

Análisis en Rotura de Secciones

7.1. Introducción

En este capítulo se quieren exponer cuáles son los principios y modelos que se han tomado para la verificación de los estados límite último de la sección frente a sollicitaciones normales y a las tangenciales. De este modo, se pretende que el programa desarrollado permita una verificación del dimensionamiento realizado acorde con las sollicitaciones de agotamiento externas a la sección y no se deba acudir a otros medios para llevar a cabo esta tarea.

Debe concebirse este nuevo módulo como parte independiente del programa ya que las ecuaciones, modelos y coeficientes de seguridad utilizados para los materiales en rotura son distintos que los empleados en servicio. No obstante, para secciones diseñadas con acero activo si que existe una conexión con el análisis evolutivo de la sección que se hace en el programa, pues es inevitable para conocer las pérdidas de pretensado en cada etapa, y en concreto, el valor final del pretensado con el que se hacen las comprobaciones.

Se ha querido que el rango de validez de este análisis en rotura abarque hormigones de hasta 100 MPa, por lo tanto, se presentaran los modelos empleados y las cautelas necesarias con el fin de no vulnerar la frontera de aplicabilidad de la verificación.

7.2. Modelos constitutivos

7.2.1. Hormigón

Para el cálculo en rotura de secciones sometidas a flexo-compresión se utilizan diagramas que tratan de reproducir el comportamiento tensión-deformación experimentalmente observado, como el parábola-rectángulo, birrectangular u otros. No obstante, a veces es muy útil sustituir el diagrama tensión-deformación del hormigón por un bloque de tensiones de forma que la resultante de tensiones y el punto de paso de ésta coincidan con las del diagrama sustituido. Este es el caso del bloque rectangular equivalente que se describe a continuación.

7.2.1.1. Bloque rectangular equivalente

El bloque rectangular está definido por dos parámetros: α_1 y β_1 tal como se indica en la figura 7.1. El valor de α_1 es la relación entre la tensión en el bloque rectangular equivalente y la resistencia del hormigón f_c en probeta normalizada; y β_1 es la razón entre la profundidad del bloque y la profundidad del eje neutro x .

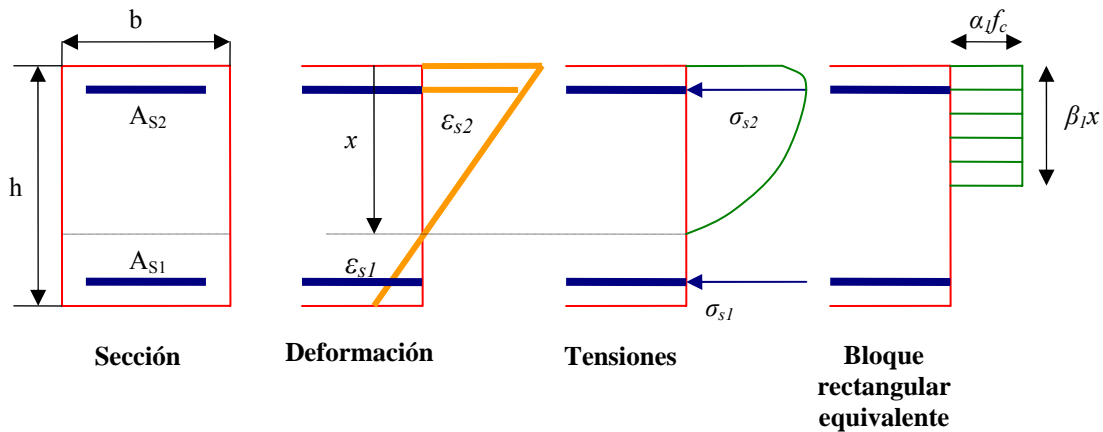


Figura 7.1. Bloque rectangular equivalente para una sección de hormigón armado

Recientes estudios han propuesto:

$$\alpha_1 \beta_1 = 1,2932 f_c^{-0,0998} \geq 0,71 \quad \text{para cargas instantáneas} \quad (7.1)$$

$$\alpha_1 \beta_1 = 0,6470 f_c^{-0,0324} \geq 0,58 \quad \text{para cargas diferidas} \quad (7.2)$$

$$\beta_1 = 1,0948 f_c^{-0,091} \geq 0,67 \quad \text{con } f_c \text{ en MPa} \quad (7.3)$$

En los códigos vigentes se acepta una metodología similar, conservando el factor de intensidad α_1 igual a 0,85 para el bloque de tensiones del hormigón y el factor de intensidad β_1 variable en función del dominio de deformaciones en el cual se halle el plano de agotamiento.

El bloque rectangular equivalente es un método sancionado por la práctica y usado de forma manual para secciones y casos de carga sencillos, que no suponga más que la resolución de un sistema de ecuaciones no lineal de a lo sumo 3 incógnitas. Con la existencia de los computadores y las calculadoras personales implementar este método de cálculo es directo y agiliza enormemente el proceso.

7.2.1.2. Diagrama parábola – rectángulo

Inicialmente propuesto por Hongstad (1995) se generaliza utilizando una parábola de grado n y un segmento rectilíneo, y modificando las deformaciones última ϵ_{cu} y de pico ϵ_{co} en función de la resistencia del hormigón. Esta es la forma que el EC-2 incorpora este diagrama para hormigones de hasta 90 MPa: el vértice de la parábola se

encuentra en la abcisa ε_{co} , deformación de rotura a compresión simple, y el vértice extremo de rectángulo en la abcisa ε_{cu} , deformación de rotura del hormigón en flexión. La ordenada máxima de este diagrama corresponde a una compresión igual a $0,85f_{cd}$. Los valores de ε_{co} son los siguientes:

$$\varepsilon_{co} = 0,002 \quad \text{si } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad (7.4)$$

$$\varepsilon_{co} = 0,002 + 0,5(f_{ck} - 50)10^{-5} \quad \text{si } f_{ck} > 50 \text{ MPa} \quad (7.5)$$

Los valores de la deformación ε_{cu} vienen dados por:

$$\varepsilon_{cu} = 0,0035 \quad \text{si } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad (7.6)$$

$$\varepsilon_{cu} = 0,0025 + 0,002(1 - f_{ck} / 100) \quad \text{si } f_{ck} > 50 \text{ MPa} \quad (7.7)$$

Y el valor de n que define el grado de la parábola vale:

$$n = 2 \quad \text{si } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad (7.8)$$

$$n = 1,4 + 23,4[(90 - f_{ck})/100]^4 \quad \text{si } f_{ck} > 50 \text{ MPa} \quad (7.9)$$

De este modo, la tensión en función de la deformación vale:

$$\sigma_c = f_{cd} \left[1 - \left(1 - \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{co}} \right)^n \right] \quad \text{si } 0 \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{co} \quad (7.10)$$

$$\sigma_c = f_{cd} \quad \text{si } \varepsilon_{co} \leq \varepsilon_c \leq \varepsilon_{cu} \quad (7.11)$$

Para un hormigón de 30 MPa de resistencia a compresión simple a los 28 días el diagrama parábola-rectángulo en rotura podría esquematizarse como:

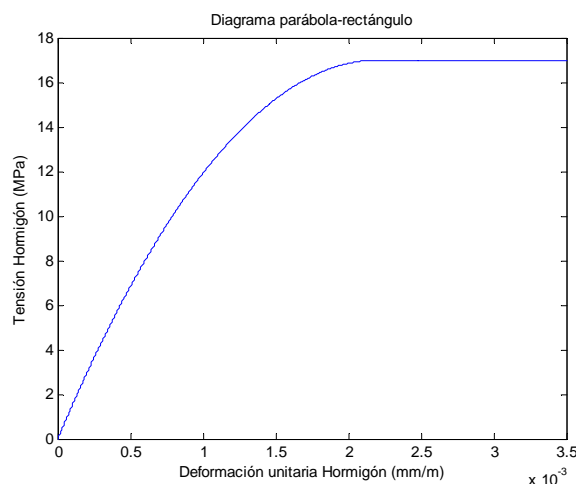


Figura 7.2. Diagrama parábola – rectángulo para hormigón

7.2.1.3. Comparación de ambos diagramas

Para el modelo de análisis en rotura frente a solicitaciones normales que aquí se utiliza el diagrama parábola – rectángulo. No obstante, aún sabiendo que este es el que mejor reproduce el comportamiento del hormigón en rotura, se va a comparar los resultados obtenidos de analizar una sección en estas condiciones considerando ambos diagramas:

Considérese una sección rectangular de 0,30 metros de ancho por 0,50 metros de altura con las siguientes características de los materiales:

| | |
|------------------|----------------|
| Hormigón | HA-25/P/20/IIa |
| Armaduras | B-500SD |

Tabla 7.1. Propiedades de los materiales

Se consideran los valores de los coeficientes parciales de seguridad correspondientes a un nivel de control normal.

Se pretende calcular el momento último de la sección suponiendo que trabaja a flexión simple bajo dos hipótesis de armado y comparar los resultados obtenidos con los dos diagramas:

1. Sólo armadura de tracción $A_s = 1885$ ($6\Phi 20$).
2. La misma armadura de tracción más $3\Phi 16$ en compresión.

| | Parábola-Rectángulo | Rectángulo equivalente |
|---------------------------------------|----------------------------|-------------------------------|
| $6\Phi 20$ | 294,3 KNm | 299,8 KNm |
| $6\Phi 20+3\Phi 16$ | 334,3 KNm | 322,9 KNm |

Tabla 7.2. Momentos últimos según la ecuación constitutiva del hormigón en rotura

A la vista de los resultados, ambos métodos ofrecen valores similares del momento de agotamiento. Las diferencias entre ambos son de un 1,9% sin armadura de compresión y un 3,5% con el refuerzo a compresión; luego, parece que ambos métodos conducen a resultados muy similares con la salvedad de que el diagrama parábola – rectángulo reproduce de forma más fidedigna la realidad. Dando peso a este hecho y de que se trata de un análisis numérico fibra a fibra en soporte informático parece lógico emplear el diagrama parábola – rectángulo.

7.2.2. Aceros activos y pasivos

7.2.2.1. Acero activo

Para modelar el comportamiento tenso - deformacional del acero activo se ha utilizado la misma ecuación constitutiva que en servicio. Para tener en cuenta los criterios de seguridad que dictan los códigos para el cálculo en estado límite último, se deducirá el diagrama del acero activo en agotamiento mediante una afinidad oblicua, paralela a la recta de Hooke, de razón $1/\gamma_s$; donde γ_s es el coeficiente de minoración de la resistencia máxima del acero.

De este modo se tiene un diagrama tal que así¹:

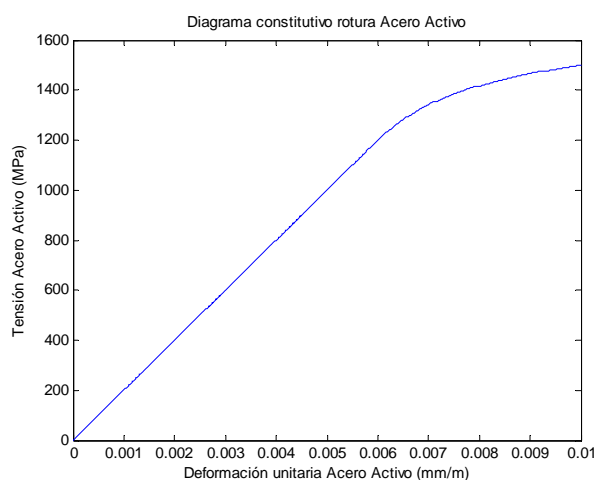


Figura 7.3. Diagrama en rotura para el Acero Activo

7.2.2.2. Acero pasivo y estructural

Para estos se modela su comportamiento tenso - deformacional mediante tres rectas. Una de ellas con pendiente igual al módulo elástico del material, E_s y E_a según sea pasivo o estructural, y otras dos horizontales de valor constante f_{yd} y f_{ad} para reproducir el límite fluencia de cada material sin considerar el posible endurecimiento de los mismos.

Se presenta un posible diagrama para un acero pasivo de armar tipo B-500SD. Para obtener el mismo diagrama para un acero estructural basta con cambiar el límite de fluencia f y el módulo de elasticidad E :

¹ Para el acero activo se considera exclusivamente la rama traccionada. En condiciones de uso normal, este estará traccionado debido a las acciones externas y la acción del pretensado existente en cada fase que se deduce directamente de la tensión inicial menos las pérdidas hasta dicho instante.

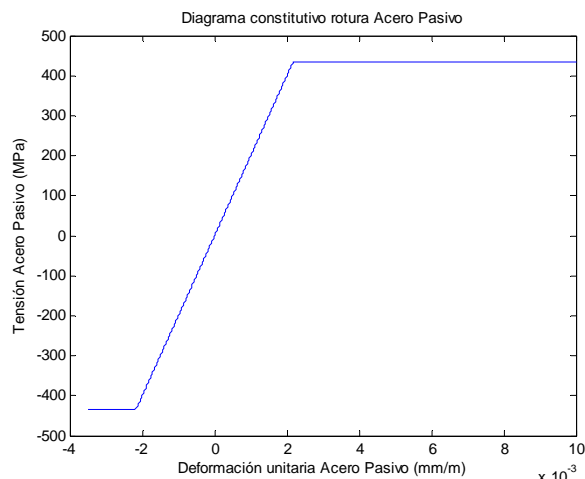


Figura 7.4. Diagrama en rotura para el Acero Pasivo

7.3. Análisis en rotura frente a solicitaciones normales

7.3.1. Sección resistente de hormigón

Para la obtención de la capacidad resistente de una sección o la verificación frente a un conjunto de esfuerzos de una sección parcial o total de hormigón se debe considerar sus anchos eficaces en fase de construcción o de servicio analizada. De este modo, en el momento de introducir la sección de cálculo en el programa deberán deducirse los anchos eficaces según el código que se está empleando.

7.3.2. Sección resistente de acero estructural

En secciones formadas íntegramente o parcialmente por acero estructural y, además, existan zonas comprimidas potencialmente inestables deberá aplicarles los correspondientes coeficientes de reducción del ancho del ala, o del alma si procede, para tener en cuenta los posibles fenómenos de abolladura local de la pieza

7.3.3. Deformaciones máximas. Diagrama de interacción

El motor de cálculo presentado para el análisis seccional se ha empleado también para la construcción de diagramas de interacción teniendo en cuenta los coeficientes de minoración de las resistencias y las leyes constitutivas de los materiales para realizar la comprobación de los estados límite último frente a solicitaciones normales. Para ello, es necesaria la definición de pivotes de agotamiento acordes con la RPX-95 más una serie de criterios propios que a continuación se exponen. Los pivotes se definen con las siguientes condiciones:

- *Hormigón en compresión.* Deformación² máxima -0.0035 de la tabla en flexión y del -0.002 para la tabla en compresión pura. El hormigón en tracción sin armadura no se define en la RPX-95 ni en la actual instrucción EHE por lo que se adopta un valor de 0.01.
- *Acero estructural en compresión con problemas de potencial abolladura.* Deformación máxima $1.2\varepsilon_y$ y -0.01 en caso contrario.
- *Acero estructural en tracción.* Se acepta una deformación máxima de $5\varepsilon_y$.
- *Acero pasivo y activo.* Al encontrarse embebidos en el hormigón, son limitativos a tracción adoptándose 0.01 como deformación máxima.

En cualquier caso, los valores de las deformaciones antes mostrados podrían cambiarse para estudiar el comportamiento del diagrama en estudios paramétricos posteriores.

7.3.3.1. Ejemplo de aplicación para sección mixta

Para ilustrar lo expuesto referente al análisis en rotura frente a solicitaciones normales se va a estudiar la siguiente sección híbrida:

Se trata de una viga de forjado unidireccional formada por una sección parcial metálica y una losa de compresión de hormigón. Para aumentar la capacidad de la sección frente a las tracciones se van a soldar dos barras de acero pasivo de 2 cms de diámetro en el ala inferior de la pieza. Las demás características de la sección se detallan en las tablas siguientes:

| | |
|--------------------------|----------------|
| <i>Hormigón</i> | HA-40/P/20/IIa |
| <i>Acero Pasivo</i> | B-500SD |
| <i>Acero Estructural</i> | S-355JR |

Tabla 7.3. Propiedades de los materiales de la sección

La sección parcial metálica se compone de un alma soldada a dos alas cuyas extremas dimensiones se detallan a continuación:

| | Ala inferior | Alma | Ala superior |
|---------------------|--------------|------|--------------|
| <i>Ancho (cm)</i> | 20,0 | 30,0 | 15,0 |
| <i>Espesor (cm)</i> | 1,0 | 1,0 | 1,0 |

Tabla 7.4. Dimensiones de la sección parcial metálica

² Estas deformaciones son válidas para los hormigones convencionales. Para los hormigones HAR se han implementado las consideraciones que se recogen en las *Recomendaciones para el proyecto de estructuras de hormigón de alta resistencia* del Ache, Monografía M-8.

| Trapezio | Base inferior (m) | Altura (m) | Base superior (m) |
|----------|-------------------|------------|-------------------|
| 1 | 0,20 | 0,10 | 0,25 |
| 2 | 0,80 | 0,20 | 0,80 |

Tabla 7.5. Dimensiones de la sección parcial de hormigón

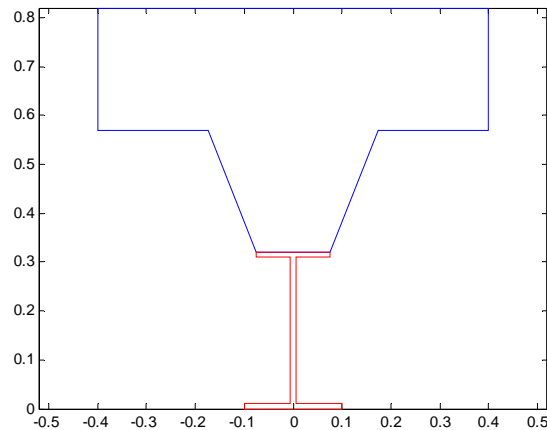


Figura 7.5. Representación de la sección

En este ejemplo se analiza el comportamiento en rotura para conocer la capacidad última de la sección si ésta trabaja a flexión simple bajo momentos positivos, así como conocer cuáles son las deformaciones y las tensiones en las fibras extremas.

Se va a considerar que el ala superior al estar conectada a la sección parcial de hormigón no tiene problemas de inestabilidad por abolladura.

Obtención del diagrama de interacción

El diagrama de interacción flector-axil de la sección se obtiene mediante la técnica de los pivotes presentada anteriormente. De este modo, se barren todos los posibles planos de agotamiento de la sección y se puede hallar en cuál de estos planos la integral de tensiones tiene una resultante nula, o lo que es lo mismo: axil nulo.

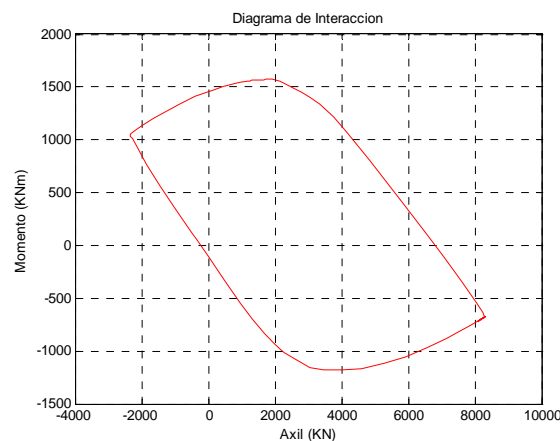


Figura 7.7. Diagrama de interacción sección híbrida

Capacidad resistente de la sección

De todos los puntos del diagrama de interacción, como se ha comentado, sólo interesa el que corresponde a una fuerza axial nula y flexión positiva. Se discretizan la sección metálica y la losa de compresión en 50 particiones cada una para poder integrar las tensiones, y de este modo, obtener los esfuerzos axil y flector en cada elemento diferencial. Según los análisis realizados por el programa con los modelos implementados y ya expuestos se tiene que:

| | |
|---------------------------|--------|
| $M_{\text{último}} (KNm)$ | 1458,1 |
| $\chi_u (m^{-1})$ | 0,013 |
| $x_{\text{neutra}} (cm)$ | 18,1 |

Tabla 7.6. Capacidad resistente de la sección y modo de rotura

La fibra neutra está situada en la sección parcial de hormigón lo que implica que parte de ésta permanece fisurada en rotura.

| | Sección Metálica | Losa de Hormigón |
|-----------------------|------------------|------------------|
| <i>Fibra inferior</i> | 8,4 mm/m | 4,1 mm/m |
| <i>Fibra superior</i> | 4,1 mm/m | -2,3 mm/m |

Tabla 7.7. Deformaciones unitarias en las fibras extremas de las secciones parciales

| | Sección Metálica | Losa de Hormigón |
|-----------------------|------------------|------------------|
| <i>Fibra inferior</i> | -322,7 MPa | 0,0 MPa |
| <i>Fibra superior</i> | -322,7 MPa | 22,7MPa |

Tabla 7.8. Tensiones en las fibras extremas de las secciones parciales

Nótese que la rotura de la sección se da por la deformación excesiva de la fibra inferior de la sección parcial metálica, que está totalmente traccionada en el plano de agotamiento:

$$\varepsilon_{a,máx} = 5 * \varepsilon_{ak} = 5 * f_{ak} / E_a = 5 * 355 / 210.000 = 8,45 \text{ mm/m}$$

7.3.4. Análisis en rotura de soportes de alta resistencia

Para hormigones de baja y media resistencia, HC $f_{ck} < 60 \text{ MPa}$, la capacidad última de un soporte de hormigón armado sometido a flexo – compresión puede obtenerse, con razonable aproximación, mediante el uso de diagramas de interacción.

En caso de compresión simple, la incertidumbre en el punto de aplicación de la carga o las imperfecciones geométricas se aconseja considerar una excentricidad mínima.

Tradicionalmente se ha utilizado un factor de reducción de la resistencia del hormigón para tener en cuenta el cansancio bajo cargas permanentes, generalmente 0,85, así como un factor reductor de la resistencia de del hormigón por efectos del hormigonado vertical que puede dar lugar a una distribución no uniforme de las resistencias. En la actualidad ambos factores están cuestionados, dado que el nivel de cargas permanentes no suele alcanzar el umbral de tensiones para que el cansancio sea efectivo y también a que la utilización de aditivos plastificantes muy eficientes que mejoran sensiblemente la trabajabilidad, junto con la mejora de las técnicas de colocación y compactación del hormigón conducen a una notable mejora de la homogeneidad del soporte en altura.

No obstante, numerosos ensayos sobre soportes de HAR han mostrado que la capacidad resistente de los soportes ensayados, especialmente bajo esfuerzos de compresión en la rama del diagrama de interacción con esfuerzo axial superior al de la rotura crítica, es menor a la obtenida mediante métodos válidos para soportes de HC, anteriormente citados, siendo mayores las diferencias a mayor resistencia del hormigón. En muchos ensayos realizados se ha detectado el desprendimiento explosivo del recubrimiento para valores de la deformación de compresión en el hormigón entre 0,0022 y 0,0030, inferiores a la deformación última del hormigón.

Esta pérdida de recubrimiento, para niveles de esfuerzos inferiores a los de cálculo parece ser la explicación más razonable para la disminución de capacidad a flexo – compresión de soportes de HAR, por ello deberá considerarse en los cálculos. Aunque para soportes de HC ensayados bajo cargas centradas y excéntricas también se observa un cierto daño en el recubrimiento, éste no salta inmediatamente. En [17] se puede hallar una explicación más detallada de este fenómeno.

Así pues, para el cálculo de soportes de HAR se plantea, como opción más razonable en la actualidad, el uso de diagramas de interacción o cualquier otro método de cálculo de secciones que tenga en cuenta, además, la forma de la curva tensión – deformación del hormigón de alta resistencia hasta una deformación máxima del 0,0025, aproximadamente, para la que salta el recubrimiento.

Para el desarrollo del programa se ha utilizado un método para el cálculo de soportes de HAR expuesto en [18] basado en este principio. Para ello, se realiza el análisis seccional en régimen no lineal eliminando el hormigón del recubrimiento en cuanto se supera la deformación de 0,0025. Con esto, se obtienen los diagramas de interacción para soportes de HAR y, por añadidura, unos factores de reducción del esfuerzo axial γ_1 y del momento flector γ_2 , para considerar el *spalling* definidos así:

$$\gamma_1 = \frac{N_u^{2,5}}{N_u} ; \gamma_2 = \frac{M_u^{2,5}}{M_u} \quad (7.12)$$

Donde:

$N_u^{2,5}$ y $M_u^{2,5}$: Son el axial y el momento resistentes de la sección, respectivamente, asociados a la deformación para la que salta el recubrimiento.

N_u y M_u : Son el axil y el momento últimos de la sección sin pérdida del recubrimiento.

Diversos estudios realizados para conocer la influencia sobre estos factores de reducción confirman la existencia de distintos parámetros. Se encuentra que el espesor del recubrimiento, el tamaño de la sección y la cuantía de armadura longitudinal apenas influyen en γ_1 ni en γ_2 , mientras que la resistencia del hormigón y el nivel del esfuerzo axial influyen significativamente. Para el programa se utilizan los mismos valores de los coeficientes que proponen [18]:

$$\gamma_1 = 1 - \frac{f_c - 80}{300} \quad \text{para } f_c \geq 80 \text{ MPa} \quad \text{y} \quad \gamma_1 = 1 \quad \text{para } f_c < 80 \text{ MPa} \quad (7.13)$$

$$\gamma_2 = 1 - \frac{f_c - 55}{106} \frac{N}{N_0} \gamma_1 \quad \text{para } f_c \geq 55 \text{ MPa} \quad \text{y} \quad \gamma_2 = 1 \quad \text{para } f_c < 55 \text{ MPa} \quad (7.14)$$

Donde N_0 es el axil último centrado, sin momento flector, de la sección completa sin considerar el salto del recubrimiento y N el axil que solicita la sección.

De esta forma, conocido el diagrama de interacción de la sección utilizando una curva de tensión – deformación propia del hormigón convencional, el diagrama de interacción para HAR se obtiene multiplicando los esfuerzos axiles por $(1 - \gamma_1)$ y los momentos por $(1 - \gamma_2)$.

7.3.4.1. Ejemplo de aplicación de cálculo de soportes de HAR

Se quiere probar, con el programa implementado, que los resultados obtenidos al analizar en rotura un pilar de edificación cuadrado $30 \times 30 \text{ m}^2$ de hormigón de alta resistencia y armado simétricamente son distintos según la consideración del salto del recubrimiento para una cierta deformación o según la consideración de sección íntegra para cualquier deformación admisible.

Los demás datos del análisis son:

| | |
|---------------------|------------------|
| Hormigón | HAR-80/P/20/IIIa |
| Acero Pasivo | B-500SD |

Tabla 7.9. Propiedades de los materiales de la sección

| | |
|-------------|-------|
| 4Φ20 | 4 cm |
| 2Φ20 | 15 cm |
| 4Φ20 | 26 cm |

Tabla 7.10. Distribución de armado

Se pretende obtener los diagramas de interacción suponiendo el salto de recubrimiento para una deformación de compresión del hormigón de $-2,5 \text{ mm/m}$ y el el

mismo suponiendo que el recubrimiento permanece íntegro en el proceso de rotura de la sección. Además se quiere calcular el momento de agotamiento para un axil de 3000 KN de compresión en ambos casos y el estado tenso – deformacional en rotura.

Los diagramas de interacción obtenidos en las dos situaciones se presentan en la siguiente figura:

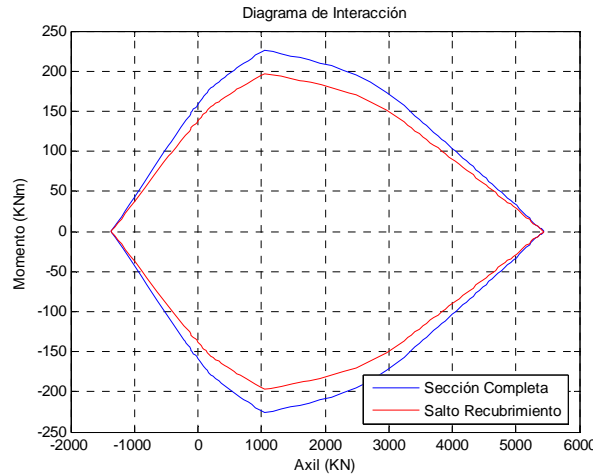


Figura 7.8. Diagramas de interacción para las 2 hipótesis

Nótese que los dos diagramas son homotéticos respecto a la coordenada vertical de razón $\gamma_2 = 0,87$. Esta situación se da únicamente cuando el coeficiente γ_1 adopta el valor unidad, es decir: el hormigón tiene una resistencia a los 28 días igual o inferior a los 80 MPa, véase ecuación 7.13. Para los demás casos el diagrama de interacción para la sección que pierde el recubrimiento en el proceso de rotura sufre una contracción en las dos direcciones del plano.

Los demás resultados obtenidos son:

| | Sección Completa | Salto Recubrimiento |
|---|------------------|---------------------|
| $M_{\text{último}} \text{ (KNm)}$ | 171,3 | 149,0 |
| $\chi_{\text{última}} \text{ (1/m)}$ | 0,009 | 0,008 |
| $x_{\text{neutra}} \text{ (cm)}$ | 27,8 | 30,0 |
| $\varepsilon_{c,\text{sup}} \text{ (mm/m)}$ | -2,6 | -2,3 |
| $\varepsilon_{c,\text{inf}} \text{ (mm/m)}$ | 0,2 | -0,0 |

Tabla 7.11. Parámetros en rotura en cada caso

A la vista de los resultados obtenidos se puede concluir, para este ejemplo que:

1. Hay una reducción del 13% del momento de agotamiento si se considera que el recubrimiento salta al alcanzar una deformación por compresión determinada. Resulta una cantidad no despreciable y que puede conducir a errores grandes sino se tiene en cuenta este fenómeno.
2. La sección que permanece íntegra durante todo el proceso de rotura falla por compresión excesiva en la fibra superior, y lo hace de forma frágil en la tabla de flexión compuesta, con una profundidad relativa de la fibra neutra x/d de

1,070; mientras que la otra, lo hace de forma aún más frágil, x/d adopta un valor de 1,154 y falla por en un plano dominado por la compresión compuesta donde todas las fibras están comprimidas pero no se alcanza la $\varepsilon_{c,ult}$.

Conclusión

Los soportes armados con hormigón de alta resistencia padecen una pérdida de ductilidad y de capacidad resistente debido al fenómeno del *spalling* que debe tenerse en cuenta en los cálculos. Parece que la forma más sencilla es la de modificar la ley constitutiva del hormigón en rotura y aplicar unos coeficientes de reducción γ_1 y γ_2 a los esfuerzos últimos hallados mediante la técnica de los pivotes que ya ha sido sancionada por diversas instrucciones, entre ellas la instrucción española EHE y el Eurocódigo 2.

7.4. Análisis en rotura frente a cortante

7.4.1. Introducción

Con el fin de dotar al programa de una mayor capacidad de cálculo y resolución de diversos problemas tanto de comprobación como de dimensionamiento de secciones, se han implementado los algoritmos necesarios para analizar secciones en rotura frente a cortante.

Del mismo modo que para las solicitaciones normales se ha dividido la exposición según se trate de hormigones convencionales o de alta resistencia cuando proceda.

Nota: El programa no contempla un análisis frente a solicitaciones tangenciales cuando se trata con secciones metálicas o mixtas.

7.4.2. Secciones de hormigón convencional

Para el cálculo del cortante de agotamiento en secciones de hormigón armado o pretensado con $f_{ck,28}$ inferiores a los 50 MPa y las posteriores comprobaciones se utilizan las consideraciones y metodología presentada en la EHE, que coincide en todos sus puntos con el EC-2 por lo que no procede presentar las ecuaciones en este trabajo.

7.4.3. Secciones de hormigón de alta resistencia

En la comprobación y dimensionamiento de piezas sometidas a esfuerzo cortante con hormigón debe considerarse que la alta resistencia de la matriz y la interfaz entre la

matriz y los áridos puede dar lugar a fisuras con escaso engranamiento entre sus caras, disminuyendo, por tanto, el término V_{cu} correspondiente a la contribución del hormigón a la resistencia a cortante.

Por ello, para la determinación de los valores V_{u2} para piezas sin armadura a cortante y de V_{cu} para piezas con armadura a cortante, se deberá limitar el valor de f_{ck} a 60 MPa.

Para la determinación del esfuerzo cortante de agotamiento por compresión oblicua del alma se limitará el valor de f_{1cd} a:

$$f_{1cd} = 0,6f_{cd} \quad \text{para } f_{ck} \leq 60 \text{ MPa} \quad (7.15)$$

$$f_{1cd} = (0,9 - 0,005f_{ck})f_{cd} \quad \text{para } 60 \text{ MPa} \leq f_{ck} \leq 80 \text{ MPa} \quad (7.16)$$

$$f_{1cd} = 0,5f_{ck} \quad f_{ck} > 80 \text{ MPa} \quad (7.17)$$

Las demás consideraciones a tener en cuenta son:

$$\sigma'_{cd} \leq 0,2f_{cd} \quad (7.18)$$

$$\psi = 1 + \sqrt{\frac{0,2}{d}} \leq 2 \quad (7.19)$$

$$V'_{u2} = \left(0,035\psi^{3/2} f_{ck}^{1/2} - 0,15\sigma'_{cd} \right) b_0 d \leq V_{u2} \quad (7.20)$$

Con todas estas modificaciones a la formulación para el cálculo del cortante de agotamiento en hormigón convencional se puede abordar el mismo análisis para el hormigón de alta resistencia. Nótese que la formulación no es continua, sino que existen saltos en diversos puntos.

7.4.4. Secciones compuestas por dos hormigones

Este tema es sistemáticamente obviado por las distintas Instrucciones, tanto nacionales como de carácter internacional. De todos modos, en [4] se presentan unas ecuaciones para resolver el problema que han sido implementadas en el programa con el fin de dar solución a esta cuestión.

7.4.4.1. Cortante de agotamiento en vigas compuestas

Sea la sección de la figura 7.9, donde la zona H_1 es de hormigón de resistencia f_{ck1} y la H_2 de hormigón de resistencia f_{ck2} . Deben distinguirse tres zonas designadas como A , B y C . En lo que sigue se supone que $f_{ck2} > f_{ck1}$.

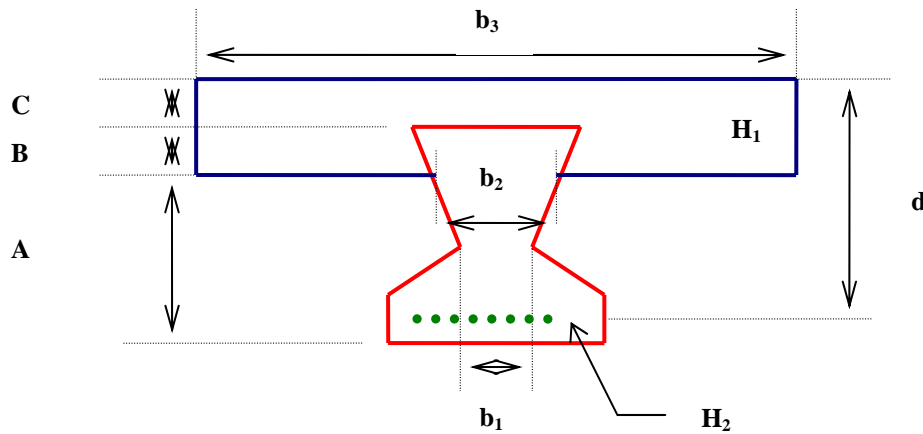


Figura 7.9. Vigueta con losa de hormigón

En la zona A:

$$V_{cuA} = \left(0,10\xi(100\rho_{11}f_{ck2})^{1/3}\right) b_1 d \quad (7.21)$$

donde ρ_{11} es la cuantía geométrica referida a $b_1 d$ y las demás variables ya se han presentado.

En la zona B:

Se tomará como V_{cu} el menor de los dos valores³.

$$V_{cuB} = \left(0,10\xi(100\rho_{12}f_{ck2})^{1/3}\right) b_2 d \quad (7.22)$$

$$V_{cuB'} = \left(0,10\xi(100\rho_{13}f_{ck1})^{1/3}\right) b_3 d \quad (7.23)$$

ρ_{12} es la cuantía geométrica referida a $b_2 d$ y ρ_{13} referida a $b_3 d$.
 b_2 es el menor ancho de hormigón H_2 en la zona B.

En la zona C:

$$V_{cuC} = \left(0,10\xi(100\rho_{13}f_{ck1})^{1/3}\right) b_3 d \quad (7.24)$$

El valor de V_{cu} correspondiente a la sección compuesta es el menor de los tres valores correspondientes a cada zona y las demás componentes del cortante de agotamiento se calculan análogamente a secciones simples de hormigón armado o pretensado.

³ Con la investigación disponible no cabe pensar en fórmulas aditivas de ambas zonas de hormigón en una sección horizontal.

7.4.4.2. Cortante de agotamiento en losas compuestas

En el caso de losas con capa de compresión como la que se presenta en la 7.11 se tiene que la contribución del hormigón a la resistencia a cortante se calcula como:

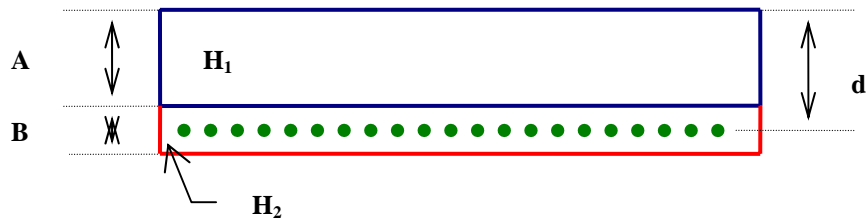


Figura 7.10. Losa de forjado con capa de compresión

Zona A:

$$V_{cuA} = \left(0,12\xi(100\rho_1 f_{ck1})^{1/3}\right)bd \quad (7.25)$$

Zona B:

$$V_{cuB} = \left(0,12\xi(100\rho_1 f_{ck2})^{1/3}\right)bd \quad (7.26)$$

donde ρ_1 es la cuantía geométrica referida a bd .

Como habitualmente $f_{ck2} > f_{ck1}$, el valor a adoptar será V_{cuA} .

7.4.4.3. Ejemplo de aplicación de cálculo del cortante de agotamiento en secciones compuestas

Para esclarecer el planteamiento que aquí se ha presentado para el cálculo del cortante de agotamiento en secciones compuestas se va a llevar a cabo un ejemplo.

Consiste en una viga prefabricada y armada de forjado cuya sección resistente se completa con una losa de compresión *in situ*. La dificultad del problema, tal como se ha comentado antes, es el cálculo de la contribución del hormigón a la resistencia a cortante V_{cu} ya que hay dos hormigones en la misma sección son anchos eficaces b_0 distintos. Las demás variables corresponden a la de la 7.9 y se calculan de forma análoga.

Los demás datos de la sección son los siguientes:

| | |
|----------------------|-----------------|
| Hormigón viga | HC-35/P/20/IIIa |
| Hormigón losa | HC-25/P/20/IIIa |
| Acero Pasivo | B-500SD |

Tabla 7.12. Propiedades de los materiales de la sección

| | |
|-------------|------|
| 6Φ20 | 4 cm |
| 4Φ20 | 8 cm |

Tabla 7.13. Distribución de armado longitudinal

| | |
|------------------|---------------------------------|
| Familia 1 | cercos 2Φ8 a 15 cm formando 90° |
|------------------|---------------------------------|

Tabla 7.14. Distribución de armado transversal

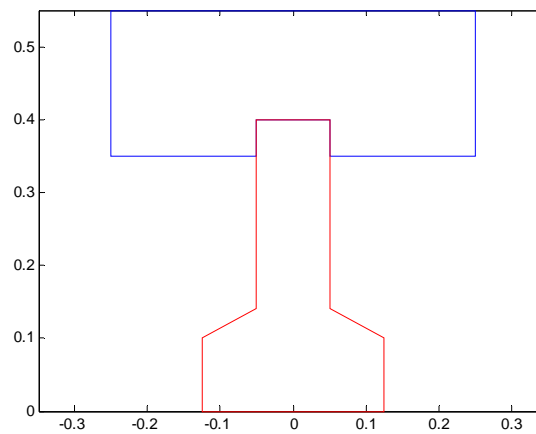


Figura 7.12. Viga armada de forjado unidireccional con losa de compresión

Esta geometría se puede representar con los siguientes trapecios:

| Trapecio | Base inferior (m) | Altura (m) | Base superior (m) |
|----------|-------------------|------------|-------------------|
| 1 | 0,250 | 0,100 | 0,250 |
| 2 | 0,250 | 0,050 | 0,075 |
| 3 | 0,075 | 0,250 | 0,075 |

Tabla 7.15 Geometría de la pieza prefabricada

La losa es rectangular y embebe los 5 centímetros superiores de la viga prefabricada con 0,5 metros de ancho por 0,2 de altura.

Tras el análisis con el programa resulta que la contribución mínima a cortante del hormigón es debido a la viga, V_{cuA} es de 34,2 KN para ésta. En cambio, para la losa V_{cuB} es de 130,0 KN, lo que resulta evidente ya que su ancho eficaz a cortante es cinco veces mayor. No obstante, en esta formulación se está suponiendo que la pieza cumple el estado límite último frente a sollicitaciones rasantes, es decir: en la unión la transferencia de tensiones está asegurada y no existe deslizamiento relativo entre los dos

hormigones. Luego, para que estos resultados tengan validez, deberán disponerse los conectores necesarios para asegurar dicha conexión.

| Resultados del análisis a Cortante | |
|------------------------------------|--------|
| V_u (KN) | 157,2 |
| V_{u1} (KN) | 357,0 |
| V_{u2} (KN) | 157,2 |
| V_{su} (KN) | 123,1 |
| V_{cu} (KN) | 34,2 |
| $b_{0,viga}$ (cm) | 10 |
| $b_{0,losa}$ (cm) | 50 |
| θ (°) | 45,0 |
| θ_e (°) | 45,0 |
| $\rho_{l,viga}$ | 0,02 |
| $\rho_{l,losa}$ | 0,0123 |

Tabla 7.16. Resultados del análisis a cortante de la sección en estado límite último

Nótese que el cortante de agotamiento de la sección V_u viene marcado por el fallo del alma de la sección en tracción, o lo que es lo mismo, la contribución del hormigón V_{cu} más la contribución de la armadura transversal.

7.5. Conclusiones

Se ha visto en este capítulo la metodología empleada para el análisis de secciones en estado límite último frente a solicitaciones normales y frente cortante. Se ha intentado hallar modelos, sancionados por la práctica, que den continuidad al tratamiento de hormigones convencionales y los de alta resistencia. En algunos casos se ha logrado, las formulaciones de las ecuaciones constitutivas en rotura del hormigón para ambos casos ofrecen continuidad en sus expresiones, en cambio, en el análisis a cortante, se ha tenido que discernir entre las dos tipologías de hormigones para poder modelar el comportamiento a cortante en rotura.

Los modelos implementados en *AESS* son una herramienta potente para la verificación y dimensionamiento de cualquier tipo de sección, ya sea simple o compuesta por diversos materiales. De este modo, se abre un gran abanico de posibilidades y casuísticas a analizar que otros programas convencionales no logran abarcar.