

## **4 MODELOS DE COMPORTAMIENTO DE HORMIGÓN EN ABAQUS**

### **4.1 INTRODUCCIÓN**

El modelo de material de estudio en el presente trabajo es el llamado “Brittle Cracking”. Es un modelo para el hormigón disponible en Abaqus/Explicit que permite modelar el hormigón en aplicaciones en las que el comportamiento es principalmente a tracción (con grietas). El comportamiento a compresión del hormigón se modela siempre como lineal y elástico, por ello su uso se recomienda en problemas en los que se conoce que el fallo se producirá por tracción y no por compresión. Este modelo puede servir también para modelar otros materiales frágiles, como materiales cerámicos y rocosos, pero ha sido especialmente diseñado para el hormigón en masa.

Además del modelo aquí expuesto, en la librería de materiales de Abaqus, se dispone de otro modelo para el hormigón que está basado en teorías de daño plástico escalar “Concrete Damaged Plasticity”. Este modelo está disponible tanto en Abaqus/Standard como en Abaqus/Explicit.

Por otro lado, en la librería de materiales de Abaqus/Standard también se dispone de otro modelo para el hormigón conocido como “Concrete Smeared Cracking” que se basa en un modelo de fisuración distribuida.

### **4.2 DESCRIPCIÓN DEL MODELO BRITTLE CRACKING**

A continuación se describe el modelo con agrietamiento incluido en Abaqus/Explicit para hormigón y otros materiales frágiles.

El hormigón presenta principalmente dos modos primarios de comportamiento: un modo frágil en el que las microgrietas que aparecen se unen para formar macrogrietas, representando zonas de deformación muy localizadas; y un modo dúctil, en el que las microgrietas se desarrollan de una manera más o menos uniforme en el material, dando lugar a deformaciones no localizadas.

El comportamiento frágil está asociado con la aparición de grietas y con mecanismos de fractura a cortante y en modo mixto, que se observan ante estados de tensiones de tracción, o de tracción-compresión, y generalmente implica el ablandamiento del material.

El comportamiento dúctil está asociado con la microfisuración distribuida que se observa principalmente bajo estados de tensiones de compresión, y normalmente implica un endurecimiento del material.

El modelo de material Brittle Cracking sólo modela el comportamiento frágil del hormigón. Aunque esto suponga una gran simplificación, hay muchas aplicaciones donde sólo el comportamiento frágil del hormigón es significativo, y, por tanto, la suposición de que el material permanece en el rango lineal y elástico a compresión, estaría justificada en estos casos.

## **FISURACIÓN DISTRIBUIDA**

Un modelo de fisuración distribuida se usa para representar el comportamiento frágil del hormigón. En este modelo, no se calculan directamente las macrogrietas, sino que éstas son introducidas en el cálculo a través del efecto que producen en las tensiones y en la rigidez del material en una determinada dirección. La anisotropía producida por las grietas sí es tenida en cuenta.

Los modelos de fisuración distribuida tienen algunos inconvenientes. El principal es que esta técnica da lugar a soluciones sensibles a la malla, de manera que un refinamiento de ésta da lugar a bandas de grietas más estrechas. Sin embargo, numerosas investigaciones sobre este tema indican que es necesario introducir el término “longitud característica” para atenuar la sensibilidad a la densidad de la malla, como se verá más adelante.

## **DIRECCIÓN DE CRECIMIENTO DE LAS GRIETAS**

En la bibliografía [16], es posible encontrar tres modelos de cálculo de la dirección de las grietas:

- Grieta fija. La dirección normal a la primera grieta está alineada con la dirección de tensión principal máxima de tracción en el momento de la iniciación de grieta. El modelo tiene memoria de esta dirección de grieta, y las siguientes grietas en el punto en consideración sólo pueden formarse en direcciones ortogonales a la primera.
- Grieta giratoria. En este modelo sólo puede formarse una grieta en cada punto, alineada con la dirección de tensión principal máxima de tracción, y dicha grieta rota con las direcciones de los ejes de tensiones principales. Este modelo no tiene memoria de dirección de grietas.
- Grieta multidireccional. Permite la formación de cualquier número de grietas en cada punto, de acuerdo con los cambios de dirección experimentados por los ejes de tensiones principales con la evolución de la carga. En la práctica, hay algunas limitaciones sobre el número de grietas permitidas en cada punto. El modelo tiene memoria de todas las direcciones de grietas.

El modelo de grieta multidireccional es el menos popular, principalmente porque el criterio para decidir la formación de nuevas grietas en un mismo punto es de alguna manera arbitrario: se elige un “ángulo umbral”, para prevenir la aparición de grietas que formen un ángulo con las existentes menor de dicho valor, pero la elección de este ángulo umbral no se basa en ninguna evidencia física.

En el modelo de grieta giratoria, el concepto de cierre y reapertura de grieta no está bien definido porque la dirección de las grietas puede variar continuamente, y el modelo no memoriza las grietas formadas anteriormente.

El modelo de grieta fija ha sido principalmente criticado por el tratamiento tradicional de la retención de cortante empleado, que hacía que la respuesta obtenida fuera

demasiado rígida. Este problema puede resolverse formulando el modelo de la retención de cortante de manera que se asegure que la tensión de cortante tiende a cero a medida que la apertura de grieta aumenta. Esto se explicará después detenidamente.

El modelo de cálculo de dirección de grietas utilizado por Abaqus es el de grieta fija, pudiendo formarse una grieta en cada una de las direcciones principales de cada elemento. Las grietas pueden cerrarse completamente si se aplican tensiones de compresión sobre ellas, y pueden volver a abrirse. Aún así, las grietas no desaparecen, una vez que una grieta se ha formado ésta permanece en el resto del cálculo.

## MODELO ELÁSTICO-FISURADO PARA EL HORMIGÓN

Los puntos más importantes del modelo son: la descomposición de la velocidad de deformación en elástica y de fisuración, el criterio de fisuración, y la ley de comportamiento del hormigón fisurado. La descomposición de la velocidad de deformación permite, a diferencia de los modelos clásicos de fisuración distribuida, en los que no se realiza dicha descomposición, identificar la parte de deformación debida a la fisuración. La parte del hormigón no fisurada entre grietas se modela como lineal, elástica e isotrópica. La naturaleza ortotrópica del material agrietado se introduce en la componente de fisuración del modelo.

La descomposición de la velocidad de deformación es de la siguiente manera:

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

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

Es necesario además definir un sistema de referencia local alineado con la dirección de la grieta porque, por ejemplo, la ley de ablandamiento es una función de la apertura de grieta, y para ello es necesario definir la dirección normal a la dirección de la grieta (ver figura 4.2.1).

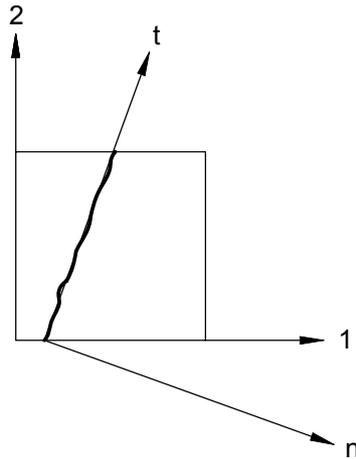


Figura 4.2.1. Sistemas de coordenadas globales y locales

Para el caso bidimensional, las deformaciones y las tensiones en ambos sistemas de referencia serían:

Deformaciones en el sistema de referencia global

$$\boldsymbol{\epsilon} = [\epsilon_{11} \quad \epsilon_{22} \quad \gamma_{12}]$$

Deformaciones en el sistema de referencia local

$$\boldsymbol{e} = [e_{nn} \quad e_{tt} \quad g_{nt}]$$

Tensiones en el sistema de referencia global

$$\boldsymbol{\sigma} = [\sigma_{11} \quad \sigma_{22} \quad \sigma_{12}]$$

Tensiones en el sistema de referencia local

$$\boldsymbol{t} = [t_{nn} \quad t_{tt} \quad t_{nt}]$$

## INICIACIÓN DE LAS GRIETAS

Para detectar la iniciación de las grietas se usa el criterio de Rankine. Las grietas se formarán cuando la tensión principal máxima supere la resistencia a tracción del material. Aunque la detección de la grieta está basada en un modo de fractura puro en modo I, el modelo de comportamiento del hormigón fisurado incluye consideraciones tanto modo I (ablandamiento del material a tracción) como en modo II (retención de cortante) como se describirá más adelante.

## LEY DE ABLANDAMIENTO A TRACCIÓN

La ley de comportamiento del hormigón fisurado en la dirección perpendicular a la grieta está basada en el modelo de Hillerborg [11]. Es una ley de ablandamiento en la que, una vez alcanzada la resistencia a tracción del hormigón,  $\sigma_{tu}^I$ , éste se fisura, y la tensión en la dirección normal a la grieta no disminuye bruscamente a cero, sino que disminuye suavemente conforme aumenta la apertura de la grieta, hasta que, a cierto valor de la apertura de grieta,  $u_{n0}$ , alcanza la tensión cero. La energía de fractura requerida para formar una unidad de superficie de grieta en modo I,  $G_f^I$ , es considerada una propiedad del material, y representa el área encerrada bajo la curva de ablandamiento tensión-apertura de grieta. Asumir que la energía de fractura es una propiedad del material, implica que la relación tensión-apertura de grieta del hormigón fisurado no depende del tamaño del espécimen.

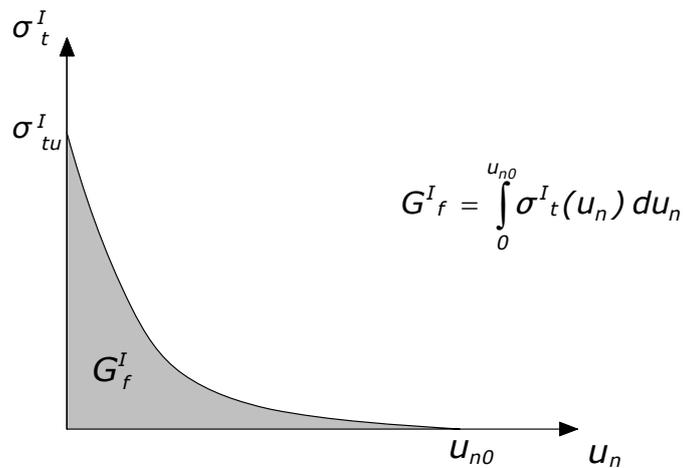


Figura 4.2.2. Curva de ablandamiento  $\sigma$ - $u$  y energía de fractura

En Abaqus, la apertura de grieta se calcula de la siguiente manera:

$$u_n^{ck} = e_{nn}^{ck} h$$

Donde  $h$  es la longitud característica del elemento, que está basada en la geometría del elemento: para elementos lineales, es la longitud del elemento; para elementos planos, es la raíz cuadrada del área del elemento; para sólidos es la raíz cúbica de su volumen. Está definida de esta manera porque no se sabe la dirección en la que se formarán las grietas a priori, por tanto no se puede elegir una determinada dirección para calcular la longitud característica. Los elementos con una relación de aspecto grande, presentarán un comportamiento diferente dependiendo de la dirección en la que aparezcan las grietas, introduciendo sensibilidad a la malla en este sentido. Por tanto, se recomienda que los elementos de la malla sean lo más cuadrados posible, es decir, que tengan sus lados aproximadamente iguales.

## RETENCIÓN DE CORTANTE

Un aspecto importante de este modelo de material Brittle Cracking es que, aunque el criterio de iniciación de grieta esté basado en el modo I de fractura, una vez que el hormigón está fisurado, se incluye un modelo del comportamiento en modo II.

El modelo en modo II se basa en el hecho de que el comportamiento a cortante también depende de la apertura de fisura. Una vez fisurado el material, éste conserva cierta rigidez a cortante debido al engranamiento de los áridos, pero este efecto disminuye conforme aumenta la apertura de la grieta. En el modelo de retención de cortante, el módulo de elasticidad transversal del hormigón fisurado,  $G_c$ , se ve reducido conforme aumenta la deformación debida a la fisuración, con respecto a su valor inicial,  $G$ , por un factor  $\beta$ .

$$G_c = \beta G$$

|         |  |
|---------|--|
| $G_c$   | Módulo de elasticidad transversal reducido |
| $G$     | Módulo de elasticidad transversal inicial  |
| $\beta$ | Factor de retención de cortante            |

En este caso  $\beta G$  está asociado a la deformación total, pero en nuestro caso, en que se ha realizado la descomposición de la deformación en la parte elástica y la fisurada, es más apropiado el modelo de Rots y Blaauwerdraad [16], en el que la reducción de cortante se relaciona sólo con la parte de deformación debida a la fisuración.

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

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

Donde

$D^{II}$  módulo de cortante fisurado

$p$  parámetro del material, indicativo de la forma en que decrece  $\alpha$  (ver figura 4.3.6)

$e_{max}^{ck}$  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

Esta fórmula satisface las condiciones:

- $\alpha \rightarrow \infty$  cuando  $e_{nn}^{ck} \rightarrow 0$ , correspondiente al estado no fisurado
- $\alpha \rightarrow 0$  cuando  $e_{nn}^{ck} \rightarrow e_{max}^{ck}$ , correspondiente a la pérdida completa de rigidez a cortante

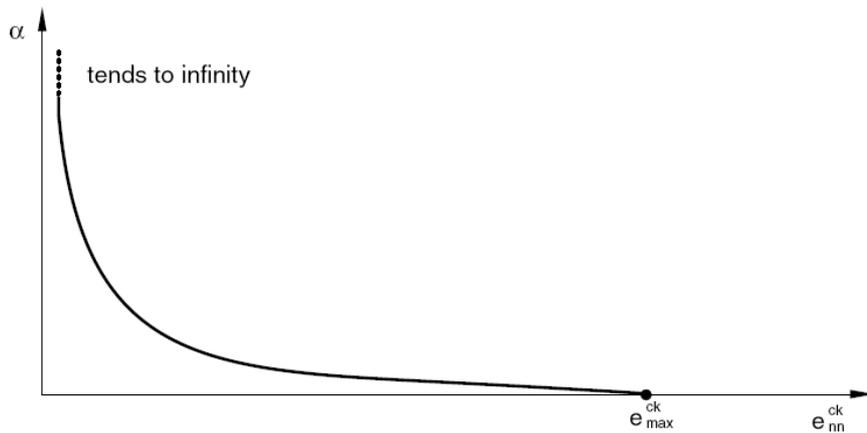


Figura 4.2.3. Factor de retención de cortante en función de la apertura de grieta

Puede observarse que los límites de  $\alpha$  en esta definición son infinito y cero. Sin embargo, en la definición tradicional, en la que no se realiza la descomposición de la deformación del hormigón en la parte elástica y la fisurada, el factor de retención de cortante,  $\beta$  (en Abaqus llamado  $\rho$ ), toma un valor comprendido entre 0 y 1. La relación entre ambos parámetros es:

$$\frac{1}{\rho G} = \frac{1}{G} + \frac{1}{D^{II}} \quad \rightarrow \quad \rho = \frac{\alpha}{\alpha + 1}$$

Como la forma más habitual del modelo de retención de cortante es la tradicional, los valores que son necesarios introducir en Abaqus son de  $\rho$  y no de  $\alpha$ . Sin embargo, el modelo considerado por Abaqus es la ley potencial explicada anteriormente y no la fórmula tradicional. Por ello, reescribimos la ley de potencia del factor de cortante en función de  $\rho$ :

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

#### **4.3 INTRODUCCIÓN DE DATOS DEL MODELO BRITTLE CRACKING EN ABAQUS**

La ley de ablandamiento puede ser introducida de tres maneras diferentes:

- Relación tensión-deformación. No es recomendable su uso para hormigón con poco o ningún armado, porque introduce sensibilidad a la malla (ver figura 4.3.1).
- Criterio de energía de fractura, introduciendo como parámetros del material la energía de fractura y la resistencia a tracción. Este caso sí puede ser usado para hormigón en masa y es muy poco sensible a la malla. Asume una pérdida lineal de resistencia después de la fractura (ver figura 4.3.2).
- Relación tensión-desplazamiento. Este caso también puede ser usado para hormigón en masa porque no introduce sensibilidad a la malla. Permite la

introducción de una curva post-pico multilineal, ya que los datos son introducidos como una tabla de valores tensión-apertura de fisura (ver figura 4.3.3 y 4.3.4).

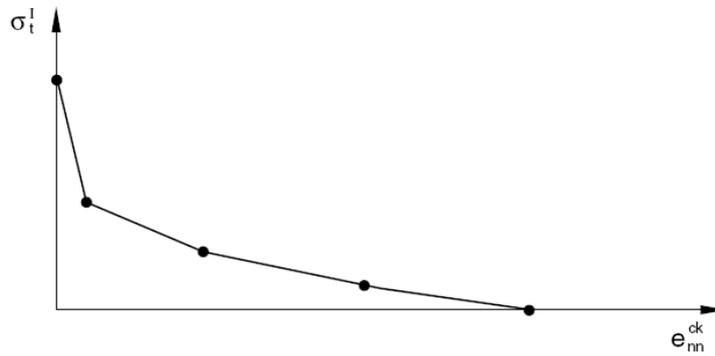


Figura 4.3.1. Ley de ablandamiento. Relación tensión-deformación

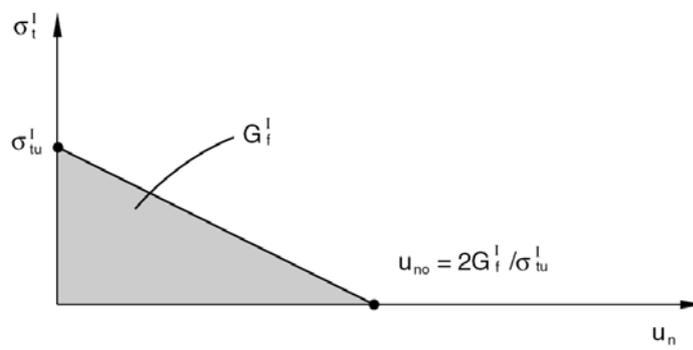


Figura 4.3.2. Ley de ablandamiento. Criterio de energía de fractura

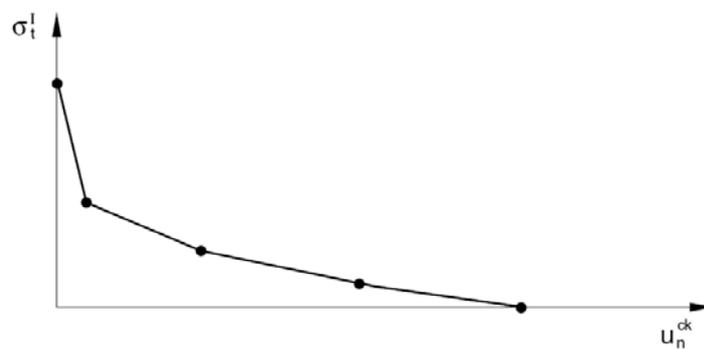


Figura 4.3.3. Ley de ablandamiento. Relación tensión-desplazamiento

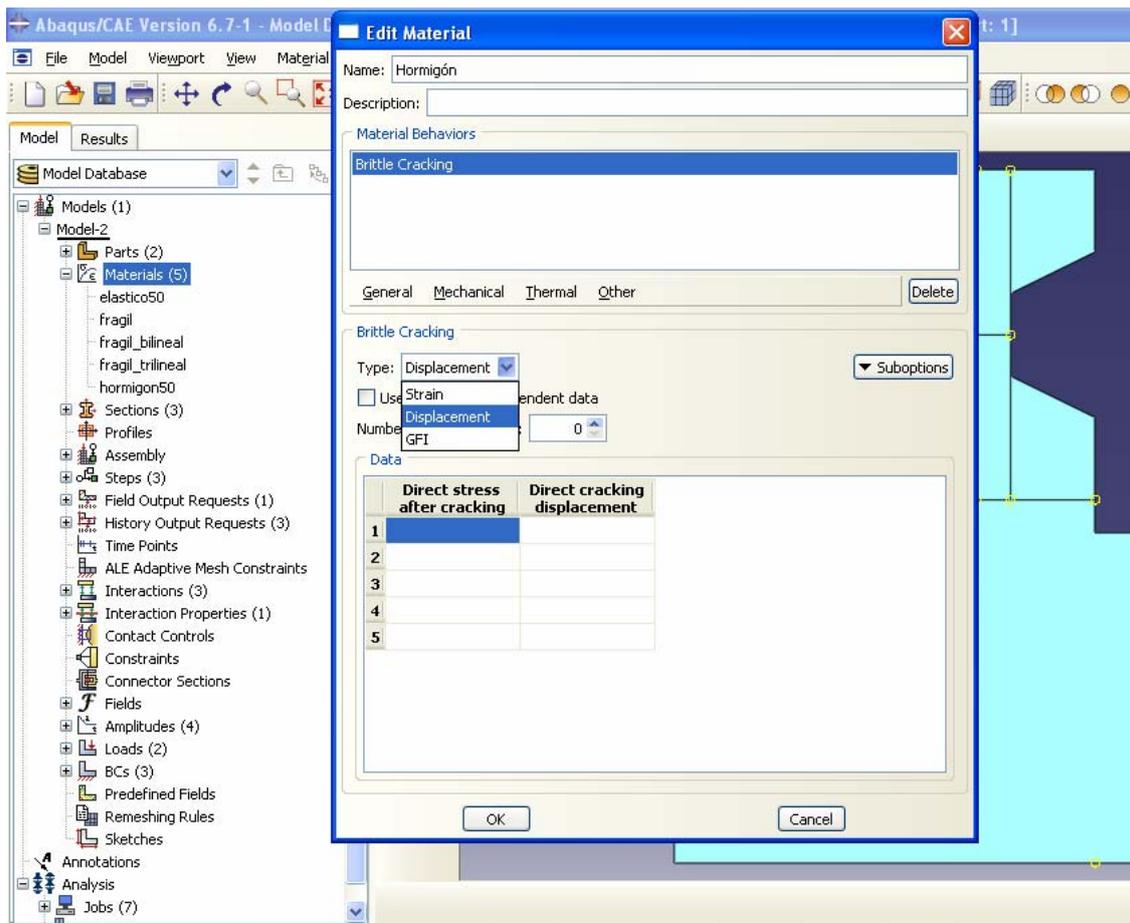


Figura 4.3.4. Ejemplo de introducción de datos de un material con propiedades de fractura a través de una tabla de valores tensión-desplazamiento

Además, se puede definir el modelo de retención de cortante, en que el módulo de elasticidad transversal del hormigón fisurado,  $G_c$ , se reduce a medida que la grieta se abre. No se debe usar un factor de retención de cortante nulo.

$$G_c = \rho(e_{nn}^{ck}) G$$

$G$  Módulo de elasticidad transversal del hormigón no fisurado

$\rho$  Factor de retención de cortante

El factor de retención de cortante puede ser definido como una tabla de valores en función de la deformación en la dirección normal a la grieta (ver figura 4.3.5), o en la forma de la ley potencial explicada anteriormente (ver figura 4.3.6).

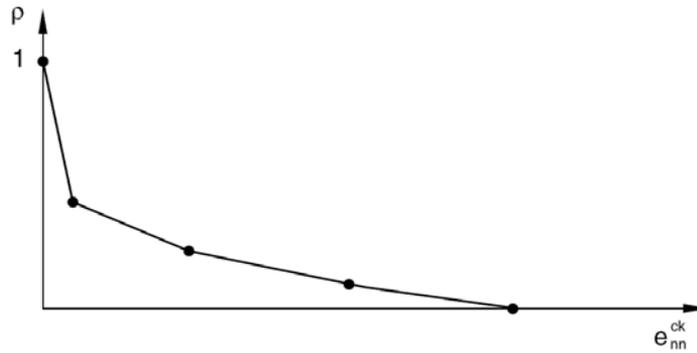


Figura 4.3.5. Factor de retención de cortante. Forma multilineal

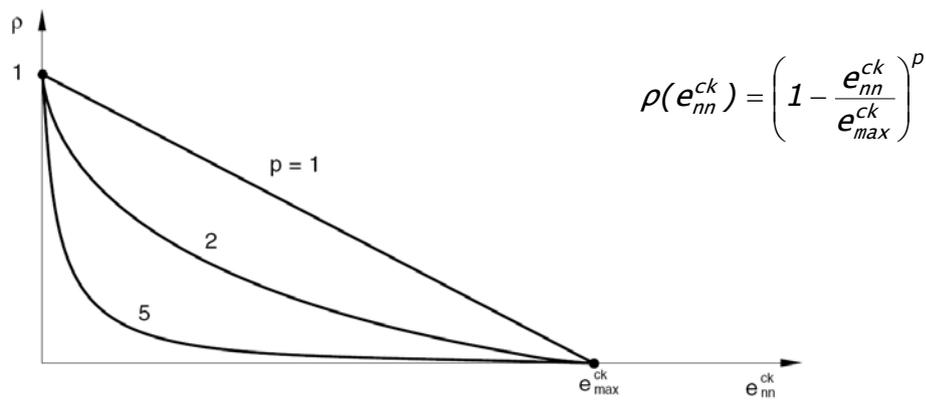


Figura 4.3.6. Factor de retención de cortante. Forma ley potencial

Finalmente, un punto importante del modelo es la posibilidad de introducir un criterio de fallo de elementos, que permite la eliminación de elementos basándose en un criterio de fractura.

Cuando la apertura de la grieta en un elemento alcanza un cierto valor (el criterio de fallo, dado por el usuario) las tensiones se hacen cero y se elimina el elemento de la malla.

Si la ley de ablandamiento ha sido introducida como tensión–deformación, el criterio de fallo es una deformación última, y si la ley de ablandamiento ha sido introducida como tensión–desplazamiento o a través de la energía de fractura, el criterio de fallo es un desplazamiento último.

Como en cada elemento puede aparecer una grieta en cada dirección (con un máximo de tres, en el caso de modelo tridimensional), el criterio de fallo puede establecerse de manera que el elemento sea eliminado cuando una, dos o tres grietas alcance el desplazamiento último. En nuestro caso, por ejemplo, que es bidimensional, si se eligieran dos grietas, el elemento tendría que alcanzar el desplazamiento máximo en las dos direcciones perpendiculares, pero como sabemos que hay una dirección preferente en la que crecerán las grietas, establecemos que el elemento sea eliminado cuando se alcance el desplazamiento último en una sola dirección.

La motivación para eliminar estos elementos es que, una vez que el elemento ya no resiste ninguna tensión, puede deformarse demasiado y provocar que el cálculo se pare por excesiva distorsión del elemento. Además, permite visualizar el camino que siguen las grietas.

Sin embargo, que un elemento por estar fisurado no resista más a tracción, no implica que no resista a compresión. Por tanto, no se debe usar el criterio de fallo si es posible que el elemento pueda ser sometido a compresión, como por ejemplo, con cargas cíclicas.

