Anejo 7

Recomendaciones para la utilización de hormigón con fibras

Contenidos del anejo

1 ALCANCE 575

2 BASES DE PROYECTO 576

2.1. ACCIONES 576

2.1.1. Valores característicos de las acciones 576

2.1.1.1. Valores característicos de las acciones permanentes 576

2.2. MATERIALES Y GEOMETRÍA 576

2.2.1. Materiales 576

2.2.1.1. Coeficientes parciales de seguridad de los materiales 576

3 ANÁLISIS ESTRUCTURAL 576

3.1. ANÁLISIS ESTRUCTURAL 576

4 PROPIEDADES TECNOLÓGICAS DE LOS MATERIALES 577

4.1. MATERIALES 577

4.1.1. Hormigones 578

4.1.1.1. Composición 578

4.1.1.2. Condiciones de calidad 579

4.1.1.3. Características mecánicas 579

4.1.1.4. Valor mínimo de la resistencia 581

4.1.1.5. Docilidad del hormigón 581

5 DURABILIDAD 582

5.1. DURABILIDAD 582

5.1.1. Durabilidad del hormigón y de las armaduras 582

5.1.1.1. Recubrimientos 582

5.1.1.2. Empleo de hormigón reforzado con fibras 582

5.1.1.3. Resistencia del hormigón frente a la erosión 582

6 CÁLCULO 582

6.1. DATOS DE LOS MATERIALES PARA EL PROYECTO 582

6.1.1. Características del hormigón 582

6.1.1.1. Tipificación de los hormigones 582

6.1.1.2. Resistencia de cálculo del hormigón 583

6.1.1.3. Diagrama tensión - deformación en tracción de cálculo del hormigón con fibras 583

6.1.1.4. Factor de orientación 586

6.1.1.5. Fluencia del hormigón 587

6.1.1.6. Coeficiente de Poisson 587

6.2. CÁLCULOS RELATIVOS A LOS ESTADOS LÍMITE ÚLTIMOS 587

6.2.1. Estado Límite de Agotamiento frente a solicitaciones normales 587

6.2.1.1. Hipótesis básicas 587

6.2.1.2. Dominios de deformación 587

6.2.1.3. Efecto de confinamiento del hormigón 587

6.2.1.4. Flexión simple o compuesta 587

6.2.1.5. Tracción simple o compuesta 588

6.2.1.6. Cuantías geométricas mínimas 588

6.2.2. Estado Límite de Agotamiento frente a cortante 588

6.2.2.1. Consideraciones generales 588

6.2.2.2. Piezas de hormigón reforzado con fibras sin y con armadura de cortante 588

6.2.2.3. Armaduras transversales 589

6.2.2.4. Armaduras longitudinales 589
6.2.2.5. Rasante entre alas y alma de una viga 589
6.2.3. Estado Límite de Agotamiento frente a punzonamiento 590
6.2.3.1. Losas de hormigón reforzado con fibras 590
6.2.4. Estado Límite de Agotamiento por esfuerzo rasante en juntas entre hormigones 590
6.2.4.1. Disposiciones relativas a las armaduras 590

7 EJECUCIÓN 590

7.1. EJECUCIÓN 590
7.1.1. Procesos de elaboración, armado y montaje de armaduras 590
7.1.1.1. Anclaje de las armaduras pasivas. Generalidades 590
7.1.2. Elaboración y puesta en obra del hormigón 590
7.1.2.1. Fabricación del hormigón 590
7.1.2.1.1. Dosificación de materiales componentes 590
7.1.2.1.2. Agua 590
7.1.2.1.3. Fibras 590
7.1.2.2. Equipos de amasado 591
7.1.2.3. Amasado del hormigón 591
7.1.2.4. Suministro del hormigón 591
7.1.2.5. Puesta en obra del hormigón 591
7.1.2.5.1. Vertido y colocación del hormigón 591
7.1.2.5.2. Compactación del hormigón 591

8 CONTROL 592

8.1. CONTROL DE LA CONFORMIDAD DE LOS PRODUCTOS 592
8.1.1. Criterios específicos para la comprobación de la conformidad de los materiales componentes del hormigón 592
8.1.1.1. Otros componentes del hormigón 592
8.1.1.1.1. Especificaciones 592
8.1.1.1.2. Ensayos 592
8.1.1.1.3. Criterios de aceptación o rechazo 592
8.1.2. Control del hormigón 592
8.1.2.1. Criterios generales para el control de la conformidad de un hormigón 592
8.1.2.2. Realización de los ensayos 593
8.1.2.2.1. Ensayos de resistencia del hormigón 593
8.1.2.2.2. Control de la resistencia del hormigón al 100 por 100 593
8.1.2.2.3. Control indirecto de la resistencia del hormigón 593
8.1.2.3. Decisiones derivadas del control 593
8.1.2.4. Ensayos de información complementaria del hormigón 594
8.2. CONTROL DE LA EJECUCIÓN 594
8.2.1. Criterios generales para el control de la ejecución 594
8.2.2. Ensayos previos y característicos del hormigón 594
8.2.2.1. Ensayos previos 594
8.2.2.2. Ensayos característicos de resistencia 595

1 Alcance

Las prescripciones y requisitos incluidos en el articulado de este Código se refieren a hormigones que no incorporan fibras en su masa. Por ello, se precisa establecer unas recomendaciones específicas y complementarias cuando, para mejorar algunas prestaciones ya sea en estado fresco, en primeras edades o en estado endurecido, se empleen fibras en el hormigón, las cuales pueden modificar algunas de sus propiedades.

Quedan expresamente fuera de los objetivos de este anejo:

- Los hormigones fabricados con fibras distintas a las que constan en este anejo. como aceptables para su uso en hormigones.
- Los hormigones en los que la distribución y/u orientación de las fibras es forzada intencionadamente.

Los hormigones con dosificación en fibras superior al 1,5% en volumen deberán ser objeto de un estudio específico.

A los efectos de este anejo, los hormigones reforzados con fibras (HRF), se definen como aquellos hormigones que incluyen en su composición fibras cortas, discretas y aleatoriamente distribuidas en su masa. El planteamiento es general para todo tipo de fibras, si bien hay que tener presente que la base fundamental del conocimiento de que se dispone es para fibras de acero, lo que se refleja en cierta medida en el mismo.

La aplicación de estos hormigones puede ser con finalidad estructural o no estructural. El empleo de fibras en el hormigón tiene finalidad estructural cuando se utiliza su contribución en los cálculos relativos a alguno de los estados límite últimos o de servicio y su empleo puede implicar la sustitución parcial o total de armadura en algunas aplicaciones. Se considerará que las fibras no tienen función estructural, cuando se incluyan fibras en el hormigón con otros objetivos, como la mejora de la resistencia al fuego o el control de la fisuración a primeras edades.

La adición de fibras es admisible en hormigones en masa, armados o pretensados, y se puede hacer con cualquiera de los diversos sistemas, sancionados por la práctica, de incorporación de las fibras al hormigón y, en el caso de que así no se hiciera, debe explicitarse el sistema utilizado. Se contempla la confección de hormigones con fibras con carácter, en estado fresco, de autocompactabilidad.

En el anejo se presenta una relación de referencias normativas nacionales e internacionales relacionadas con el tema de este anejo y que pueden servir de apoyo o referencia.

En cada plano de la estructura deberá figurar un cuadro de tipificación de los hormigones, incluyendo las condiciones adicionales para los hormigones con fibras que se señalan en el Artículo 33 de este Código.

La tipificación propuesta en este anejo refleja las especificaciones básicas que se exigen cuando las fibras tienen finalidad estructural. Además de las propiedades que quedan implícitas en la tipificación del hormigón según el apartado 6.1.1 de este anejo, el pliego de prescripciones técnicas particulares deberá incluir aquellas características adicionales exigidas al hormigón con fibras, así como los métodos de ensayo para su verificación y los valores que deban alcanzar dichas características. En todo caso, deberá indicarse una propuesta de dosificación con los siguientes datos:

- Dosificación de fibras en kg/m^3
- Tipo, dimensiones (longitud, diámetro efectivo, esbeltez), forma, resistencia a tracción de la fibra (en N/mm^2) y módulo de elasticidad (en N/mm^2), en el caso de fibras con finalidad estructural.

Sin embargo la efectividad de las distintas fibras disponibles en el mercado puede ser muy variable, y las condiciones de disponibilidad del producto o las condiciones de la obra pueden recomendar una modificación de alguna de las características especificadas en el pliego, ya sea de tipo, de dimensiones

y, por ende, de la dosificación necesaria de fibras para obtener las mismas propiedades. Por ello, cuando la designación del hormigón sea por propiedades, la dosificación indicada en el pliego de prescripciones técnicas particulares debe entenderse como orientativa. Antes del inicio del hormigonado, el suministrador propondrá una dosificación de obra, y realizará los ensayos previos de acuerdo con el apartado 8.2.2 de este anejo. A la vista de los resultados, la dirección facultativa obra aceptará la dosificación propuesta o exigirá nuevas propuestas.

En lo que sigue, se detallan los complementos a los diversos artículos del Código necesarios para poder realizar y tener en cuenta la incorporación de fibras al hormigón.

2 Bases de proyecto

2.1. Acciones

2.1.1. Valores característicos de las acciones

2.1.1.1. Valores característicos de las acciones permanentes

La densidad y las dosificaciones usuales de las fibras no llevan a modificar los valores del peso específico característico del hormigón con fibras respecto al hormigón sin ellas.

2.2. Materiales y geometría

2.2.1. Materiales

2.2.1.1. Coeficientes parciales de seguridad de los materiales

Para los Estados Limite Últimos y para los Estados Límite de Servicio se mantienen los mismos coeficientes parciales de seguridad dados en los Anejos 19 y 21.

3 Análisis estructural

3.1. Análisis estructural

La incorporación de fibras modifica el comportamiento no lineal del hormigón estructural, especialmente en tracción, estado en el cual las secciones fisuradas también contribuyen a resistir tracciones. Esta colaboración resistente se puede tener en cuenta empleando alguno de los diagramas constitutivos presentados en el apartado 6.1.1.3 de este anejo.

Asimismo, dada la ductilidad a nivel seccional que introduce la presencia de fibras, se consideran válidos los principios para la aplicación del método de análisis lineal con redistribución limitada y de los métodos de cálculo plástico, cuando se comprueben los requisitos para la aplicación de los mismos, especificados en el Capítulo 5 de los Anejos 19 y 21.

Los momentos plásticos o últimos se obtendrán de acuerdo con el apartado 6.1.1 de este anejo y, para placas macizas, se considerará que las líneas de rotura tienen suficiente capacidad de rotación si la profundidad de la fibra neutra en ELU de flexión simple es menor que 0,3d (ó 0,25h en secciones de hormigón reforzadas exclusivamente con fibras).

El empleo de fibras estructurales puede aumentar la anchura de las bielas de compresión, lo cual puede ser tenido en cuenta en los modelos de bielas y tirantes. Por consiguiente, la combinación de armadura convencional y fibras puede suponer una alternativa para reducir la cuantía de armadura convencional en regiones D donde se presente una alta densidad de armadura que dificulte el correcto hormigonado del elemento.

4 Propiedades tecnológicas de los materiales

4.1. Materiales

Fibras. Definiciones:

Las fibras son elementos de corta longitud y pequeña sección que se incorporan a la masa del hormigón a fin de conferirle ciertas propiedades específicas.

De una manera general, se pueden clasificar como fibras estructurales, aquellas que proporcionan una mayor energía de rotura al hormigón en masa (en el caso de las fibras estructurales, la contribución de las mismas puede ser considerada en el cálculo de la respuesta de la sección de hormigón), o como fibras no estructurales, aquellas que sin considerar en el cálculo esta energía suponen una mejora ante determinadas propiedades como, por ejemplo, el control de la fisuración por retracción, incremento de la resistencia al fuego, abrasión, impacto y otros.

Las características geométricas de las fibras, longitud (l_f), diámetro equivalente (d_f), y esbeltez (λ), se establecerán de acuerdo con las normas UNE-EN 14889-1, UNE-EN 14889-2 y UNE 83516. Por otro lado, de acuerdo con su naturaleza, las fibras se clasifican en:

- Fibras de acero.
- Fibras poliméricas.
- Fibras de vidrio resistentes a los álcalis.

La efectividad de las fibras puede valorarse por medio de la resistencia residual a la tracción por flexión, correspondiente a aberturas de fisura de 0,5 y 2,5 mm, obtenidas de acuerdo a la norma UNE-EN 14651. De forma alternativa, el autor del proyecto o la dirección facultativa pueden indicar el empleo de la norma UNE 83515 (ensayo Barcelona con control por desplazamiento circunferencial o desplazamiento del pistón) con objeto de reducir la dispersión y el tiempo de ensayos o de la norma UNE 83510.

Si bien no se especifica un contenido mínimo en fibras, cuando se utilicen fibras con función estructural no es recomendable utilizar dosificaciones inferiores al 0,25% en volumen del hormigón (equivale a 20 kg/m^3 de fibras de acero o 2,5 kg/m^3 de fibras poliméricas).

El límite superior del contenido en fibras se fija en el 1,5% en volumen del hormigón. El empleo de dosificaciones muy elevadas exige modificar sensiblemente la estructura granular del hormigón. Para estos casos, se recomienda la consulta de bibliografía especializada.

Fibras de acero

Estas fibras deberán ser conformes con la norma UNE-EN 14889-1 y, según el material base utilizado en su fabricación, se clasifican en:

Grupo I: alambres estirados en frío.

Grupo II: láminas cortadas.

Grupo III: extractos fundidos.

Grupo IV: conformados en frío.

Grupo V: aserrados de bloques de acero.

La forma de la fibra tiene una incidencia importante en las características adherentes de la fibra con el hormigón y puede ser muy variada: rectas, onduladas, corrugadas, conformadas en extremos de distintas formas, etc.

Cuando las fibras sean suministradas con un recubrimiento (por ejemplo zinc), debe declararse el tipo y la cantidad del mismo, expresada en g/cm^2.

La longitud de la fibra (l_f) se recomienda sea, como mínimo, 2 veces el tamaño del árido mayor. Es usual el empleo de longitudes de 2,5 a 3 veces el tamaño máximo de árido. Cuando el hormigón se coloque por bombeo, la longitud de la fibra debe ser inferior a 2/3 del diámetro del tubo. Sin embargo, la longitud de la fibra debe ser suficiente para dar una adherencia necesaria a la matriz y evitar arrancamientos con demasiada facilidad.

A igualdad de longitud, las fibras de pequeño diámetro aumentan el número de ellas por unidad de peso y hacen más denso el entramado o red de fibras. El espaciamiento entre fibras se reduce cuando la fibra es más fina, siendo más eficiente y permitiendo, en general, una mayor capacidad de rotación en las secciones, así como un mayor grado de redistribución de esfuerzos en estructuras hiperestáticas.

Fibras poliméricas

Están formadas por un material polimérico (polipropileno, polietileno de alta densidad, aramida, alcohol de polivinilo, acrílico, nylon, poliéster) extrusionado y posteriormente cortado. Estas pueden ser adicionadas homogéneamente al hormigón, mortero o pasta. Se rigen por la norma UNE-EN 14889-2 y, según su forma física, se clasifican en:

Clase I: Micro fibras: < 0,30 mm de diámetro: a) mono-filamentosas, y b) fibrilosas.

Clase II: Macro fibras: > 0,30 mm de diámetro.

Las macro-fibras pueden colaborar estructuralmente, siempre que su longitud esté comprendida entre 20 mm y 60 mm, y que la longitud de las fibras sea como mínimo 3 veces el tamaño máximo del árido.

Las micro-fibras se emplean para reducir la fisuración por retracción plástica del hormigón, especialmente en pavimentos y soleras, pero no pueden asumir ninguna función estructural. También se utilizan para mejorar el comportamiento frente al fuego, siendo conveniente en este caso que el número de fibras por kg sea muy elevado.

Además de por sus características físico-químicas, las micro-fibras se caracterizan por su frecuencia de fibra, que indica el número de fibras presentes en 1 kg, y que depende de la longitud de fibra y muy especialmente de su diámetro.

Fibras de vidrio resistentes a los álcalis

Este tipo de fibras podrán emplearse siempre que se garantice un comportamiento adecuado durante la vida útil del elemento estructural, en relación con los problemas potenciales de deterioro de este tipo de fibras como consecuencia de la alcalinidad del medio.

La fibra de vidrio se emplea habitualmente para la fabricación de mortero reforzado con fibra, conocido como GRC por sus siglas en inglés, en cuya composición entra solo árido fino, generalmente arena silícea, y no árido grueso.

Dado que los HRF pueden experimentar importantes reducciones de resistencia y tenacidad debido a la exposición al medio ambiente, se deberán tomar las medidas adecuadas tanto sobre la fibra como sobre la matriz cementícea para su protección.

Se permite el empleo de mezclas de fibras de distinta naturaleza y/o tamaño, denominándose hormigones reforzados con mezclas de fibras. Estas combinaciones se han mostrado eficaces para mejorar las prestaciones del hormigón, obteniéndose efectos de sinergia entre los distintos tipos de fibra combinados. Esta combinación no se aconseja en el caso de las fibras de vidrio.

4.1.1. Hormigones

4.1.1.1. Composición

Cuando las fibras utilizadas sean metálicas, el ion cloruro total aportado por los componentes no excederá del 0,4% del peso del cemento.

4.1.1.2. Condiciones de calidad

Cuando se utilicen fibras, se incluirá entre las condiciones o características de calidad exigidas al hormigón en el pliego de prescripciones técnicas particulares, la longitud máxima de las fibras.

Cuando las fibras tengan función estructural, se incluirán asimismo 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 de este anejo.

Cuando se utilicen fibras con otras funciones, se especificarán los métodos para verificar la adecuación de las fibras a tal fin.

4.1.1.3. Características mecánicas

La resistencia del hormigón a flexotracción, a los efectos de este Código, se refiere a la resistencia de la unidad de producto o amasada y se obtiene a partir de los resultados de ensayo de rotura a flexotracción, en número igual o superior a tres, realizados sobre probetas prismáticas de ancho igual a 150 mm altura igual a 150 mm y longitud total entre 550 y 700 mm, de 28 días de edad, fabricadas, conservadas y ensayadas de acuerdo con la norma UNE-EN 14651. La distancia entre puntos de soporte deberá ser de 500 mm.

Cuando el elemento a diseñar tenga un canto inferior a 12,5 cm, o cuando el hormigón presente endurecimiento a flexión con resistencia residual a flexotracción f_{R1} superior a la resistencia a tracción f_{ct}, se recomienda que las dimensiones de la probeta y el método de preparación, se adapten para simular el comportamiento real de la estructura, y el ensayo se realice en probetas no entalladas.

Para elementos estructurales con un comportamiento sustancialmente diferente al de la viga, pueden utilizarse otros tipos de ensayos alternativos que sean más representativos de la respuesta del material, siempre y cuando vengan contrastados por una campaña experimental concluyente. Cuando la desviación entre los resultados de una misma unidad de producto sobrepase ciertos límites, debe realizarse una verificación del proceso seguido a fin de conceder representatividad a los mismos.

Al efecto de asegurar la homogeneidad de una misma unidad de producto, el recorrido relativo de un grupo de tres probetas (diferencia entre el mayor resultado y el menor, dividida por el valor medio de las tres), tomadas de la misma amasada, no podrá exceder el 35%.

Los criterios planteados en el Código para obtener el valor de la resistencia a tracción $f_{ct,}$ a partir de los resultados del ensayo de tracción indirecta, son válidos siempre que se refieran al límite de proporcionalidad.

En solicitaciones de compresión, el diagrama tensión-deformación del hormigón con fibras no se modifica respecto al del articulado, ya que se puede considerar que la adición de las fibras no varía de forma significativa el comportamiento del hormigón en compresión.

Del ensayo propuesto en la norma UNE-EN 14651 se obtiene el diagrama carga-abertura de fisura del hormigón (figura A7.4.1). A partir de los valores de carga correspondiente al límite de proporcionalidad (F_L) y a las aberturas de fisura 0,5 mm y 2,5 mm (F_1 y F_3 respectivamente), se obtiene el valor de resistencia a flexotracción ($f_{ct,fl}$) y los valores de resistencia residual a flexotracción correspondientes, $f_{R,1}$ y $f_{R,3}$.

El cálculo de los valores de resistencia a flexotracción y de resistencia residual a flexotracción según la citada norma UNE-EN 14651, se realiza asumiendo una distribución elástico lineal de tensiones en la sección de rotura.

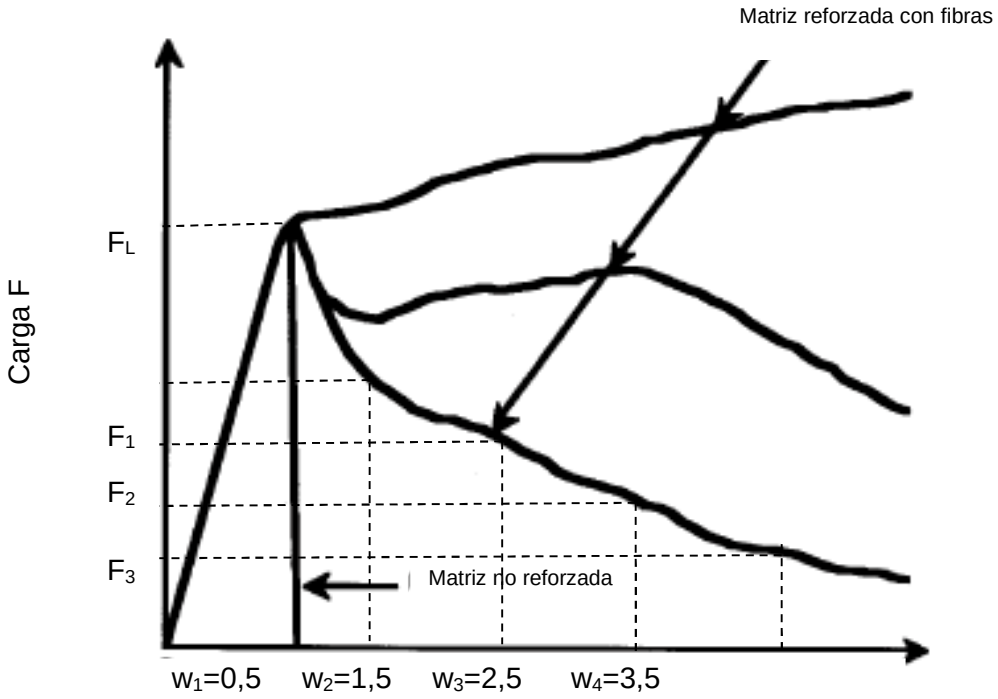


Figura A7.4.1 Diagrama tipo carga apertura de fisuras

A partir de estos valores se determinará el diagrama de cálculo a tracción según lo indicado en el apartado 6.1.1 de este anejo. También se podrán incorporar otros diagramas que definan las ecuaciones constitutivas de forma directa, siempre y cuando los resultados vengan avalados por campañas concluyentes de tipo experimental y bibliografía especializada.

Alternativamente, se puede emplear la resistencia a fisuración, tenacidad y resistencia residual a tracción del hormigón reforzado con fibras, propiedades obtenidas de acuerdo a la norma UNE-EN 14651. Se puede asimismo emplear la norma UNE 83515 en sustitución de la norma UNE-EN 14651, previa calibración de las correlaciones entre ambos ensayos para el hormigón de obra. También se admite la adopción de probetas con otras formas y dimensiones, así como la simplificación del procedimiento de ensayo, siempre y cuando estas modificaciones hayan sido validadas mediante comprobación experimental propia o con base en la literatura. El recorrido relativo de un grupo de probetas (diferencia entre el mayor resultado y el menor, dividida por el valor medio), tomadas de la misma amasada, no podrá exceder del 35%.

Tal y como indica la figura A7.4.2 del ensayo propuesto en la norma UNE 83515, se obtiene el diagrama que relaciona la carga aplicada y el desplazamiento circunferencial total del hormigón (TCOD). A partir de los valores de carga correspondiente a la carga de fisuración (P_f), se puede estimar el valor de resistencia a tracción (f_{ct}). Asimismo, se pueden obtener resistencias residuales a tracción (f_{ctRx}) correspondientes a una determinada deformación circunferencial (R_x).

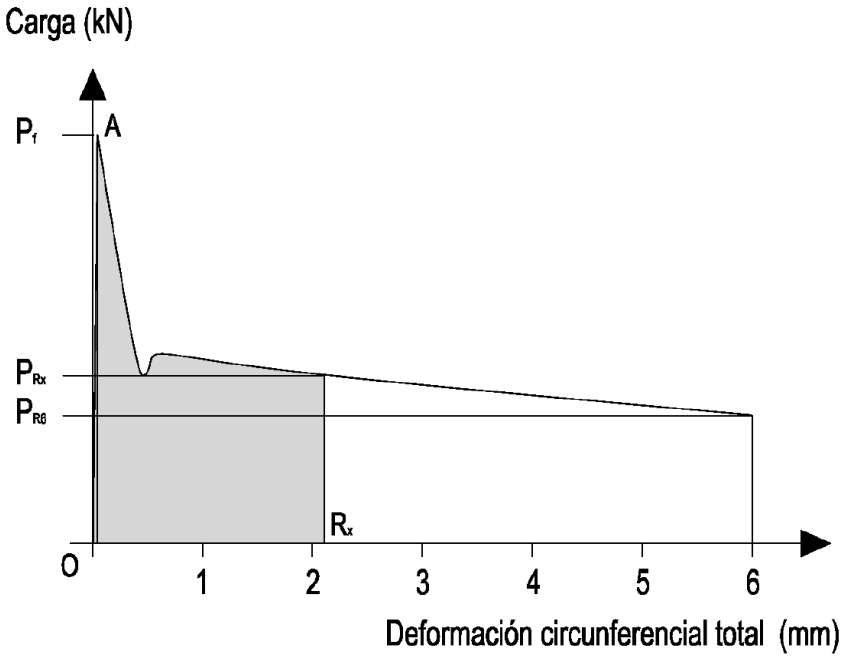


Figura A7.4.2 Diagrama tipo carga – desplazamiento circunferencial total (mm)

Existe bibliografía específica que permite correlacionar los resultados de los ensayos realizados con las normas UNE-EN 14651 y UNE 83515 para hormigones con distintos tipos de fibras. Asimismo, se pueden establecer correlaciones experimentales entre ambos ensayos con el fin de emplear el ensayo UNE 83515 (con control de la apertura circunferencial de fisura o desplazamiento vertical del actuador). Estas correlaciones deberán ser estadísticamente representativas y orientadas a su uso durante el control de calidad.

4.1.1.4. Valor mínimo de la resistencia

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 (véase apartado 33.4 de este Código).

4.1.1.5. Docilidad del hormigón

El empleo de fibras en hormigón puede provocar una pérdida de docilidad, cuya magnitud será función del tipo y longitud de la fibra empleada, así como de la cuantía de fibras dispuesta. Este factor debe considerarse especialmente al solicitar la consistencia del hormigón en el caso de adición de fibras en obra.

En el caso de hormigones con fibras, se recomienda que la consistencia del hormigón no sea inferior a 9 cm de asiento en el cono de Abrams (si bien depende del tipo de aplicación y sistema de puesta en obra). En caso contrario, el ensayo del cono de Abrams es poco adecuado y se recomienda ensayar la consistencia de acuerdo con los ensayos propuestos en la norma UNE-EN 12350-3.

En el caso de hormigones con fibras con condiciones de autocompactabilidad rige lo previsto en la tabla 33.5 b de este Código.

5 Durabilidad

5.1. Durabilidad

5.1.1. Durabilidad del hormigón y de las armaduras

5.1.1.1. Recubrimientos

El empleo de hormigón reforzado con fibras con función estructural hace innecesaria la utilización de la malla de reparto que exige el Código, a situar en medio de los recubrimientos superiores a 50 mm.

5.1.1.2. Empleo de hormigón reforzado con fibras

De forma general, se podrá emplear hormigón reforzado con fibras en todas las clases de exposición. En las clases de exposición XS2, XS3, XD2 y XF4, en el caso del empleo de fibras de acero al carbono deberá justificarse el uso mediante pruebas experimentales. Una alternativa viable es el empleo de aceros inoxidables, galvanizados o resistentes a la corrosión.

En caso de clases de exposición por ataques químicos al hormigón XA1, XA2 y XA3, las fibras de acero y sintéticas podrán emplearse previo estudio justificativo de la no reactividad de los agentes químicos con dichos materiales distintos del hormigón.

5.1.1.3. Resistencia del hormigón frente a la erosión

En general, el empleo de fibras de acero mejora la resistencia a la erosión.

6 Cálculo

6.1. Datos de los materiales para el proyecto

6.1.1. Características del hormigón

6.1.1.1. Tipificación de los hormigones

Los hormigones se tipificarán de acuerdo con el siguiente formato (lo que deberá reflejarse en los planos de proyecto y en el pliego de prescripciones técnicas particulares del proyecto):

T – R / f-R1-(R3/R1) / C / TM-TF / A

donde:

T	Indicativo que será HMF en el caso de hormigón en masa, HAF en el caso de hormigón armado y HPF en el caso de hormigón pretensado
R	Resistencia característica a compresión especificada, en N/mm²
f	Indicativo del tipo de fibras que será A en el caso de fibras de acero, P en el caso de fibras poliméricas y V en el caso de fibra de vidrio. En el caso de mezclas de fibras se incluirán dos o más letras indicativas
R1, R3	Resistencia característica residual a flexotracción especificada $f_{R,1,k}$ *y* $f_{R,3,k}$ en N/mm²
(R3/R1)	*Relación* $f_{R,3,k}/f_{R,1,k}$
C	Letra inicial del tipo de consistencia, o definición de autocompactabilidad en su caso, tal y como se define en el apartado 33.5. de este Código
TM	Tamaño máximo del árido en mm, definido en el apartado 30.3. de este Código

TF	Longitud máxima de la fibra, en mm. En el caso de mezclas de fibras se incluirán dos o más números en el mismo orden que en *f*.
A	Designación del ambiente, de acuerdo con el apartado 27.1 de este Código.

En cuanto a las resistencias residuales a flexotracción características especificadas, se recomienda utilizar la siguiente serie siempre que supere el valor mínimo exigido en el apartado 33.4 de este Código:

1,0 – 1,5 – 2,0 – 2,5 – 3,0 – 3,5 – 4,0 – 4,5 – 5,0 – ….

Las cifras indican las resistencias residuales a flexotracción características especificadas del hormigón a 28 días, expresada en N/mm².

Cuando las fibras no tengan función estructural, los indicativos R1 y R3 deberán sustituirse por “CR” en el caso de fibras para control de retracción, “RF” en el caso de fibras para mejorar la resistencia al fuego y “O” en otros casos.

En el caso de hormigones designados por dosificación se recomienda el siguiente formato:

T - D – G/f/CF/C/TM/A

Donde *D* significa hormigón designado por dosificación, *G* es el contenido de cemento en kg/m^3 de hormigón y *CF* el contenido de fibra en kg/m^3 de hormigón, prescrito por el peticionario. El resto de los parámetros tiene el significado indicado más arriba. En este caso, deberá garantizarse que el tipo, dimensiones y características de las fibras coincidan con los indicados en el pliego de prescripciones técnicas particulares.

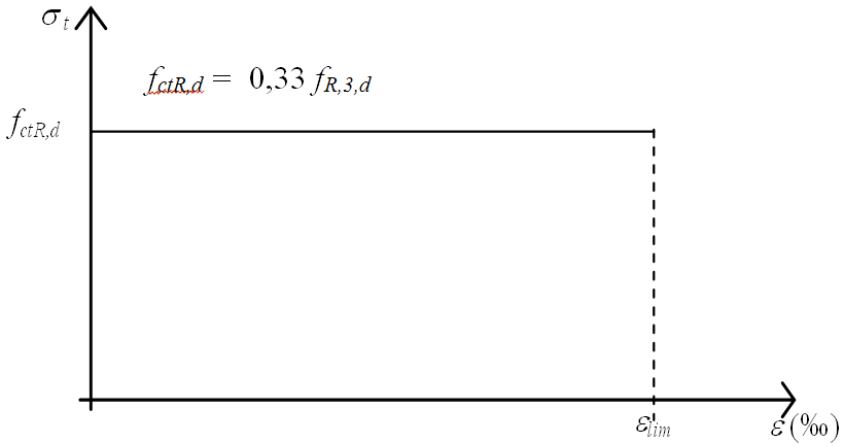
6.1.1.2. Resistencia de cálculo del hormigón

Se considerarán como resistencias residuales a flexotracción de cálculo del hormigón, $f_{R,1,d}$ *y* $f_{R,3,d}$, el valor de la resistencia característica de proyecto $f_{R,1,k}$ *y* $f_{R,3,k}$ correspondiente, dividido por un coeficiente parcial de seguridad γ_c, que adopta los valores indicados en los Anejos 19 y 21. Es posible trabajar con resistencias residuales a tracción, siempre que se demuestre la validez experimental.

6.1.1.3. Diagrama tensión - deformación en tracción de cálculo del hormigón con fibras

Para el cálculo de secciones sometidas a solicitaciones normales, en los Estados Límite Últimos se adoptará uno de los diagramas siguientes:

- Diagrama rectangular: De forma general, se aplicará el diagrama de la figura A7.6.1. caracterizado por la resistencia residual a tracción de cálculo $f_{ctR,d}$.



ε_{lim} = 20 ‰ para secciones sometidas a flexión,
y 10 ‰ para secciones sometidas a tracción

Figura A7.6.1 Diagrama de cálculo rectangular

– Diagrama multilineal: Para aplicaciones que exigen un cálculo ajustado, se propone el diagrama tensión (σ) - deformación (ε) de la figura A7.6.2, definido por una resistencia a tracción de cálculo f_{ctd} y de las resistencias residuales a tracción de cálculo: $f_{ctR1,d}$, $f_{ctR3,d}$, asociadas a sendas deformaciones ε_1 y ε_2 en el régimen de post-pico, donde:

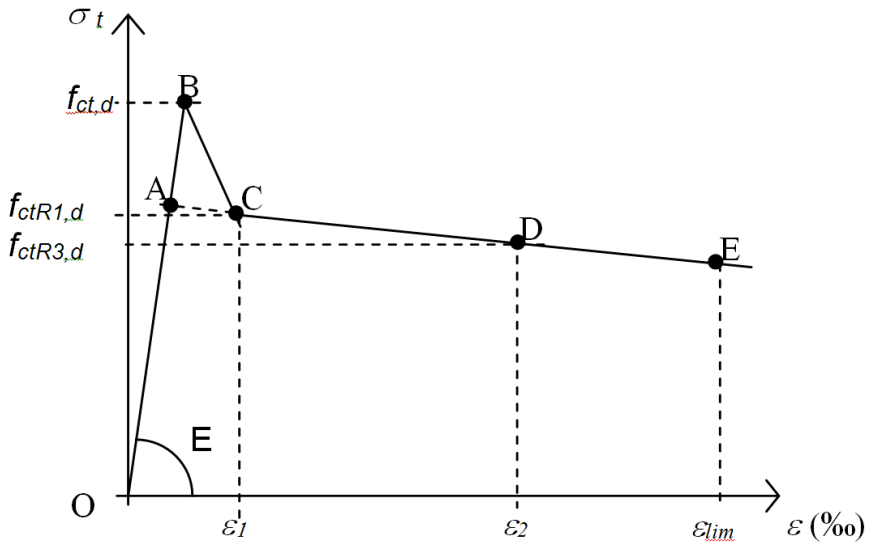


Figura A7.6.2 Diagrama de cálculo multilineal

f_L Carga correspondiente al límite de proporcionalidad

$f_{ct,d}$ = 0,6 $f_{ct,fl,d}$

$f_{ctR1,d}$ = 0,45 $f_{R,1,d}$

$f_{ctR3,d}$ = k_1 (0,5 $f_{R,3,d}$ - 0,2 $f_{R,1,d}$)

k_1 = 1 para secciones sometidas a flexión y 0,7 para secciones sometidas a tracción

ε_1 = 0,1 + 1000*$f_{ct,d}$ / $E_{c,0}$

ε_2 = 2,5/l_{cs}

ε_{lim} = 20 ‰ para secciones sometidas a flexión y 10 ‰ para secciones sometidas a tracción

l_{cs} Longitud crítica (en metros) del elemento calculado que puede determinarse por la expresión:

l_{cs} = min (s_m, h - x)

siendo: x =profundidad del eje neutro

h-x =distancia del eje neutro al extremo más traccionado

s_m = distancia media entre fisuras. Salvo que se disponga de datos justificados se podrá utilizar para s_m los valores de la tabla A7.6.1.

Tabla A7.6.1 Valores de referencia para s_m

Elementos sin armadura tradicional, o poco armados y hormigón de fibras con comportamiento a flexión con ablandamiento ($f_{R,1} < f_L$ y $f_{R,2} < f_L$)	H (canto de la pieza)
Hormigón de fibras armado, con $f_{R,3,d} < 2$ kN/mm^2	s_m calculado de acuerdo con el Anejo 19

Elementos con hormigón de fibras con comportamiento a flexión con endurecimiento ($f_{R,1} > f_L$ y/o $f_{R,3} > f_L$)	Se determinará de forma experimental según lo indicado en el apartado 4.1.1.3. de este anejo
Otros casos	Se consultará la bibliografía especializada

Nota: De forma simplificada, se considerarán elementos poco armados aquellos cuya cuantía geométrica de armadura tradicional a tracción sea inferior al uno por mil.

El efecto del pico A-B-C puede ser importante cuando se aplique un análisis no lineal, especialmente para pequeñas deformaciones. En otros casos, para el cálculo en rotura puede utilizarse el diagrama bilineal simplificado, formado por las rectas correspondientes al tramo elástico O-A y la prolongación de la recta C-E hasta el punto A, e incluso considerando un comportamiento rígido con E = ∞.

Se aceptarán otros diagramas de cálculo siempre que los resultados con ellos obtenidos concuerden de manera satisfactoria con los correspondientes a los del diagrama rectangular indicado en la figura A7.6.1, o queden del lado de la seguridad.

Los diagramas constitutivos presentados son generales y cualquiera de estos puede ser empleado también para el cálculo en ELS adaptando para ello los coeficientes de seguridad parciales de los materiales al Estado Límite que se pretenda abordar.

De forma alternativa se puede emplear la siguiente formulación:

CASO I: Para el diseño en ELS de materiales con ablandamiento se propone el mismo diagrama usado para el hormigón en masa a tracción uniaxal hasta $f_{ct.}$ En la rama residual (régimen fisurado) se aplica un diagrama bilineal (figura a).

La rama residual (BC) se describe analíticamente como:

$\frac{\sigma - f_{ct}}{0.2 f_{ct} - f_{ct}} = \frac{\varepsilon - \varepsilon_p}{\varepsilon_Q - \varepsilon_p}$ para $\varepsilon_p \leq \varepsilon \leq \varepsilon_c$

con $\varepsilon_Q = \frac{G_F}{l_{cs} f_{ct}} + \left(\varepsilon_p - \frac{0.8 f_{ct}}{Ec}\right)$

donde G_F representa la energía de fractura del hormigón en masa.

CASO II: Material con endurecimiento (figura b), la rama residual (BD) se describe analíticamente como:

$\frac{\sigma - f_{ct}}{f_{Ftsd} - f_{ct}} = \frac{\varepsilon - \varepsilon_p}{\varepsilon_{SLS} - \varepsilon_p}$ para $\varepsilon_p \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{SLS}$

CASO III: Material con endurecimiento (figura c), la rama AD se define de acuerdo con:

$\frac{\sigma - \sigma_{A'}}{f_{Ftsd} - \sigma_{A'}} = \frac{\varepsilon - \varepsilon_{A'}}{\varepsilon_{SLS} - \varepsilon_{A'}}$ para $\varepsilon_p \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{SLS}$

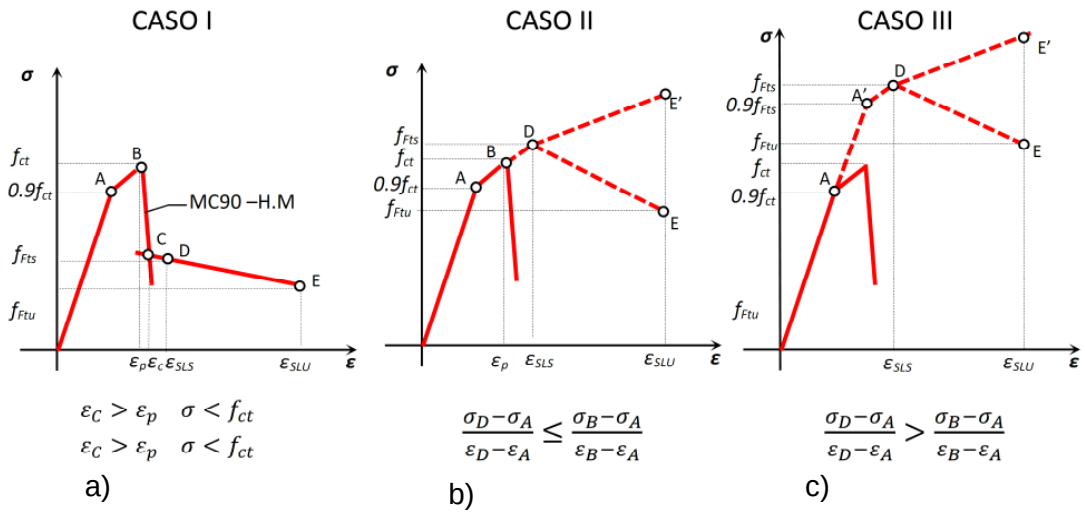


Figura A7.6.3

Las expresiones generales para la definición de la ecuación constitutiva son:

$f_{ctm}=0,30(f_{ck})^{2/3}$

$f_{Fts}=0,45f_{R1}$

$f_{Ftu}=k\,[f_{Fts}-(w_u/CMOD_3)(f_{Fts}-0,5f_{R3}+0,2f_{R1})]$

$\varepsilon_{SLS}=CMOD_1/l_{cs}$

$\varepsilon_{SLU}= w_u/l_{cs} = \min(\varepsilon_{Fu}, 2,5/l_{cs}=2,5/y)$

ε_{Fu} = [20‰ *ablandamiento*; 10‰ *endurecimiento*]

6.1.1.4. Factor de orientación

En general, en el diseño se asume que la distribución de fibras en el hormigón es isotrópica, es decir, que las fibras se orientan de manera uniforme en todo el volumen. Con el fin de considerar distribuciones diferentes que tienen lugar en estructuras, se introduce un factor de orientación (K) que en el caso de distribución isotrópica toma un valor K = 1,0. Se entiende por factor de orientación K:

$$K = \frac{n}{th} = n\frac{A_f}{V_f A}$$

Donde n es el número real de fibras en una sección, th el número teórico de fibras en la sección, A_f el área de la sección transversal de una fibra, V_f la fracción volumétrica de fibras y A el área de la sección transversal de hormigón en la que se mide el valor de K.

Para efectos favorables, se podrá aplicar un factor K < 1,0 siempre que se verifique experimentalmente. Para efectos desfavorables, será necesario determinar y aplicar experimentalmente el factor K > 1,0. Cuando se emplea K < 1,0 en una dirección, el valor de K en la otra dirección también se deberá comprobar.

Se podrán realizar ensayos específicos para determinar el efecto de la orientación de las fibras debido al hormigonado y la compactación en estructuras, usando elementos representativos del comportamiento del hormigón en las estructuras.

En la orientación y distribución de las fibras tienen influencia notable los efectos de borde y pared de encofrado, la forma del molde, el tiempo y energía de vibrado, y en el caso de los hormigones autocompactantes la dirección y distancia de avance del hormigón.

6.1.1.5. Fluencia del hormigón

En el empleo de fibras sintéticas para uso estructural, el fabricante deberá aportar el coeficiente de fluencia del hormigón, mediante el contraste experimental de los resultados.

6.1.1.6. Coeficiente de Poisson

Las fibras individualmente, o como grupo, deberán tener un coeficiente de Poisson similar al del hormigón, si se quiere tener en cuenta el efecto red a nivel estructural.

6.2. Cálculos relativos a los Estados Límite Últimos

6.2.1. Estado Límite de Agotamiento frente a solicitaciones normales

6.2.1.1. Hipótesis básicas

El cálculo de la capacidad resistente última de las secciones en las que las fibras desempeñen función estructural se efectuará considerando como diagrama de cálculo del hormigón a tracción alguno de los que se definen en los Anejos 19 y 21.

6.2.1.2. Dominios de deformación

Se consideran los mismos que para una estructura con hormigón convencional para secciones de hormigón con refuerzo mixto de armadura convencional y fibras. Para secciones de hormigón reforzado exclusivamente con fibras, la deformación máxima asociada al pivote A (10‰) se aumentará hasta ε_{lim} (ver el apartado 6.1.1.3 de este anejo).

6.2.1.3. Efecto de confinamiento del hormigón

Las fibras con función estructural proporcionan al hormigón un efecto de confinamiento similar al de las armaduras transversales. Para cuantificar el efecto del confinamiento producido por las fibras debe consultarse la bibliografía especializada.

6.2.1.4. Flexión simple o compuesta

En aquellos casos en que se utilicen fibras con función estructural, solas o en combinación con armadura tradicional, se deberá cumplir la siguiente limitación:

$$A_p\, f_{pd}\, \frac{d_p}{d_s} + A_s\, f_{yd} + \frac{z_f}{z}\, A_{ct}\; f_{ctR,d} \geq \frac{W_1}{z}\, f_{ctm} + \frac{P}{z}\left(\frac{W_1}{A} + e\right)$$

donde:

$z_f\, A_{ct}\, f_{ctR,d}$	Contribución de las fibras
z_f	Brazo mecánico de la tracción del hormigón
A_{ct}	Área traccionada de hormigón
$f_{ctR,d}$	Resistencia residual a tracción de cálculo en el diagrama rectangular.

En el caso de secciones rectangulares con o sin armadura pasiva puede emplearse la siguiente relación simplificada, en la que no se precisa determinar el área traccionada de hormigón.

$$A_s\, f_{yd} + 0{,}4\, A_c\; f_{ctR,d} \geq 0{,}04\, A_c\, f_{cd}$$

Esta limitación se justifica como garantía para evitar la rotura frágil del hormigón. La acción de las armaduras tradicionales y de las fibras es complementaria en este aspecto, y por tanto, la limitación constituye una exigencia de contenido mínimo en fibras para elementos sin armaduras tradicionales, y la

posibilidad de reducir, e incluso eliminar, la exigencia de armaduras tradicionales mínimas en elementos con contenido suficiente de fibras estructurales.

Esta limitación no rige para losas apoyadas sobre el terreno. Asimismo, en elementos que trabajen predominantemente comprimidos y con flexiones reducidas en régimen de servicio tampoco rige esta limitación, debiéndose considerar esta solo si en alguna fase transitoria se producen estados de flexión que puedan conducir a la fisuración del elemento estructural.

Alternativamente a la expresión simplificada propuesta, de forma equivalente y para cualquier geometría de sección, se puede estimar la necesidad mínima de refuerzo, imponiendo que el Momento último (M_u), considerando la contribución de las fibras y de la armadura en forma de barras, si la hubiere, debe ser igual o superior al Momento de fisuración de la sección (M_{fis}).

$$M_u \geq M_{fis}$$

Para secciones rectangulares armadas solo con HRF, esta condición se traducirá en:

$b \cdot h^2/6 \cdot f_{R3d} \geq b \cdot h^2/6 \cdot f_{ctm.fl}$ y, por tanto, $f_{R3d} \geq f_{ctm,fl}$.

6.2.1.5. Tracción simple o compuesta

En el caso de secciones de hormigón sometidas a tracción simple o compuesta, provistas de dos armaduras principales y fibras, deberá cumplirse la siguiente limitación:

$$A_p \ f_{pd} + A_s \ f_{yd} + A_c \ f_{\boldsymbol{ctR,d}} \geq 0{,}20 \ A_c \ f_{cd}$$

6.2.1.6. Cuantías geométricas mínimas

Los valores relativos a las cuantías geométricas mínimas (establecidas en el Anejo 19) que deben disponerse en los diferentes tipos de elementos estructurales, en función del acero utilizado, se podrán reducir, en el caso de hormigones con fibras, en una cuantía mecánica equivalente:

$$A_c \ f_{ctRm}$$

donde A_c y f_{ctRm} son el área de la sección transversal de hormigón y la resistencia residual a tracción media del hormigón, respectivamente.

Este refuerzo se debe disponer con el fin de controlar el ancho de las fisuras que se forman a cortas edades, debido a los fenómenos térmicos producidos por las reacciones de hidratación y retracción, y no por acciones de tipo directo o indirecto. En este sentido, si bien el control de este tipo de fisuración viene influenciado por una multitud de factores (curado, régimen térmico e higrométrico del entorno, acción solar, entre otros), es sabido que el uso de la cuantía y tipo adecuados de fibras conduce a un control eficiente de la fisuración originada por estos motivos. Esta limitación no rige si el fabricante y/o suministrador de las fibras puede garantizar, mediante pruebas a escala real u otros ensayos, que su producto es adecuado para el control de este tipo de fisuración, para el elemento estructural a ejecutar y en las condiciones reales de obra.

6.2.2. Estado Límite de Agotamiento frente a cortante

6.2.2.1. Consideraciones generales

La contribución de las fibras se deberá tener en cuenta en la capacidad resistente de los tirantes.

6.2.2.2. Piezas de hormigón reforzado con fibras sin y con armadura de cortante

Cuando existan barras longitudinales dobladas que sean tenidas en cuenta en el cálculo como armadura de cortante, al menos un tercio de la resistencia a cortante deberá ser provista por la contribución de las fibras de acero o en su caso por la contribución conjunta de las fibras de acero y estribos verticales. En todo caso, la cuantía mínima de la armadura a cortante está establecida y se dispondrá tal como lo marca el Anejo 19.

El esfuerzo cortante de agotamiento por tracción en el alma se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$V_{u2} = V_{cu} + V_{su} + V_{fu}$$

donde:

V_{cu} Contribución del hormigón a la resistencia a esfuerzo cortante

V_{su} Contribución de la armadura transversal de alma a la resistencia a esfuerzo cortante

V_{fu} Contribución de las fibras de acero a la resistencia a esfuerzo cortante.

$V_{fu} = 0{,}7\ \xi\ \tau_{fd}\ b_0\ d$

donde:

$\xi = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}}$ con d en (mm) y $\xi \leq 2$

τ_{fd} Valor de cálculo del incremento de la resistencia a cortante debido a las fibras, tomando el valor:

$\tau_{fd} = 0{,}5\ f_{ctR,d}$ (N/mm^2)

En el caso de secciones en T, se podría tener en cuenta la contribución de las alas a través de un coeficiente k_f multiplicador en la expresión de V_{fu}. Este coeficiente puede obtenerse mediante la siguiente expresión:

$$k_f = 1 + n \cdot \left[\frac{b_f}{b_0}\right] \cdot \left[\frac{h_f}{d}\right] \text{ con } k_f \leq 1{,}5$$

donde:

h_f Altura de las alas en mm

b_f Ancho de las alas en mm

b_0 Ancho del alma en mm

$n = \frac{b_f - b_w}{h_f} \leq 3$ y $n \leq \frac{3 \cdot b_w}{h_f}$

6.2.2.3. Armaduras transversales

La cuantía mínima de refuerzo a cortante, ya sea en forma de hormigón reforzado por fibras de acero y/o estribos verticales, debe cumplir la relación:

$$V_{su} + V_{fu} \geq \frac{f_{ct,m}}{7{,}5} b_0\ d$$

6.2.2.4. Armaduras longitudinales

En el caso de estructuras de hormigón reforzado con fibras con función estructural, en lugar de V_{su}, deberá considerarse (V_{su}+V_{fu}) en las expresiones del articulado.

6.2.2.5. Rasante entre alas y alma de una viga

Experimentalmente se ha comprobado, que las fibras con función estructural pueden contribuir de forma significativa a resistir el esfuerzo rasante ala-alma. Para considerar esta contribución, deberá basarse en campañas experimentales concluyentes o en publicaciones científicas avaladas.

6.2.3. Estado Límite de Agotamiento frente a punzonamiento

6.2.3.1. Losas de hormigón reforzado con fibras

Las fibras pueden mejorar la resistencia a punzonamiento. Una primera aproximación es considerar su contribución a partir de una tensión resistente en la superficie crítica equivalente a:

$\tau_{fd} = 0{,}5\ f_{ctR,d}$ (N/mm^2)

No obstante, este valor puede ser significativamente mayor, debiéndose demostrar experimentalmente si se pretende utilizar.

6.2.4. Estado Límite de Agotamiento por esfuerzo rasante en juntas entre hormigones

6.2.4.1. Disposiciones relativas a las armaduras

Solo se considerará que las fibras contribuyen a la resistencia al deslizamiento cuando se trate de juntas encastilladas transversalmente donde las dimensiones de las llaves sean comparables a la de la propia fibra.

7 Ejecución

7.1. Ejecución

7.1.1. Procesos de elaboración, armado y montaje de armaduras

7.1.1.1. Anclaje de las armaduras pasivas. Generalidades

Las fibras mejoran las características de anclaje, en el caso de empleo conjunto con armaduras pasivas y activas, lo cual puede ser utilizado en los cálculos de este anejo siempre que vengan avalados por ensayos experimentales que así lo justifiquen.

7.1.2. Elaboración y puesta en obra del hormigón

7.1.2.1. Fabricación del hormigón

7.1.2.1.1. Dosificación de materiales componentes

7.1.2.1.2. Agua

El aumento de la consistencia debido al uso de las fibras debe ser compensado siempre con la adición de aditivos reductores de agua, sin modificar la dosificación prevista de agua.

7.1.2.1.3. Fibras

La efectividad de los distintos tipos de fibras puede variar mucho, por ello, se recomienda designar el hormigón por propiedades y definir el tipo y dosificación de fibras en los ensayos previos.

La selección del tipo y dosificación de las fibras dependerá de su efectividad y de su influencia en la consistencia del hormigón. La longitud máxima cumplirá las condiciones estipuladas en este anejo. El aumento de la esbeltez de las fibras y el empleo de altas dosificaciones, conlleva un aumento de su eficiencia mecánica, pero puede provocar un descenso de la consistencia y un mayor riesgo de formación de bolas de fibras que se segregan del hormigón (erizos).

La dosificación de las fibras se hará en peso, empleando básculas y escalas distintas de las utilizadas para los áridos. En el caso de empleo de dosificadores automáticos, los mismos deberán estar tarados con la frecuencia que determine el fabricante. La tolerancia en peso de fibras será del ± 3 por 100.

7.1.2.2. Equipos de amasado

La comprobación de la homogeneidad de la mezcla producida por una amasadora fija o móvil, deberá incluir la verificación de que la diferencia máxima tolerada entre los resultados de contenido en fibras obtenido según norma UNE-EN 14721 y UNE-EN 14488-7 de dos muestras tomadas de la descarga del hormigón (a 1/4 y 3/4 de la descarga) sea inferior al 10%.

7.1.2.3. Amasado del hormigón

El amasado es una fase crítica de los hormigones con fibras, por el riesgo de enredo de las fibras formando erizos. Este riesgo se reduce con una buena dosificación con suficiente contenido de árido fino, pero aumenta con un transporte excesivamente largo y especialmente cuando el contenido en fibras es elevado y estas son muy esbeltas. El orden de llenado también puede ser decisivo. Como norma general, las fibras se incorporarán junto con los áridos. Preferentemente, el árido grueso al inicio del amasado, desaconsejándose la introducción de las fibras como primer componente de la mezcla.

Cuando se prevea un transporte largo, puede plantearse la adición de las fibras en obra. Para ello, se debe prever un hormigón suficientemente fluido para facilitar el camino de las fibras hasta el fondo de la cuba, y disponer de un sistema de dosificación en obra que garantice la precisión indicada en el apartado 51.2.3 de este Código. El vertido de las fibras se debe realizar lentamente (entre 20 y 60 kg por minuto en el caso de fibras de acero) con la cuba girando a su máxima velocidad, hasta garantizar la distribución homogénea de las fibras en la masa del hormigón.

7.1.2.4. Suministro del hormigón

En la hoja de suministro deberán figurar los siguientes datos:

- Especificación del hormigón: designación de acuerdo con el apartado 33.6. de este Código.
- Material, tipo, dimensiones (longitud, características de la sección y diámetro equivalente, esbeltez), características de las formas (conformadas en extremos, onduladas, etc.) de las fibras.
- Contenido de fibras en kilos por metro cúbico (kg/m^3) de hormigón, con una tolerancia de ± 3 %.

La relación de las características de las fibras podrá ser sustituida por una referencia a la designación comercial completa de las mismas, y soportada por una ficha técnica previamente aceptada por la dirección facultativa y disponible en el libro de obra.

7.1.2.5. Puesta en obra del hormigón

7.1.2.5.1. Vertido y colocación del hormigón

El vertido y colocación debe realizarse de modo que no precise transporte adicional del hormigón en obra. Deben evitarse interrupciones del hormigonado, ya que estas podrían ocasionar discontinuidades en la distribución de las fibras.

Cuando la colocación en obra se realiza mediante tolva, el diámetro de la boca de descarga debe ser superior a 30 cm para facilitar el vertido.

7.1.2.5.2. Compactación del hormigón

Debido a que el uso de fibras reduce la docilidad del hormigón, se necesitará una mayor energía de compactación. Sin embargo, la respuesta a la vibración del hormigón de fibras es mejor que la de un hormigón tradicional, por lo que para un mismo asiento en el cono de Abrams se requiere menor tiempo de vibrado.

La compactación origina una orientación preferencial de las fibras. En general, estas tienden a colocarse paralelas a la superficie encofrada, especialmente si se aplican vibradores de superficie. Este efecto es solo local pero puede ser importante en elementos de poco espesor.

El uso de vibradores internos puede generar zonas con exceso de pasta y pocas fibras en la zona donde se ha dispuesto el vibrador, así como cierta orientación en el sentido tangencial al diámetro externo del vibrador.

8 Control

8.1. Control de la conformidad de los productos

8.1.1. Criterios específicos para la comprobación de la conformidad de los materiales componentes del hormigón

8.1.1.1. Otros componentes del hormigón

8.1.1.1.1. Especificaciones

Son las establecidas en los Artículos 31 y 32 del Código Estructural más las que puedan contenerse en el pliego de prescripciones técnicas particulares.

8.1.1.1.2. Ensayos

Antes de comenzar la obra, se comprobará el efecto de las fibras mediante los ensayos previos del hormigón citados en el Anejo 13 del Código Estructural. Como consecuencia de lo anterior, se seleccionarán las marcas, tipos y dosificación de fibras admisibles en la obra. La continuidad de la composición y de las características será garantizada por el fabricante correspondiente.

Durante la ejecución de la obra se vigilará que las fibras utilizadas sean precisamente las aceptadas según el párrafo anterior.

La dirección facultativa, cuando lo considere necesario en la ejecución de la obra, podrá requerir la comprobación de las condiciones exigidas a las fibras.

8.1.1.1.3. Criterios de aceptación o rechazo

El incumplimiento de alguna de las especificaciones, será condición suficiente para calificar las fibras como no aptas para los hormigones.

Cualquier posible modificación de la marca, el tipo o la dosificación de las fibras que se vayan a utilizar, respecto a lo aceptado en los ensayos previos al comienzo de la obra, implicará su no utilización, hasta que tras la realización con dichas modificaciones de los ensayos previstos en el Anejo 13 del Código Estructural, la dirección facultativa autorice su aceptación y empleo en la obra.

8.1.2. Control del hormigón

El control de la calidad del hormigón de fibras incluirá, además del control especificado en el articulado, el del tipo y contenido de fibras, y en caso de fibras con función estructural, el de su resistencia residual, según el método que establezca el pliego.

8.1.2.1. Criterios generales para el control de la conformidad de un hormigón

Cuando las fibras tengan función estructural, los ensayos incluirán, además de los especificados en el articulado, el ensayo de tres probetas por cada amasada utilizada para control, de acuerdo con la norma UNE-EN 14651, para determinar los valores de la resistencia residual a flexotracción $f_{R,1,m}$ y $f_{R,3,m}$ a los 28 días de edad. Alternativamente, el autor del proyecto o la dirección facultativa pueden indicar el empleo de la norma UNE 83515. En cada amasada se determinará también el contenido en fibras según la norma UNE-EN 14721 o UNE-EN 14488-7.

Cuando, de acuerdo con lo especificado en el apartado 33.3 del Código Estructural, se seleccionen otros tipos de ensayos alternativos para el control de la resistencia residual a flexotracción del hormigón, estos deberán venir contrastados por una campaña experimental concluyente. La dirección facultativa fijará previamente los valores de referencia a obtener durante los ensayos y los criterios de aceptación y rechazo.

De acuerdo con lo indicado en la parte de materiales de este anejo, la dirección facultativa podrá valorar, bajo su responsabilidad, el empleo de otros procedimientos que faciliten el control. Puede ser el caso del ensayo MDPT o multidireccional de doble punzonamiento, realizado sobre probeta cúbica de 15x15x15 cm para el control de la resistencia residual o el método de inducción magnética para el control del contenido de fibras metálicas (y orientación). Finalmente, se podrán realizar conteos para conocer el contenido y orientación de las fibras.

8.1.2.2. Realización de los ensayos

En caso de hormigones de fibras de consistencia inferior a 9 cm de asiento en el cono de Abrams, se recomienda utilizar como método de control de la consistencia otros métodos, como el consistómetro Vebe de acuerdo con la norma UNE-EN 12350-3 o el cono invertido de acuerdo con UNE 83503.

8.1.2.2.1. Ensayos de resistencia del hormigón

Antes del comienzo del hormigonado es necesaria la realización de ensayos previos o ensayos característicos, los cuales se describen en el Anejo 13 del Código Estructural.

Cuando exista experiencia, bien documentada y suficiente, tanto en materiales, incluido el tipo y marca comercial de las fibras previstas, como en dosificación y medios (por ejemplo las centrales de hormigón preparado), podrán realizarse únicamente los ensayos de control.

8.1.2.2.2. Control de la resistencia del hormigón al 100 por 100

Los criterios de definición de lotes coincidirán con lo especificado en el articulado.

El control de la resistencia residual según la norma UNE-EN 14651 o según UNE 83515, se realizará sobre 2 amasadas por lote. De estas amasadas, se hará el control del contenido en fibras según las normas UNE-EN 14721 o UNE-EN 14488-7.

Cuando el resultado del control de contenido en fibras en una amasada del lote, fuera inferior en un 10 % al valor estipulado, se ampliará el control de resistencia residual a flexotracción a todas las amasadas sobre las que se tomen muestras para determinar la resistencia a compresión.

El análisis de resultados y los estimadores a emplear para obtener los valores característicos correspondientes, a partir de los resultados de los ensayos, serán los mismos que los expuestos en el articulado para la resistencia a compresión.

8.1.2.2.3. Control indirecto de la resistencia del hormigón

No se permite la aplicación de este tipo de control para los hormigones de fibras con función estructural.

8.1.2.3. Decisiones derivadas del control

Cuando en un lote de obra sometida a control de resistencia, sea $f_{R,j,est} \geq f_{R,j,k}$, tal lote se aceptará.

Si resultase $f_{R,j,est} < f_{R,j,k}$, a falta de una explícita previsión del caso en el pliego de prescripciones técnicas particulares de la obra y sin perjuicio de las sanciones contractuales previstas por el Código, se procederá como sigue:

- Si $f_{R,j,est} \geq 0{,}9\ f_{R,j,k}$, el lote se aceptará.
- Si $f_{R,j,est} < 0{,}9\ f_{R,j,k}$, se procederá a realizar, por decisión de la dirección facultativa o a petición de cualquiera de las partes, los estudios o ensayos complementarios pertinentes.

Si se detectara alguna variación en el aspecto, dimensiones o forma de las fibras se deberán volver a realizar los ensayos previos.

8.1.2.4. Ensayos de información complementaria del hormigón

La extracción de testigos, realizada de conformidad con lo indicado en los Capítulos 12, 13 y 14 del Código Estructural conduce a probetas cilíndricas sobre las que no pueden aplicarse los ensayos de referencia para la determinación de las características mecánicas a flexotracción del hormigón de fibras. Dado que esta verificación no podrá realizarse, pueden ser sustituidos por otros ensayos que permitan estimar la tenacidad del hormigón como, por ejemplo, el ensayo Barcelona o alternativamente el ensayo MDPT, ambos bajo la configuración de doble punzonamiento.

8.2. Control de la ejecución

8.2.1. Criterios generales para el control de la ejecución

En el apartado 63.2 de este Código se incluirán las siguientes unidades de inspección, específicas de los hormigones de fibras:

- Tipos de fibras empleados tras el control de contenido en fibras.
- Condiciones de almacenamiento de las fibras.
- Método de añadir las fibras a la mezcla.

Los tamaños máximos de estas unidades de inspección anteriores se establecerán en el correspondiente proyecto, en función de las características de la obra.

8.2.2. Ensayos previos y característicos del hormigón

8.2.2.1. Ensayos previos

En el caso de hormigones con fibras, los ensayos previos toman especial importancia para la definición de las fibras a emplear y de su dosificación.

Cuando las fibras tengan función estructural, los ensayos previos incluirán la fabricación de al menos cuatro series de probetas procedentes de amasadas distintas, de seis probetas cada una, para ensayo a los 28 días de edad, por cada dosificación que se desee establecer, y se operará de acuerdo con la norma UNE-EN 14651 para determinar los valores medios de la resistencia residual a flexotracción:

$f_{R,1,m}$ y $f_{R,3,m}$

Para definir los valores de resistencia a obtener en los ensayos previos, cuando no se conozca el valor del coeficiente de variación de este ensayo, a título meramente informativo, puede suponerse que:

$f_{R,j,k} = 0{,}7\ f_{R,j,m}$

mientras que en los casos de elementos solicitados a flexión, en los que se conozca el coeficiente de variación, el valor característico de tensión residual puede calcularse a través de:

$$f_{R,j,k} = \left(1 - \frac{0{,}85\,\alpha\ CV_{R,j}}{h^{0,32}\ l_{fis}{}^{0,48}}\right) f_{R,j,m} \leq 0{,}85\ f_{R,j,m}$$

donde:

h	es la altura del elemento en mm, la cual debe asumirse siempre menor o igual a 300 mm
l_{fis}	es la menor de las dimensiones diferentes de la altura o la mínima longitud de las líneas de rotura formadas, ambas en mm, asumiéndose siempre valores menores o iguales a 2000 mm

$CV_{R,j}$ es el coeficiente de variación del ensayo de flexotracción de la norma UNE-EN 14651 en tanto por uno, el cual debe asumirse siempre mayor o igual a $0{,}115 \cdot \alpha'$

α' es el coeficiente estadístico relacionado con el grado de incertidumbre en la estimación de $CV_{R,j}$ en función del número de probetas ensayadas, tal y como muestra la tabla A7.1

α es el parámetro relacionado la confianza a respecto del valor de $CV_{R,j}$, el cual puede asumirse igual a 1 cuando se conozca la dispersión típica del material en el ensayo de la norma UNE-EN 14651 o igual α' si se desconoce dicha dispersión, pero se dispone de resultados experimentales.

- Para elementos tipo viga, l_{fis} coincide con el ancho (b) mientras que para elementos planos l_{fis}, será la longitud mínima de las fisuras principales de flexión, y que pueden determinarse mediante criterios de cálculo plástico.
- En el caso que no se conozca el valor de CV, puede asumirse CV = 25%.

Tabla A7.1 Valores de referencia para α'

N° de probetas ensayadas	3	4	5	6	8	10	20	30	∞
α'	2,05	1,60	1,42	1,33	1,22	1,17	1,07	1,05	1,00

8.2.2.2. Ensayos característicos de resistencia

Cuando las fibras tengan función estructural, los ensayos incluirán, además de los especificados en el articulado, el ensayo de tres probetas por amasada de acuerdo con la norma UNE-EN 14651 para determinar los valores de la resistencia residual a flexotracción $f_{R,1,m}$ y $f_{R,3,m}$ a los 28 días de edad. En cada amasada de este tipo, se determinará también el contenido en fibras según la norma UNE-EN 14721 o UNE-EN 14488-7.

El análisis de resultados y los estimadores a emplear para obtener los valores característicos correspondientes a partir de los resultados de los ensayos, serán los mismos expuestos en el articulado para la resistencia a compresión.