Anejo 9

Recomendaciones para la utilización del hormigón proyectado estructural

Contenidos del Anejo

1 INTRODUCCIÓN 609

***2* ÁMBITO DE APLICACIÓN ESPECÍFICO RELATIVO A LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN 609**

3 PROPIEDADES TECNOLÓGICAS DE LOS MATERIALES 609

3.1 CEMENTO 609
3.2 ÁRIDOS 610
3.3 ADITIVOS 610
3.4 ADICIONES 611
3.5 HORMIGONES 611
3.5.1 Composición 611
3.5.2 Docilidad del hormigón 612
3.5.3 Tipificación de los hormigones 612

4 DURABILIDAD DE LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN 613

4.1 RECUBRIMIENTO NOMINAL 613
4.2 CARBONATACIÓN DEL HORMIGÓN 614

5 DIMENSIONAMIENTO Y COMPROBACIÓN 614

5.1 VALORES CARACTERÍSTICOS DE LAS ACCIONES PERMANENTES 614
5.2 MÓDULO DE DEFORMACIÓN 614
5.3 RESISTENCIA A TRACCIÓN DE CÁLCULO 615
5.4 DIAGRAMA TENSIÓN – DEFORMACIÓN DE CÁLCULO 615
5.5 DOMINIOS DE DEFORMACIÓN 615
5.6 ESTADOS LÍMITE DE AGOTAMIENTO FRENTE A CORTANTE 616
5.6.1 Obtención de V_{u1p} 616
5.6.2 Obtención de V_{u2p} 616
5.7 ESTADOS LÍMITE DE AGOTAMIENTO POR TORSIÓN EN ELEMENTOS LINEALES 616
5.7.1 Obtención de Tu1p 616
5.8 ESTADOS LÍMITE DE AGOTAMIENTO FRENTE A PUNZONAMIENTO 616
5.9 ANCLAJE Y EMPALME DE LAS ARMADURAS PASIVAS 616

6 EJECUCIÓN DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN 617

6.1 PUESTA EN OBRA Y CURADO DEL HORMIGÓN 617
6.1.1 Prescripciones generales 617
6.2 FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN 617
6.2.1 Cemento 617
6.2.2 Aditivos 617
6.3 TRANSPORTE Y SUMINISTRO DEL HORMIGÓN 617
6.3.1 Transporte del hormigón 617
6.3.2 Suministro del hormigón 618
6.4 VERTIDO Y COLOCACIÓN DEL HORMIGÓN 618
6.5 PROYECCIÓN PARA TRABAJOS DE REPARACIÓN 619
6.6 PUESTA EN OBRA DEL HORMIGÓN EN CONDICIONES CLIMÁTICAS ESPECIALES 619
6.6.1 Hormigonado en tiempo frio 619
6.7 CURADO DEL HORMIGÓN 619
6.8 PROCESOS POSTERIORES AL HORMIGONADO 619
6.8.1 Desencofrado, desmoldeo y descimbrado 619
6.8.2 Acabado de superficies 620

7 GESTIÓN DE LA CALIDAD DE LOS PRODUCTOS 620

7.1 CRITERIOS ESPECÍFICOS PARA EL CONTROL DE LOS PRODUCTOS 620

7.1.1 Criterios específicos para la comprobación de la conformidad de los productos 620

7.1.2 Aditivos *..... 620*

7.2 CONTROL DEL HORMIGÓN 620

7.2.1 Criterios generales para el control de la conformidad de un hormigón 621

7.2.2 Toma de muestras 621

7.2.3 Realización de los ensayos 622

1 Introducción

La proyección es una técnica de puesta en obra del hormigón que reúne, en una sola acción, las etapas de la colocación y la compactación, lo que se consigue por la proyección de los materiales a gran velocidad sobre un soporte mediante dos sistemas: vía húmeda y vía seca. Aunque los elementos bien ejecutados mediante ambos sistemas, pueden tener responsabilidad estructural, por cuestiones de calidad del ambiente de trabajo (especialmente en entornos cerrados) y de reducción de consumo de materiales, se recomienda el uso de la vía húmeda. Si bien el presente anejo se centra en esta última, las consideraciones de diseño aquí incluidas, también se aplican a elementos ejecutados por la vía seca, siempre y cuando se tomen medidas para asegurar la relación agua/cemento del hormigón y se compruebe el cumplimiento de las prestaciones de durabilidad requeridas.

Durante la ejecución por vía húmeda, el hormigón fresco se impulsa hasta la boquilla de proyección mediante un sistema de bombas. En la boquilla, que supone un estrangulamiento de la tubería, se añaden aire a presión y, si es necesario, aditivos antes de que el material se proyecte sobre el soporte. En este proceso, se producen dos fenómenos que tienen incidencia en las propiedades resistentes del hormigón colocado: el rebote y la introducción de aire en la mezcla.

En aras de establecer directrices de producción y control compatibles con las especificidades de la técnica, es necesario diferenciar entre los términos hormigón de partida y hormigón proyectado. El primero se refiere al hormigón suministrado en estado fresco para el proceso de bombeo y proyección, pero que todavía no ha sido sometido a dicho proceso. El segundo se refiere al hormigón colocado tras el proceso de bombeo y proyección, que debe resistir las solicitaciones de la estructura y está influenciado tanto por el rebote como por una mayor porosidad.

Por las diferencias que pueden existir durante la ejecución, hay que distinguir entre el hormigón proyectado en la estructura final y el hormigón proyectado sobre la artesa normalizada, con el fin de realizar el control de calidad del material.

En este anejo se detallan los complementos a los diversos artículos de este Código, necesarios para poder considerar la aplicación estructural del hormigón proyectado.

2 Ámbito de aplicación específico relativo a las estructuras de hormigón

Las recomendaciones que se recogen en este anejo son aplicables a todas las estructuras y elementos de hormigón estructural que se indican en el Artículo 26 de este Código.

3 Propiedades tecnológicas de los materiales

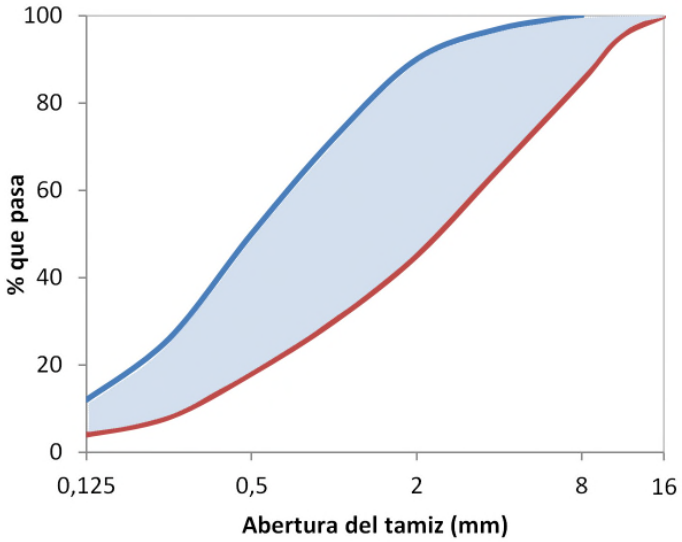
Los principales constituyentes del hormigón proyectado son el cemento, los áridos, el agua, las adiciones y los aditivos. Para determinadas aplicaciones, el hormigón proyectado puede ser reforzado con fibras o armaduras de acero. Las especificaciones generales de los materiales son las indicadas en el Capítulo 8 de este Código.

3.1 Cemento

En el hormigón proyectado se pueden emplear cementos portland tipo I o tipo II/A. El uso de cementos tipo II/B o tipo III también está permitido, siempre y cuando se cumplan las recomendaciones del Anejo 6 de este Código, y la viabilidad desde el punto de vista de su comportamiento y seguridad, se demuestre mediante ensayos a escala real. Es necesario que el cemento tenga buena compatibilidad con los aditivos empleados, para que se obtenga un fraguado rápido, promoviendo una rápida evolución de la resistencia inicial.

3.2 Áridos

La trabajabilidad, bombeabilidad y las propiedades en el estado endurecido del hormigón proyectado, dependen de la composición mineralógica y de la granulometría de los áridos. El tamaño máximo de los áridos debe ser menor o igual a 12 mm. La distribución granulométrica estará dentro del huso indicado en la figura A9.3.2.



Abertura (mm)	% que pasa por el tamiz
16	100
12	95 – 100
8	85 – 100
4	65 – 100
2	45 – 90
1	30 – 72
0,50	18 – 50
0,25	8 – 26
0,125	4 – 12

Figura A9.3.2 – Distribución granulométrica del árido

3.3 Aditivos

Los principales aditivos utilizados en hormigón proyectado son plastificantes/ superplastificantes, estabilizadores de fraguado y acelerantes de fraguado. La combinación de los aditivos en el mismo hormigón proyectado, está permitida siempre que sean compatibles entre sí, y dispondrán de marcado CE conforme a la norma UNE-EN 934-2.

De acuerdo con su composición química, los acelerantes de fraguado pueden ser de tres tipos: alcalinos, bien basados en aluminatos o bien en silicatos de sodio, o libres de álcalis, cuyo compuesto principal es el sulfato de aluminio. En la tabla A9.3.3, se presentan las características de los mismos.

Tabla A9.3.3 Aditivos acelerantes de fraguado

Propiedad	Alcalinos (aluminatos)	Alcalinos (silicatos)	Libres de álcali
Rango de dosificación (% sobre la masa de cemento)	3 – 7	12 – 15	4 – 8
pH	13 – 14	12 – 13	2,5 – 6
Contenido de Na_2O equivalente (%)	19 – 20	8 – 10	< 1

Está permitido el uso de todos los tipos de aditivos acelerantes de fraguado indicados en la tabla A9.3.3. Por cuestiones de durabilidad, de capacidad resistente y de consumo de materiales, los elementos con resistencia característica igual o superior a 35 N/mm² que requieran el uso de acelerantes de fraguado, serán ejecutados con acelerantes de tipo libres de álcali. También están indicados por motivos de salud y seguridad, ya que, debido a su pH alrededor de 3, se reduce la formación de nieblas y aerosoles alcalinos en el ambiente de aplicación y, por tanto, el riesgo de daños a la piel, mucosas y ojos. Además, estos acelerantes no aumentan la cantidad de iones solubles en el hormigón, lo que reduce el riesgo de eflorescencias y de reacciones álcali-árido.

La dosificación óptima del acelerante y la compatibilidad del mismo con los demás aditivos o el

cemento, debe determinarse mediante ensayos previos. A falta de otra referencia, se emplearán el procedimiento de ensayo y los criterios descritos en el apartado 7.2.3.7 de este anejo, además de las comprobaciones posteriores a escala real.

Los aditivos de autocurado pueden emplearse cuando el proceso de curado por otros métodos sea difícil de realizar. También se pueden emplear en el hormigón de partida, aditivos oclusores de aire con el fin de facilitar el proceso de bombeo. Esa práctica resulta especialmente interesante cuando se realiza la proyección de mezclas con consistencia baja y sin acelerantes.

3.4 Adiciones

En el hormigón proyectado se utilizan las adiciones, en sustitución de una parte del contenido de cemento, para mejorar algunas de sus propiedades, como trabajabilidad, retención de agua, aumento de densidad, resistencia y durabilidad. Siempre que sea viable, se dará preferencia a la incorporación de humo de sílice por los consecuentes beneficios obtenidos en cuanto a la facilidad de bombeo, a la durabilidad y a la resistencia a largo plazo.

3.5 Hormigones

De cara a especificar y tipificar el material, se tendrán en cuenta las diferencias entre el hormigón de partida y el hormigón proyectado. El primero será responsabilidad del suministrador del hormigón, mientras que el segundo será responsabilidad del constructor encargado de ejecutar la estructura. A efectos de control, cuando no haya especificación a ese respecto, se entenderá que el cambio de responsabilidades se produce inmediatamente antes de la entrada del hormigón de partida en la tolva del equipo de proyección.

La especificación y la tipificación del hormigón establecidas en proyecto se referirán al hormigón ya colocado, siendo de responsabilidad del constructor asegurar que las mismas se cumplan. El suministrador del hormigón de partida no será responsable del material colocado, siempre y cuando cumpla con las especificaciones definidas para el hormigón de partida en la etapa de validación previa o de acuerdo con el constructor.

Una vez puesta a punto la dosificación y comprobado el proceso de proyección, el suministrador deberá informar previamente al constructor sobre cualquier cambio que se produzca en los materiales o en la composición del hormigón de partida. La falta de dicha información previa por parte del suministrador del hormigón, implicará la asunción de la responsabilidad sobre los incidentes apreciados tras la ejecución y a raíz de dichos cambios.

La información del cambio debe realizarse desde el primer momento que se produce, comunicandolo a la dirección de obra y reflejándose en los albaranes de entrega.

3.5.1 Composición

La composición final del hormigón proyectado, similar en cierta medida al de partida, presenta algunas diferencias introducidas por la incorporación del aire comprimido, por el uso de acelerantes de fraguado, en el caso de que se empleen, y por el rebote. Para un transporte por tubería y proyección satisfactorios, se recomienda que el contenido total de finos del hormigón de partida que pasan por el tamiz 0,063 mm (incluidos los procedentes de los áridos, del cemento y de las adiciones) se sitúe entre 500 y 550 kg/m^3. El constructor tomará medidas adicionales para asegurar que el rebote no supere el 15% en superficies verticales y el 20% en el techo.

En el hormigón proyectado se puede emplear cualquier fibra estructural, siendo las más usuales las de acero y las poliméricas. Las fibras de acero deben tener marcado CE conforme a la norma UNE-EN 14889-1 y las poliméricas conforme a la norma UNE-EN 14889-2. La longitud de las fibras viene condicionada por los diámetros de las tuberías de transporte y la boquilla de proyección, así como por el tamaño máximo del árido y la posible formación de erizos. Son usuales longitudes de 30 a 40 mm, en el caso de fibras de acero y menores que 65 mm en el caso de fibras poliméricas, debido a su mayor flexibilidad.

3.5.2 Docilidad del hormigón

La consistencia del hormigón de partida viene condicionada por los requisitos de bombeabilidad del material en estado fresco. Esta consistencia puede ser evaluada a través del asentamiento en el cono de Abrams, de acuerdo con la norma UNE-EN 12350-2, o por la extensión de flujo en la mesa de sacudidas de acuerdo con la norma UNE-EN 12350-5. Siempre que sea posible, se dará preferencia a la realización de este último ensayo, debido a su mayor capacidad para discriminar variaciones que puedan afectar al proceso de bombeo y proyección.

Los rangos de consistencia para cada ensayo se presentan en la tabla A9.3.5.2. Los hormigones proyectados sin acelerantes de fraguado tendrán preferentemente consistencia S2, S3, E1, E2 o E3. Por otra parte, hormigones proyectados con acelerantes de fraguado serán preferentemente de tipo S4, S5, E3 o E4. La observancia de estos rangos no garantiza el cumplimiento de las condiciones de bombeabilidad exigibles al hormigón fresco, por lo que se deben realizar pruebas previas en obra.

Tabla A9.3.5.2 Clases de consistencia

Ensayo	Clase	Rango
Asentamiento UNE-EN 12350-2	S1	entre 10 mm y 40 mm
	S2	entre 50 mm y 90 mm
	S3	entre 100 mm y 150 mm
	S4	entre 160 mm y 210 mm
	S5	Mayor que 220 mm
Extensión de flujo UNE-EN 12350-5	E1	entre 500 mm y 540 mm
	E2	entre 550 mm y 590 mm
	E3	entre 600 mm y 640 mm
	E4	entre 650 mm y 700 mm

3.5.3 Tipificación de los hormigones

3.5.3.1 Hormigón de partida

La designación del hormigón de partida puede realizarse tanto por dosificación como por propiedades. En el primer caso, la tipificación se realizará de acuerdo con el siguiente formato:

T - D – G / f / CF / C / TM-TF / A

donde:

T	Indicativo que será HB para el hormigón de partida sin fibra y HBF para el hormigón de partida con fibras.
D	Indicativo de hormigón especificado por dosificación.
f	En el caso de emplear fibras, 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 fibras de vidrio.
G	Es el contenido de cemento, en kg por m³ de hormigón.
f	En el caso de emplear fibras, 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 fibras de vidrio.
CF	Es el contenido de fibra, en kg (hasta el primer decimal de precisión) por m³ de hormigón.
C	Es la clase de consistencia del hormigón en función del tipo de ensayo de referencia seleccionado.

TM Tamaño máximo del árido grueso en mm, definido en el apartado 30.3 de este Código.

TF En el caso de emplear fibras, longitud máxima de la fibra, en mm.

A Designación del ambiente, de acuerdo con el apartado 27.1 de este Código.

También se incluirá una tabla con la composición de la dosificación, en la cual se indicarán los materiales empleados, así como sus respectivas cantidades en kg/m³ de hormigón.

En el caso de designación del hormigón de partida por propiedades, se usará la misma tipificación, cambiando el significado de la sigla *T* y de la sigla *C*. La primera será HB para el hormigón de partida sin fibra y HBF para el hormigón de partida con fibras. La segunda corresponde a la clase de consistencia en función del tipo de ensayo de referencia seleccionado, tal y como indica la tabla A9.3.5.2 del presente anejo.

3.5.3.2 Hormigón proyectado

Los hormigones proyectados y ya colocados sobre la superficie, 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 / J / (f-R1-R3) / TM-TF / A

donde:

T Indicativo que será HMP en el caso de hormigón en masa proyectado, HAP en el caso de hormigón armado proyectado, HPP en el caso del hormigón pretensado proyectado y HRP en el caso del hormigón reforzado únicamente con fibras y proyectado. En el supuesto de que el hormigón armado proyectado o el hormigón pretensado proyectado también llevaran fibras, se usará respectivamente HAPF o HPPF.

R Resistencia característica a compresión especificada, en N/mm² y referida al hormigón una vez proyectado sobre la superficie.

J Clase resistente a corta edad, establecida de acuerdo con el apartado 7.2.3.2 del presente anejo.

f En el caso de emplear fibras, 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 fibras de vidrio.

R1,R3 En el caso de emplear fibras, resistencia característica residual a flexotracción especificada $f_{R,1,k}$ *y* $f_{R,3,k}$, en N/mm² y referida al hormigón una vez proyectado sobre la superficie o valores equivalentes obtenidos en un ensayo alternativo, tal y como indica el apartado 7.2.3.3 de este anejo.

TM Tamaño máximo del árido grueso en mm, definido en el apartado 30.3 del articulado.

TF En el caso de emplear fibras, longitud máxima de la fibra, en mm.

A Designación del ambiente, de acuerdo con el apartado 27.1 del articulado.

4 DURABILIDAD DE LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN

4.1 Recubrimiento nominal

En el caso de hormigón armado o pretensado proyectado, los recubrimientos mínimos definidos en el Código, deben incrementarse en:

10 mm ambientes XD, XS y XA

5 mm resto de ambientes.

Este incremento viene dado por la posible mayor porosidad superficial del hormigón.

En el caso de hormigón reforzado con fibras proyectado, no se impone condición alguna de recubrimiento. Se podrán emplear directrices diferentes a las especificadas en esta recomendación cuando se compruebe el comportamiento del material mediante ensayos específicos.

4.2 Carbonatación del hormigón

En elementos de hormigón proyectado, el valor del coeficiente c_{air} de la tabla A12.3.1.b del Anejo 12, a falta de mayor información, deberá tomarse igual a 0,7.

5 DIMENSIONAMIENTO Y COMPROBACIÓN

Para el análisis estructural, el dimensionamiento y la comprobación de las estructuras de hormigón proyectado, el autor del proyecto empleará los Anejos 19 y 21, según el caso.

La incorporación de aire a la mezcla y la modificación del esqueleto granular debido al rebote diferencial, conducen a una ligera variación en la densidad y en las propiedades mecánicas del hormigón proyectado, en comparación con el de partida antes de la proyección. Esto afecta a las ecuaciones usadas para estimar las propiedades mecánicas y los diagramas constitutivos incluidos en el Código. Todas las propiedades referentes al hormigón proyectado serán indicadas en el presente anejo con los mismos símbolos recogidos en el Código para el hormigón convencional, añadiendo el subíndice “p”.

5.1 Valores característicos de las acciones permanentes

Como consecuencia del sistema de puesta en obra, la densidad del hormigón proyectado suele ser inferior a la de un hormigón convencional. Por eso, para el cálculo del peso propio de la estructura, se recomienda tomar las siguientes densidades definidas en función de la resistencia característica del hormigón proyectado (f_{ckp}) a los 28 días:

- Hormigón proyectado en masa o con fibras estructurales

  $f_{ckp} < 40$ N/mm^2 2.250 kg/m^3

  $f_{ckp} \geq 40$ N/mm^2 2.300 kg/m^3

- En el caso del hormigón proyectado armado o pretensado, a los valores indicados anteriormente se añadirán 100 kg/m^3.

5.2 Módulo de deformación

El módulo de deformación longitudinal secante del hormigón proyectado ($E_{cmp,j}$) a una edad *j* expresado en N/mm^2, viene dado por la ecuación:

$$E_{cmp,j} = \gamma_p \cdot \gamma_r \cdot 9500 \cdot \sqrt[3]{f_{cmp,j}}$$

donde:

$f_{cmp,j}$ Es la resistencia media a compresión estimada para el hormigón proyectado a la edad *j*

γ_p Es el coeficiente de porosidad según:

$$\gamma_p = \frac{1 - p_s}{0{,}92}$$

p_s Es la porosidad del hormigón proyectado a la edad de 28 días, en tanto por uno

γ_r Es el coeficiente de rebote según:

$$\gamma_r = 1 - r$$

r Es el rebote de material al proyectar el hormigón, en tanto por uno.

Esta formulación es válida siempre que las tensiones, en condiciones de servicio, no sobrepasen el valor de *0,40* $f_{cmp,j}$. En estas ecuaciones, la porosidad del hormigón proyectado deberá estar entre el 8% y el 18%, mientras que el rebote del material durante la proyección, deberá estar comprendido entre el 5% y el 15%. A falta de datos al respecto de porosidad y del rebote, se podrá adoptar el valor de 0,76 para el producto $\gamma_p \cdot \gamma_r$.

El módulo de deformación longitudinal del hormigón tiene una marcada dependencia del tipo del árido con el que se ha fabricado el hormigón. Las expresiones propuestas corresponden a hormigones fabricados con áridos de caliza densa. Los mismos factores de corrección establecidos en los Anejos 19 y 21 pueden aplicarse a esas ecuaciones en el caso de tener áridos de otras naturalezas.

Si se desea obtener con mayor precisión el valor del módulo para el tipo concreto de árido que se va a utilizar, se deberán realizar ensayos experimentales para adaptar las expresiones propuestas con coeficientes correctores en función de la naturaleza del árido. Como pasa con el hormigón convencional, dichas comprobaciones también deben realizarse en aquellas estructuras en que las deformaciones y su control sean especialmente importantes, bien por su magnitud (como en los casos de estructuras muy estables) o bien por su influencia en los esfuerzos y comportamiento de la propia estructura (como en el caso de construcciones evolutivas o por fases).

5.3 Resistencia a tracción de cálculo

La resistencia media o característica a tracción y a flexotracción del hormigón proyectado pueden estimarse con las mismas ecuaciones y consideraciones propuestas en el Anejo 19 de este Código, multiplicándose el valor resultante por el coeficiente (η_p) que tiene en cuenta las variaciones en la densidad con respecto al hormigón convencional. Dicho coeficiente se calculará de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\eta_p = 0{,}4 + 0{,}6\ \frac{\rho_p}{2.400}$$

donde ρ_p es la densidad en estado seco del hormigón proyectado en kg/m^3, que no se considerará mayor que 2.400.

5.4 Diagrama tensión – deformación de cálculo

Para los hormigones proyectados se recomienda el uso de los diagramas parábola–rectángulo ó rectangular que se recogen a continuación, los cuales contemplan el riesgo de disminución progresiva de la deformación de rotura cuando disminuye la densidad en seco del hormigón proyectado.

a) Diagrama parábola – rectángulo:

   Se puede utilizar el mismo diagrama del Anejo 19, multiplicando la deformación última (ε_{cu2}) por η_p obtenido en el apartado 5.3 de este anejo.

b) Diagrama rectangular:

   Es aplicable el diagrama rectangular del Anejo 19, con tensión constante $\sigma_{cp} = \eta(x) \cdot f_{cdp}$ y altura del bloque comprimido $y = \lambda(x) \cdot h$. No obstante, la deformación última obtenida de acuerdo con el Código será multiplicada por η_p. Además, el factor λ_p para la obtención de $\lambda(x)$ será definido por la ecuación:

   $\lambda_p = 0{,}937 \cdot \eta_p - 0{,}737$

5.5 Dominios de deformación

Deberá tenerse en cuenta, en la definición de los dominios de deformación, la reducción de la deformación última en el hormigón en flexión, de acuerdo con el criterio establecido en el apartado 5.4 de este anejo.

5.6 Estados límite de agotamiento frente a cortante

5.6.1 Obtención de V_{u1p}

El esfuerzo cortante de agotamiento por compresión oblicua del alma se obtendrá de acuerdo con el apartado 6.2 del Anejo 19, reduciéndose por el factor υ_p dado por la ecuación siguiente. En ella se empleará la resistencia característica del hormigón proyectado (f_{ckp}) en N/mm².

$$\upsilon_p = 0{,}5 \cdot \eta_p \cdot \left(1 - \frac{f_{ckp}}{250}\right)$$

5.6.2 Obtención de V_{u2p}

5.6.2.1 Piezas sin armadura de cortante

El esfuerzo cortante por tracción en el alma se obtendrá como:

$$V_{u2p} = \left[\frac{0{,}18}{\gamma_c}\eta_p\xi\left(100\rho_p f_{cvp}\right)^{1/3} + 0{,}15\alpha_p\sigma'_{cdp}\right]b_0 d \geq \left[0{,}35 f_{ctdp} + 0{,}15\alpha_p\sigma'_{cdp}\right]b_0 d$$

5.6.2.2 Piezas con armadura de cortante

La contribución del hormigón a esfuerzo cortante se obtendrá como:

$$V_{cup} = \left[\frac{0{,}18}{\gamma_c}\eta_p\xi\left(100\rho_p f_{cvp}\right)^{1/3} + 0{,}15\alpha_p\sigma'_{cdp}\right]b_0 d \geq \left[0{,}35 f_{ctdp} + 0{,}15\alpha_p\sigma'_{cdp}\right]b_0 d$$

5.7 Estados límite de agotamiento por torsión en elementos lineales

5.7.1 Obtención de Tu1p

El esfuerzo torsor de agotamiento por compresión oblicua del alma, se obtendrá de acuerdo con el apartado 6.3 del Anejo 19, reduciéndose por el factor υ_p dado en el apartado 5.6.1 de este anejo.

5.8 Estados límite de agotamiento frente a punzonamiento

La tensión máxima resistente en el perímetro crítico, se obtendrá como:

$$\tau_{rdp} = \frac{0{,}18}{\gamma_c}\eta_p\xi\left(100\rho_p f_{cvp}\right)^{1/3} + 0{,}1\sigma'_{cdp} \geq\ 0{,}4 f_{ctdp} + 0{,}1\sigma'_{cdp}$$

5.9 Anclaje y empalme de las armaduras pasivas

La adherencia entre barras y alambres corrugados con el hormigón proyectado, puede alcanzar valores similares a los que se alcanzan con hormigones colocados por métodos convencionales. No obstante, éste es un parámetro que está muy influenciado por la técnica de puesta en obra, el diámetro de la barra, la densidad de armadura, la composición del hormigón, el contenido de acelerante y, especialmente, la experiencia y habilidad del operador, que juega un papel clave a la hora de alcanzar buenas prestaciones. Para determinar la longitud neta de anclaje, se consideran los siguientes coeficientes para el cálculo de la tensión de adherencia con el hormigón proyectado:

$$\tau_{bdp}\ = 2{,}25\ \eta_1\eta_2\ f_{ctd}$$

f_{ctdp} Resistencia a tracción de cálculo del hormigón proyectado, calculada de acuerdo con el apartado 5.3 del presente anejo. A efectos de cálculo no se adoptará un valor superior al asociado a un hormigón de resistencia característica 60 N/mm^2

η_1 Coeficiente relacionado con la calidad de la adherencia y posición de la barra durante el hormigonado

$\eta_1 = \eta_p$ *para* barra individual en un solo plano de armado y buena adherencia

$\eta_1 = 0,7$ para el resto de casos

η_2 Coeficiente relacionado con el diámetro de la barra

$\eta_2 = 1$ para barras de diámetro $\varnothing \leq 16$

$\eta_2 = (116-\varnothing)/100$ para barras de diámetro $\varnothing > 16$

6 Ejecución de estructuras de hormigón

6.1 Puesta en obra y curado del hormigón

6.1.1 Prescripciones generales

En la puesta en obra mediante proyección, un factor principal es el soporte sobre el que se proyecta, en el cual, previamente a la proyección, se deben realizar los trabajos preparatorios y tomar las medidas adicionales necesarias para asegurar las prestaciones finales requeridas, ya sean de adherencia entre capas o del acabado de la capa. El sustrato puede ser cualquier elemento portante capaz de resistir el impacto del hormigón proyectado y que tenga la suficiente rigidez para que el material pueda ser aplicado correctamente y se adhiera bien al sustrato sin que este último se mueva o vibre excesivamente.

El área de aplicación se limpiará con una mezcla aire-agua. La misma podrá estar húmeda pero sin agua libre antes de la aplicación del hormigón. El hormigón proyectado no se deberá emplear en sustratos con temperaturas inferiores a 2°C o en aquellos expuestos a vientos y lluvias fuertes sin tomar medidas especiales.

6.2 Fabricación del hormigón

6.2.1 Cemento

La cantidad mínima de cemento por metro cúbico de hormigón será 1,15 veces la establecida en el apartado 43.2.1 del articulado. Con ello se quiere compensar, en cierta medida, la parte de cemento que se pierde en el rebote, aparte de facilitar aspectos de puesta en obra. En el caso de que la proyección se realice por la vía seca, se tomarán las medidas necesarias para asegurar que la cantidad de agua añadida en la boquilla y la relación agua/cemento resultante no superen en ningún momento los límites establecidos en el Código, estando dentro de los límites definidos en proyecto y en la etapa de validación descrita en el apartado 7.2 del presente anejo.

6.2.2 Aditivos

Los acelerantes se almacenarán evitando la helada y la contaminación. Cada máquina para la proyección por vía húmeda incorporará una bomba dosificadora integrada para dispensar aditivos líquidos con una precisión mínima de ±5% de la dosificación requerida.

6.3 Transporte y suministro del hormigón

6.3.1 Transporte del hormigón

Dependiendo de la aplicación y del tiempo abierto necesario para el transporte y operación de proyección, es frecuente el empleo de aditivos estabilizadores de fraguado, por lo que no procede la limitación de tiempo que en el articulado se señala. En este caso, deberán considerarse las indicaciones del suministrador del aditivo en cuanto al tiempo máximo de estabilización.

6.3.2 Suministro del hormigón

Con respecto al suministro del hormigón de partida, rigen las consideraciones realizadas en el articulado, permitiéndose la especificación por composición. Esto debe tenerse presente en los temas de control y gestión de la obra.

6.4 Vertido y colocación del hormigón

Antes de iniciar la proyección, la dirección facultativa deberá aprobar el equipo y el operador. Cuando se inicia la misma, se dirigirá la boquilla en otra dirección a la de los trabajos hasta que la mezcla sea correctamente ajustada. Asimismo, en el caso de que durante la proyección el flujo fuera intermitente, el operario deberá realizar la misma operación hasta que dicho flujo vuelva a ser constante. Por ello, se recomienda proteger adecuadamente las zonas adyacentes a la de trabajo, para evitar salpicaduras, manchas y rebotes.

Cada capa de hormigón proyectado se llevará a cabo mediante varias pasadas de la boquilla en la zona de trabajo, mediante el uso de buenas prácticas y la manipulación de la boquilla. Cada pasada se realiza con una trayectoria en forma de elipse que se traslada en el espacio, esto es, no hay que concentrar la proyección en un punto. El hormigón saldrá de la boquilla en un flujo constante e ininterrumpido, manteniendo una distancia al soporte (entre 0,5 y 1,5 m en función del sistema de proyección y del equipo empleado) y un ángulo adecuado (próximo a 90º con respecto al sustrato). Cuando se proyecte detrás de la armadura, la boquilla se mantendrá próxima al sustrato y con un ángulo que asegure que la armadura quede totalmente envuelta, evitando que se acumule el rebote detrás de la misma.

Para superficies verticales o casi verticales, la proyección del hormigón deberá comenzar desde la parte inferior. En zonas donde se aplican capas gruesas, la superficie superior mantendrá una pendiente de aproximadamente 45º. Para superficies superiores curvas en clave o en bóveda, se deberá proyectar el hormigón preferiblemente desde los laterales hasta la parte superior.

Se respetará el tiempo suficiente para que el hormigón de una capa fragüe antes de aplicar la siguiente. Para obtener el espesor de hormigón prescrito es preferible, desde el punto de vista técnico, hacer varias pasadas formando capas finas, si bien desde el punto de vista de rendimientos este proceso no es satisfactorio, por lo que habrá que encontrar un equilibrio en la propia obra.

El constructor asegurará la proyección de una capa con el espesor mínimo establecido en proyecto. Para simplificar el control del espesor, siempre que sea posible, se instalarán separadores de referencia en diferentes puntos de la superficie sobre la cual se va a proyectar hormigón. El operador que controla la boquilla deberá cubrir la superficie con material hasta que no se aprecien los separadores, buscando generar un espesor lo más uniforme posible. Todo el material de rebote se retirará de la zona de trabajo y no se usará en los trabajos de proyección. La eliminación del rebote se realizará con el debido respeto a los riesgos de contaminación ambiental.

La máquina de proyección y el equipo auxiliar tendrán una capacidad adecuada para los volúmenes aplicados. Además, el equipo será a prueba de fugas con respecto a todos los materiales, manteniéndose en correcto funcionamiento para la duración de los trabajos en la obra. El equipo de proyección será capaz de alimentar los materiales a un ritmo aproximadamente constante y de expulsar las mezclas de hormigón proyectado desde la boquilla a velocidades que permitan la adherencia a la superficie con un mínimo rebote y una máxima adherencia y densidad.

El equipo se limpiará en profundidad como mínimo una vez por cada turno de trabajo, o en intervalos de tiempo menores si se usan aditivos para el control de la hidratación, para prevenir acumulación de residuos.

Las mangueras flexibles o rígidas deberán seguir una línea recta o curvas suaves. Además, presentarán un diámetro uniforme adecuado a la mezcla y a las características de la fibra (en el caso de hormigón proyectado con fibras) determinados en las pruebas en obra, evitando cualquier abolladura o torcedura.

El equipo para proyección por vía húmeda se configurará de acuerdo con las recomendaciones del fabricante. La boquilla estará diseñada para la adición de aire presurizado para obtener velocidad y alta compactación del hormigón. En los casos que se requiera, la boquilla presentará una entrada para la incorporación de los aditivos acelerantes de fraguado. Preferiblemente, estos aditivos se deberán mezclar con el aire comprimido en la boquilla antes de incorporarse al hormigón. La boquilla debe ser suficientemente larga para aprovechar la presión generada por el aire comprimido. El aire para el equipo debe ser limpio, seco y libre de aceite. Se proporcionará de forma continua al equipo a una presión no más baja que la de operación y en los ratios de volumen especificados por el fabricante.

6.5 Proyección para trabajos de reparación

Para trabajos de reparación de hormigón, se aplicarán los requisitos especificados en los apartados anteriores. Asimismo, se deberán cumplir las recomendaciones indicadas a continuación:

- Antes de iniciar los trabajos de reparación, se realizará una prueba en un área de la superficie para verificar la calidad de la superficie y que la armadura queda embebida adecuadamente.
- El hormigón se aplicará hasta el nivel del hormigón adyacente o hasta cumplir el recubrimiento especificado. Si fuera necesario, se usará encofrado para obtener la forma original.
- Si el espacio entre barras de armado es menor de 50 mm, se tomarán medidas especiales, tales como disminuir el hormigón que sale de la boquilla y reducir la distancia entre la boquilla y el sustrato.

6.6 Puesta en obra del hormigón en condiciones climáticas especiales

6.6.1 Hormigonado en tiempo frio

El hormigón proyectado se protegerá de la helada esporádica hasta que haya alcanzado una resistencia a compresión de al menos 5 N/mm². Si la helada se produjera de manera cíclica a cortas edades, se tomarán medidas adicionales para evitar que afecte a la durabilidad del material colocado.

Antes y durante la ejecución de elementos con riesgo de desprendimiento, el hormigón que se proyecta debe tener una temperatura de al menos 10°C. En el caso de que la temperatura afecte al comportamiento del material y la puesta en obra, deberán tomarse medidas adicionales en la central de producción para incrementar la temperatura del hormigón de partida, bien sea empleando agua caliente, bien protegiendo los áridos frente a heladas, entre otras medidas. Además se deberá tener en cuenta la temperatura del aire empleado para la proyección, así como la de los aditivos activadores de fraguado.

6.7 Curado del hormigón

En el hormigón proyectado, aparte de los métodos de curado habituales, podrán utilizarse aditivos de curado interno. Si los agentes de curado se aplican en zonas en las que habrá proyección de más capas de hormigón, se realizarán pruebas para comprobar la adherencia entre capas. Para ello, se emplearán las mezclas y métodos de trabajo aprobados antes de emplear dichos agentes en la obra.

El curado preferiblemente comenzará durante los 20 minutos siguientes a la finalización de cada operación de proyección si se usan aditivos acelerantes de fraguado y durante la primera hora siguiente cuando no se emplee ese tipo de aditivos. El curado será continuo durante al menos 7 días.

6.8 Procesos posteriores al hormigonado

6.8.1 Desencofrado, desmoldeo y descimbrado

Dada la velocidad muy rápida de desarrollo de resistencias de estos hormigones, se pueden reducir los tiempos de desencofrado, desmoldeo o descimbrado, que será como mínimo el tiempo en el que el conjunto del elemento estructural sea estable y esté todo proyectado.

6.8.2 Acabado de superficies

El empleo de aditivos acelerantes dificulta cualquier actuación posterior de acabado en la superficie de hormigón. En consecuencia, debe estudiarse en detalle (incluso con experiencias previas) cuál debe ser el aditivo y la dosificación de acelerante para conseguir el acabado que se requiera.

Salvo que se especifique lo contrario, se evitarán las acciones de acabado como el enrasado superficial aplicado directamente sobre la capa proyectada. En el caso de que se requiera un tratamiento por contacto, este se realizará empleando llanas. Ningún tratamiento de superficie tendrá lugar hasta que la capa previa haya alcanzado una resistencia adecuada. Inmediatamente tras el acabado de la capa final, se aplicará un agente de curado u otro método para proteger la superficie del secado. Donde sea necesaria la realización de un revestimiento posterior, las membranas de curado se retirarán antes de su aplicación.

En el caso de que se produzcan acumulaciones de áridos, nidos de grava u otros defectos, deberán ser eliminados. El área de la nueva proyección no será inferior a 300 x 300 mm.

7 GESTIÓN DE LA CALIDAD DE LOS PRODUCTOS

7.1 Criterios específicos para el control de los productos

7.1.1 Criterios específicos para la comprobación de la conformidad de los productos

Las especificaciones para todos los materiales cumplirán lo establecido en los Artículos 28 a 33 del Código Estructural y en el pliego de prescripciones técnicas particulares. En el caso de emplear fibras, también se seguirán las especificaciones establecidas en el Anejo 7.

7.1.2 Aditivos

En el caso de que se empleen acelerantes de fraguado, antes de comenzar la obra, se comprobará el efecto de los mismos a partir de ensayos con el cemento empleado, así como el resto de aditivos para la fabricación del hormigón de partida. Como consecuencia de lo anterior, se seleccionarán las marcas, tipos y dosificación de los acelerantes en la obra. La continuidad de su composición y características será garantizada por el fabricante correspondiente.

Durante la ejecución de la obra se vigilará que los acelerantes de fraguado sean los aprobados 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 los acelerantes de fraguado. La dosificación de validación de los acelerantes de fraguado será aquella que permita una adecuada puesta en obra, así como el correcto desarrollo de resistencias mecánicas a todas las edades según sea la especificación del hormigón.

El incumplimiento de alguna de las especificaciones será condición suficiente para calificar los acelerantes como no aptos para los hormigones. Cualquier posible modificación de la marca, el tipo o la dosificación 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 de nuevos ensayos de validación la dirección facultativa autorice su aceptación y empleo en la obra.

7.2 Control del hormigón

La caracterización de las propiedades del material se podrá realizar a tres niveles: sobre el hormigón de partida, sobre el hormigón ya proyectado en artesas normalizadas y sobre el hormigón proyectado en la propia estructura. Cuando la extracción del testigo o la ejecución del ensayo no supongan riesgo al que lo ejecuta y no provoquen un perjuicio estructural o estético inaceptables, la caracterización se podrá realizar en la propia estructura, no siendo necesario repetirla en la artesa. En caso contrario, se considerará que los resultados derivados de la caracterización de las artesas proyectadas son

representativos de la propia estructura, aunque pueden existir diferencias que deben ser evaluadas si se producen incidencias o no conformidades.

En lo que respecta al control del hormigón, hay que distinguir dos etapas con finalidades distintas: la validación previa y el control sistemático. En la primera de ellas, realizada antes del inicio de la ejecución de la estructura, se llevará a cabo la evaluación del comportamiento del hormigón y la comprobación de su conformidad con los requerimientos establecidos en proyecto. El equipo usado en las pruebas será el mismo que el empleado en la obra y los materiales serán representativos de aquellos que se usarán. La proyección será realizada por los operadores encargados de llevar a cabo la proyección en obra, los cuales deberán demostrar su competencia y habilidad para producir hormigón proyectado, cumpliendo en todo momento con las presentes recomendaciones. Con la mezcla de prueba se prepararán suficientes paneles de, al menos, 1.000 x 1.000 mm para proyección mediante robot y 600 x 600 mm para proyección manual, siguiendo lo descrito en la norma UNE-EN 14488-1, que serán debidamente caracterizados. La edad de extracción de las muestras, la edad de ensayo y el procedimiento de conservación y curado adoptados en esta etapa, serán los mismos que se emplearán durante la ejecución de la obra.

El procedimiento descrito en el párrafo anterior se repetirá teniendo en cuenta los valores máximos y mínimos previstos para la dosificación de acelerante y para los parámetros de proyección (presión de las bombas y del aire comprimido) durante la obra. En ese sentido, se deberá comprobar que los hormigones obtenidos en dichas situaciones extremas atienden a los requerimientos de proyecto. Asimismo, se realizará la caracterización del hormigón de partida empleado en las pruebas, con el fin de establecer los requerimientos que el responsable del suministro del mismo deberá respetar durante la ejecución. Como resultado final de esta etapa, se elaborará un informe de validación en el que se incluirá la descripción de las dosificaciones validadas, de los parámetros de proyección de referencia, de los resultados obtenidos y de los criterios para la aceptación de los hormigones.

En la segunda etapa, realizada durante la ejecución de la obra, se llevará a cabo la comprobación sistemática de los requerimientos desde el punto de vista de comportamiento y durabilidad establecido en proyecto y derivado de la etapa anterior. Dicha verificación se realizará tanto en el hormigón de partida como en el hormigón ya colocado. Es importante asegurar que el material objeto de los ensayos de control sea lo más representativo posible del que se encuentra en la estructura. Por ello, los ensayos de caracterización del hormigón ya colocado se llevarán a cabo en una superficie ejecutada con una dosificación de acelerante que sea representativa del lote.

7.2.1 Criterios generales para el control de la conformidad de un hormigón

Los criterios para el control del hormigón de partida son los mismos establecidos en el Código. El control de la calidad del hormigón proyectado incluirá, además del control especificado en el Código, el de su resistencia a muy cortas edades.

7.2.2 Toma de muestras

En el caso de que la tipificación del hormigón de partida se realice por propiedades, la toma de muestras previamente al proceso de proyección se realizará tal y como establece el Código. En el caso del hormigón proyectado, las muestras se obtendrán a partir de paneles previamente proyectados en la misma obra siguiendo el procedimiento descrito en la norma UNE-EN 14488-1 o en muestras extraídas del mismo hormigón colocado en obra, con lo que se obtienen resultados más representativos. La localización del punto a caracterizar en la estructura deberá ser propuesta por el contratista y aprobada por la dirección facultativa, siendo la dosificación de acelerante usada en la proyección de ese punto representativa del lote.

La extracción de muestras de los paneles proyectados o de la propia estructura se realizará cuando el hormigón proyectado haya alcanzado una resistencia a compresión media de al menos 15 N/mm², estimada en probetas cilíndricas. Todas las muestras extraídas serán talladas y preparadas antes de los ensayos, y se referenciarán apropiadamente, marcando la fecha y la hora de la proyección. El curado y la conservación de las muestras se realizará de manera análoga a la aplicada en obra. Para garantizar la trazabilidad, se aconseja realizar los controles del hormigón de partida y del hormigón proyectado sobre los mismos lotes de suministro.

7.2.3 Realización de los ensayos

Los principales ensayos realizados se presentan en la tabla A9.7.2.3, pudiendo ser de tipo informativo o característico. Los primeros aportan información básica sobre el material o sobre la compatibilidad de algunos de sus componentes, mientras que los segundos son de comprobación obligatoria para la aceptación del hormigón de partida o del proyectado. La dirección facultativa podrá incorporar otros ensayos a los ya indicados, así como establecer la obligatoriedad de ensayos informativos para la aceptación del material.

Tabla A9.7.2.3 Clasificación de los ensayos

Tipo	Ensayos
Informativos	Vicat modificado (7.2.3.7)
	Módulo de deformación (7.2.3.4)
	Contenido de fibras (7.2.3.5)
Característicos	Docilidad (7.2.3.1)
	Resistencia a compresión (7.2.3.2)
	Resistencia residual a flexotracción [(1)] (7.2.3.3)
	Comprobación de espesor proyectado (7.2.3.6)

[(1)] Este ensayo se considerará obligatorio solo en hormigones reforzados con fibras con responsabilidad estructural.

NOTA: Entre paréntesis se recogen los apartados de este anejo donde se detallan los correspondientes ensayos.

Otro aspecto relevante en elementos estructurales de hormigón proyectado, es la definición del momento en el que se lleva a cabo la caracterización. Dada la importancia de la evolución de la resistencia a corta edad en la estabilidad del elemento proyectado, se recomienda la realización de ensayos para estimar de manera directa o indirecta la evolución de propiedades durante las primeras 24 horas. Asimismo, para obtener resultados más fiables y representativos, se recomienda que la edad de caracterización de las propiedades mecánicas se acerque al momento en el que deberían producirse las solicitaciones en la estructura o exista riesgo de inestabilidad. Por lo general, si no hubiera especificación diferente en el pliego de condiciones o por limitaciones del procedimiento de ensayo, se define como edad de referencia para el cálculo de valores característicos la de 28 días.

En caso de que los componentes del hormigón de partida varíen o exista un cambio en el proceso de la puesta en obra, será necesario comprobar experimentalmente su idoneidad antes de seguir con la ejecución de la obra.

7.2.3.1 Ensayos de docilidad del hormigón

La docilidad del hormigón de partida se comprobará mediante la determinación de la consistencia del hormigón fresco por el asentamiento en el cono de Abrams de acuerdo con la norma UNE-EN 12350-2 o por la extensión de flujo en la mesa de sacudidas de acuerdo con la norma UNE-EN 12350-5. Se dará preferencia a la realización de este último ensayo por su mayor capacidad de discriminar variaciones que pueden afectar al proceso de bombeo y proyección, especialmente cuando se emplea hormigón con fibras. Salvo que se especifique lo contrario, la comprobación de la docilidad del hormigón se llevará a cabo justo antes del vertido a la tolva del equipo de proyección.

7.2.3.2 Ensayos de resistencia del hormigón

La evaluación de la resistencia hasta las 24 horas se llevará a cabo de acuerdo con la norma UNE-EN 14488-2, bien mediante el ensayo de penetración (que se utiliza hasta que el hormigón adquiere una resistencia igual a 1,0 N/mm²), bien mediante el método de la pistola de clavos (que se utiliza para estimar la resistencia hasta 20,0 N/mm²).

En función de la evolución temprana de la resistencia medida con los ensayos hasta las 24 horas, el hormigón proyectado se clasificará como de tipo J1, J2 o J3, de acuerdo con la figura A9.7.2.3.2. Los hormigones de clase J1 tendrán una evolución de resistencias entre las curvas A y B, mientras que los de clase J2 tendrán una evolución entre las curvas B y C. Los hormigones J3 deberán tener una resistencia superior a la indicada en la curva C.

La resistencia a compresión del hormigón proyectado cuando el material ya tenga una resistencia mínima de 15 N/mm² se estima de acuerdo con la norma UNE-EN 123090-3, a través del ensayo de testigos. Las muestras pueden ser cúbicas o cilíndricas, y la relación altura/diámetro (h/d) debe ser igual a 1,0 para muestras cúbicas y 2,0 para muestras cilíndricas. La utilización de distintas formas de muestra y distintas relaciones h/d, exige utilizar factores de conversión para comparar los resultados experimentales de resistencia a compresión. Se recomienda establecer una única forma de las muestras y adecuar la preparación de las mismas para que se mantenga la relación h/d deseada.

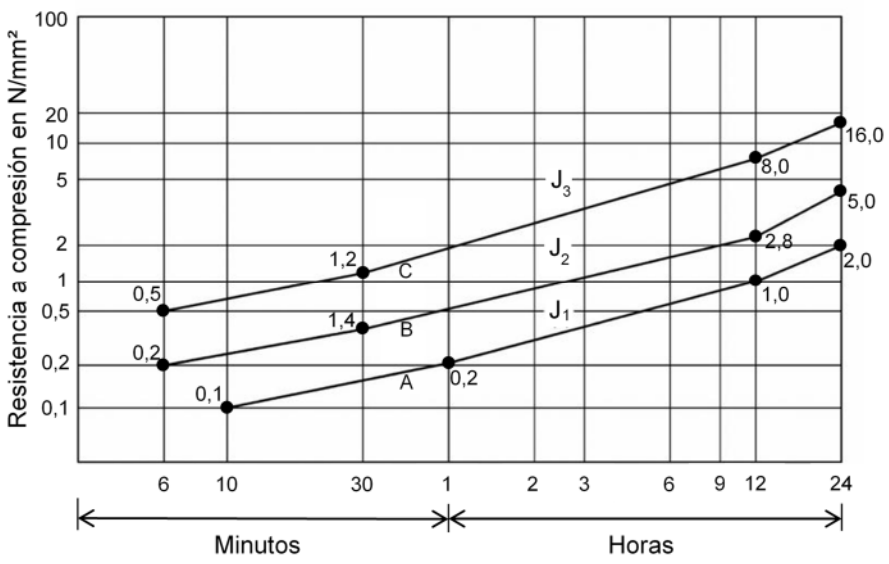


Figura A9.7.2.3.2 Requisitos de evolución de resistencia a muy corta edad

7.2.3.3 Resistencia a flexión y resistencia residual

A menudo, el hormigón proyectado está sometido a esfuerzos de flexión en servicio. La resistencia a flexión es una medida indirecta de la resistencia a tracción del hormigón y se realiza sobre viguetas cortadas o paneles obtenidos tras la proyección. Asimismo, es obligatoria la estimación de la resistencia residual del hormigón proyectado con fibras cuando estas tienen una responsabilidad estructural. Para ello, se debe emplear el ensayo de flexotracción según la norma UNE-EN 14651, el cual permite estimar las resistencias residuales requeridas para el diseño en estado límite de servicio y estado límite último. En este sentido, se tomarán como referencia los resultados obtenidos en el ensayo de tres puntos realizados en prismas de 150 x 150 x 600 mm con entalle.

Por las características del proceso de producción, dicho ensayo no es de fácil aplicación para el control sistemático del hormigón proyectado con fibras. Por esa razón, se pueden emplear ensayos alternativos. La determinación de los valores residuales equivalentes entre el ensayo de flexotracción según la norma UNE-EN 14651 y el ensayo alternativo elegido, se llevará a cabo mediante una comprobación experimental previa a la ejecución, tal y como indica el Anejo 7.

En esta comprobación, se producirán paneles de la misma proyección destinados a la extracción de los testigos para ambos ensayos. Para ello, se usarán paneles que tengan al menos 3,5 veces el volumen de los testigos, evitando la extracción en zonas afectadas por el rebote o por los efectos de borde. El espesor proyectado será suficiente para satisfacer la altura mínima de la muestra requerida para cada ensayo. Se tallarán los testigos para regularizar las caras de las probetas y eliminar la rugosidad de la superficie proyectada. La edad de extracción de las muestras de los paneles, las edades de ensayo y los

procedimientos de conservación y curado serán los mismos empleados posteriormente en la etapa de control de calidad. Los resultados obtenidos para aberturas de fisura análogas para ambos ensayos servirán para estimar las cargas residuales equivalentes, que serán la referencia para el control sistemático de la resistencia residual mediante el ensayo alternativo.

Para simplificar la extracción, la caracterización y el control sistemático, se recomienda que la resistencia residual se estime de manera indirecta mediante el Método Barcelona, descrito en la norma UNE 83515. Las aberturas de fisuras análogas entre dicho ensayo y el de flexotracción serán las definidas en el Anejo 7. El procedimiento de definición de equivalencia de la resistencia residual descrito con anterioridad también se podrá usar para estimar la tenacidad del material.

La estimación de la capacidad de absorción de energía de probetas planas reforzadas con fibras se realizará según la norma UNE-EN 14488-5.

7.2.3.4 Módulo de deformación

La estimación del módulo de deformación se realizará con testigos conforme a la norma UNE-EN 12390-13.

7.2.3.5 Contenido de fibras

La rápida evolución de las propiedades mecánicas del hormigón proyectado con acelerantes de fraguado dificulta la cuantificación del contenido de fibras por los métodos tradicionales. La determinación de dicho contenido se llevará a cabo de acuerdo con lo establecido en la norma UNE-EN 14488-7. En el caso de utilizar fibras metálicas, se recomienda la utilización del método descrito por la norma UNE-EN 14721, que estima el contenido de fibras mediante un método inductivo.

7.2.3.6 Ensayos para la comprobación del espesor proyectado

La verificación del espesor proyectado tras la ejecución de la estructura es de carácter obligatorio y se realizará con métodos topográficos o equivalentes. Dicha comprobación se realizará en puntos representativos distribuidos uniformemente por toda la superficie.

7.2.3.7 Ensayo de Vicat modificado

Como forma indirecta de comprobar la dosificación de acelerante de fraguado requerida o la compatibilidad entre los acelerantes de fraguado y los demás aditivos y cemento seleccionados, se empleará el ensayo de Vicat modificado, utilizando el mismo equipo descrito en la norma UNE-EN 196-3 para la determinación del tiempo de fraguado. Para la realización del ensayo, los materiales y los equipos deberán estar a la misma temperatura que la de la obra durante la aplicación del material.

El ensayo consiste en mezclar activamente 300 g de cemento con 84 g de agua durante 30 segundos hasta conseguir una pasta homogénea. Luego, se añaden los aditivos plastificantes/superplastificantes o retardantes, mezclando activamente durante 90 segundos. A continuación, se deja reposar durante 30 segundos y se vuelve a mezclar durante 90 segundos. Una vez terminado ese tiempo, se añade el acelerante de fraguado de manera rápida, continua y distribuida sobre el material mientras se mezcla de manera vigorosa durante 15 segundos. La mezcla se introduce en el molde tronco-cónico estandarizado en la norma UNE-EN 196-3 apoyado sobre una placa base y, en un tiempo inferior a 30 segundos desde la mezcla con el acelerante, se realiza la primera lectura. Todas las mediciones se llevan a cabo con la aguja usada para determinar el inicio de fraguado, que se pone en contacto con la parte superior de la muestra y se deja caer sobre la misma.

El tiempo de inicio de fraguado se considera como aquél, en el que la aguja deja de tocar la placa base. El tiempo de final de fraguado se considera como aquél, en el que la aguja penetra menos de 1 mm en la muestra. Ambos se miden tomando como referencia el inicio de la adición del acelerante de fraguado. El ensayo se repetirá como mínimo tres veces manteniendo la misma composición de mezcla y se usarán los tiempos promedio obtenidos en las tres mediciones. La tabla A9.7.2.3.7 presenta una clasificación orientativa de los resultados.

Tabla A9.7.2.3.7 Clasificación de los resultados del Ensayo de Vicat modificado

Fraguado	Aceptable	Muy bueno
Inicio	≤ 5 min	≤ 2 min
Fin	≤ 10 min	≤ 5 min

En aras de facilitar la comparación de la eficiencia de diferentes acelerantes, se podrán comparar los tiempos obtenidos para una misma dosificación definida previamente de acuerdo con los requisitos del proyecto. Alternativamente, también se podrá determinar la dosificación mínima requerida de cada acelerante para alcanzar un comportamiento considerado aceptable o muy bueno.

Para aplicaciones con alto riesgo de desprendimiento del material proyectado o en las que se requiera resistencia a muy cortas edades, se recomienda buscar la composición o la dosificación que confiera un comportamiento clasificado como muy bueno. En cambio, las aplicaciones en las que no existe un riesgo elevado de desprendimiento se pueden ejecutar con composiciones o dosificaciones que presenten un comportamiento clasificado como aceptable. La realización del ensayo de Vicat modificado no exime al constructor de llevar a cabo pruebas a escala real para confirmar la compatibilidad y los resultados obtenidos.