

## 8 ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE JUNTA SECA CON TRES LLAVES

### 8.1 DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Finalmente, se realiza un modelo de junta seca con tres llaves, y se comparan los resultados obtenidos con el modelo de elementos finitos Abaqus y los resultados experimentales obtenidos por Zhou [20], tanto en lo relativo a la resistencia a cortante como en la trayectoria seguida por las grietas.

#### GEOMETRÍA, CARGAS Y CONDICIONES DE CONTORNO

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

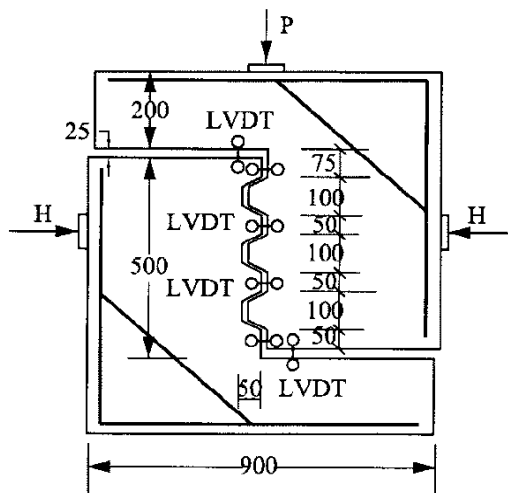


Figura 8.1.1. Configuración del ensayo

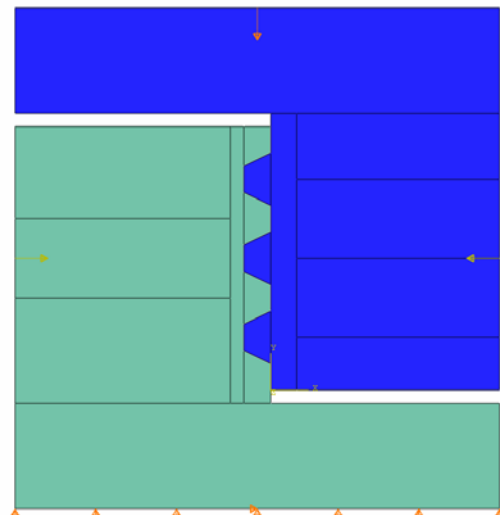


Figura 8.1.2. Modelo Abaqus

El modelo, en 2-D, consta de dos partes independientes en contacto, que se muestran en la figura 8.1.2 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 (flecha naranja), 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.

El desplazamiento impuesto se aplica mediante una “función suave”, como ya se explicó en el capítulo anterior, durante un periodo de 10 segundos, hasta llegar a un desplazamiento final de 1.5 mm.

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. En el paso 2, de 10 segundos de duración, se impone el desplazamiento como ya se ha explicado anteriormente.

## MATERIALES

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

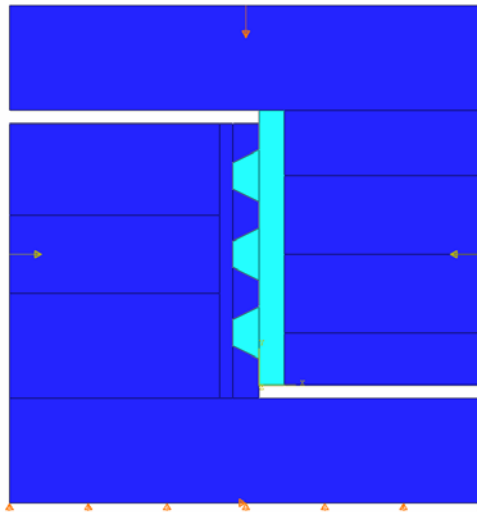


Figura 8.1.3. Representación de las partes donde se aplica cada modelo de material

Las llaves (en celeste), han sido modeladas con el modelo de material Brittle Cracking, 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, asumiendo que el comportamiento del hormigón a compresión es elástico y lineal. El resto se modela con un modelo de material elástico y lineal.

Las propiedades mecánicas del hormigón utilizado son las deducidas en el capítulo anterior, y son las siguientes:

$E_c$ (GPa)	$f_{ts}$ (MPa)	$f_t$ (MPa)	$G_F$ (N/m)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\nu$
35	5.2	4.68	51	2500	0.2

Tabla 8.1.2. Propiedades del hormigón

Siendo

- $E_c$  Módulo de deformación longitudinal
- $f_{ts}$  Resistencia a tracción indirecta
- $f_t$  Resistencia a tracción directa, siendo  $f_t = 0.9 f_{ts}$
- $G_F$  Energía de fractura
- $\rho$  Densidad
- $\nu$  Módulo de Poisson

La curva de ablandamiento que se toma es la curva bilineal con la que se obtuvieron los mejores resultados en el capítulo anterior, y se representa en la figura 8.1.4.

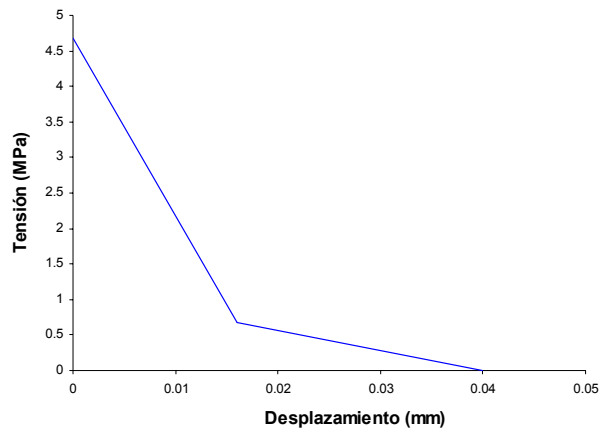


Figura 8.1.4. Curva  $\sigma-u$  , modelo de comportamiento del hormigón a tracción bilineal

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 8.1.5) en el que la deformación máxima es la correspondiente al desplazamiento crítico, teniendo en cuenta las dimensiones del elemento.

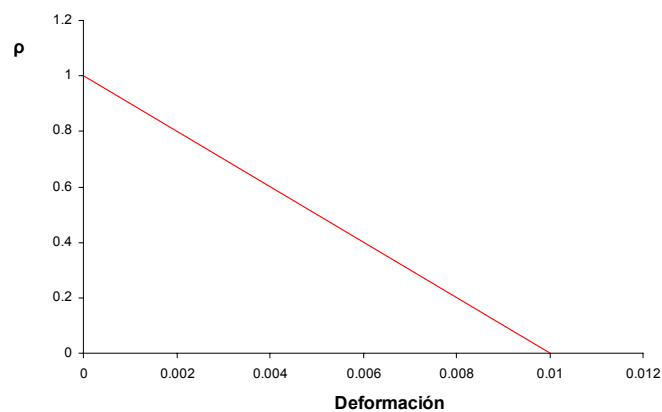


Figura 8.1.5. Factor de retención de cortante

## MALLA

Como en el ejemplo anterior, se realiza un refinamiento de la malla en la zona de las llaves. 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 las llaves (ver figuras 8.1.6 y 8.1.7).

Los elementos utilizados son CPS4R. Estos elementos 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 8464 elementos.

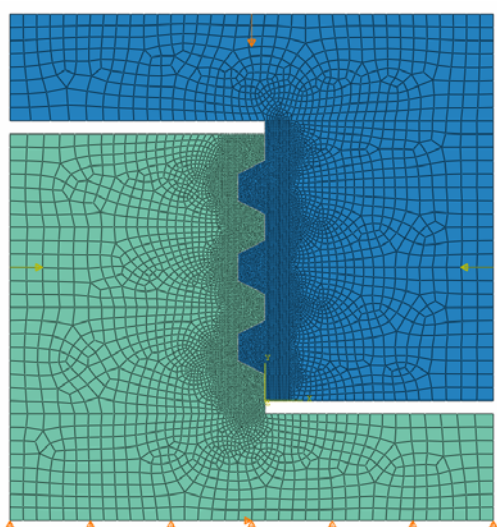


Figura 8.1.6. Malla

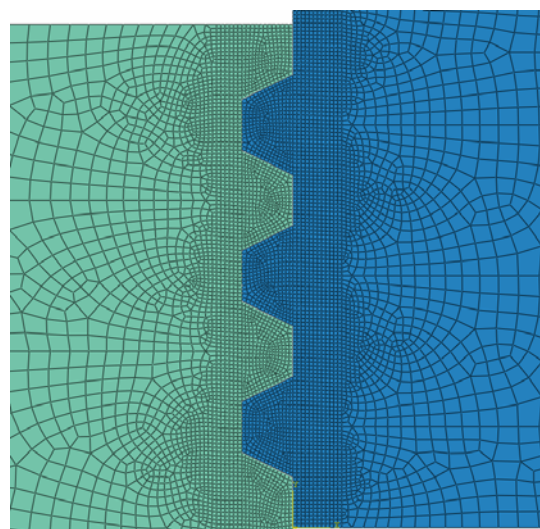


Figura 8.1.7. Detalle del refinamiento de la malla

## CONTACTO

Como se explicó en el capítulo anterior, se utiliza el algoritmo Contact Pair para modelar el contacto, con superficies definidas en los elementos.

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.

## 8.2 COMPARACIÓN CON RESULTADOS EXPERIMENTALES

Las curvas fuerza-desplazamiento obtenidas se muestran en la figura 8.2.1 para distintas tensiones de compresión, y en ellas se ve cómo la resistencia a compresión crece con la tensión de confinamiento.

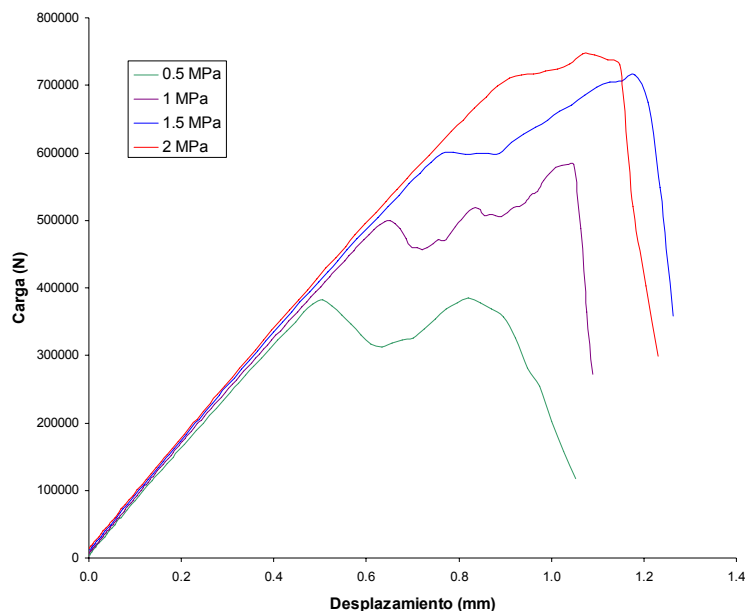


Figura 8.2.1. Curva carga-desplazamiento para junta con tres llaves y distintas tensiones de compresión

Se puede observar cómo se producen varias “caídas” en el valor de la fuerza que resiste la junta, correspondiente a la rotura sucesiva de las distintas llaves. Además, es interesante ver cómo la fuerza de pretensado afecta al comportamiento de la junta: su resistencia crece, y su comportamiento se hace cada vez más frágil. En el caso de mayor tensión de compresión (2 MPa) vemos cómo apenas se distinguen las tres “caídas” en la resistencia, lo que indica que las tres llaves rompen prácticamente a la vez, y su comportamiento es muy similar al de la junta con una llave.

La comparación de la resistencia de la junta con los valores experimentales, se muestra en la tabla 8.2.1.

Presión de confinamiento (MPa)	0.5	1	1.5	2
Carga máxima Abaqus (kN)	385	583	715	747
Carga máxima experimental (kN)	340	451	661	740
Error (%)	13	29	8	1

Tabla 8.2.1. Comparación de resultados de Abaqus con los experimentales para junta con tres llaves

Puede observarse que el error varía desde el 1 % hasta el 30 %, siendo siempre mayor el valor obtenido con Abaqus. Esto se explica porque en la práctica el acoplamiento entre las dos superficies puede no ser perfecto, debido a la presencia de los áridos.



Cabe señalar que, en los ensayos de laboratorio que se toman para comparar los resultados [20], no se usa siempre el mismo tipo hormigón, de hecho la resistencia a compresión de los hormigones utilizados varía desde 30,2 MPa hasta 80 MPa, lo que podría explicar una diferencia tan grande en los errores calculados.

En las siguientes figuras se representa la tensión máxima principal para distintos instantes de tiempo. 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 inferior (ver figura 8.2.2), más adelante se ablanda el material disminuyendo su tensión, mientras que en la segunda y la tercera llave se observa la concentración de tensiones (ver figura 8.2.3). A continuación aparece una grieta a 45° en la llave inferior (ver figura 8.2.4), después en la segunda (ver figura 8.2.5) y finalmente en la tercera (ver figura 8.2.6). En la figura 8.2.7 se ve la rotura total de la junta.

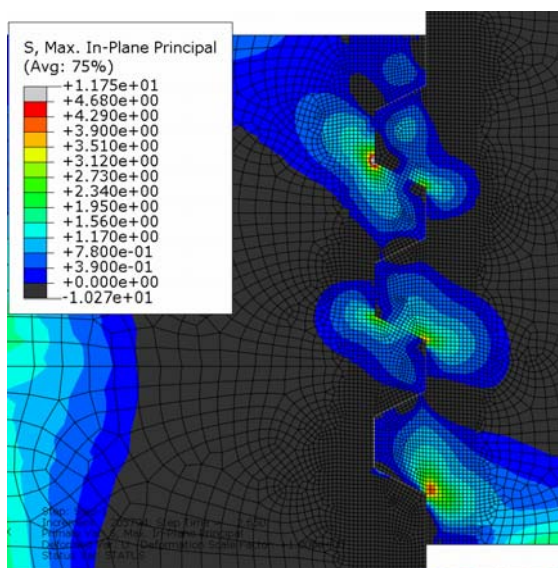


Figura 8.2.2. Tensión máxima principal en el instante  $t = 2.65$  s

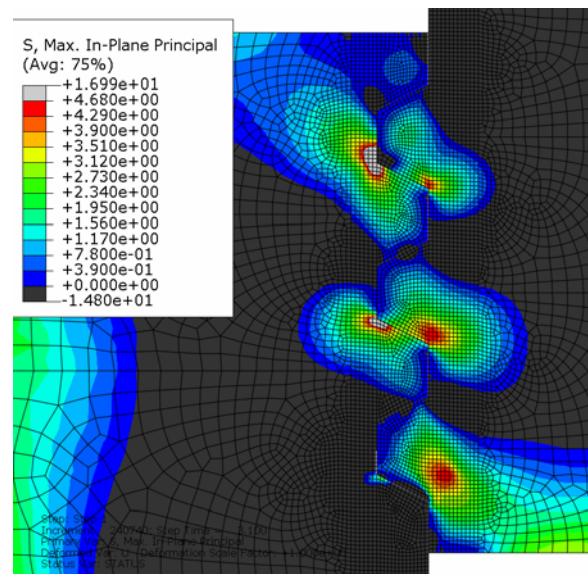


Figura 8.2.3. Tensión máxima principal en el instante  $t = 3.1$  s

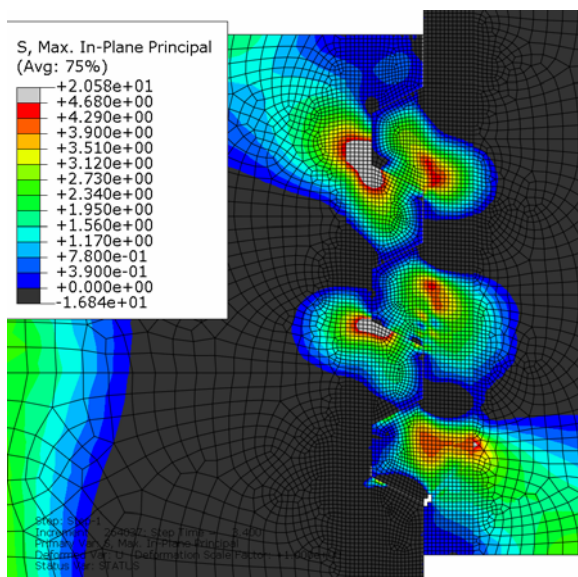


Figura 8.2.4. Tensión máxima principal en el instante  $t = 3.4$  s

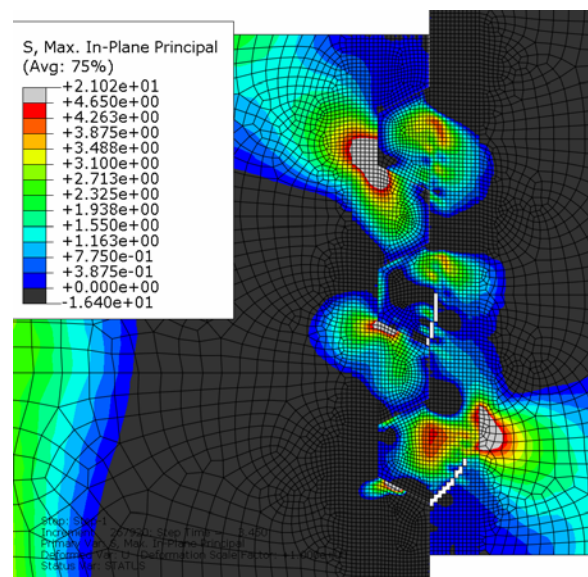


Figura 8.2.5. Tensión máxima principal en el instante  $t = 3.45$  s

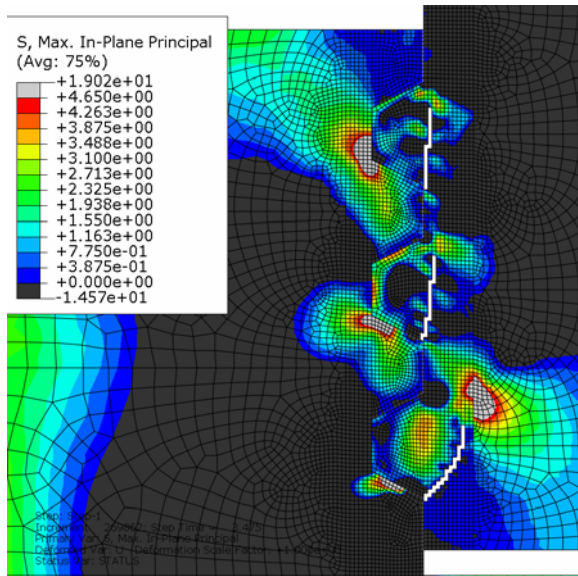


Figura 8.2.6. Tensión máxima principal en el instante  $t = 3.475$  s

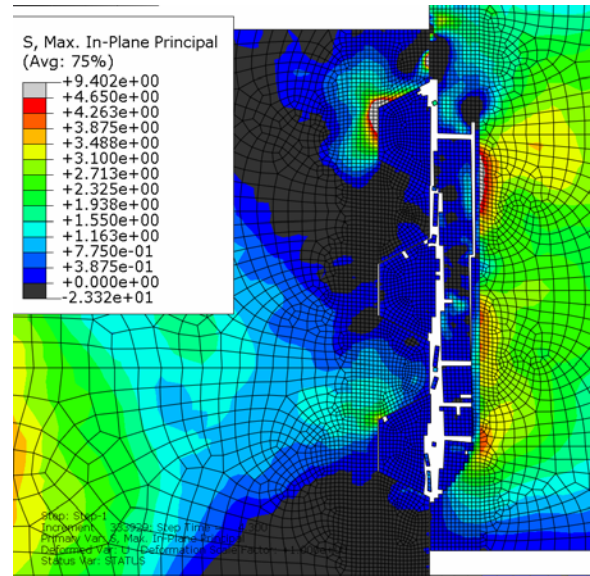


Figura 8.2.7. Tensión máxima principal en el instante  $t = 4.3$  s

Comparando con los resultados obtenidos con Abaqus y los experimentales [20], se ve la gran semejanza de los patrones de fisuras y de la rotura sucesiva de las llaves (ver figura 8.2.8).

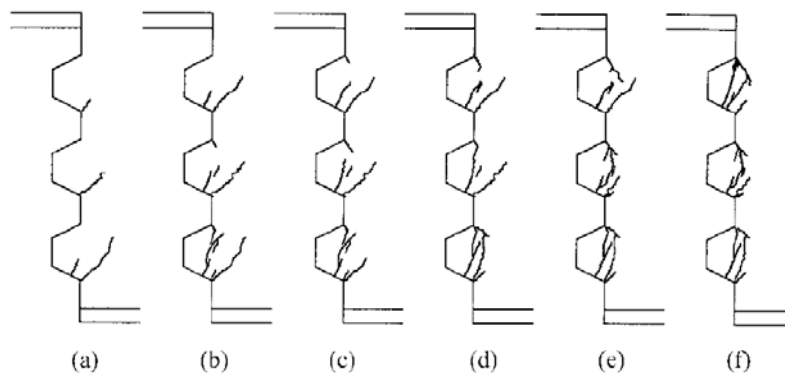


Figura 8.2.8. Evolución de las grietas para junta seca con tres llaves [20]

Finalmente, podemos concluir que el modelo realizado permite observar el crecimiento de las grietas, y calcular la resistencia a cortante de la junta, aunque este aspecto es mejorable y sería conveniente realizar más ensayos de laboratorio.

