

7 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE JUNTA SECA CON UNA LLAVE

7.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Una vez comprobada la validez del modelo de material Brittle Cracking para reproducir el comportamiento del hormigón, será aplicado a un modelo de junta seca con una llave para analizar su comportamiento, ver cómo le afecta la variación de algunos parámetros, y observar el camino de crecimiento de grietas.

GEOMETRÍA, CARGAS Y CONDICIONES DE CONTORNO

El modelo realizado reproduce el ensayo encontrado en la bibliografía [20] que se muestra a continuación:

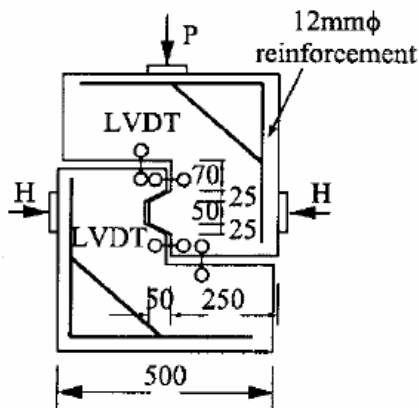


Figura 7.1.1. Configuración del ensayo

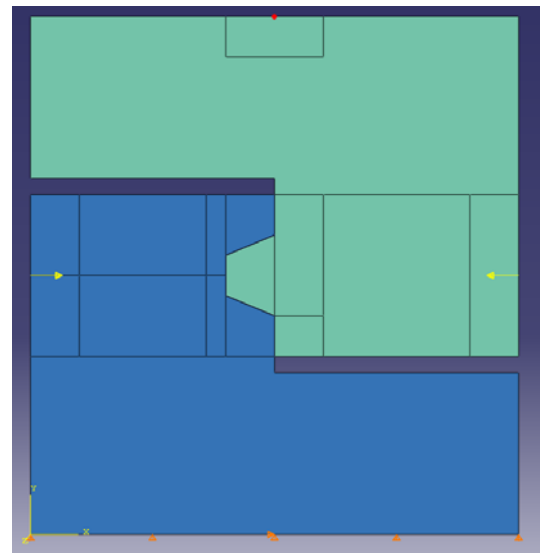


Figura 7.1.2. Modelo Abaqus

El modelo, en 2-D, consta de dos partes independientes en contacto, que se muestran en la figura 7.1.2 de distinto color. Además, se aplican dos fuerzas que comprimen la junta y simulan la fuerza de pretensado (representadas en amarillo). Las condiciones de contorno aplicadas impiden el desplazamiento vertical en la superficie inferior y el desplazamiento horizontal en su punto medio.

La carga vertical aplicada en la parte superior central (punto rojo), se modela como un desplazamiento impuesto que crece suavemente desde cero hasta el desplazamiento que provoca la rotura total de la junta. Así, se puede obtener la curva completa carga-desplazamiento.

Abaqus/Explicit realiza un análisis dinámico. Es importante imponer el desplazamiento de manera que la velocidad de aplicación sea lo suficientemente pequeña como para

eliminar los efectos de inercia. Esto es especialmente importante en los materiales con comportamiento frágil, ya que la eliminación de elementos provoca caídas en la carga soportada por el espécimen que normalmente aumentan la energía cinética de la respuesta.

Por ello, el desplazamiento impuesto se aplica mediante una “función suave”, con una velocidad creciente, (ver figura 7.1.3) durante un periodo de 10 segundos, hasta llegar a un desplazamiento final de 1 mm. Para asegurarnos de que se obtiene una solución cuasi-estática, es necesario comprobar que la energía cinética del material no supera el 5 ó el 10 % de la energía interna durante todo el proceso. Aún así, las oscilaciones en la curva de respuesta carga-desplazamiento debida a los efectos de inercia pueden ser todavía visibles, especialmente después de que el hormigón se haya fracturado significativamente.

La evolución del desplazamiento impuesto frente al tiempo se puede observar en la siguiente figura:

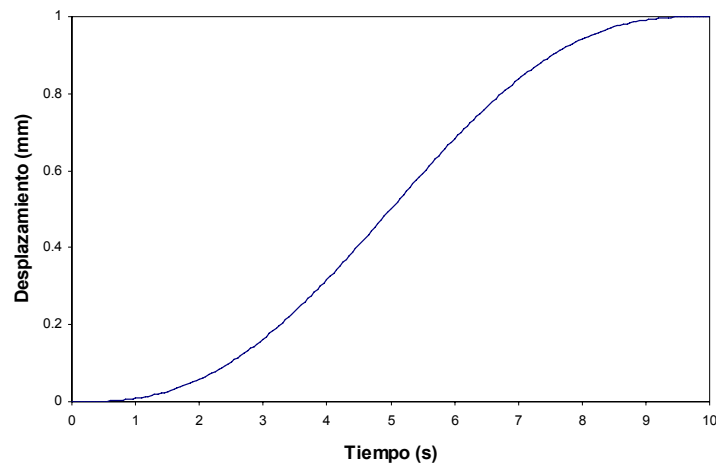


Figura 7.1.3. Desplazamiento impuesto frente al tiempo

La aplicación de las condiciones de contorno y fuerza se realiza en sucesivos pasos de carga. En el paso inicial, se aplican las condiciones de contorno y las propiedades del contacto. En el paso 1, de 1 segundo de duración, se aplican las fuerzas de compresión con una evolución suave de la misma manera que el desplazamiento impuesto (ver figura 7.1.3). En el paso 2, de 10 segundos de duración, se impone el desplazamiento como ya se ha explicado anteriormente.

Dichos pasos permiten elegir entre un cálculo en pequeños o en grandes desplazamientos, en este modelo se eligen grandes desplazamientos. Este caso podría dar lugar a que el cálculo se abortara debido a que algunos elementos se distorsionaran demasiado, pero para evitar esto Abaqus/Explicit ofrece la posibilidad de incluir modelos de fallo que eliminen los elementos muy deformados. En nuestro caso se ha usado el modelo “Brittle Failure” dentro del modelo de material Brittle Cracking en el entorno de la llave, que es donde la aparición de las grietas podría provocar grandes deformaciones de los elementos.

MATERIALES

Se han usado tres modelos distintos de material, representados con distintos colores en la siguiente figura:

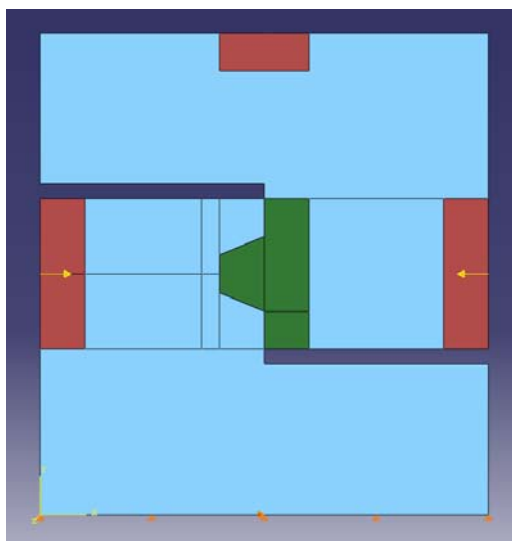


Figura 7.1.4. Representación de las partes donde se aplica cada modelo de material

La llave (en verde), principal objeto de estudio, ha sido modelada con un modelo de material que permite incluir las propiedades del hormigón a tracción, necesarias para obtener resultados acerca del comportamiento del hormigón ya fracturado y observar la trayectoria que siguen las grietas. Sin embargo, asume que el comportamiento del hormigón a compresión es elástico y lineal. Esto no supone un problema en la llave, ya que en ella se darán principalmente tensiones de tracción, pero sí en el resto del material. Por ello, la parte del hormigón donde no aparecen grietas (en celeste) será modelada con un material que incluya el comportamiento a compresión pero no el de tracción. Además, en la zona cercana a la aplicación de la carga (en rojo), se aplica un modelo del material elástico y lineal, para evitar que rompa por compresión o tracción indebidamente, debido al efecto de concentración de la carga.

El hormigón utilizado es de alta resistencia y las propiedades mecánicas son las siguientes:

E_c (GPa)	f_{ts} (MPa)	f_t (MPa)	f_c (MPa)	G_F (N/m)	ρ (kg/m ³)	ν
20	5.2	4.68	50	58	2500	0.2

Tabla 7.1.2. Propiedades del hormigón

Siendo

E_c	Módulo de deformación longitudinal
f_{ts}	Resistencia a tracción indirecta
f_t	Resistencia a tracción directa, siendo $f_t = 0.9 f_{ts}$
f_c	Resistencia a compresión
G_F	Energía de fractura
ρ	Densidad
ν	Módulo de Poisson

Los modelos de comportamiento del hormigón en compresión considerados, elástico y lineal en algunos casos, y no lineal en otros, como se ha explicado, se muestran a continuación:

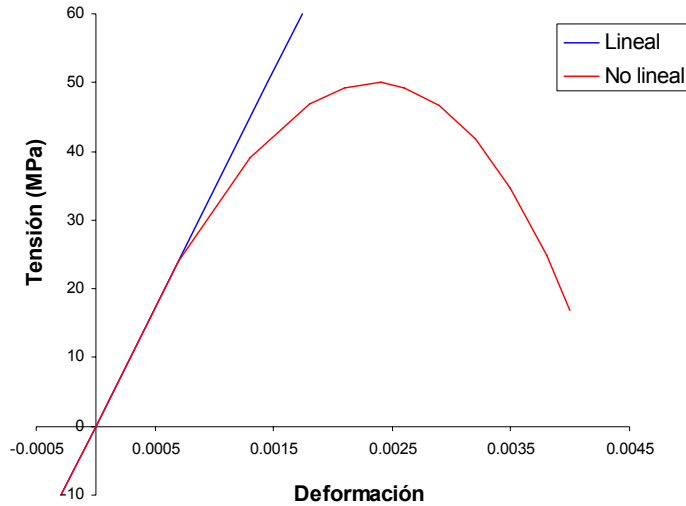


Figura 7.1.5. Curva σ - ϵ de los modelos de comportamiento del hormigón a compresión, lineal y no lineal

La curva de ablandamiento que describe el comportamiento en tracción, se representa en la figura 7.1.6

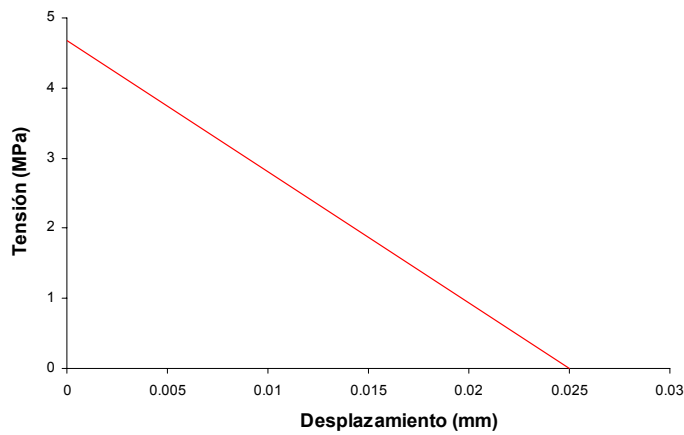


Figura 7.1.6. Curva σ - u , modelo de comportamiento del hormigón a tracción lineal

Al modelar el ablandamiento del material a tracción, es necesario incluir un modelo de retención de cortante, para modelar el comportamiento del hormigón fisurado en modo II. Se incluye un modelo lineal (ver figura 7.1.7) en el que la deformación máxima es la correspondiente al desplazamiento crítico, teniendo en cuenta las dimensiones del elemento.

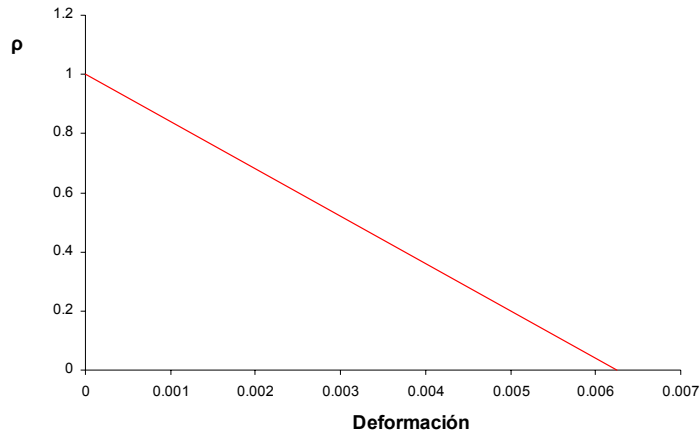


Figura 7.1.7. Factor de retención de cortante.

MALLA

El principal objetivo de la investigación es conseguir obtener la trayectoria seguida por las grietas y reproducir el comportamiento de la junta después de la aparición de las fisuras. Estas grietas aparecerán en la llave, por tanto conviene discretizar con una malla más fina la zona de la llave. Además, para el modelo de hormigón utilizado, que permite eliminar elementos que ya no resisten a tracción a través de un criterio de fallo en desplazamiento, es recomendable que los elementos sean cuadrados mejor que rectángulos, para que al aparecer la grieta en una dirección o en otra, se aplique siempre el mismo criterio de fallo.

Los elementos más pequeños son cuadrados de 4 mm de lado, y su tamaño crece gradualmente hasta elementos de 20 mm de lado en las zonas más alejadas de la llave (ver figuras 7.1.8 y 7.1.9).

Los elementos utilizados son CPS4R. Son cuadriláteros, 2-D, lineales, de 4 nodos, con 2 grados de libertad por nodo (los desplazamientos en las direcciones 1 y 2). Su formulación es lagrangiana, es decir, los elementos se deforman con el material. Son elementos de tensión plana, que incluyen además la opción de integración reducida, que evita el bloqueo por cortante.

La malla está formada por 4044 elementos.

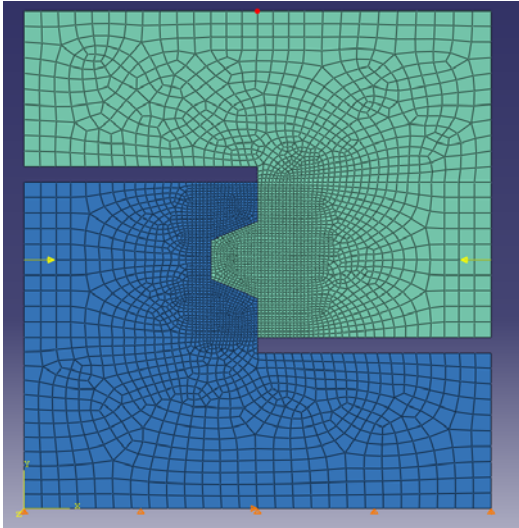


Figura 7.1.8. Malla

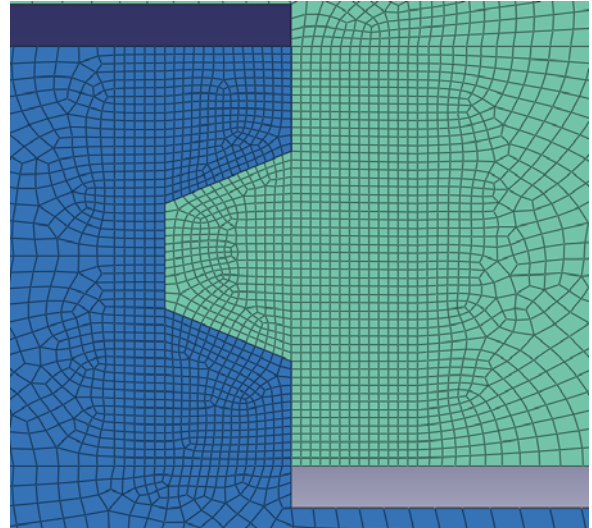


Figura 7.1.9. Detalle del refinamiento de la malla

CONTACTO

Como se explicó en el capítulo anterior, se utiliza el algoritmo Contact Pair para modelar el contacto. En este caso las superficies podían ser definidas de dos maneras:

- “Node-based”. Definida en los nodos de los elementos de la superficie siendo, por definición, discontinua.
- “Element-based”. Formada por los bordes de los elementos que componen la superficie, siendo en este caso, continua.

En una interacción, una superficie será siempre del tipo Element-based y para la segunda es posible elegir que sea del mismo tipo o del tipo Node-based. En nuestro caso elegiremos la primera opción, ya que con la segunda, al ser la superficie discontinua, se produce penetración. Esto se muestra en la figura 7.1.10, de una junta fisurada, señalando en rojo y naranja los dos elementos que se superponen por la penetración.

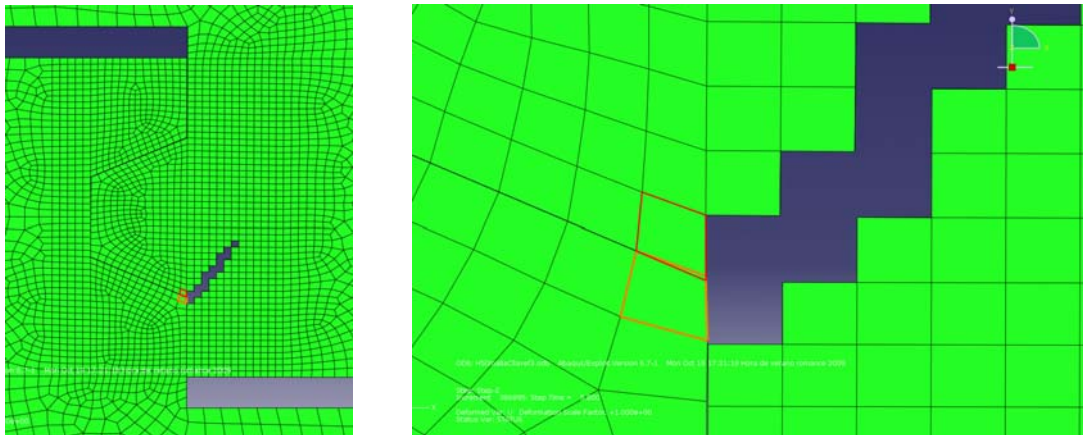


Figura 7.1.10. Ejemplo de contacto con penetración por ser una superficie del tipo Node-based y detalle

Sin embargo, al elegir la opción que no produce penetración, Abaqus nos advierte de que esa opción no es recomendable si los elementos pueden ser eliminados por un criterio de fallo, como es nuestro caso. Sin embargo, basta con comprobar que los elementos eliminados no son los de la superficie de contacto, sino que se encuentran en el interior del material.

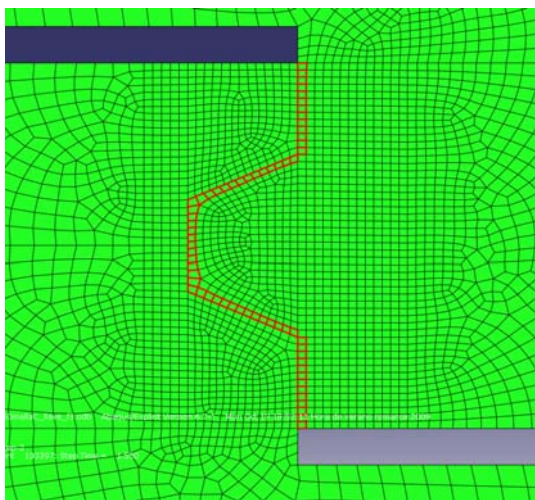


Figura 7.1.11. Elementos sobre los que Abaqus advierte que además de tener definida una ley de contacto, pueden ser eliminados por fallo a tracción

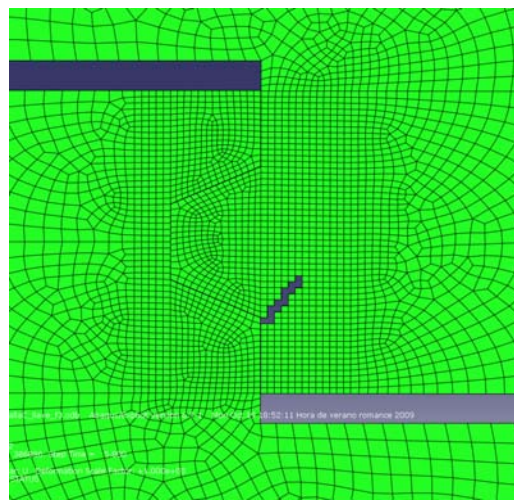


Figura 7.1.12. Comprobación de que los elementos que fallan no son los de la superficie sino los interiores

El modelo de las propiedades de contacto en la dirección normal a las superficies es el llamado Hard-contact, y en la dirección tangencial, es el modelo de fricción de Coulomb.

La formulación del contacto es la llamada Kinematic Contact, que utiliza un mecanismo predicción/corrección para aplicar las condiciones de contacto, como por ejemplo, para impedir la penetración. La técnica para calcular el movimiento relativo de las superficies que forman un par de contacto utilizada es Finite Sliding, que permite cualquier movimiento arbitrario entre las superficies. Todo esto se explicó detalladamente en el capítulo 6.

7.2 COMPARACIÓN CON RESULTADOS EXPERIMENTALES

En primer lugar, ha sido necesario realizar un ajuste del valor del módulo de deformación del hormigón para reproducir los resultados experimentales, ya que el valor real no es conocido. Éste se ha variado desde 20 GPa hasta 35 GPa, y los resultados se muestran en la figura 7.2.1 para el caso de presión de confinamiento de 1 MPa.

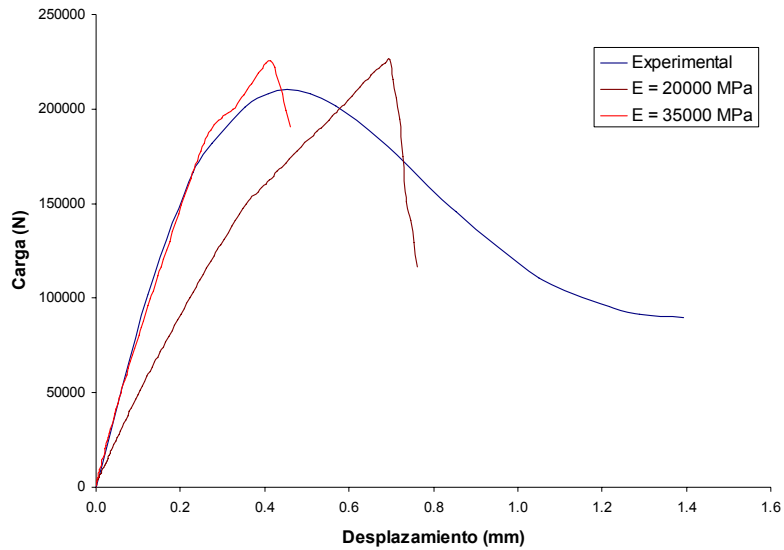


Figura 7.2.1. Curva carga-desplazamiento para junta con una llave y distintos módulos de deformación

Con esto se consigue ajustar la parte lineal de la curva. Para comprobar que la malla es lo suficientemente fina, se realiza un ejemplo con una malla en la que los elementos cuadrados más pequeños tienen un lado de 2.5 mm, en lugar de 4 mm. Los resultados se muestran en la figura 7.2.2, y se demuestra que efectivamente no es sensible a la malla.

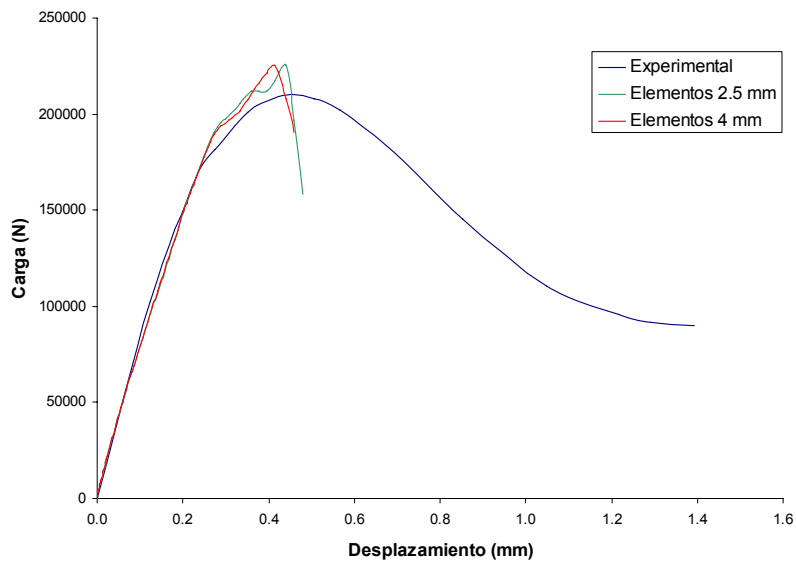


Figura 7.2.2. Curva carga-desplazamiento para junta con una llave y dos tamaños de elementos

A continuación, se analiza el efecto del aumento de la tensión de confinamiento en la resistencia última de la junta. En la figura 7.2.3 se muestran los resultados tanto experimentales como del modelo de Abaqus para 1 MPa y 3 MPa.

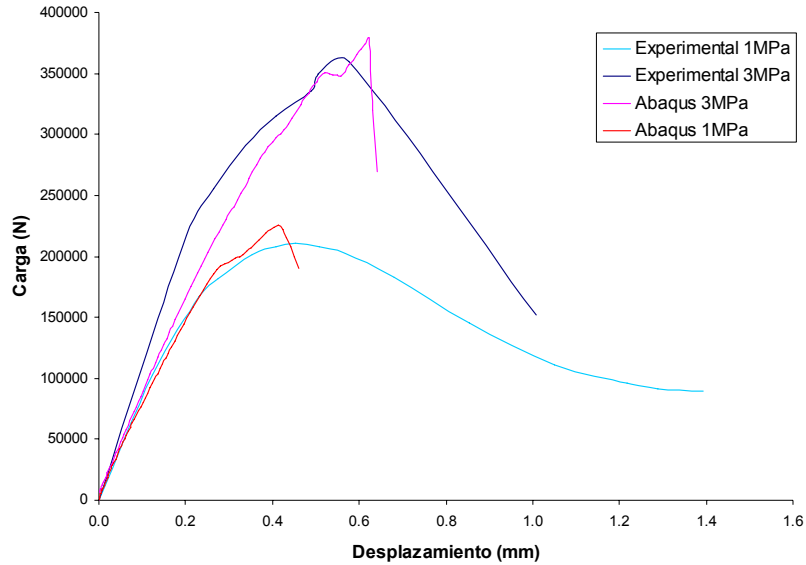


Figura 7.2.3. Curva carga-desplazamiento para junta con una llave y distintas presiones de confinamiento

De la gráfica anterior pueden sacarse varias conclusiones. En primer lugar, se ve cómo al aumentar la fuerza de precompresión de la junta aumenta considerablemente la resistencia, y Abaqus es capaz de reproducir este efecto. En segundo lugar, se observa que la pendiente de la curva de 3 MPa es distinta en los resultados experimentales y en Abaqus. Esto puede deberse a que el hormigón utilizado en el laboratorio tenga distinto módulo elástico, ya que esa propiedad no ha sido medida. Por último, se observa que el fallo en Abaqus es más frágil que en los resultados experimentales, produciéndose una caída brusca de la carga después del pico, en lugar de tener una caída suave como en la curva experimental. Ante esto, variaremos algunas propiedades del hormigón para intentar reproducir este comportamiento.

En este sentido, reduciremos la energía de fractura de 58 N/m a 51 N/m para el caso de 3 MPa de tensión de precompresión, conservando el criterio de fallo y la resistencia a tracción. Esto se consigue con una curva de ablandamiento bilineal, que se representa en la figura 7.2.4, y sus efectos en la curva fuerza-desplazamiento, se observan en la figura 7.2.5.

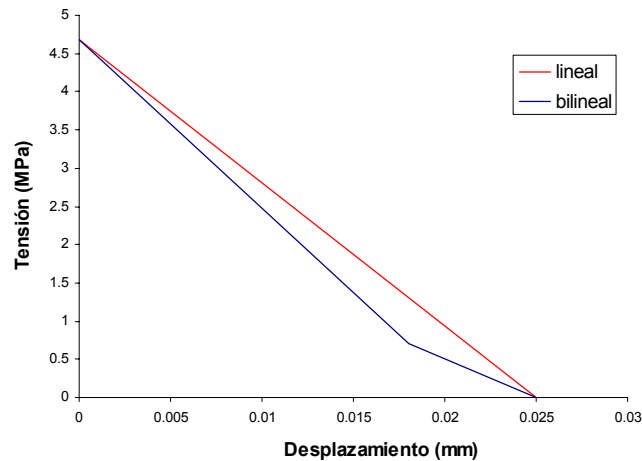


Figura 7.2.4. Curva de ablandamiento lineal y bilineal, para $f_t = 4.68 \text{ MPa}$ y $u_{fallo} = 0.025 \text{ mm}$

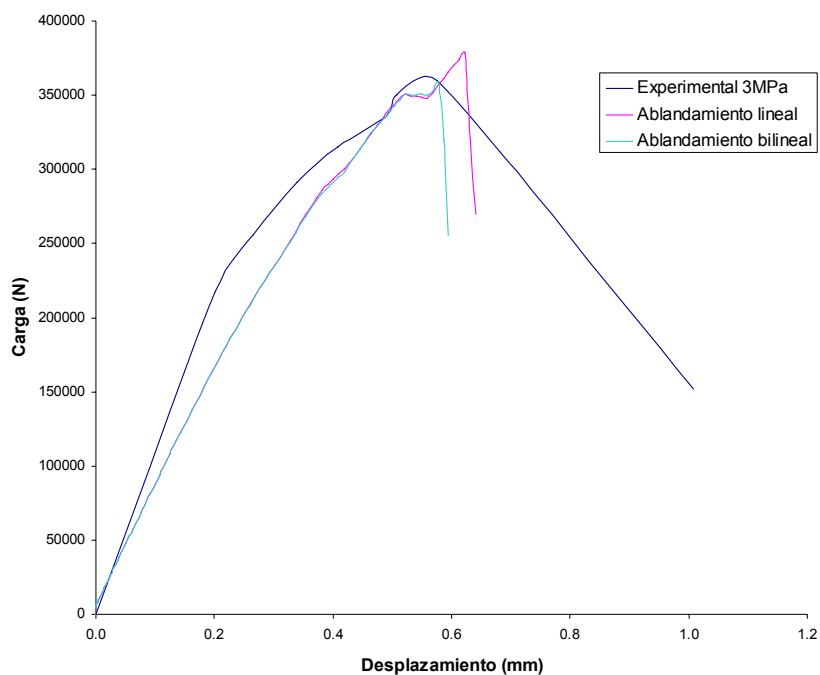


Figura 7.2.5. Curva fuerza-desplazamiento, para curva de ablandamiento lineal y bilineal

Puede comprobarse cómo al bajar la energía de fractura, disminuye el área de la curva, reduciendo el valor pico de la fuerza, como ya se comprobó en el capítulo 5 para el caso de la viga con entalla.

La curva bilineal utilizada, no responde a un modelo experimental, sino que se ha elegido por la necesidad de conservar la resistencia a tracción y bajar la energía de fractura. A continuación se mostrará un ejemplo para comprobar que estos son los parámetros que definen el comportamiento del material, siendo menos importante la forma de la curva. Para ello, se realizan dos ejemplos con idéntica energía de fractura y resistencia a tracción, pero distinta curva de ablandamiento, variando el criterio de fallo. Los resultados se muestran en la figura 7.2.7, y las curvas de ablandamiento en la figura 7.2.6.

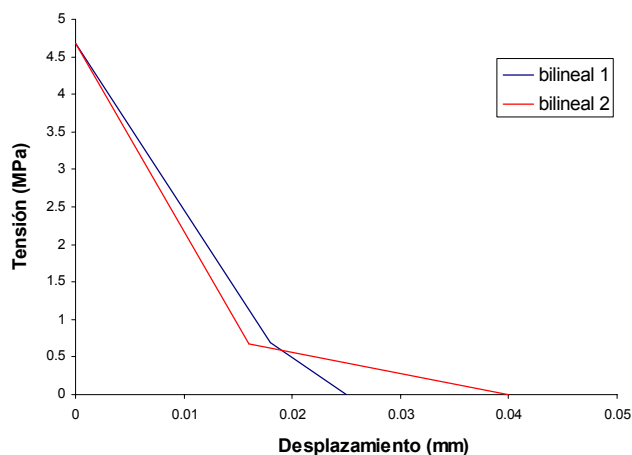


Figura 7.2.6. Curvas de ablandamiento bilineales, para $f_t = 4.68 \text{ MPa}$ y $G_F = 51 \text{ N/m}$

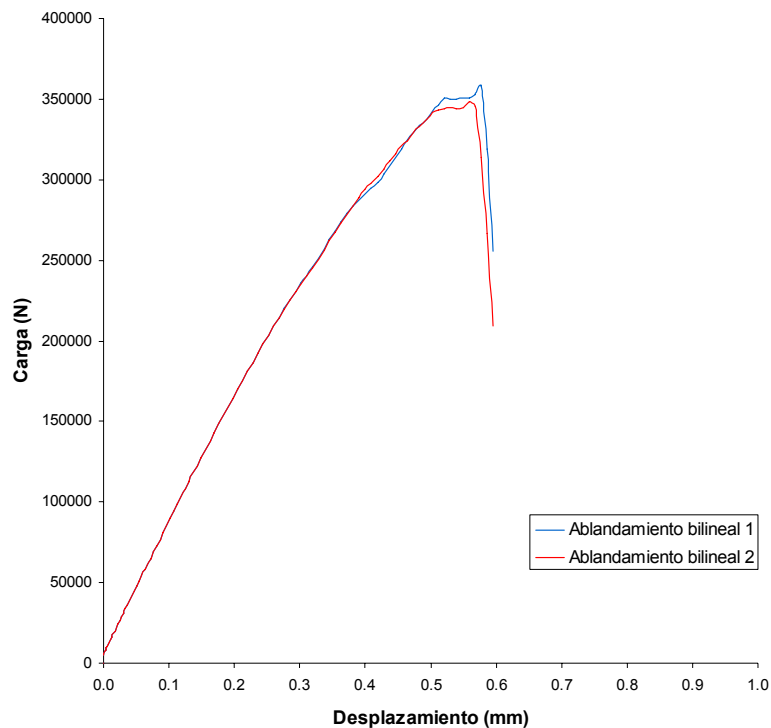


Figura 7.2.7. Curva carga-desplazamiento para distintos modelos de ablandamiento y mismas f_t y G_F

Se comprueba que, conservando la energía de fractura y la resistencia a tracción, la forma de la curva no afecta a la resistencia de la junta. Aun así, puesto que para ello se ha aumentado el criterio de eliminación de elementos, un desplazamiento de fallo demasiado grande provocaría que estos elementos no fueran eliminados y se mantuvieran en la malla resistiendo una tensión muy pequeña, por lo que se perdería una de las ventajas obtenidas del modelo de material Brittle Cracking: la visualización de la trayectoria de las grietas.

En las siguientes figuras se representa la tensión máxima principal para distintos instantes de tiempo del ejemplo con modelo de ablandamiento bilineal 2 (ver figura 7.2.6). En ellas, se representan en colores los distintos valores de tensión positiva, y en negro la parte que se encuentra en compresión. Se observa cómo en primer lugar se concentran las tracciones en la esquina inferior de la llave (figura 7.2.8), más adelante se ablanda el material disminuyendo su tensión, y la zona de concentración de tensiones de desplaza (figura 7.2.9), y después aparece una grieta a 45 °, propia del fallo por cortante (figura 7.2.10). Finalmente, aparece una segunda grieta en el centro de la llave (figura 7.2.11).

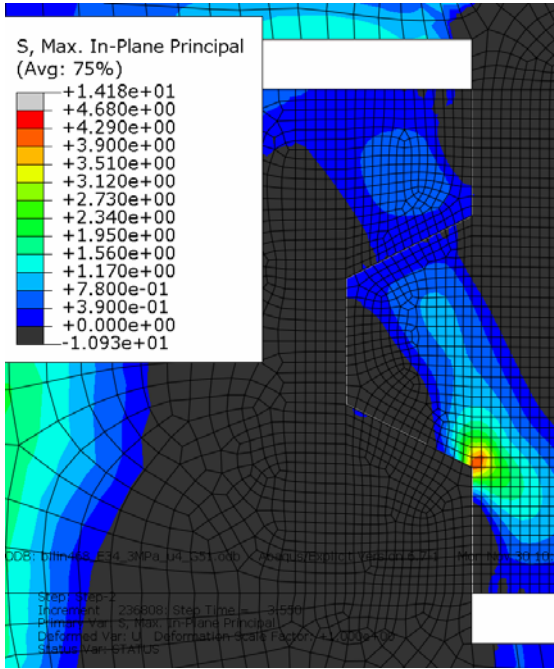


Figura 7.2.8. Tensión máxima principal en el instante $t = 3.55$ s. Concentración de tensiones.

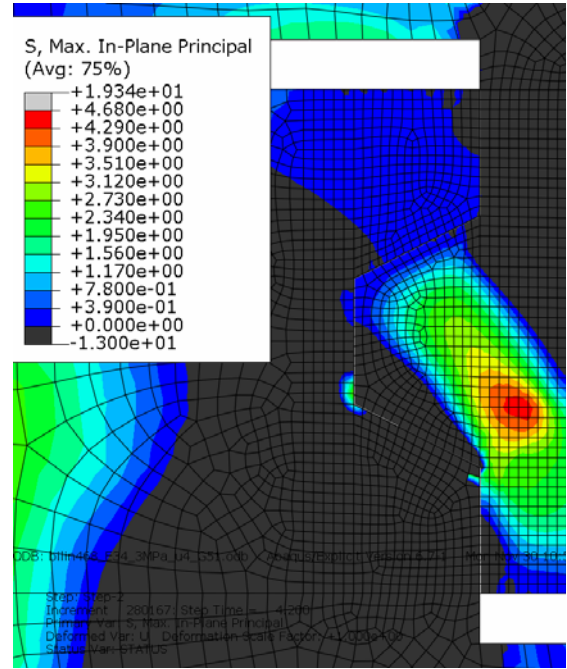


Figura 7.2.9. Tensión máxima principal en el instante $t = 4.2$ s. Ablandamiento.

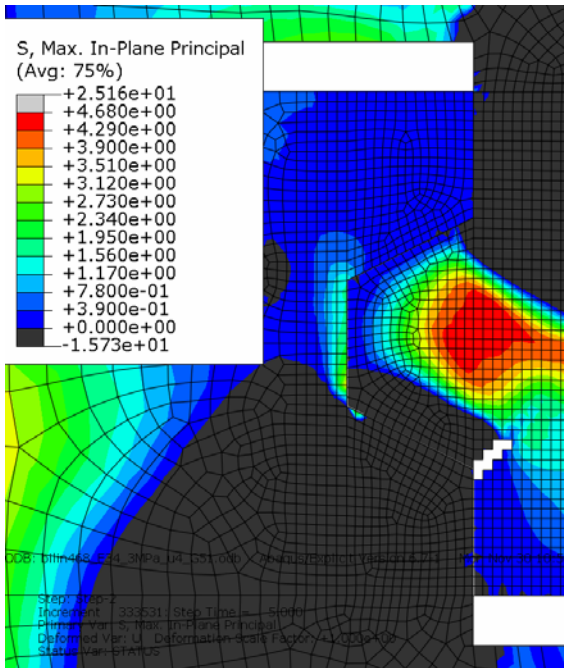


Figura 7.2.10. Tensión máxima principal en el instante $t = 5$ s. Aparición de la primera grieta.

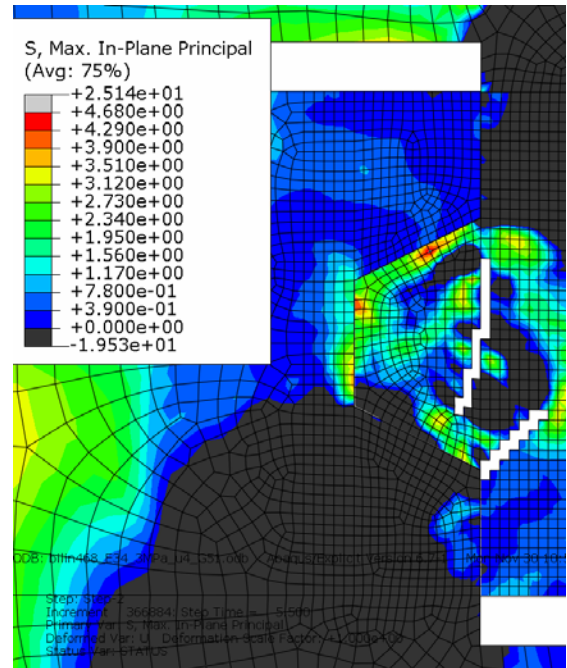


Figura 7.2.11. Tensión máxima principal en el instante $t = 5.5$ s. Aparición de la segunda grieta.

Comparando con los resultados experimentales obtenidos por Zhou [20] se ve que los patrones de fisuras coinciden (ver figura 7.2.12)

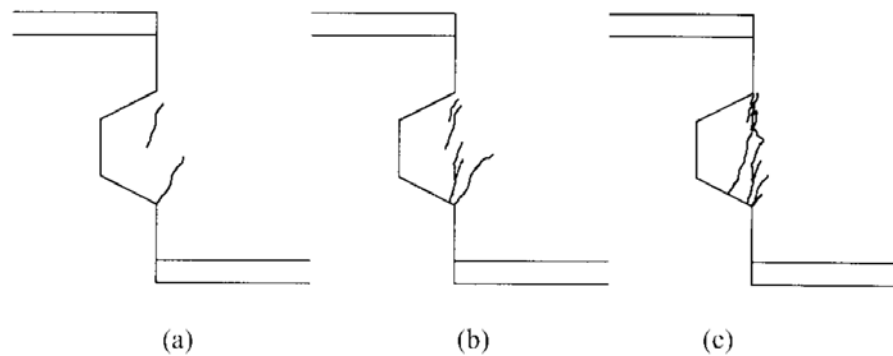


Figura 7.2.12. Evolución de las grietas para junta seca con una llave [20]

Como conclusión, podemos decir que el modelo realizado reproduce con exactitud la evolución de las grietas y calcula con precisión la resistencia a cortante de la junta, pero no predice la parte post-pico de la curva carga-desplazamiento, siendo los resultados obtenidos con Abaqus correspondiente a un comportamiento más frágil del hormigón.

