente. Por eso, la propagación de las fisuras y sus patrones cambian en comparación con el hormigón simple o incluso reforzado.

Como las fibras de acero suelen tender puentes entre las fisuras en un ángulo no perpendicular, ya se estarán deformando y absorbiendo carga en fisuras de poco ancho. La fricción local aumenta y, por lo tanto, se inducen tensiones de compresión paralelas a la superficie de la fisura.

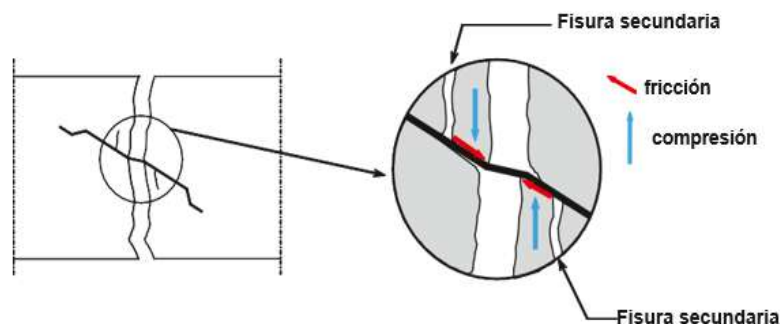


Figura 16. Agrietamiento secundario en hormigón reforzado con fibra de acero

Como consecuencia, las tensiones de tensión asociadas perpendiculares a la fisura pueden provocar un agrietamiento secundario (Imagen 16). Estas fisuras pueden compararse con las fisuras en el hormigón armado, que se pueden encontrar en la zona directamente alrededor de las barras de refuerzo. Con el hormigón con fibras de acero, el agrietamiento secundario se puede observar en toda la sección agrietada. Posteriormente, las fisuras se vuelven más curvadas. Se pueden identificar patrones de fisuración de fragmentación, traslación y multiplicación, como se observa en la Imagen 17.



Figura 17. Patrón de fisuras influenciado por las fibras de acero

Gracias al control de la fisura por las fibras de acero, la resistencia a la introducción de sustancias, especialmente líquidos, se aumenta sustancialmente. La trabazón y fricción de los agregados también se mejoran.

Muchas aplicaciones deben diseñarse para un ancho de fisura determinado, especialmente aplicaciones estructurales. Confiar únicamente en la experiencia y en detalles precisos puede no ser siempre suficiente y, por lo tanto, no cumplir con los requisitos. Por ejemplo, puede ser necesario determinar el ancho de fisura de diseño para evitar la corrosión de las barras de refuerzo o daños estéticos, garantizar la estanqueidad o proteger el medio ambiente de sustancias peligrosas. En estos casos, las fibras de acero pueden contribuir significativamente a mejorar el efecto del refuerzo tradicional.

Ambos, experiencia e investigación han probado que las fibras de acero son una excelente elección “cuando una fisura cerrada es importante”. Ya sea con hormigón con fibras de acero solo o en combinación con barras de refuerzo tradicionales, la estructura se beneficiará sin duda.

3.14 COMPORTAMIENTO POST-FISURA - COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO (HRFA)

A las fibras de acero se les ha asociado tradicionalmente a las propiedades de ductilidad y tenacidad, que es la capacidad de soportar carga después de la primera fisura o resistencia residual. La razón es su capacidad de combinar capacidad de carga con una gran capacidad de deformación. Muy a menudo la tenacidad se expresa mediante el término resistencia equivalente o residual.

La mayoría de los hormigones con fibras de acero que se utilizan hoy en día en aplicaciones de pisos industriales presentan un comportamiento de tenacidad que se clasifica como de ablandamiento por deformación, que es cuando la curva baja después del pico inicial de módulo de rotura a flexión; pero para el caso de prefabricados se usan hormigones con comportamiento de flexión endurecimiento dado sus requerimientos en servicio y estado límite último de aplicación estructural (véase la imagen 7).

Como se observa en la imagen 7, cuanto más ancha es la abertura de la fisura, menor es la capacidad de carga. Esto ocurre especialmente en caso de tracción directa, pero también se observa en caso de flexión pura. En este último caso es posible producir un comportamiento de endurecimiento por flexión, lo que casi nunca ocurre en caso de tracción directa.

La resistencia a la tracción posterior a la fisura se puede convertir a partir de la resistencia a la flexión posterior a la fisura mediante factores de conversión. Estos factores dependen del comportamiento de tensión-deformación asumido del hormigón reforzado con fibras y de prueba que se realiza.

El nivel y la forma de la curva de resistencia a la fisura posterior dependen básicamente de:

- Clase de fibra de acuerdo con el capítulo 3.1.
- Número de fibras en la fisura.
- Tipo de anclaje.
- Longitud y diámetro de la fibra.
- Orientación de la fibra.
- Resistencia de la matriz del hormigón.

3.15 IMPACTO

La resistencia al impacto aumenta enormemente con la adición de fibras de acero. Varias pruebas están disponibles para simular impactos distribuidos o puntuales, duros o suaves, a alta o baja velocidad, teniendo en cuenta la carga estática o dinámica en ciclos únicos o incluso múltiples. El impacto podría, por ejemplo, ser de balas (fuerte impacto, en un solo punto, con alta velocidad), o de ondas de choque (de un solo ciclo, distribuidas) o de caída de rocas (de un solo punto, de uno o varios ciclos, baja velocidad).

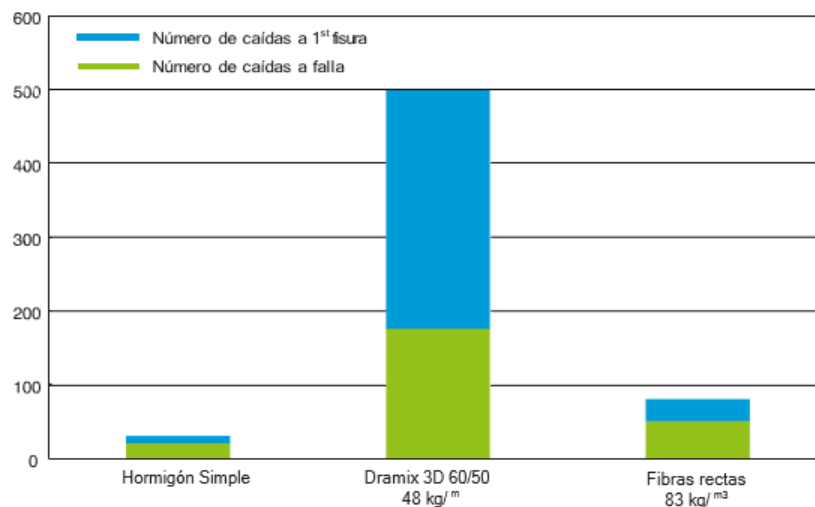


Figura 18. Número de caídas de acuerdo con el espécimen de hormigón

En todos los casos, la adición de fibras de acero mejora significativamente la resistencia del hormigón simple. La imagen 18, demuestra una vez más la importancia de elegir el tipo adecuado de fibra. Los resultados se han derivado de usar un martillo de 4.54 kg y una caída de 457 mm según el procedimiento descrito en la ACI 544.4r-18.

La combinación de refuerzo de barras y fibras es especialmente beneficiosa en el caso de carga de ondas de choque (refugios para aplicaciones militares o industriales).

Beneficios del hormigón reforzado con fibra de acero son:

- Reducir el desportillamiento y formación de costras de paneles.
- Aumenta la absorción de energía.
- Aumenta el número de golpes a la primera fisura.
- Aumenta el número de golpes de fisuras a ruptura.
- Aumenta la resistencia a la cavitación.

También en esta aplicación, un mayor comportamiento post-fisura del hormigón con fibras de acero en ensayos estáticos de vigas/paneles conduce a un aumento de la resistencia al impacto. Se prefieren mayores cantidades de fibras de acero de alto rendimiento para proporcionar una mayor red de fibras requeridas. La mejora puede incluso alcanzar y superar órdenes de magnitud en comparación con los hormigones sin fibras, como también lo confirma la imagen 19.

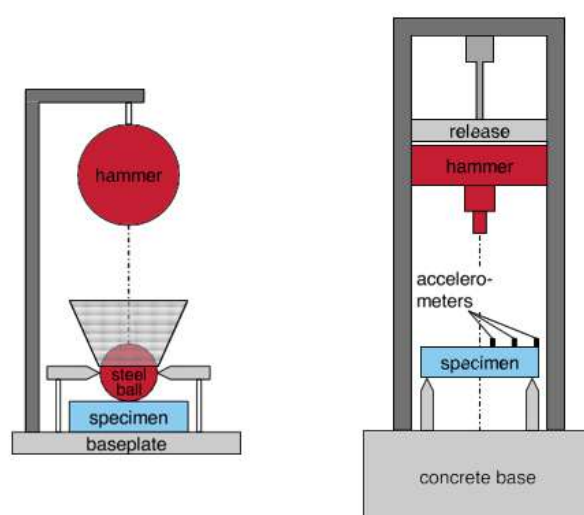
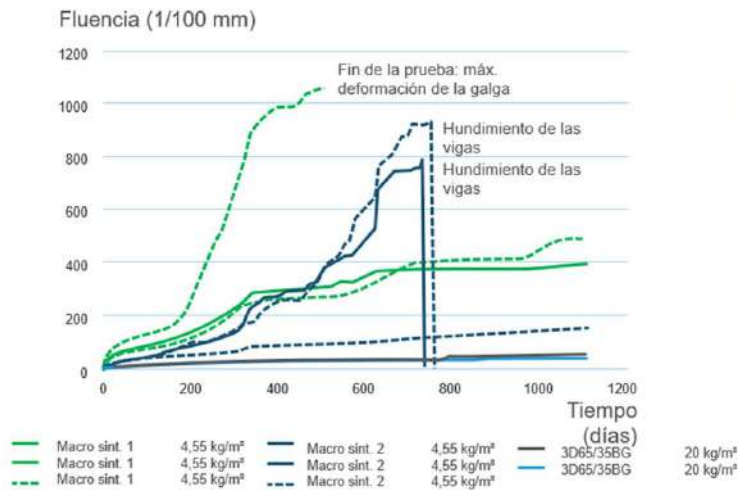


Figura 19. Descripción de configuración de prueba para impacto de acuerdo con la ACI 544.4r-18

Las aplicaciones adecuadas pueden ser pilotes hincados, prefabricados en segmentos para túneles, refugios, búnkeres, estructuras de contención, aliviaderos, u otros elementos de protección.

3.16 **COMPORTAMIENTO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO A LARGO PLAZO**

En el contexto del rendimiento a largo plazo, la deformación por fluencia en el estado límite de servicio es considerable. Pruebas internas, realizadas en el laboratorio de hormigón de Bekaert y las pruebas iniciadas por la Sociedad Austriaca de Tecnología del Hormigón y la Construcción demostraron una reducción flechas por fluencia en estado límite de servicio debido al uso de fibras de acero.



Laboratorio de hormigón de Bekaert

Figura 20. Curva de deflexión versus tiempo en ensayos de flexión de vigas de hormigón reforzadas con fibras macro sintéticas y de acero

Los ensayos se realizaron con vigas de ensayo estándar sometidas a una carga permanente que representaba aproximadamente el 50 % de la carga residual alcanzada con una deflexión definida. El nivel de carga se eligió para simular el nivel de tensión que realmente se produce en el estado límite de servicio.

3.17 CORTANTE

A diferencia de la flexión, el diseño de cortante siempre se basa en un enfoque de diseño de secciones. No es necesario tener en cuenta las propiedades del sistema. La experiencia de las pruebas demuestra que las fibras de acero pueden reemplazar el refuerzo de cortante mínimo que se debe colocar por razones de robustez cuando no se requiere ningún refuerzo de cortante o casi ningún refuerzo de cortante debido al nivel de las fuerzas reales.

Para fuerzas de corte mayores, se debe colocar un refuerzo adicional, como estribos. Sin embargo, las fibras permiten reducir su espaciamiento y/o diámetro. Las aplicaciones más económicas son aquellas en las que todo el refuerzo de corte se puede reemplazar por fibras de acero.

La imagen 21 muestra las diferencias de la falla de un elemento sin refuerzo al corte versus uno reforzado con fibras de acero.

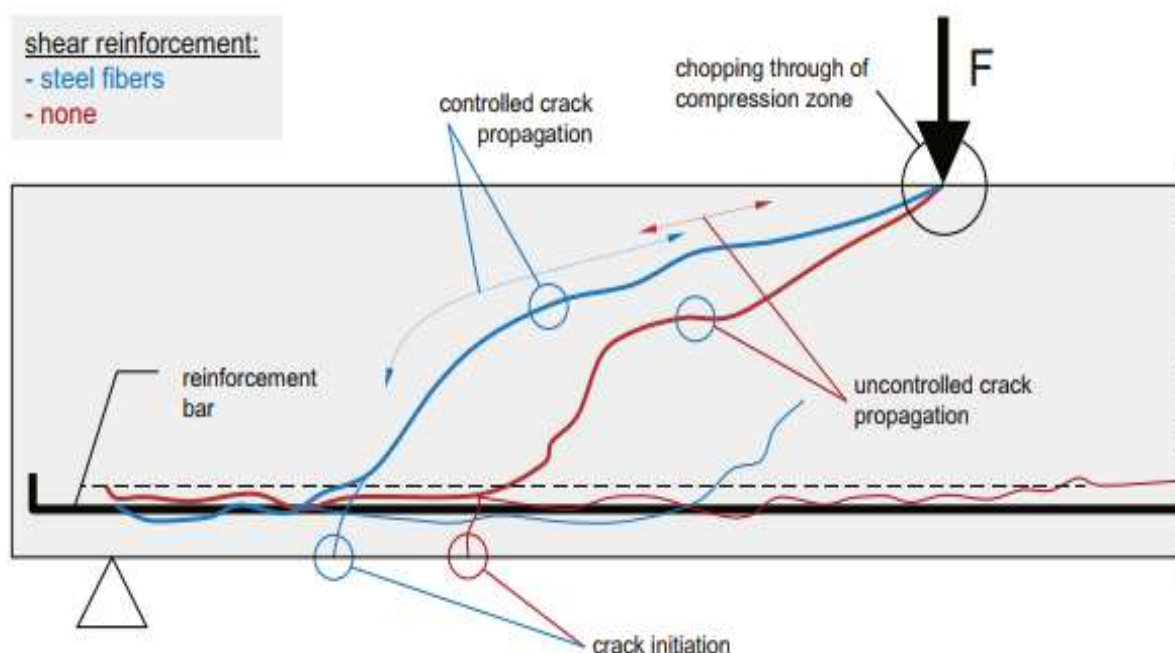


Figura 21. Comportamiento de la fisura al corte en una viga sin refuerzo y con refuerzo con fibra de acero

La forma de la fisura de corte es significativamente diferente cuando se utilizan fibras de acero. En lugar de una propagación rápida de la fisura en el elemento sin refuerzo de corte (línea roja en la Figura 20), la propagación de la fisura se vuelve estable y controlada en un amplio rango (línea azul en la Figura 20) con reforzamiento de fibra de acero.

Con fibra de acero se consigue una falla dúctil, mientras que sin refuerzo resulta un colapso repentino. El efecto de las fibras de acero sobre la capacidad de corte puede explicarse debido a que las fibras se fijan en la sección fisurada, manteniendo así el aglomerado de los agregados y proporcionando un componente de refuerzo vertical adicional, que apoya al equilibrio interno de fuerzas.

3.18 RESISTENCIA AL FUEGO

A pesar de que el hormigón no arde, no siempre resiste muy bien el fuego. La humedad contenida en el hormigón debe escapar de la matriz en forma de vapor. Si el vapor se produce más rápido de lo que puede escapar, es probable que se produzca un desconchado explosivo. Incluso si el desconchado solo afecta a las zonas cercanas a la superficie, puede exponer el refuerzo de forma rápida y directa al fuego. La capacidad de carga de la estructura puede perderse rápidamente. El colapso es más que

probable, porque la resistencia a la tracción del acero se reduce drásticamente con el aumento de la temperatura.

Las fibras de acero, cuando se añaden en dosis normales, no aumentan significativamente la conductividad térmica del hormigón, que es similar a su efecto en conductividad eléctrica (capítulo 3.k). A diferencia del refuerzo de acero, las fibras se distribuyen por toda la sección. Las fibras discontinuas no están concentradas en una capa fina cerca de la superficie y, por lo tanto, no están todas cerca de la fuente de calor. En consecuencia, el riesgo de perder la capacidad de carga de todas las fibras de acero al mismo tiempo es insignificante.

Sin embargo, las fibras de acero no pueden proteger el hormigón del deterioro térmico. Hay indicios de que la inclusión de fibras de acero reduce el desconchado debido al choque térmico y al gradiente térmico. Pero las fibras de acero solo deben considerarse como una medida adicional que puede conducir a un mejor escape de vapor.

3.19 CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

La conductividad eléctrica y la resistividad del hormigón desempeñan un papel importante en aquellas aplicaciones en las que las corrientes continuas pueden alterar las señales o crear condiciones inseguras.

La resistividad eléctrica también es importante en los casos en los que el hormigón armado estará expuesto a condiciones corrosivas, ya que las corrientes que favorecen o inducen la corrosión fluirán con mayor facilidad en el hormigón de baja resistividad.

Si se mantiene baja la cantidad de pasta de cemento, se utilizan puzolanas de buena calidad y se evita la introducción de sales inorgánicas ionizadas, se obtendrá una conductividad menor y una resistividad mayor.

Los efectos de la temperatura también son importantes, ya que las temperaturas más altas dan lugar a una resistividad menor. Las fibras de acero no modifican ni la resistividad ni la conductividad del hormigón. Las fibras son discontinuas y se distribuyen tridimensionalmente por todo el hormigón.

4 VENTAJAS DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO

4.1 REDUCCIÓN DE LA MANO DE OBRA

La incorporación de fibras en elementos prefabricados conlleva un significativo ahorro en mano de obra en fábrica derivada de la preparación del armado (movimiento en planta, corte del armado, preparación del armado).

En ciertos elementos como paneles o tubos las fibras de acero de diámetros menores de 1,2 m pueden reemplazar todo el refuerzo, mientras que en elementos como cajones para drenaje la solución es una combinación de barras de refuerzo con fibras metálicas, donde el refuerzo tradicional se coloca en los lugares donde el momento actuante es mayor y la fibra en el resto del hormigón, que quedará en todo el elemento.

En el ejemplo del capítulo 7 se muestran paneles con soluciones combinadas de fibras de acero y barras de refuerzo.

También el reducir la cantidad de refuerzo tradicional se requerirá menos espacio de almacenamiento y menos movimientos de materiales, porque las barras y mallas de refuerzo suelen ocupar un espacio notable.

En la experiencia en el mercado, dependiendo del tipo de paneles, la reducción de refuerzo puede ser del 20% al 85%.

Al eliminar o reducir parte de la mano de obra se pueden distribuir a otras tareas de valor añadido.

4.2 AHORROS ECONÓMICOS

Como se describió en el punto anterior, la reducción más importante en costes está influenciado en la reducción de los gastos en la mano de obra, y a su vez en productividad. Pero existe otra ventaja, las fibras al ser un refuerzo en todo el elemento optimiza el comportamiento del acero actuando en el punto exacto donde se está generando el esfuerzo; esto permite que el refuerzo con fibras de acero sea menor si lo comparamos con el de la malla de acero, lo que a su vez permite reducir espesores en el elemento.

Como el precio de la malla de acero normalmente es menor que el de la fibra, pero considerando que peso por elemento con fibra va a ser menor, si comparamos el valor de las soluciones de ambas es similar y no significativo (excepto en elementos de prefabricados de capa definitiva en túneles, donde si se presenta un ahorro en costos

de material debido a que dosificación de fibra es usualmente de 35 kg/m³ versus los 100 kg de armado tradicional).

También podríamos disponer de más espacio libre en fábrica para acopio y fabricación.

4.3 AHORROS EN EJECUCIÓN

El cuello de botella más frecuente en la producción de paneles prefabricados de hormigón se encuentra en el armado. Se necesita de una a tres personas para hacerlo, que incluye el traslado del material, colocación, soldado o amarre de este. Al quitar un considerable volumen de armado o su totalidad se está ahorrando tiempo, que puede ser hasta un 50% o más en el tiempo de esta actividad.

Una de las grandes ventajas del sistema constructivo de prefabricados es su rapidez, que es uno de los factores importantes al momento de construir. La solución con fibras de acero en paneles u otros elementos prefabricados refuerza y apoya esta ventaja.

4.4 AHORROS EN TRANSPORTE

Al ser las piezas más ligeras, y en algunos casos de menor volumen/espesor, todo el circuito logístico de las piezas tanto dentro de fábrica como el transporte hacia obra puede ser redimensionado. Un ejemplo en un panel, donde se reduce el espesor de 15 a 14 cm, hay una reducción de 6,6% en su volumen y peso en camión; así donde se transportaban 64 m² de paneles se podrían transportar, 68 m².

También a la hora de su ejecución en obra se podrían usar elementos de izado de tonelaje más ajustado.

4.5 FLEXIBILIDAD Y ADAPTABILIDAD

Dado que las fibras de acero son un refuerzo homogéneo e isotrópico, y basado en el diseño incluido en el Model Code y el anejo 7 del Código Estructural la capacidad de actuar de este tipo de refuerzo es más rápido y específico al presentarse un esfuerzo, lo que permite elementos con formas singulares.

Se pueden reforzar paneles curvos y/o personalizados sin armados, donde el refuerzo tradicional presenta inconvenientes debido a su tamaño, forma y necesidad de recubrimiento para protegerlo del ambiente.

4.6 **AHORROS EN HUELLA DE CARBONO**

Existen tres parámetros que mejoran la huella de carbono (reducción de CO₂) en elementos de prefabricados reforzados con fibras de acero comparados con los reformados con mallazo tradicional:

La huella de carbono CO₂ por kilo de acero es menor con las fibras de acero versus el armado (0.8 kg CO₂ por kilo de acero). Cabe aclarar que esto depende de cada producto y productor de fibra de acero, donde el documento de declaración de producto ambiental es diferente para cada producto, y se van actualizando, dependiendo de las políticas ambientales internas de cada empresa

La posibilidad de reducir espesor, o de optimizar la geometría del prefabricado, reduce la cantidad de hormigón que es el material que genera más CO₂.

También hay reducción de la huella de carbono si se reduce el número de transportes que movilizan el panel a la obra (en caso de que exista este transporte). Menos transporte, menos emisiones de los camiones, menos CO₂.

5 NORMATIVA AMBIENTAL EN ESPAÑA

5.1 ANTECEDENTES

La sostenibilidad constituye uno de los pilares fundamentales para el presente y futuro del sector de la construcción debido a su gran impacto ambiental.

Según un informe emitido por la ONU, en el año 2021 el sector de la construcción fue responsable de más del 34% de la demanda energética y alrededor del 37% de las emisiones globales de carbono.

Cada vez un mayor número de países está trabajando para descarbonizar los edificios. Implementar prácticas sostenibles no solo ayuda a mitigar el cambio climático, sino que también promueve la eficiencia energética, la reducción de residuos y la conservación de recursos naturales, contribuyendo a un futuro más ecológico y responsable.

Materiales como el cemento y el acero son responsables del 18% de las emisiones mundiales de CO₂, además de ser una fuente importante de residuos de la construcción. Por ello, el uso de materiales de baja emisión de carbono es una de las vías a seguir para lograr este objetivo.

5.2 ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA (LIFE CYCLE ANALYSIS – LCA)

El Análisis de Ciclo de Vida (LCA, por sus siglas en inglés) es una herramienta clave para evaluar el impacto ambiental de productos, materiales y procesos a lo largo de todas las etapas de su vida útil, desde la extracción de materias primas hasta su disposición final, pasando por su producción, transporte, distribución y uso.

El LCA permite la identificación de los principales impactos ambientales (vertidos, residuos, emisiones a la atmósfera, etc.) y, por tanto, identificar áreas críticas de mejora mediante el análisis de alternativas en procesos productivos, que tienen como objetivo la reducción de emisiones durante la fabricación de materiales, la optimización del transporte, o la gestión eficiente de los residuos de demolición.

En definitiva, el LCA es una herramienta determinante en la transición hacia una construcción más responsable siguiendo un modelo de Economía Circular y sostenible, ya que aporta información valiosa sobre los perfiles ambientales de productos y servicios. Además, su aplicación en la selección de materiales y sistemas

constructivos respalda el diseño de edificios sostenibles, contribuyendo al cumplimiento de normativas ambientales y certificaciones verdes.

El Análisis de Ciclo de Vida está regulado por un conjunto de normas internacionales como la ISO 14025 y la serie EN 15804 (específica para productos de construcción en Europa), que aseguran que se realice de manera coherente, transparente y comparable, permitiendo a las empresas mejorar su desempeño ambiental basándose en estándares internacionalmente aceptados.

5.3 **DECLARACIÓN AMBIENTAL DE PRODUCTO (ENVIROMENT PRODUCT DECLARATION – EPD)**

Una Declaración Ambiental de Producto (DAP) es un documento estandarizado que proporciona información transparente, verificable y público sobre el impacto ambiental de un producto o sistema a lo largo de su ciclo de vida. De hecho, el LCA es la base de las DAP.

La DAP se elabora siguiendo las reglas aplicables a las categorías de productos (RCP), está diseñada para facilitar la toma de decisiones sostenibles al evaluar materiales, productos o sistemas; y se encuentra verificada por un tercero independiente, lo que garantiza su fiabilidad.

Una DAP incluye:

1. Impactos ambientales: Emisiones de gases de efecto invernadero, consumo de energía, generación de residuos, entre otros.
2. Fases del ciclo de vida: Desde la extracción de materias primas, fabricación, transporte, uso y hasta el final de vida del producto.
3. Información cuantitativa: Basada en datos científicos y revisada por terceros para garantizar su fiabilidad.
4. Categorías de impacto ambiental: Incluyen el calentamiento global, agotamiento de recursos, contaminación del agua y suelo, etc.

Aplicación en el sector de la construcción

En la construcción, las DAP son esenciales para evaluar el impacto ambiental de materiales como el hormigón, acero, madera, vidrio, ladrillos y otros componentes utilizados en edificios e infraestructuras. Su uso está vinculado a la creciente demanda

de construcciones sostenibles, certificaciones ambientales (como LEED, BREEAM, etc.) y normativas gubernamentales que fomentan prácticas responsables.

Las Declaraciones Ambientales de Producto son herramientas cruciales para promover la sostenibilidad en el sector de la construcción, proporcionando datos confiables para el diseño y la construcción de infraestructuras más ecológicas.

5.4 **CERTIFICACIÓN Y NORMATIVA**

1) El Código Técnico de la Edificación (CTE)

El CTE, base normativa para toda construcción en España, establece los requisitos básicos que deben cumplir los edificios en relación con aspectos como la seguridad estructural, la habitabilidad y la eficiencia energética.

En el caso de la construcción industrializada, cobra especial relevancia ya que:

- (i) los componentes fabricados deben cumplir con los mismos estándares que las edificaciones convencionales;
- (ii) los procesos requieren certificaciones adicionales para garantizar que los materiales y diseños cumplen con las especificaciones de seguridad y sostenibilidad;
- (iii) los requisitos de control de calidad se integran en fábrica, lo que reduce la incertidumbre durante el ensamblaje en obra.

Entre los nuevos requisitos del CTE destacan mayores exigencias en eficiencia energética y certificaciones vinculadas a la reducción de emisiones de carbono.

2) Reglamento de Productos de Construcción

Garantiza que los productos utilizados en construcción cumplan estándares de seguridad, sostenibilidad y trazabilidad con la inclusión, en 2025, del Pasaporte Digital de Producto para certificar el origen, impacto ambiental y trazabilidad de cada material.

Por un lado, los fabricantes deberán registrar y certificar cada lote de materiales en una plataforma digital común y, por otro, los productos deberán cumplir requisitos ambientales estrictos para poder comercializarse en la UE.

3) Pacto Verde Europeo

Establece la estrategia de la UE para alcanzar la neutralidad climática en 2050. Esto implica medidas legislativas en eficiencia energética, gestión de residuos y promoción del ecodiseño en proyectos constructivos. Además, los proyectos que cumplan con estas regulaciones tendrán mayor acceso a incentivos fiscales y financiación europea específica.

El pacto se centra en la normativa de emisiones (estándares más estrictos para los sectores de construcción, transporte e industria pesada) y los incentivos fiscales (subvenciones y deducciones fiscales para los proyectos sostenibles).

4) Avances Normativos en Instalaciones Térmicas y Eficiencia Energética

- La Directiva Europea de Eficiencia Energética en los Edificios (EPBD) es el principal marco normativo de la UE para mejorar el rendimiento energético de los edificios y lograr la neutralidad climática en 2050. La actualización más reciente establece que todos los edificios nuevos deben ser de cero emisiones a partir de 2030, con un cumplimiento anticipado en 2028 para edificios públicos.
 - La rehabilitación energética, los certificados energéticos obligatorios y la innovación tecnológica son aspectos claves incluidos en la directiva.
 - El Reglamento de Instalaciones Térmicas en los Edificios (RITE) se ha actualizado para adaptarse a las necesidades de la construcción industrializada. Así, las instalaciones térmicas diseñadas para casas prefabricadas deben ser evaluadas durante el proceso de fabricación, garantizando su compatibilidad con los sistemas constructivos y su correcto rendimiento tras el ensamblaje.
 - El reglamento promueve el uso de tecnologías renovables, como paneles solares o bombas de calor, integradas desde la fase de prefabricación.

5) Certificaciones y Controles en la Construcción Industrializada

La construcción industrializada se distingue tanto por la fabricación de componentes en entornos controlados, como por la necesidad de cumplir con certificaciones específicas que garanticen su calidad y sostenibilidad. Adicionalmente, el ensamblaje final requiere permisos municipales, como la licencia de obra y la licencia de primera ocupación. Entre las certificaciones técnicas se encuentran, por ejemplo:

- **Marcado CE para Productos de Construcción:** este distintivo asegura que el producto cumple con las directrices europeas en términos de seguridad, salud y medio ambiente.
- **Certificación ISO 9001:** garantiza que los procesos de producción están orientados a la mejora continua, minimizando errores y optimizando recursos.
- **Certificaciones Medioambientales (ISO 14001):** las fábricas deben demostrar que sus procesos son respetuosos con el medio ambiente, incluyendo la reducción de residuos en la fabricación, el uso de materiales reciclados o reciclables y la optimización del consumo energético en las instalaciones.
- **Requisitos de Control Durante el Ensamblaje:** garantizar la seguridad estructural y funcionalidad del edificio, así como su estanqueidad, verificando la conexión de módulos, la compatibilidad con sistemas urbanos y la adaptación al terreno.

El marco normativo de 2025 abre nuevas oportunidades para el sector al alinearse con las políticas europeas de sostenibilidad y digitalización, que permiten la internacionalización de nuestros productos. Algunas de las tendencias más destacadas incluyen:

- (i) Integración del BIM (Building Information Modeling), que permite gestionar todas las etapas del ciclo de vida del edificio;
- (ii) El acceso a Subvenciones y Beneficios Fiscales gracias al cumplimiento de las normativas más estrictas en materia de sostenibilidad.

6) La Ley de Ordenación de la Edificación (LOE): Responsabilidades y Garantías

La LOE establece las responsabilidades de los diferentes agentes que participan en un proyecto constructivo:

- **Fabricante:** asegurar que los elementos prefabricados son conformes con las normativas de seguridad y sostenibilidad antes de su traslado a la obra.
- **Promotor:** garantizar al comprador la correcta ejecución del proyecto y cumplimiento de los estándares de calidad.
- **Arquitectos y técnicos:** supervisar las obras y garantizar que los módulos ensamblados cumplen con el diseño original y las normativas vigentes.

5.5 **NUEVAS FIBRAS**

La tecnología de fibras continuamente ha estado evolucionando, en los años 70 eran elementos sueltos y con el tiempo se han introducido nuevos tipos de anclajes, mayores resistencias de alambre de acero y capas protectores para hacerlas más resistentes a las condiciones ambientales. Es por esto que en el mercado de fibras de acero se encuentran más de 50 referencias que están clasificadas según la aplicación de uso.

Las innovaciones continúan, con la tendencia de crear soluciones ambientalmente más amigables y de mayor desempeño cada año salen nuevas referencias de fibras de acero para atender estos nuevos requerimientos.

6 DISEÑO DEL HORMIGÓN REFORZADO CON FIBRAS DE ACERO

Como se describió anteriormente, las fibras de acero mejoran el comportamiento del hormigón, en especial la tracción en secciones fisuradas. Este aporte permite introducir métodos de diseños lineales de redistribución de esfuerzos y de cálculo plástico.

La metodología de diseño de elementos de hormigón reforzados con fibras la encontramos en el Anejo 7 del Código Estructural: “Recomendaciones para la utilización de hormigón con fibras”. Algunas consideraciones que se debe tener en cuenta para elementos prefabricados estructurales son:

- Se toman los valores de resistencia característica residual a tracción por flexión $f_{R,1,k}$ y $f_{R,3,k}$, de acuerdo con lo especificado en el apartado 6.1 del Anejo 7. Estos son los valores de resistencia residual para una referencia, dosificación y resistencia del hormigón para una apertura de fisuras de 0,5 y 2,5 mm. Con estos valores se determinará el diagrama de cálculo a tracción según lo indicado en el apartado 6.1.1

Para que el hormigón con fibras pueda ser considerado con función estructural, la resistencia característica residual a tracción por flexión $f_{R,1,k}$ no será inferior al 40 % del límite de proporcionalidad y $f_{R,3,k}$ no será inferior al 20 % del límite de proporcionalidad

- Considerar que el incorporar fibras al hormigón puede afectarse la docilidad, entonces se debe hacer ajustes a la mezcla
- Para efectos de cálculos relativos a los Estados Límite Últimos, a flexión simple o compuesta, tracción simple o compuesta, cuantías o dosificaciones mínimas, cortante y punzonamiento favor referirse al anejo 7, capítulo 6.2

6.1 CAPACIDAD A FLEXIÓN

En el mercado existen herramientas de software que permiten realizar estos cálculos más rápidamente, algunos ya están incorporados en herramientas de elementos finitos y otros son entregados por los fabricantes de las fibras de acero.

Uno de los softwares existentes es el de capacidad de momento, el cual calcula la capacidad resistente de momento que tiene un elemento determinado reforzado con hormigón con fibras, para una norma de diseño, resistencia de hormigón, tipo de fibra y dosificación de fibra seleccionada. Conociendo el valor que resiste el elemento se compara con el momento actuante.

7 EJEMPLO DE CÁLCULO DE DISEÑO Y DE HUELLA DE CARBONO DE PANEL ARQUITECTÓNICO Y ESTRUCTURAL

7.1 PROTOTIPO DE ANÁLISIS

Para analizar las posibilidades del uso de las fibras metálicas en elementos prefabricados se han escogido dos ejemplos de distinta tipología y formato del panel:

7.1.1 PANEL DE FACHADA PARA EDIFICIO DE VIVIENDAS

Se trata de paneles de pequeño espesor, habitualmente entre 8 y 12 cm, con dimensiones alrededor de 3.30 m de altura y longitudes entre 4 y 7 m. Suelen incluir huecos de puertas y ventanas en diferentes disposiciones.

Ejemplos de fachada de edificación residencial:

Para el estudio de la viabilidad del uso de las fibras metálicas en los paneles de edificación residencial se propusieron dos prototipos que exponen a continuación:

Imagen 22. Prototipo 1: Panel de 12 cm de espesor con reducción a 8 cm en zonas localizadas y hastiales de ventana en voladizo

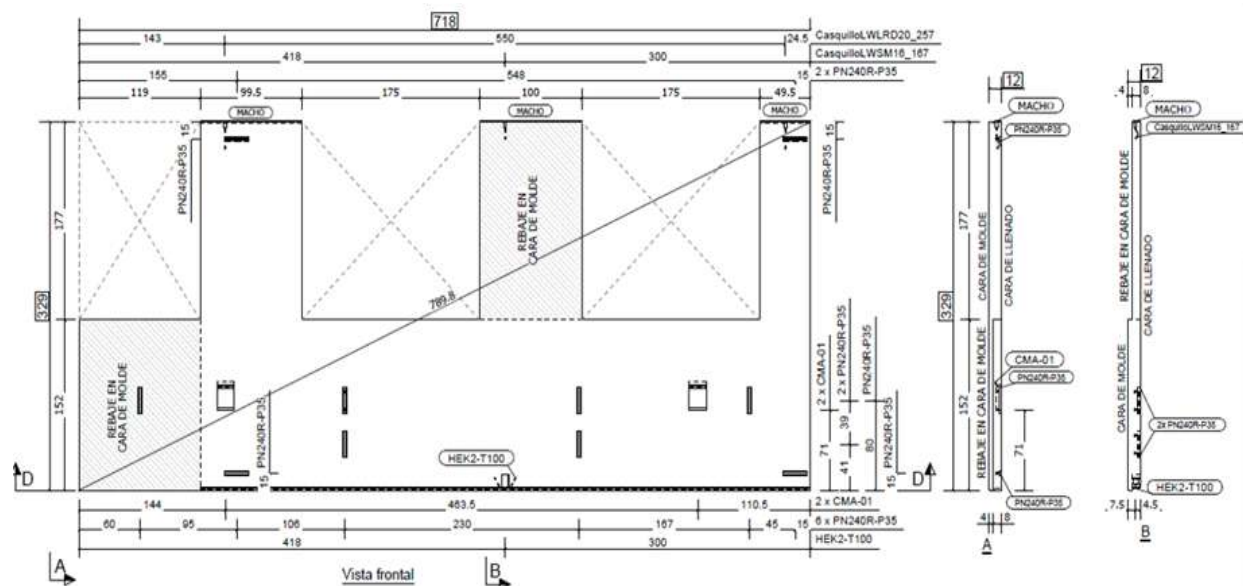


Figura 22. Prototipo 1: Panel de 10 cm de espesor con rebajes locales de 2 cm y huecos para puertas

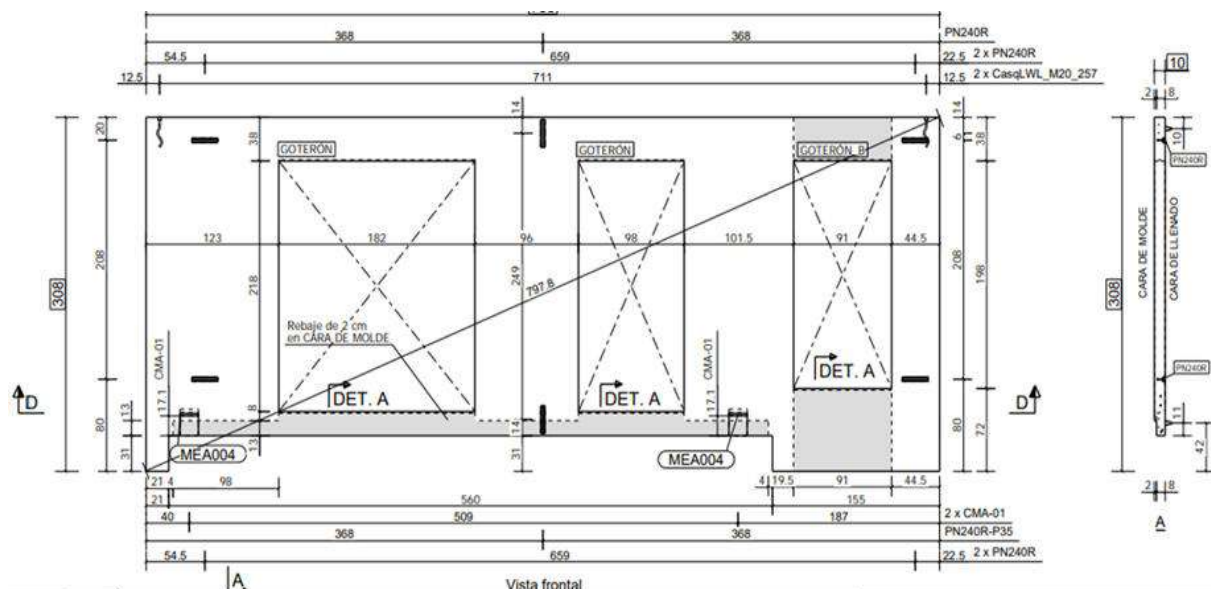


Figura 23. Prototipo 2: Panel de 10 cm de espesor con rebajes locales de 2 cm y huecos para puertas

De estos dos prototipos técnicos de Bekaert realizaron un análisis detallado del diseño estructural del prototipo 2, incluyendo las fases de fabricación y puesta en servicio. El informe completo del diseño del prototipo se anexa a este informe. A continuación, se hace un resumen con los resultados del análisis en las distintas fases: desmoldeo y servicio.

Desmoldeo:

En el siguiente esquema se representan las zonas del panel que quedan sometidas a tensiones por encima de 2 MPa durante el desmoldeo. Se verifica la conveniencia de desmoldeo en moldes basculantes, con desmoldeo vertical, respecto a la opción de desmoldeo horizontal donde las zonas que superan el nivel de tensiones de 2 MPa es generalizada.

FE Analysis

Demoulding _ Principal stress (dynamic action + adhesion to the formwork)

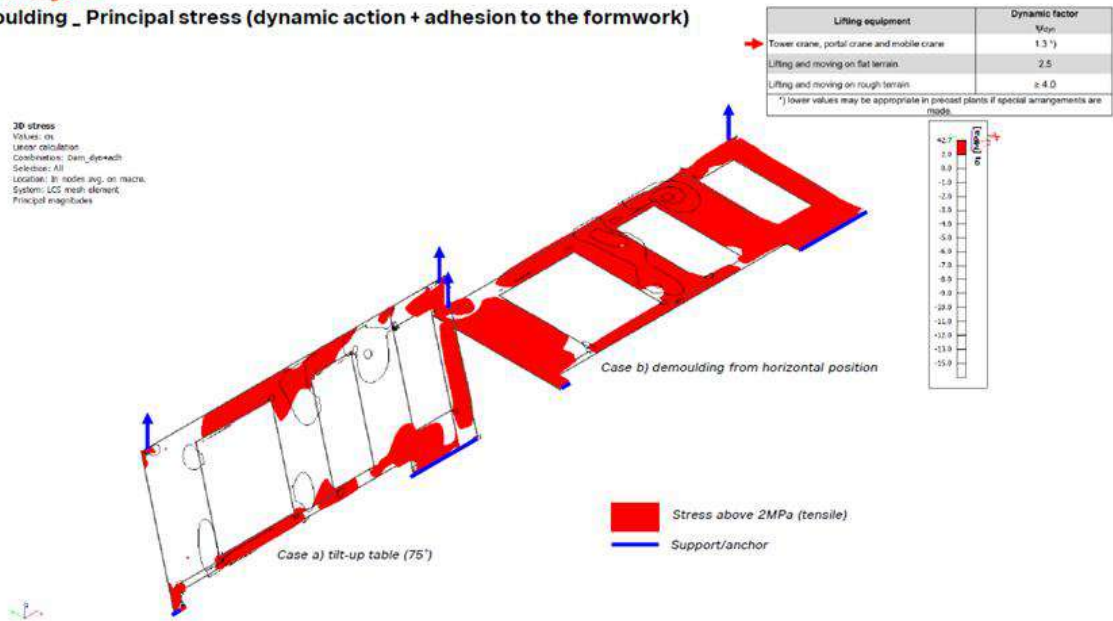


Figura 24. Diagrama de tensiones que superan los 2 MPa (incluidas la adherencia al molde y efectos dinámicos)

FE Analysis

Demoulding _ Principal stress (selfweight only)

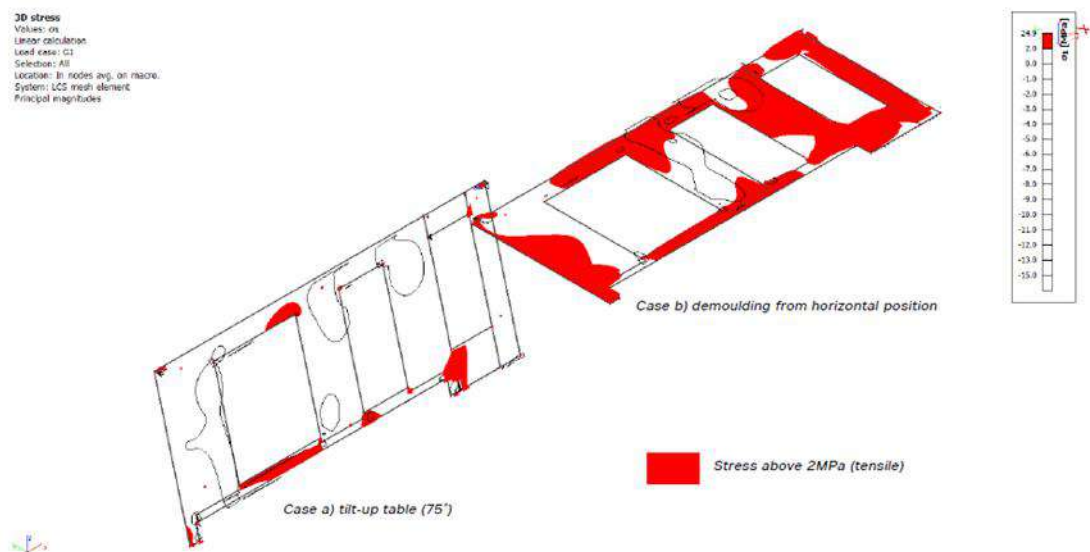


Figura 25. Diagrama de tensiones que superan los 2 MPa bajo la acción de peso propio

En este nivel de tensiones es conveniente la colocación de refuerzos locales que garanticen la integridad de la pieza durante la manipulación.

Servicio:

FE Analysis

In-service _ bending moment Mx

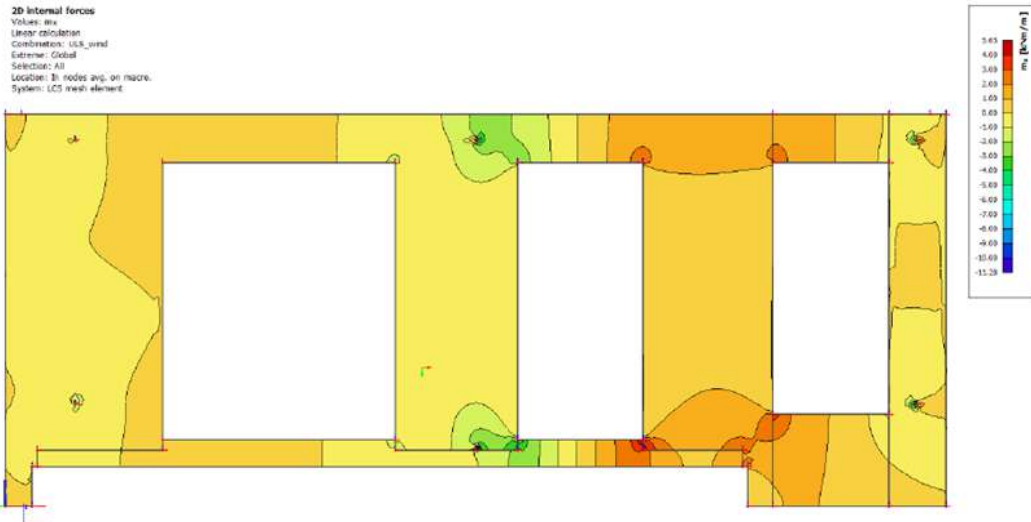


Figura 26. Gráfico de momento flector en ELS

Después de instalada la pieza el nivel de tensiones es más alto en los bordes y esquinas de los huecos de puertas y ventanas por lo que se recomienda disponer una armadura de contorno que cubra los riesgos de fallo por concentración de tensiones localizadas. Un esquema de refuerzos a disponer se indica en el siguiente esquema:

FE Analysis _ In-service

Remarks

Bending capacity calculated on the basis of the average values from Bekaert database. Assessment according to the actual customer concrete mix is advice.

Local reinforcement is recommended at the anchoring points and around the openings.

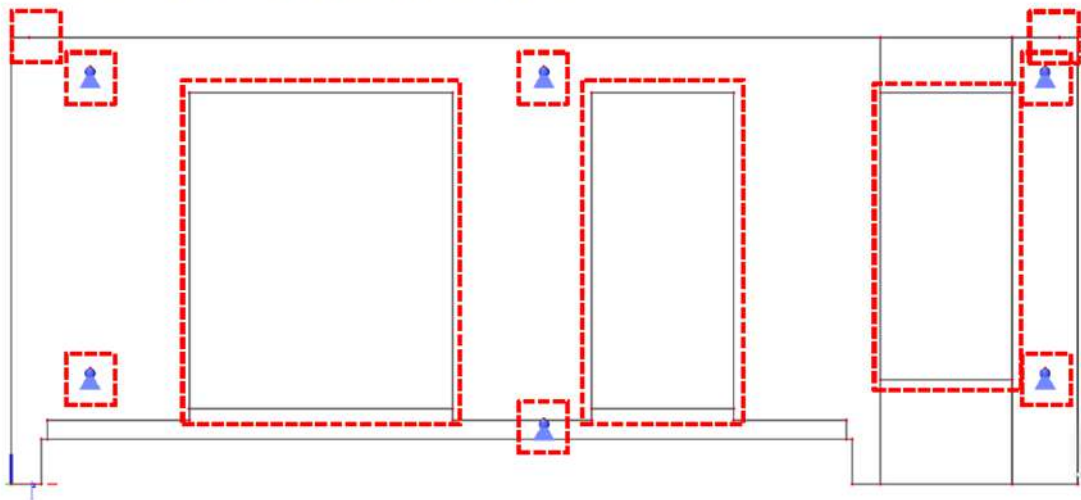


Figura 27. Gráfico de refuerzo necesario

7.1.2 PANEL DE FACHADA PARA EDIFICACIÓN INDUSTRIAL

Es un panel de mayor formato, frecuentemente con espesores entre 12 y 20 cm, ancho de 2.50 m y longitudes entre 9 y 12 m. Suelen incluir algunas ventanas y puertas, pero de manera menos repetitiva que en el caso de fachadas de edificación residencial.

Ejemplos de fachada de edificación industrial:

Igual que para los paneles de fachada de edificación residencial se propusieron otros dos prototipos de paneles para edificación industrial, los cuales exponen a continuación:

Imagen 28. Prototipo 1: Panel de 16 cm de espesor, macizo de 10.60 m de longitud, sin huecos

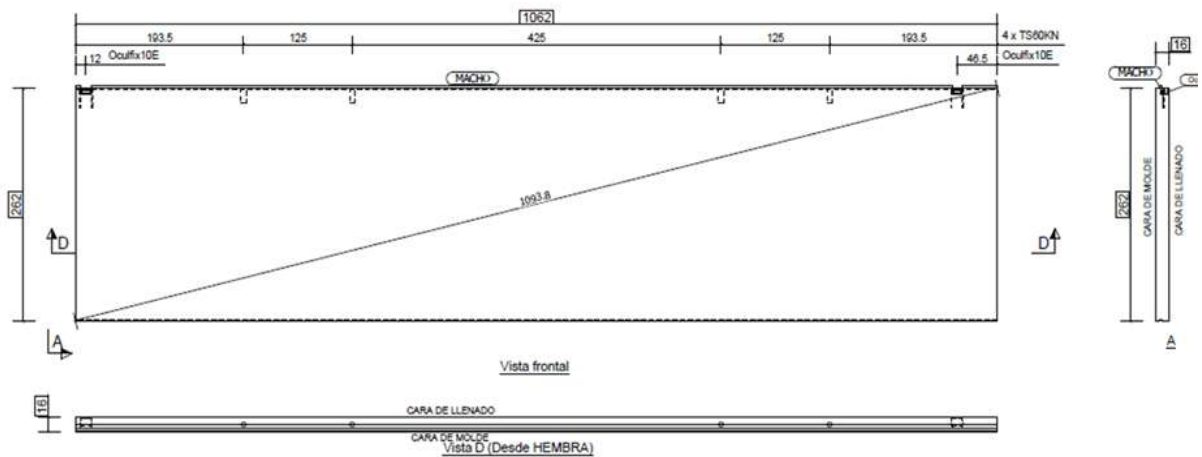


Figura 28. Prototipo 1: Panel de 16 cm de espesor, de 10.6 m de longitud con huecos para puertas.

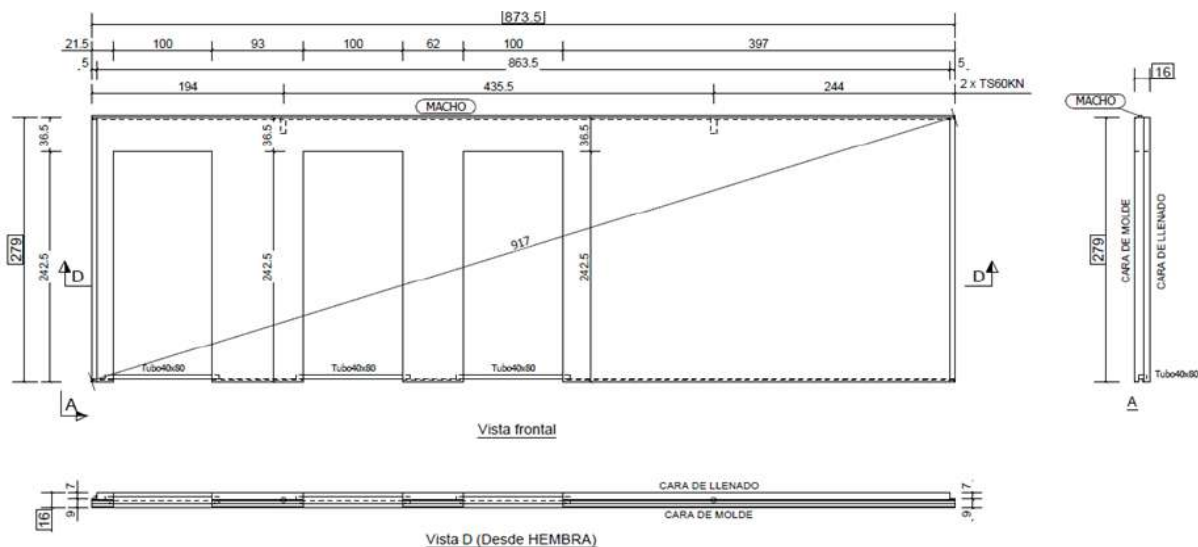


Figura 29 Prototipo 2: Panel de 16 cm de espesor, de 8.75 m de longitud con huecos para puertas.

También se realizó el diseño estructural del prototipo 1 para edificación industrial, cuyos resultados se resumen a continuación:

Desmoldeo:

En este caso las zonas con tensiones superiores a 2 MPa se localizan en los puntos de elevación, tanto para desmoldeo vertical como horizontal.

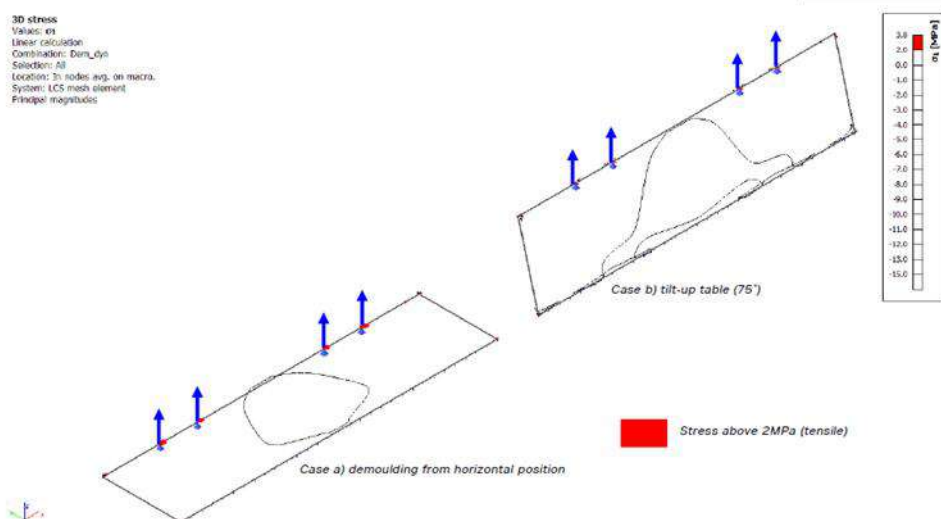
FE Analysis

Demoulding _ Principal stress (dynamic action + adhesion to the formwork vibration)

3D stress
Values: on
Linear calculation
Consideration: Dem_dyn
Selection: All
Location: In nodes eq. on macro.
System: LCS mesh element
Principal magnitudes

Lifting equipment	Dynamic factor
Tower crane, portal crane and mobile crane	1.3 (*)
Lifting and moving on flat terrain	2.5
Lifting and moving on rough terrain	≥ 4.0

(*) lower values may be appropriate in precast plants if special arrangements are made.



28

Figura 30. Diagrama de tensiones que superan los 2 MPa (incluidas la adherencia al molde y efectos dinámicos)

Servicio:

Las solicitaciones de servicio originan los siguientes gráficos de tensiones, con valores inferiores a los que puede resistir el hormigón reforzado con fibras, sin armadura adicional.

FE Analysis

In-service _ bending moment Mx

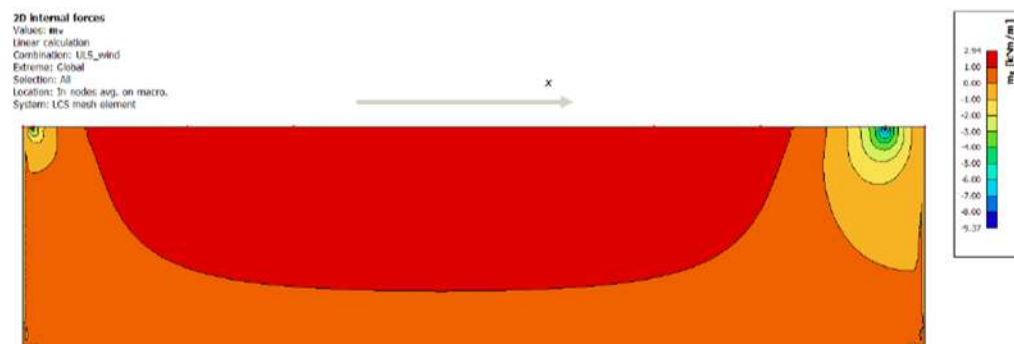


Figura 31. Gráfico de momento flector M_x en ELS

FE Analysis

In-service _ bending moment My

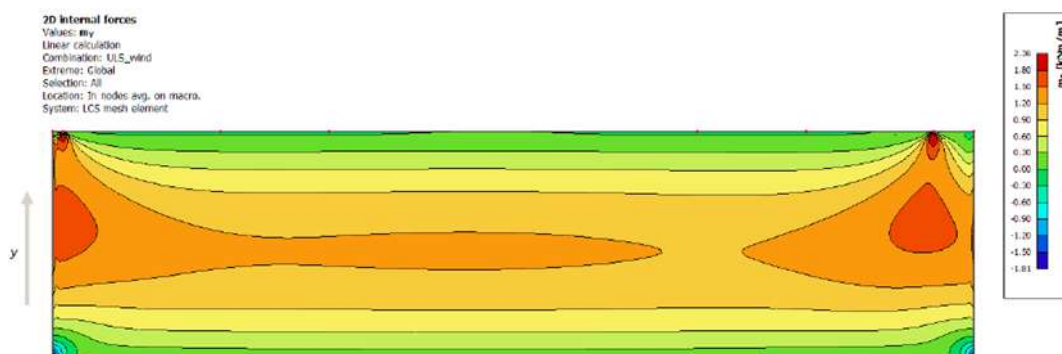


Figura 32. Gráfico de momento flector M_y en ELS

En el caso de este prototipo se podría sustituir toda la armadura por fibras metálicas, a excepción de las zonas localizadas en los puntos de elevación y anclajes.

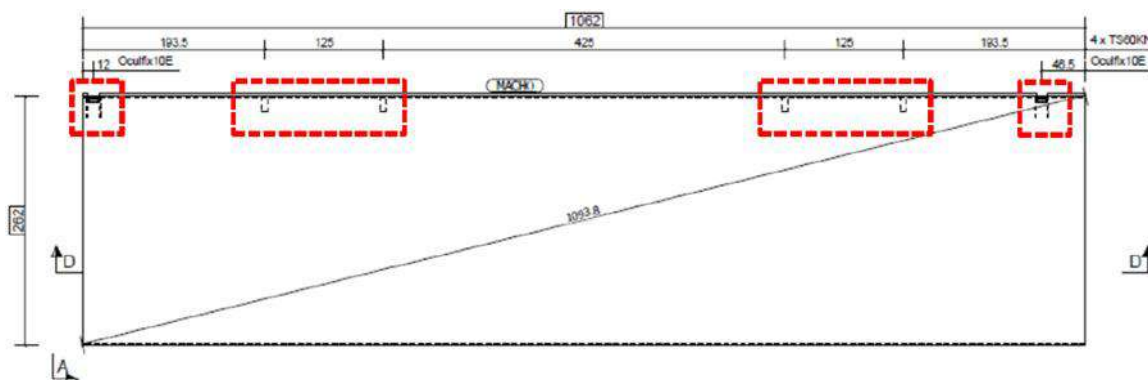


Figura 33. Gráfico de refuerzo necesario

7.1.3 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS DE LOS PROTOTIPOS DE PANELES

1. El empleo de fibras metálicas en hormigones convencionales permite reducir / eliminar la cantidad de armadura pasiva en las zonas con niveles de tensiones bajo, cercanos a la resistencia a tracción de la matriz del hormigón.
2. En aquellas zonas que se superan las tensiones admisibles de tracción del hormigón reforzado con fibras deberán preverse los refuerzos necesarios para garantizar la integridad estructural del elemento.
3. Esto hace pensar que el uso de hormigones reforzados con fibra es muy adecuado para reducir la cuantía de armadura pasiva en zonas de bajo nivel tensional, disponiendo la armadura necesaria sólo en las zonas que se requiera por cálculo.
4. Una de las ventajas del uso de hormigones reforzados con fibras es que se simplifican los trabajos de elaboración de ferralla y vertido de hormigón.
5. Dadas sus características es muy adecuado para piezas de bajo nivel tensional como paneles, nichos, tubos de alcantarillas, marcos, rellenos de capas de compresión, soleras y pavimentos, etc.

7.2 ANÁLISIS ECONÓMICO Y DE HUELLA DE CARBONO

Partiendo de las consideraciones anteriores sobre la sustitución de cuantía mínima por las fibras, se ha realizado una comparación económica estimada y la repercusión de la huella de carbono en distintas configuraciones de paneles prefabricados. En cada una de las tablas de resultados se ha remarcado en color rojo cuando la sustitución de la fibra no representa ventaja sobre la solución tradicional y viceversa en color verde.

7.2.1 PANEL EDIFICACIÓN INDUSTRIAL:

- Panel macizo de 10.6 m de largo, 2.50 m de ancho y 0.16 m de espesor

PANEL MACIZO DE 10.6X2.60X0.16

*assumptions subject to change per country dynamics

	Unit	Actual Value	New Value	
surface of the element	m2	27.56		
thickness	m	0.16		
Rebar cost	EUR/kg	0.80		
Dramix cost	EUR/kg	1.80		
Concrete cost	EUR/m3	70	70	no need to include unless concrete thickness is reduced
Labor Cost	EUR per 1 kg rebar	0.1		
	EUR per m²	9.33		

Panel sin aberturas - manteniendo espesor

Element Material Cost

		Traditional Solution	Dramix Solution
Traditional Reinf	kg per element	206.7	82.7
SFRC	kg/m3	0.0	30
Concrete	m3	4.410	4.410
Material Cost per element		474.03 €	612.93 €
Material cost saving			29%

Total Value Added

Material cost saving	29%
Total cost saving	14%
Sustainability Saving	-6%
Productivity Increase	-15%

Element Labor Cost

Select labor cost type

		Traditional Solution	Dramix Solution
Labor Cost	EUR per element	€ 257.21	€ 218.63
Total Cost per element	€	731.24	831.56
Total cost saving			14%

Productivity Increase

Total production time	hour/element	12.86	10.93
Productivity Increase			-15%

Sustainability Savings

	kgCO2e	Traditional Solution	Dramix Solution
Rebar/mesh	1	206.7	82.68
Dramix	0.689		91
Concrete	70	308.672	308.672
Total		515.372	482.498
Sustainability Saving			-6%

- Panel macizo de 3 m de largo, 2.5 m de ancho y 0.16 m de espesor

PANEL MACIZO DE 3x2.5x0.16			
		*assumptions subject to change per country dynamics	
Unit	Actual Value	New Value	
surface of the element	m2	7.50	
thickness	m	0.16	
Rebar cost	EUR/kg	0.80	
Dramix cost	EUR/kg	1.80	
Concrete cost	EUR/m3	70	70 no need to include unless concrete thickness is reduced
Labor Cost	EUR per 1 kg rebar	0.1	
	EUR per m²	12.67	
Panel sin aberturas - manteniendo espesor			
Element Material Cost		Total Value Added	
		Traditional Solution	Dramix Solution
Traditional Reinf	kg per element	56.3	22.5
SFRC	kg/m3	0.0	30
Concrete	m3	1.200	1.200
Material Cost per element		129.00 €	166.80 €
Material cost saving			29%
		Material cost saving	29%
		Total cost saving	11%
		Sustainability Saving	-6%
		Productivity Increase	-15%

Element Labor Cost			
Select labor cost type	EUR per m²		
		Traditional Solution	Dramix Solution
Labor Cost	EUR per element	€ 95.00	€ 80.75
Total Cost per element		€ 224.00	€ 247.55
Total cost saving			11%
Productivity Increase			
Total production time	hour/element	4.75	4.04
Productivity Increase			-15%
Sustainability Savings			
	kgCO2e	Traditional Solution	Dramix Solution
Rebar/mesh	1	56.25	22.5
Dramix	0.689		25
Concrete	70	84	84
Total		140.25	131.304
Sustainability Saving			-6%

- Panel macizo de 10.6 m de largo, 2.50 m de ancho y 0.13 m de espesor

PANEL MACIZO DE 10.6X2.60X0.16 CON REDUCCIÓN DE ESPESOR 3 cm				
*assumptions subject to change per country dynamics				
	Unit	Actual Value	New Value	
surface of the element	m2	27.56		Panel sin aberturas - menos 3 cm espesor
thickness	m	0.16	0.13	
Rebar cost	EUR/kg	0.80		
Dramix cost	EUR/kg	1.8		
Concrete cost	EUR/m3	100	100	no need to include unless concrete thickness is reduced
Labor Cost	EUR per 1 kg rebar	0.1		
	EUR per m2	9.33		

Element Material Cost

		Traditional Solution	Dramix Solution
Traditional Reinf	kg per element	206.7	82.7
SFRC	kg/m3	0.0	30
Concrete	m3	4.410	3.583
Material Cost per element		606.32 €	617.90 €
Material cost saving			2%

Total Value Added

Material cost saving	2%
Total cost saving	-3%
Sustainability Saving	-20%
Productivity Increase	-15%

Element Labor Cost

Select labor cost type **EUR per m2**

		Traditional Solution	Dramix Solution
Labor Cost	EUR per element	€ 257.21	€ 218.63
Total Cost per element		€ 863.53	€ 836.52
Total cost saving			-3%

Productivity Increase

Time to prepare rebar/m2: hours		1	0
Total production time	hour/element	12.86 €	10.93 €
Productivity Increase			-15%

Sustainability Savings

	kgCO2e	Traditional Solution	Dramix Solution
Rebar/mesh	1	206.7	82.68
Dramix	0.689		74
Concrete	240	1058.304	859.872
Total		1265.004	1016.608476
Sustainability Saving			-20%

7.2.2 PANEL EDIFICACIÓN RESIDENCIAL:

- Panel macizo de 5 m de largo, 3 m de ancho y 0.10 m de espesor

PANEL MACIZO DE 5X3x0.10				
*assumptions subject to change per country dynamics				
	Unit	Actual Value	New Value	Panel sin aberturas - manteniendo espesor
surface of the element	m2	15.00		
thickness	m	0.10		
Rebar cost	EUR/kg	0.80		
Dramix cost	EUR/kg	1.80		
Concrete cost	EUR/m3	70	70	no need to include unless concrete thickness is reduced
Labor Cost	EUR per 1 kg rebar	0.1		
	EUR per m²	35.23		
Element Material Cost				Total Value Added
Traditional Reinf	kg per element	112.5	45.0	Material cost saving 14%
SFRC	kg/m3	0.0	30	Total cost saving -7%
Concrete	m3	1.500	1.500	Sustainability Saving -17%
Material Cost per element		195.00 €	222.00 €	Productivity Increase -15%
Material cost saving			14%	

Element Labor Cost			
Select labor cost type	EUR per m²		
		Traditional Solution	Dramix Solution
Labor Cost	EUR per element	€ 528.41	€ 449.15
Total Cost per element		€ 723.41	€ 671.15
Total cost saving			-7%
Productivity Increase			
Total production time	hour/element	26.42	22.46
Productivity Increase			-15%
Sustainability Savings			
	kgCO2e	Traditional Solution	Dramix Solution
Rebar/mesh	1	112.5	45
Dramix	0.689		31
Concrete	70	105	105
Total		217.5	181.005
Sustainability Saving			-17%

- Panel macizo de 2 m de largo, 1 m de ancho y 0.08 m de espesor

PANEL MACIZO DE 2x1x0.08				
*assumptions subject to change per country dynamics				
	Unit	Actual Value	New Value	Panel sin aberturas - manteniendo espesor
surface of the element	m2	2.00		
thickness	m	0.10		
Rebar cost	EUR/kg	0.80		
Dramix cost	EUR/kg	1.80		
Concrete cost	EUR/m3	70	70	no need to include unless concrete thickness is reduced
Labor Cost	EUR per 1 kg rebar	0.1		
	EUR per m²	100.00		
Element Material Cost				Total Value Added
		Traditional Solution	Dramix Solution	
Traditional Reinf	kg per element	15.0	6.0	Material cost saving 14%
SFRC	kg/m3	0.0	30	Total cost saving -12%
Concrete	m3	0.200	0.200	Sustainability Saving -17%
Material Cost per element		26.00 €	29.60 €	Productivity Increase -15%
Material cost saving			14%	

Element Labor Cost			
Select labor cost type	EUR per m²		
		Traditional Solution	Dramix Solution
Labor Cost	EUR per element	€ 200.00	€ 170.00
Total Cost per element		€ 226.00	€ 199.60
Total cost saving			-12%
Productivity Increase			
Total production time	hour/element	10.00	8.50
Productivity Increase			-15%
Sustainability Savings			
	kgCO2e	Traditional Solution	Dramix Solution
Rebar/mesh	1	15	6
Dramix	0.689		4
Concrete	70	14	14
Total		29	24.134
Sustainability Saving			-17%

- Panel macizo de 5 m de largo, 3 m de ancho y 0.08 m de espesor

PANEL MACIZO DE 5x3x0.08				
*assumptions subject to change per country dynamics				
	Unit	Actual Value	New Value	Panel sin aberturas - menos 3 cm espesor
surface of the element	m2	15.00		
thickness	m	0.10	0.08	
Rebar cost	EUR/kg	0.80		
Dramix cost	EUR/kg	1.8		
Concrete cost	EUR/m3	100	100	no need to include unless concrete thickness is reduced
Labor Cost	EUR per 1 kg rebar	0.1		
	EUR per m2	11.05		
Element Material Cost				Total Value Added
		Traditional Solution	Dramix Solution	
Traditional Reinf	kg per element	112.5	45.0	Material cost saving -8%
SFRC	kg/m3	0.0	30	Total cost saving -11%
Concrete	m3	1.500	1.200	Sustainability Saving -24%
Material Cost per element		240.00 €	220.80 €	Productivity Increase -15%
Material cost saving			-8%	

Element Labor Cost			
Select labor cost type	EUR per m2		
		Traditional Solution	Dramix Solution
Labor Cost	EUR per element	€ 165.68	€ 140.83
Total Cost per element		€ 405.68	€ 361.63
Total cost saving			-11%
Productivity Increase			
Time to prepare rebar/m2: hours		1	0
Total production time	hour/element	8.28 €	7.04 €
Productivity Increase			-15%
Sustainability Savings			
	kgCO2e	Traditional Solution	Dramix Solution
Rebar/mesh	1	112.5	45
Dramix	0.689		25
Concrete	240	360	288
Total		472.5	357.804
Sustainability Saving			-24%

7.2.3 COMPARACIÓN DE LOS RESULTADOS

1. En ningún caso la sustitución de la malla de armadura pasiva por fibra ha resultado una reducción de costes de materia prima.
2. En el caso de los paneles de mayor espesor (edificación industrial) tampoco se observa mejoría en el coste total de ejecución.
3. Por el contrario, en el caso de paneles de pequeño espesor (edificación residencial) se consigue una mejoría en el coste total de ejecución.
4. En todos los casos se constata una mejoría apreciable en la sostenibilidad y los rendimientos productivos. Por tanto, son estos últimos los elementos de análisis más interesantes para la toma de decisiones.

8 CONTROL DE CALIDAD

8.1 CALIDAD DE LA FIBRA

El rendimiento siempre está vinculado al régimen de control de calidad aplicado a un producto. Las fibras de acero no son una excepción en este sentido. Puede resultar arriesgado confiar únicamente en las promesas de un fabricante. Por el contrario, las normas internacionales para la producción y el control de calidad del hormigón reforzado con fibras de acero se encuentran disponibles, como son la EN 14889-1 y la Norma ASTM A 820/A 820M. Dependiendo del país, las homologaciones locales pueden modificarlas o sustituirlas. Las plantas certificadas según ISO 9001 y el control de calidad según los requisitos de las normas y homologaciones mencionadas deben considerarse como el estado del arte y el mínimo que se debe aceptar hoy en día.

En particular, el marcado CE, relacionada con la norma EN 14889-1, permite una estimación rápida pero significativa de las propiedades de la fibra. En esa etiqueta se debe mostrar información importante, como datos geométricos, resistencia a la tracción y relación l/d . Además, se debe indicar una dosis mínima que debe declararse y que está relacionado con un comportamiento mínimo de resistencia residual requerido establecido en la norma EN 14651, para que pueda ser usado en elementos estructurales. En la Tabla 2 se ofrecen ejemplos de las dosificaciones mínimas para alcanzar el límite inferior de resistencia residual para aplicaciones estructurales:

Tabla 2. Tabla 2: mínimo fibra dosificación para Marcado CE de acuerdo con EN 14889-1

Tipo de Fibra	Longitud (mm)	Diámetro (mm)	Esbeltez	Dosificación (kg/m3)
3D 45/50BL	50	1.05	45	20
3D 80/60BG	60	0.75	80	10
4D 80/60GG	60	0.75	80	10
4D 80/60BGE	60	0.75	80	10
4D 65/60BG	60	0.90	65	15
4D 65/35BG	35	0.55	65	15

De acuerdo con la norma EN 14889-1, "considerar las fibras de acero para aporte estructural es dónde al adicionarse al hormigón están diseñadas para contribuir a la capacidad de carga de un elemento". Pero también especifica que existen fibras de acero para usos distintos de los estructurales. Por lo tanto, hay que tener cuidado de no confundir las fibras con la declaración de conformidad de las fibras con un

certificado CE de conformidad. La diferencia real entre esos productos puede ser significativa.

Tabla 3. Responsabilidades de control de calidad, de acuerdo al sistema “1” y “3”

	Responsibilities for quality control [1]	
	Structural use System “1”	Other uses System “2”
Initial type testing	product certification body	notified test laboratory
Initial inspection of factory and of FPC	product certification body	manufacturer
Continuous surveillance	product certification body	manufacturer
Assessment and approval of FPC	product certification body	manufacturer
EC Certificate of conformity	product certification body	n.a.
EC Declaration of conformity	manufacturer	manufacturer

Para evitar cualquier riesgo potencial, la fibra de acero debe cumplir siempre el sistema “1”, testeado por un certificado CE de conformidad.

8.2 **CALIDAD DEL HORMIGÓN**

Unas fibras de acero de alta calidad es el primer paso hacia un hormigón con fibras de acero de alta calidad. Sin embargo, se requiere más esfuerzo que aplicar el control de calidad normal para el hormigón ordinario y simplemente añadir fibras a la mezcla. Hoy en día, muchos proveedores de hormigón premezclado ofrecen hormigón con fibras de acero; los más avanzados de ellos incluso con una garantía de rendimiento para las propiedades específicas del hormigón con fibras de acero. Se pueden distinguir dos enfoques diferentes. Los principios fundamentales se explican en los siguientes capítulos.

8.3 **CONTROL DE RESISTENCIA POST-FISURA**

La gran ventaja de realizar pruebas de resistencia post-fisura es que se obtiene información de primera mano sobre las propiedades del material del hormigón realmente utilizado. Para las pruebas de control de calidad, se prefiere un tamaño de muestra con baja dispersión. De lo contrario, se necesitarán más muestras o tolerancias más amplias. A pesar de que las pruebas de vigas, como la EN 14651, se consideran el método estándar de evaluación del rendimiento en la actualidad, la dispersión intrínseca de este método de prueba siempre requiere una cantidad suficiente de muestras.

Adicionalmente, se requiere personal experimentado de laboratorio y maquinaria adecuada que mida la carga después de generarse la primera fisura (dispositivo close-loop), los ensayos no se pueden realizar in-situ y se debe esperar 28 días para los resultados. Otras regulaciones permiten otro enfoque, desarrollado a través de un control del proceso.

8.4 CONTROL DEL PROCESO

La creciente experiencia en el control de la calidad ha dado lugar a la creación de otra forma de controlar el hormigón con fibras de acero. El enfoque se ha desplazado del control del producto final al control de todo el proceso de producción. El principio básico es la idea de que las propiedades del hormigón con fibras de acero no cambiarán si no se modifican las propiedades de la matriz del hormigón ni el tipo, la cantidad y la distribución de las fibras de acero.

Basándose en un ensayo de tipo inicial de muestras de hormigón con fibra de acero endurecido, el control futuro se puede comprobar si:

- Los materiales constituyentes siguen siendo los mismos (tipo y clase de resistencia del cemento, naturaleza de los agregados, aditivos, etc.),
- la composición del hormigón no tiene cambios (compararlo con mezcla diseño de la prueba inicial),
- equipos o personal de dosificación en obra adecuados (controlar regularmente, especialmente equipos de dosificación de fibra),
- las fibras de acero son del mismo tipo (tipo de fibra, proveedor y certificado de conformidad),
- la referencia correcta de fibra de acero con el hormigón (compárese con el tipo de fibra utilizado en la prueba inicial),
- cantidad/dosificación correcta de fibras de acero en el mezclado con el hormigón (prueba de lavado, equipos de verificación 3D eye/otros),
- Las fibras de acero se distribuyen de forma homogénea (prueba de lavado a determinados intervalos por unidad de suministro, 3D eye/otros métodos).

Siempre que se produzca una modificación importante en el proceso de producción, se deberá repetir la prueba de inicio/test base y utilizarla como nueva referencia para el suministro futuro. Independientemente de ello, se deberá realizar una prueba de conformación periódica como repetición de la prueba de inicio al menos una vez al año o en caso de duda.

Cabe comentar que incluso se pueden introducir factores de seguridad más bajos para un producto con un control de proceso mejorado.

Los grandes beneficios del enfoque basado en el control de procesos son los resultados en “tiempo real” en el sitio, los procedimientos simples y los niveles aceptables de esfuerzo. Es obvio que la práctica preferirá el enfoque de control de procesos a las pruebas de resistencia post-fisura continuas.

8.4.1 ORIENTACIÓN DE LA FIBRA

La orientación de las fibras dentro del elemento está influenciada por la interacción del molde y del hormigón (su consistencia, composición, distancia de instalación, tipo de colocación, entre otros). Por lo general, no se considera importante la orientación de las fibras en los elementos dado que se buscan que estén distribuidas isotrópicamente en el elemento.

Para ciertos elementos prefabricados, en especial con espesores delgados o dovelas de revestimientos finales de túneles, se puede aprovechar dependiendo del tipo de colocación del hormigón, que las fibras queden distribuidas en cierta dirección para aprovechar o coincidir el aporte de las fibras en la dirección que se produce el momento. Esta consideración se revisa por cliente y por elemento, se incluye en los cálculos principalmente a cortante y se recomienda realizar calibraciones en aplicaciones reales.

Para la mayoría de las aplicaciones actuales, la orientación de la fibra parece ser insignificante o incluso beneficiosa.

8.4.2 VARIABILIDAD ESTADÍSTICA DE ENSAYOS

La repetición de un ensayo de deflexión controlada con un conjunto de muestras tomadas del mismo hormigón dará resultados diferentes. Incluso los valores medios de una serie de muestras pueden mostrar alguna variación, dependiendo del número real de muestras en un conjunto. La variación o desviación estándar dentro de un conjunto se reducirá al aumentar el número de muestras. Este es un principio fundamental de la estadística.

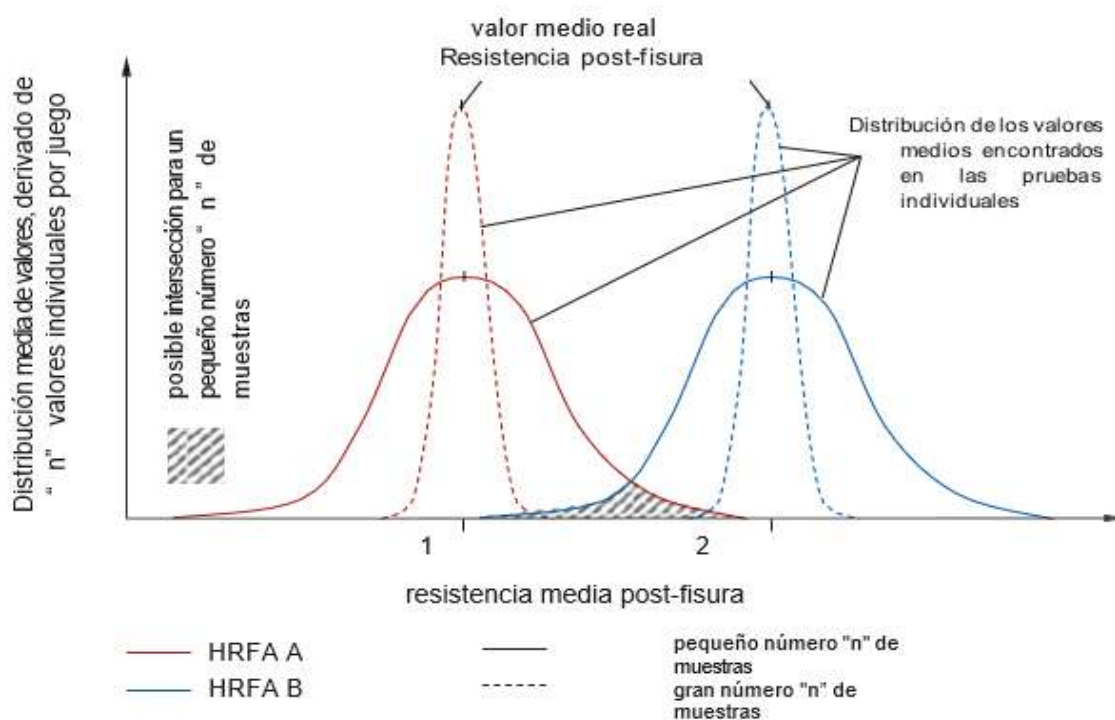


Figura 34. Distribución promedio de resistencia post-fisura para dos diferentes hormigones reforzados con fibra dependiendo del número de muestras

Por lo tanto, siempre se debe tener cuidado al comparar dos muestras de hormigones reforzados con fibra de acero, como se explica en la imagen 15. Esto es importante cuando se realizan pruebas de verificación de resistencia post-fisura, como la EN 14651.

8.4.3 MÉTODO DE MEZCLADO

Como comentamos anteriormente, una de las ventajas de los prefabricados es que mejoran el proceso constructivo de una obra y este proceso no puede ser interrumpido al agregar las fibras de acero.

El método tradicional de introducir las fibras a la mezcla de hormigón en plantas de producción de prefabricados es en la banda de agregados, que se pueden agregar de manera manual o a través de una cinta transportadora.

Pero también existen equipos que pueden ser acoplados al proceso como son los Boosters. Cabe aclarar, que estos equipos hacen más que transportar las fibras, sino que las dosifican, haciendo verificación de la cantidad de fibras que se agregan en función del volumen del hormigón.



Figura 35. Dosificador Booster

Las fibras vienen en presentación en bolsas de 20 kg o de 1 ton.

9. CONCLUSIONES

El uso de fibras de acero en el hormigón presenta múltiples ventajas que van desde la mejora en la resistencia y durabilidad del material hasta la reducción de costes y tiempos de ejecución. La incorporación de estas fibras permite una distribución más homogénea de los esfuerzos, lo que se traduce en un mejor comportamiento del hormigón ante cargas y fisuras. Además, la flexibilidad y adaptabilidad de las fibras de acero las hacen ideales para una amplia variedad de aplicaciones, desde paneles arquitectónicos hasta elementos estructurales más complejos.

La implementación de fibras de acero también contribuye significativamente a la sostenibilidad en la construcción. Al reducir la necesidad de refuerzos tradicionales y optimizar el uso de materiales, se disminuye la huella de carbono asociada a la producción y transporte de estos elementos. Esto no solo es beneficioso para el medio ambiente, sino que también responde a las crecientes demandas de normativas y certificaciones ambientales que buscan promover prácticas más responsables en el sector de la construcción.

Para poder beneficiarse de estas ventajas, hay que estudiar cada caso y se requiere un conocimiento técnico y una planificación adecuados. La selección del tipo de fibra, su dosificación y la metodología de mezclado son factores críticos que deben ser considerados para garantizar el rendimiento óptimo del hormigón reforzado. Por ello, es fundamental contar con el asesoramiento de especialistas y seguir las recomendaciones establecidas en las normativas vigentes.

En conclusión, el hormigón reforzado con fibras de acero representa una solución innovadora y eficiente para la construcción moderna. Su capacidad para mejorar las propiedades mecánicas del hormigón, junto con sus beneficios económicos y ambientales, lo convierten en una opción a considerar en proyectos que buscan combinar calidad, sostenibilidad y eficiencia.