

3 MECÁNICA DE LA FRACTURA APLICADA AL HORMIGÓN

3.1 INTRODUCCIÓN

El hormigón es un material cuasi-frágil, cuyo comportamiento es bastante complejo. Uno de los fenómenos más importantes que influyen en su comportamiento ante la aplicación de cargas es la formación de grietas, que pueden aparecer como microfisuración distribuida, o pueden unirse para formar macrogrietas. Sin embargo, la aparición de grietas no implica la pérdida total de la resistencia, sino que el hormigón puede seguir transmitiendo tensión a través de las grietas, lo que nos lleva a pensar que para comprender realmente el comportamiento del hormigón es necesaria la aplicación de los conocimientos de la Mecánica de la Fractura.

El uso de la Mecánica de la Fractura en las estructuras de hormigón está justificado por numerosas razones [13]:

1. Energía necesaria para el crecimiento de la grieta. El crecimiento de una grieta requiere el consumo de cierta cantidad de energía, por tanto, sería conveniente establecer un criterio de propagación de grieta basado en consideraciones energéticas.
2. Objetividad. En los modelos de elementos finitos, la energía disipada en la formación y crecimiento de grietas disminuye conforme aumenta el tamaño del elemento. Esto hace que sea necesaria la definición de la energía de fractura, que mantenga constante la energía de disipación para distintos tamaños de malla.
3. Falta de zona de cadencia. En los materiales dúctiles, superada la resistencia a tracción del material, aumenta la deformación sin que aumente la tensión necesaria para ello. Este efecto no se produce en el hormigón, sino que el material tras alcanzar la resistencia a tracción sufre ablandamiento debido a la fractura, es decir disminuye la tensión conforme aumenta la deformación. Además, el modo de fallo de una losa de hormigón puede ser más dúctil o más frágil dependiendo de su tamaño.
4. Capacidad de absorción de energía y ductilidad. La mayor parte de la energía absorbida por la estructura durante el proceso de fallo, se absorbe durante el ablandamiento post-pico. Cuanta más energía es absorbida, más dúctil es la respuesta. El análisis límite no tiene en cuenta el ablandamiento.
5. Efecto tamaño. El hormigón responde de manera diferente según sea el tamaño de la probeta. Este efecto influye principalmente en dos aspectos. El primero en la capacidad última del hormigón, la cual disminuye a medida que el tamaño de la probeta crece, y en segundo lugar afecta a la capacidad cortante del material, disminuyendo también al aumentar el tamaño de la probeta.

3.2 MODELOS COHESIVOS

Existen varias teorías basadas en la mecánica de la fractura que describen el comportamiento del hormigón. Nosotros nos centraremos en las teorías no lineales.

MODELO DE GRIETA FICTICIA

El modelo de grieta ficticia fue propuesto por Hillerborg en 1976 [11]. Este modelo no sólo explica el crecimiento de las grietas, sino también su formación. Establece que la grieta se formará en cualquier punto del material que supere la resistencia a tracción. Después, la tensión en la fisura disminuye suavemente hasta cero, conforme aumenta la apertura de la grieta.

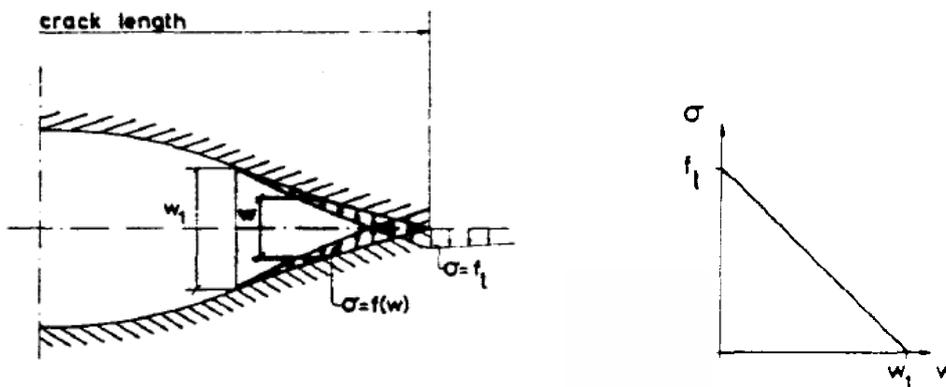


Figura 3.2.1. Modelo de grieta ficticia propuesto por Hillerborg [11]

Para describir el comportamiento del hormigón fisurado, se necesitan dos parámetros del material:

- La relación tensión-apertura de grieta o ley de ablandamiento $\sigma(w)$
- La energía de fractura G_F , que es el área bajo la curva de ablandamiento

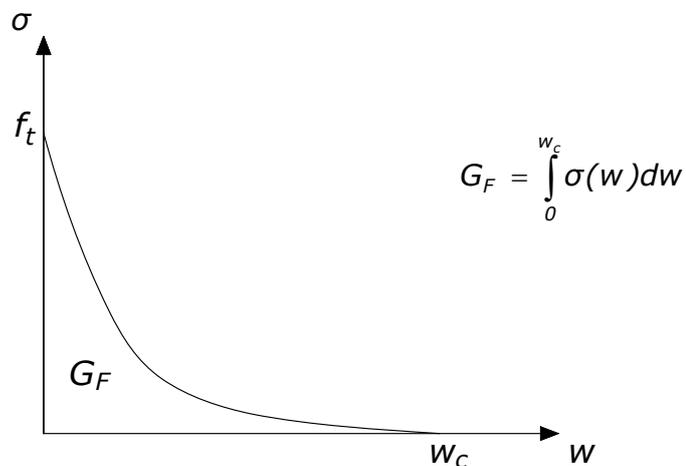


Figura 3.2.2. Curva de ablandamiento y energía de fractura

MODELO DE BANDA FISURADA

Este modelo fue propuesto por Bazant 1983 [5]. En él no se supone la existencia de una grieta, sino de una región fisurada, como si hubiera muchas fisuras pequeñas paralelas distribuidas en una banda de un cierto espesor. Dicho espesor es considerado como una propiedad del material. Esto se puede modelar, no a través de las discontinuidades que producen las fisuras, sino mediante el efecto que éstas producen en el material en una determinada dirección, reduciendo la rigidez y la resistencia en la dirección normal a la fisura después de alcanzar la tensión pico del material. La evolución del proceso de fractura implica deformaciones inelásticas por ablandamiento, es decir, reducción de la tensión post-pico mientras aumenta la deformación.

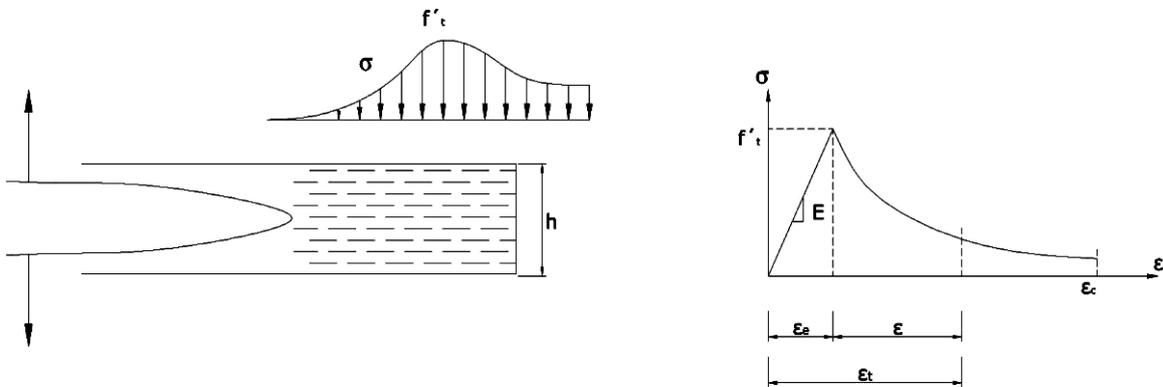


Figura 3.2.3. Modelo de banda fisurada propuesto por Bazant [5]

La energía de fractura es ahora:

$$G_F = h \int_0^{\epsilon_c} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad \epsilon_c = w_c / h$$

donde

- w_c apertura de grieta crítica, a la que la tensión se hace cero
- h espesor de la banda de grieta
- $\sigma(\epsilon)$ relación tensión-deformación en la grieta

Bazant recomendó un valor del ancho de la banda de microfisuras tres veces el tamaño máximo del agregado.

De acuerdo con la evolución de la dirección de la fisura distribuida adoptada en el algoritmo de cálculo, se han desarrollado varias aproximaciones diferentes [16].

- Grieta fija. La grieta se formará en la dirección normal a la dirección de la tensión principal máxima de tracción en el momento de la iniciación de grieta, y crecerá en esa dirección.

- Grieta giratoria. La dirección de la grieta que se forma estará alineada con la dirección de tensión principal máxima de tracción, y dicha grieta rotará con las direcciones de los ejes de tensiones principales.
- Grieta multidireccional. Permite la formación de varias grietas en cada punto, de acuerdo con los cambios de dirección experimentados por los ejes de tensiones principales con la evolución de la carga.

MODELO DE RENTENCION DE CORTANTE

La capacidad del hormigón de transmitir tensiones tangenciales también se ve reducida después de la fisuración pero no experimenta una caída brusca hasta cero. La unión de las caras de la grieta, debido principalmente a la interconexión de los áridos, hace que ésta mantenga cierta resistencia a cortante.

En un principio, se consideró que el módulo de rigidez a cortante reducido para el hormigón fisurado podría ser un porcentaje del valor inicial, introduciendo el concepto de factor de retención de cortante [1, 16].

$$G_c = \beta G$$

G_c	Módulo de elasticidad transversal reducido
G	Módulo de elasticidad transversal inicial
β	Factor de retención de cortante

Más adelante, se introdujo en el cálculo la separación de la deformación en dos partes, la debida a la apertura de las grietas, y la debida a la deformación de la parte de hormigón no fisurado:

$$d\varepsilon = d\varepsilon^{el} + d\varepsilon^{ck}$$

Siendo:

$d\varepsilon$	Velocidad de deformación mecánica total
$d\varepsilon^{el}$	Velocidad de deformación elástica del hormigón no fisurado
$d\varepsilon^{ck}$	Velocidad de deformación de fisuración, debida a la apertura de grietas

Esto hace que se necesite por un lado un modelo constitutivo del material no fisurado, y una ley tensión-deformación para la parte fisurada:

$$d\sigma = D^{el} d\varepsilon^{el}$$

$$dt^{ck} = D^{ck} de^{ck}$$

estando la primera ecuación expresada en coordenadas globales y la segunda en coordenadas locales orientadas con la dirección de las grietas. D^{el} contiene los módulos de deformación instantáneos del material y D^{ck} relaciona la tensión y

deformación en la zona fisurada. En el caso bidimensional esta matriz sería de la forma:

$$D^{ck} = \begin{pmatrix} D^I & 0 \\ 0 & D^{II} \end{pmatrix}$$

En el término D^I se incluye la ley de ablandamiento explicada anteriormente y en el término D^{II} el modelo de retención de cortante.

Una fórmula matemática apropiada para D^{II} es la ley potencial propuesta por Rots y Blaauwerdraad [16]:

$$D^{II} = \alpha G$$

$$\alpha(e_{nn}^{ck}) = \frac{\left(1 - \frac{e_{nn}^{ck}}{e_{max}^{ck}}\right)^p}{1 - \left(1 - \frac{e_{nn}^{ck}}{e_{max}^{ck}}\right)^p}$$

Donde

p parámetro del material, indicativo de la forma en que decrece α

e_{max}^{ck} indica la deformación a la que la tensión en la dirección normal a la grieta se hace cero, considerado un parámetro del material

e_{nn}^{ck} es la deformación en la dirección normal a la de la grieta

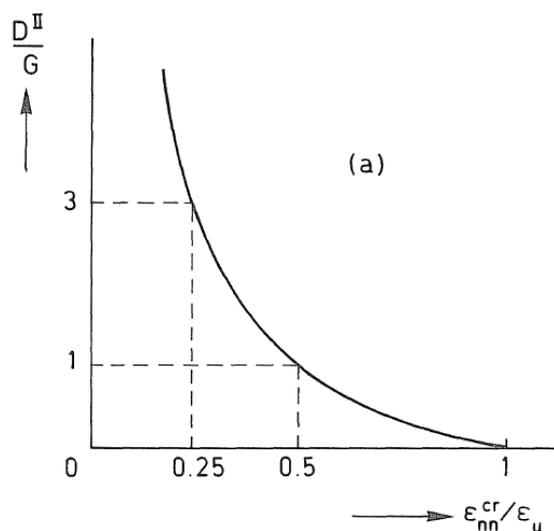


Figura 3.2.4. Modelo de retención de cortante propuesto por Rots y Blaauwerdraad, para $p=1$

A diferencia del modelo de retención de cortante tradicional, en el que βG estaba asociado a la deformación total, en este modelo αG está relacionado sólo con la parte de deformación debida a la fisuración. En el apartado 4.2 se explica cómo relacionar ambos coeficientes.