



UNIVERSIDAD DE JAÉN
Escuela Politécnica Superior de Jaén

Trabajo Fin de Grado

ANÁLISIS NUMÉRICO DEL EFECTO DE LA INTERACCIÓN ENTRE GRIETAS EN COMPONENTES MECÁNICOS

Alumno: Francisco José Pérez Lorente

Tutor: Prof. D. José Manuel Vasco Olmo
Dpto: Ingeniería Mecánica y Minera

Junio, 2018



Universidad de Jaén
Escuela Politécnica Superior de Jaén
Departamento de Ingeniería Mecánica y Minera

Don José Manuel Vasco Olmo, tutor del Proyecto Fin de Carrera titulado: Análisis numérico del efecto de la interacción entre grietas en componentes mecánicos, que presenta Francisco José Pérez Lorente, autoriza su presentación para defensa y evaluación en la Escuela Politécnica Superior de Jaén.

Jaén, Junio de 2018

El alumno:

El tutor:

Francisco José Pérez Lorente

José Manuel Vasco Olmo

ÍNDICE

1. RESUMEN	5
2. OBJETIVOS Y MOTIVACIÓN.....	5
3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	5
3.1. El criterio de Griffith	6
3.2. Modificación de la ecuación de Griffith	6
3.3. Tasa de liberación de energía (G)	7
3.4. Factor de intensidad de tensiones	7
3.5. J-integral	10
4. METODOLOGÍA.....	10
4.1. Creación de la geometría	11
4.2. Propiedades del material	14
4.3. Creación de la sección	16
4.4. Creación del Instance	17
4.5. Creación de la grieta.....	17
4.6. Creación del Step.....	20
4.7. Condiciones de contorno y carga	21
4.8. Mallado.....	23
4.9. Salida de la variable J	26
5. ESTUDIO Y ANÁLISIS DE VARIABLES	28
5.1. Probeta CT (Compact Tension).....	29
5.1.1. Sensibilidad de malla	30
5.1.2. Particiones del vértice de grieta	31
5.1.3. Número de contornos para obtener la variable J	32
5.1.4. Conclusiones.....	33
5.2. Probeta MT (MiddleTension)	33
5.2.1. Sensibilidad de la malla	33
5.2.2. Particiones del vértice de grieta	34
5.2.3. Número de contornos para obtener la variable J	35
5.2.4. Conclusiones.....	36
5.3. Probeta DEN (Double Edge Notched).....	37
5.3.1. Número de contornos en las particiones del vértice de grieta	39
5.3.2. Mallado de los contornos.....	42
5.3.3. Mallado de las proximidades.....	44

5.3.4.	Mallado externo	46
5.3.5.	Conclusiones.....	49
6.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	51
7.	CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	70
8.	REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA.....	71

1. RESUMEN

En el presente trabajo fin de grado se analizará el efecto que la interacción entre grietas pueda tener en los campos de tensiones en los contornos de los vértices de dichas grietas mediante la utilización del método de elementos finitos. En primer lugar, con la ayuda de probetas de titanio tipo CT (Compact Tension) y MT (Middle Tension), se estudiarán los parámetros más relevantes para la correcta simulación numérica del fenómeno de interacción entre grietas. Una vez hallados los parámetros más influyentes se hará uso de la probeta de titanio tipo DEN (Double Edge Notched). En esta probeta tipo DEN habrá dos variables geométricas muy destacables como son, la longitud de grieta y la separación entre las entallas, las cuales se irán variando de valor para obtener unas conclusiones importantes. Los análisis se llevarán a cabo a través del cálculo del factor de intensidad de tensiones observando como evoluciona éste a medida que varían los diferentes parámetros.

2. OBJETIVOS Y MOTIVACIÓN

El objetivo principal de este trabajo es evaluar el campo de tensiones que hay alrededor del vértice de grieta, para ello, como se ha dicho anteriormente se analizará el factor de intensidad de tensiones (K).

Este trabajo tiene también como objetivo la reducción del coste computacional a la hora de realizar las diferentes simulaciones numéricas. Por tanto, el análisis de las diferentes variables es un paso fundamental para cumplir este objetivo.

Se ha realizado este trabajo porque proporcionar respuestas de forma cuantitativa a problemas relacionados con grietas contenidas en elementos mecánicos o estructurales ha sido un tema de interés para gran número de investigadores desde hace tiempo. Entre estos problemas, un tema que ha despertado gran interés a los investigadores es el fenómeno de interacción entre grietas. Algunas de las cuestiones, entre otras, que se han planteado al inicio de este trabajo son: ¿qué ocurrirá a medida que la longitud de grieta va aumentando?, ¿qué pasará a medida que la separación entre las entallas va aumentando?, ¿habrá valores límites a partir de los cuáles no hay variación del factor de intensidad de tensiones?

3. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En este capítulo se llevará a cabo una breve descripción de conceptos teóricos relacionados con la mecánica de la fractura, donde principalmente se hará incapié en la obtención del factor de intensidad de tensiones.

3.1. El criterio de Griffith

Griffith [1] fue el primero que formuló el fenómeno de fractura. Partió del hecho de que un cuerpo deformado elásticamente almacena una energía potencial. De esta forma, propuso que esta energía elástica almacenada era la impulsora para el crecimiento o la propagación de grietas. La expresión que anunció Griffith para determinar la tensión de fractura en materiales frágiles fue la siguiente:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi a}} \quad (1)$$

Donde:

σ_f = tensión de fractura

E = módulo de Young del material

γ_s = energía superficial

a = mitad de la longitud de la grieta

3.2. Modificación de la ecuación de Griffith

Posteriormente, fueron Orowan e Irwin [1] quienes se dieron cuenta que siempre existía una componente de energía de deformación plástica que debía ser tomada en cuenta. Por tanto, modificaron la ecuación de Griffith incluyendo el término γ_p que representa la energía necesaria para deformar el material, quedando la ecuación como sigue:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2E(\gamma_s + \gamma_p)}{\pi a}} \quad (2)$$

El problema del criterio de Griffith fue la gran dificultad para evaluar experimentalmente la energía de superficie. A pesar de ello, hizo dos aportaciones fundamentales, la ecuación de Griffith indica que hay una relación entre la tensión de fractura y el tamaño de la grieta, y que la fractura resulta de un proceso de conversión de energía, que no depende solo del valor de la tensión sino también del tamaño de grieta.

3.3. Tasa de liberación de energía (G)

Irwin [1] propuso un criterio de energía para la fractura en el que estableció el concepto de tasa de liberación de energía (G). Donde G está referida a la energía disponible para un incremento en la extensión de la grieta. En la ecuación (3) se establece dicho concepto.

$$G = \frac{dU}{da} = \frac{\pi\sigma^2 a}{E} \quad (3)$$

Donde:

U = energía elástica del sistema

a = longitud de la grieta

σ = tensión aplicada en la placa

E = módulo de Young del material

3.4. Factor de intensidad de tensiones

La mecánica de la fractura [1] se fundamenta en el cálculo del campo de tensiones y deformaciones alrededor de una grieta, los cuales provocan el desplazamiento relativo de las superficies de fractura en una grieta. Los tres modos básicos de desplazamiento (modos de carga) de las superficies de fractura en una grieta que pueden ocurrir en un cuerpo agrietado al aplicar una fuerza se muestran en la Figura 3.1.

El modo I es conocido como modo de apertura. La carga se aplica perpendicularmente al plano de la grieta, por lo que las superficies de la grieta se

separan simétricamente con respecto al plano ocupado por la grieta antes de la deformación. Es el modo que menos energía requiere para la fractura.

El modo II es el modo de deslizamiento o cizalladura. La carga se aplica en el mismo plano de la grieta, originando que las superficies de la grieta se deslicen una sobre la otra en direcciones opuestas pero en el mismo plano.

Y por último, el modo III es el modo de desgarro. La carga se aplica de tal forma que las superficies de la grieta se desplazan en el plano de la grieta en dirección opuesta entre sí y paralelas al frente de grieta.

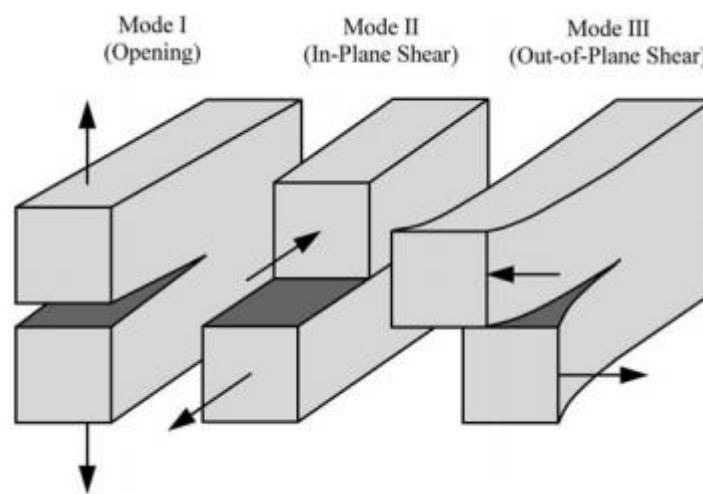


Figura 3.1 Modos de desplazamiento de superficies fracturadas [2]

Para hallar la ecuación del factor de intensidad de tensiones hay que realizar un análisis de la fractura. Se supone una grieta en el modo I, en una placa de espesor uniforme y sometida a un esfuerzo de tracción también uniforme. En la Figura 3.2 se muestra el estado tensional de un punto de coordenadas polares r y θ , estableciendo como origen el vértice de la grieta. Dependiendo del espesor de la placa, se establece un estado de tensión plana en el caso de que la placa sea muy delgada y de deformación plana para una placa muy gruesa. En tensión plana, la tensión en la dirección z será cero ya que no hay suficiente material en esta dirección para transmitir los esfuerzos. En el presente trabajo, un estado de tensión plana puede ser establecido ya que se estudian probetas cuyo valor del espesor es mucho menor que el resto de dimensiones de las mismas.

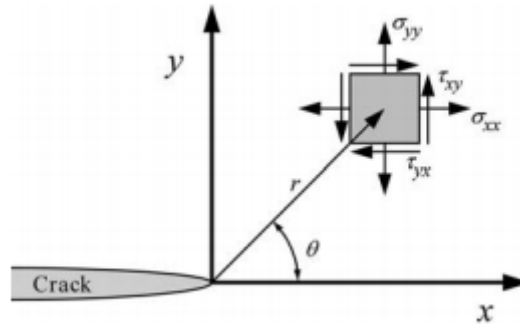


Figura 3.2 Definición del sistema de coordenadas alrededor de una grieta [2]

Estableciendo el origen del sistema de referencia en el vértice de la grieta, tal y como se ha comentado anteriormente, las componentes del estado tensional en estudio vendrán definidas por la siguiente expresión:

$$\sigma_{ij} = \sigma \sqrt{\frac{a}{2r}} f_{ij}(\theta) \quad (4)$$

Donde:

σ_{ij} = esfuerzo en los ejes x, y o z

σ = tensión aplicada en la placa

a = mitad de la longitud de la grieta

r, θ = coordenadas polares del punto analizado

Se puede reescribir la ecuación anterior quedando finalmente la ecuación (5) donde el término K es el factor de intensidad de tensiones.

$$\sigma_{ij} = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} f_{ij}(\theta) \quad (5)$$

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \quad (6)$$

La ecuación (6) será referida para una placa infinita. Sin embargo, para una placa finita, esta expresión ha de modificarse mediante la introducción de un factor. Este factor, Y , conocido como factor de forma dependerá de las dimensiones de la placa. El factor de forma se encuentra recogido en forma de tablas y gráficos en diferentes prontuarios, por lo que puede ser determinado mediante la consulta de estas tablas/gráficos. Así, el factor de intensidad de tensiones vendrá dado por la siguiente expresión:

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a} \quad (7)$$

A parte de la solución analítica mostrada anteriormente, hay diferentes formas para hallar este valor. Se puede hacer uso de métodos numéricos, como por ejemplo elementos finitos, que será abordado más adelante en este trabajo, o también de forma experimental mediante el empleo de técnicas y métodos modernos que se pueden encontrar en la actualidad.

3.5. J-integral

En la mecánica de la fractura elástico-lineal el parámetro principal es el factor de intensidad de tensiones, visto anteriormente. En la mecánica de la fractura elástico-plástico, hay dos parámetros fundamentales como son el CTOD y el J-integral. En los distintos análisis numéricos que se realizarán en este trabajo mediante el software Abaqus CAE, se trabajará con el parámetro J-integral, ya que en nuestro caso como tenemos un material elástico-lineal, el valor de J-integral es numéricamente equivalente a G , tasa de liberación de energía. Por tanto, a partir de la ecuación (8) se podrá averiguar el valor del factor de intensidad de tensiones.

$$J = G = \frac{K^2}{E} \quad (8)$$

4. METODOLOGÍA

Como se ha dicho en el capítulo anterior, los distintos análisis numéricos se llevarán a cabo mediante el empleo del software Abaqus CAE. En este capítulo se describe el proceso llevado a cabo para el desarrollo de los análisis numéricos. La interfaz de Abaqus CAE se muestra en la Figura 4.1. En la pestaña módulo se irá cambiando éste conforme se vaya necesitando.

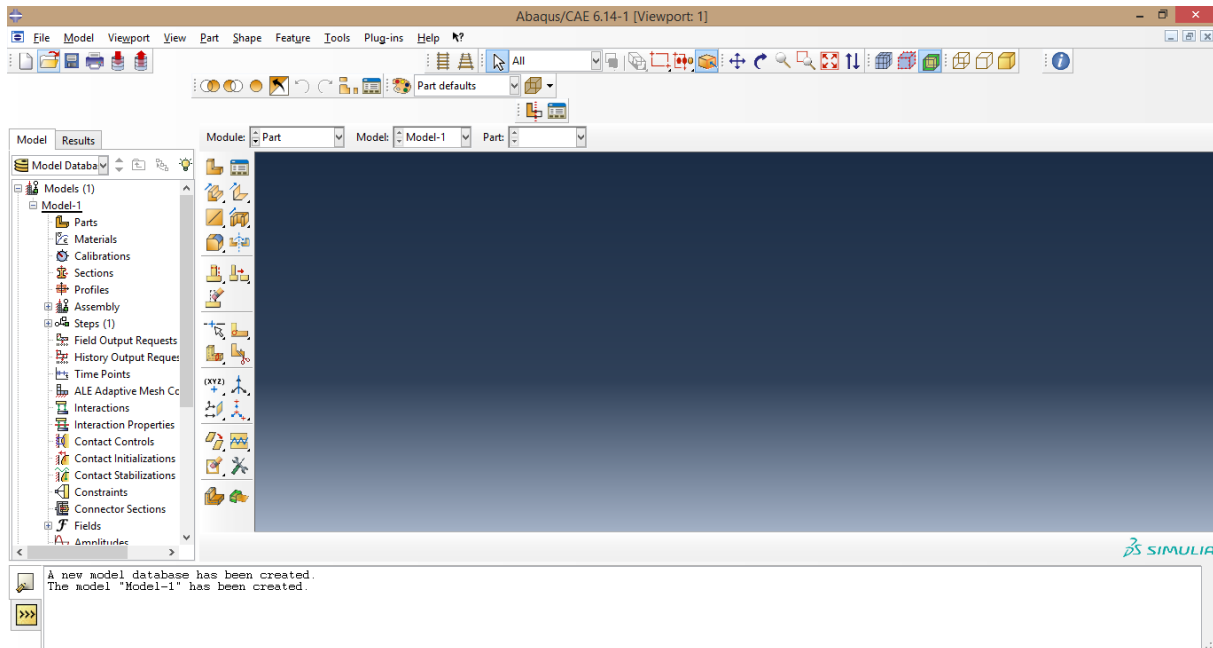


Figura 4.1 Interfaz de Abaqus CAE

4.1. Creación de la geometría

El primer paso será crear la geometría de la probeta. En este trabajo se utilizarán tres tipos de probetas cuyos planos se muestran más adelante.

En el módulo Part, se selecciona Create Part (Figura 4.2 (a)) y se despliega un menú, en el cual se escribirá la designación de la probeta, se seleccionará un modelado en 2D, tipo deformable y tipo shell (Figura 4.2 (b)).

A continuación se dibujará la geometría de la probeta que se necesite. Después, dependiendo del tipo de probeta analizada, se realizarán diferentes particiones para conseguir un mejor mallado de la probeta y así obtener resultados más exactos. Para realizar la partición se seleccionará la opción Partition Face: Sketch (Figura 4.3). Lo más importante es realizar una buena partición en el vértice de grieta porque ahí se concentran las tensiones y el principal objetivo es conseguir un mallado homogéneo. Para ello, en el vértice de grieta se realizan una serie de

círculos y en el resto de la probeta se realizan rectas verticales y horizontales con el objetivo de conseguir un mejor aspecto de la malla. En la Figura 4.4 se muestran algunas de las probetas que se utilizarán en este trabajo con las particiones realizadas.

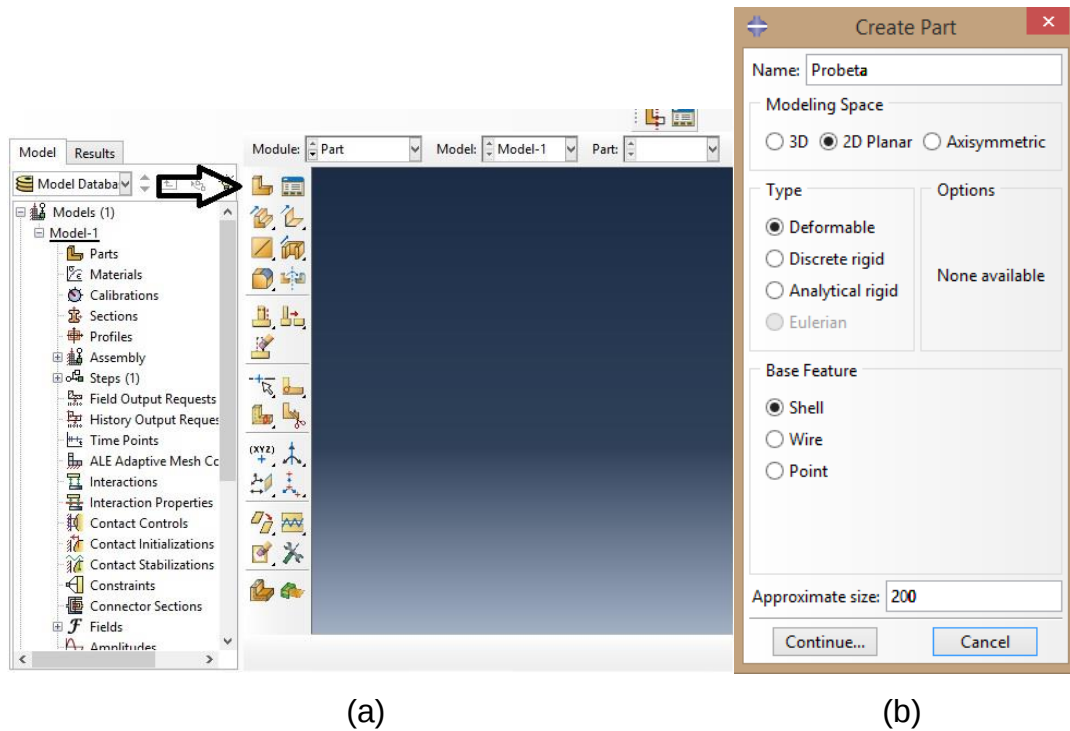


Figura 4.2 (a) Create Part, (b) Menú Part

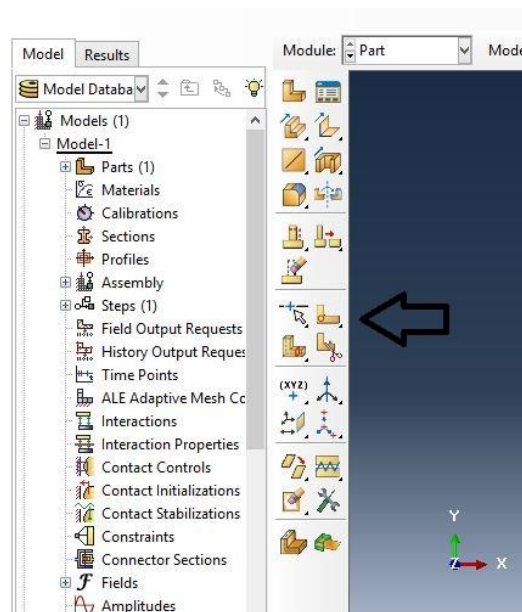


Figura 4.3 Partition Face: Sketch

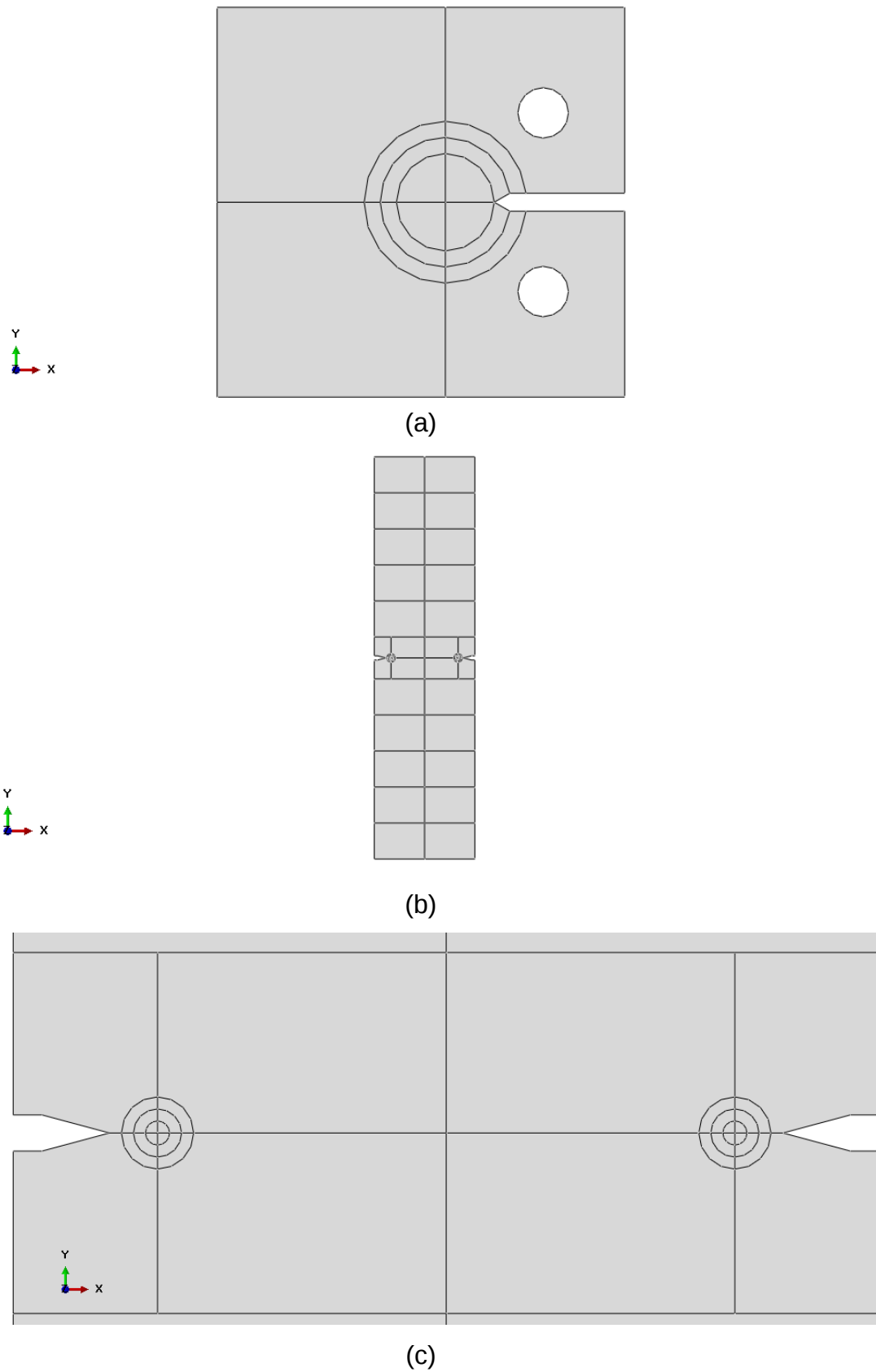


Figura 4.4 (a) Partición probeta MT, (b) Partición probeta DEN, (c) Zoom en la zona central de la probeta DEN

4.2. Propiedades del material

El siguiente paso será introducir las propiedades elásticas y plásticas del material. Se utilizarán probetas de titanio ya que están fabricadas para el análisis de forma experimental. Las propiedades se han obtenido mediante su caracterización mecánica realizada en laboratorio y son las siguientes:

$$E = 105000 \text{ MPa}$$

$$\nu = 0.33$$

Tensión (MPa)	Deformación
0	0
405	0.003785
438.2022	0.062857
453.6517	0.098776
459.2697	0.142857
452.2472	0.197551
435.3933	0.262857
411.5169	0.315102
365.1685	0.364898

Tabla 4.1 Tensión-Deformación

Para introducir estos valores en Abaqus CAE se selecciona el módulo Property y luego la opción Create Material (Figura 4.5). Se desplegará un menú donde se puede editar la denominación del material, en este caso Titanio, y se seleccionará la opción Mechanical → Elasticity → Elastic y se introducen los valores del módulo de elasticidad (E) y del coeficiente de Poisson (ν) (Figura 4.6 (a)). Por último, se introducen las propiedades plásticas en la opción Mechanical → Plasticity → Plastic (Figura 4.6 (b)).

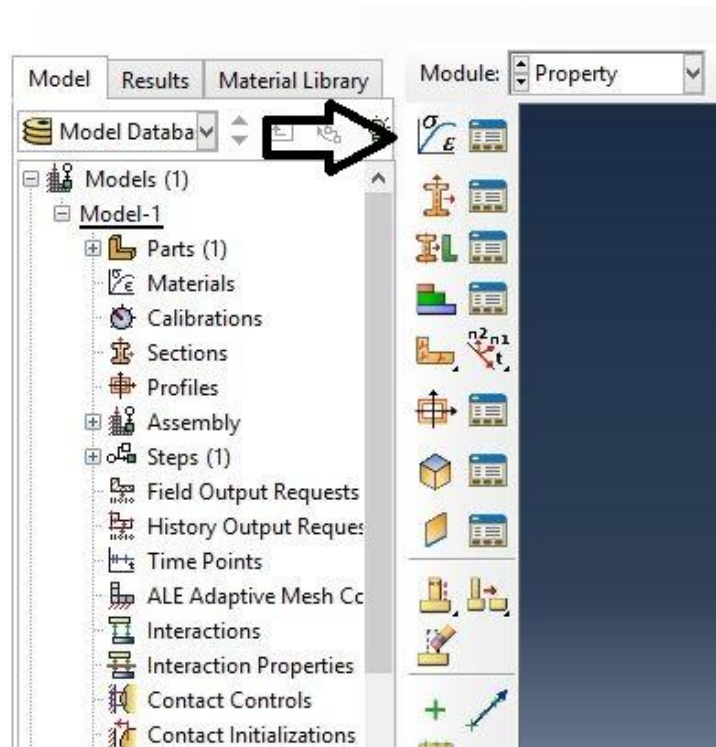
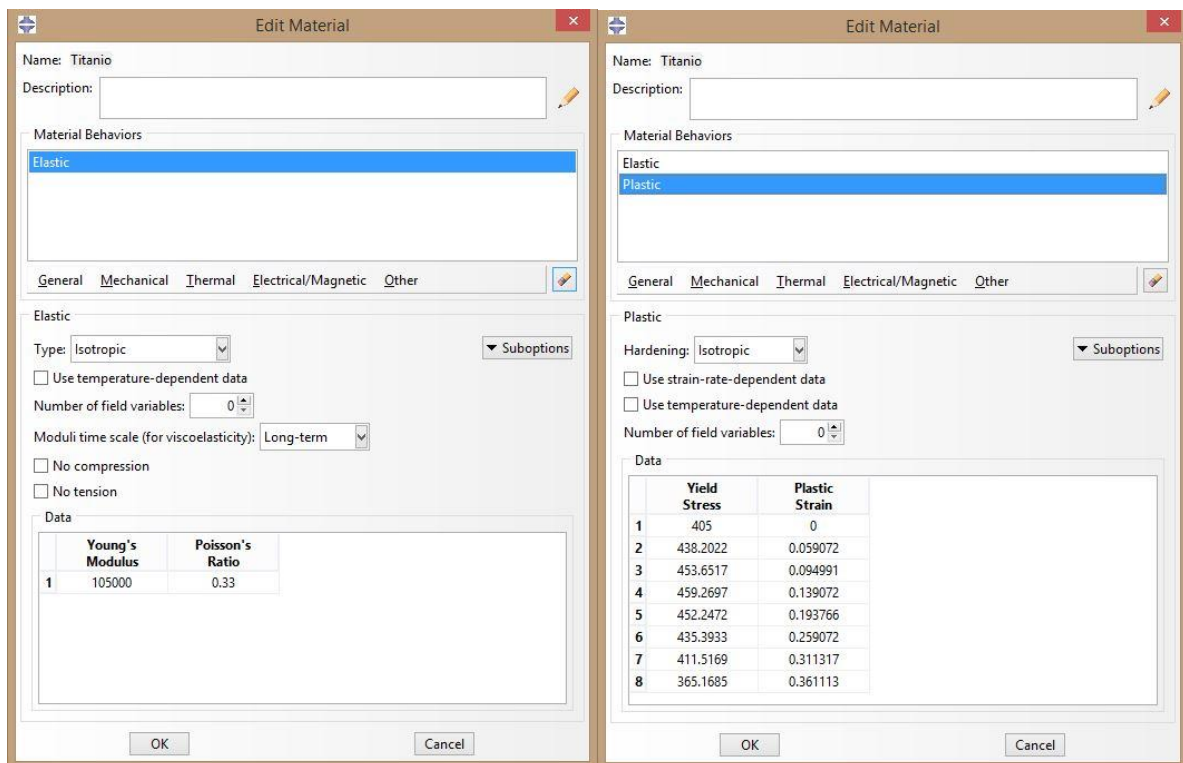


Figura 4.5 Create Material



(a)

(b)

Figura 4.6 (a) Propiedades elásticas, (b) Propiedades plásticas

4.3. Creación de la sección

Una vez introducidas todas las propiedades del material hay que crear y asignar la sección. Para ello, dentro del módulo Property, se selecciona la opción Create Section, y en el menú que aparece, se elige categoría solid y tipo homogeneous (Figura 4.7).

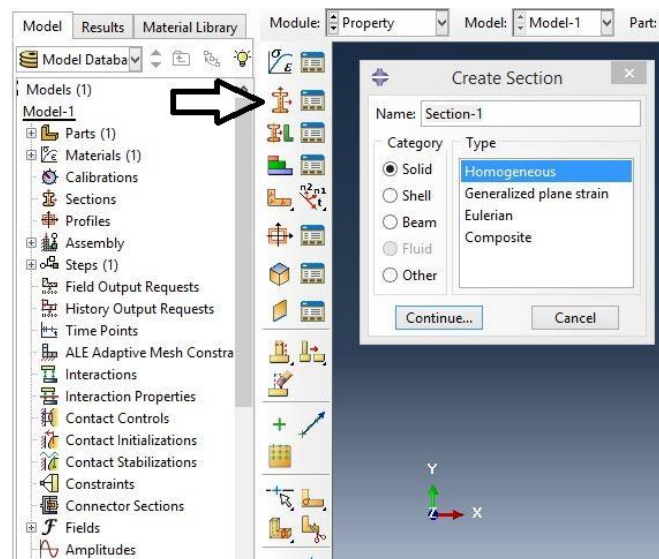


Figura 4.7 Create Section

Se selecciona continuar y aparece un pequeño menú donde vendrá establecido el material que hemos creado y se seleccionará la opción OK (Figura 4.8).

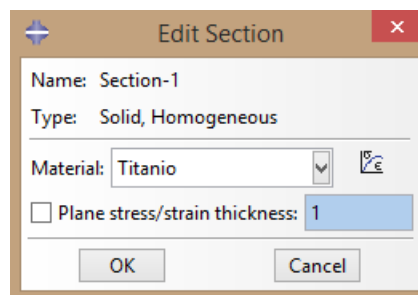


Figura 4.8 Selección de material

Una vez creada la sección solamente queda asignarla a la probeta, entonces, con la opción Assign Section que se encuentra por debajo de la opción Create Section, se selecciona toda la probeta, y se abrirá un menú donde vendrá establecida la sección que hemos creado.

4.4. Creación del Instance

En el módulo Assembly hay que crear un instance para poder realizar posteriormente el mallado desde este módulo. Se le da a la opción Create Instance y se señala el tipo independiente para hacer el mallado desde el módulo Assembly y no desde el módulo Part (Figura 4.9).

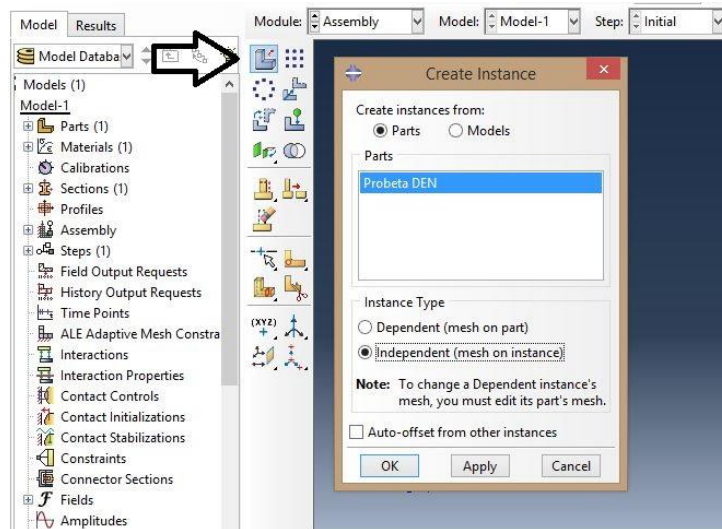
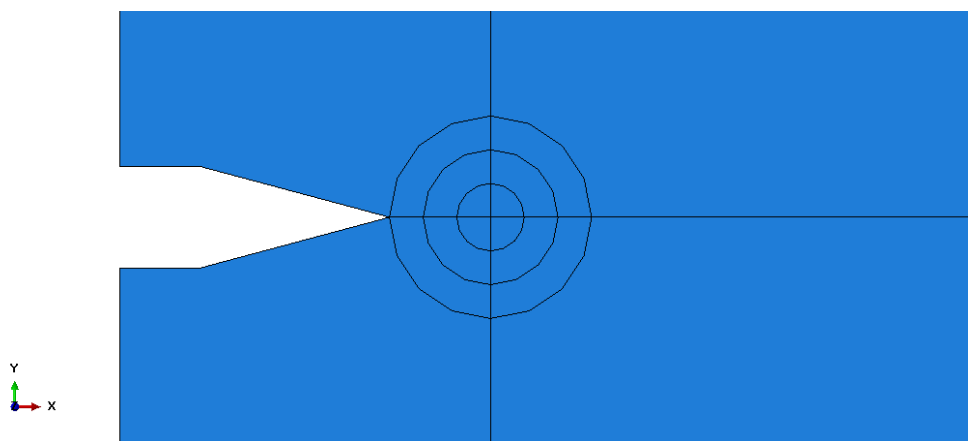


Figura 4.9 Create Instance

4.5. Creación de la grieta

Para la creación de la grieta se parte de la Figura 4.10 (a) donde se puede ver la partición cercana a la entalla. En primer lugar, se elige el módulo Interaction, desde la barra de menú que se encuentra en la parte superior de nuestra interfaz de Abaqus, se selecciona la opción Special → Crack → Assign Seam y se señala la longitud de la grieta (Figura 4.10 (b)).



(a)

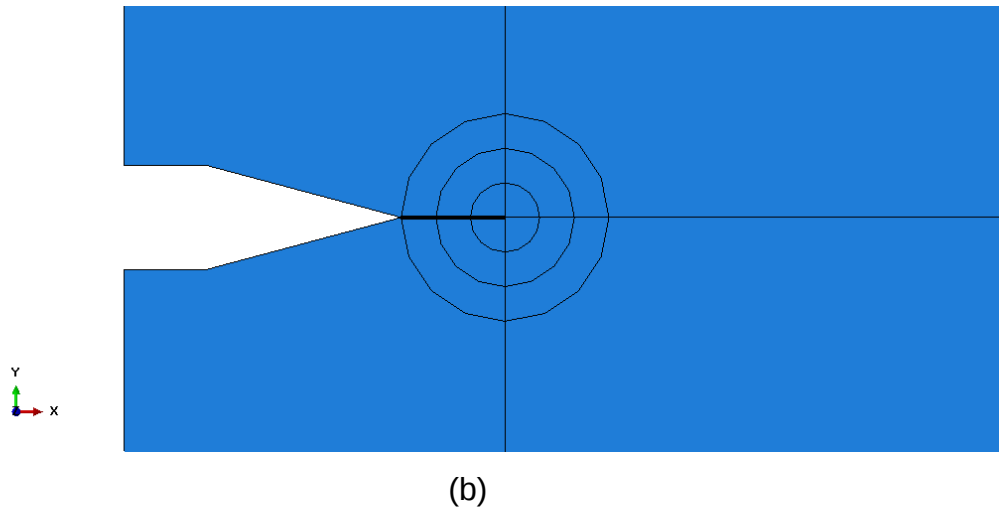


Figura 4.10 (a) Partición cercana a la entalla, (b) Selección de la grieta

Una vez definida la grieta, hay que indicar la dirección de avance de la misma. Para ello se selecciona **Special → Crack → Create**, se desplegará un menú donde se define el nombre de la grieta y el tipo que será **Contour integral** (Figura 4.11).

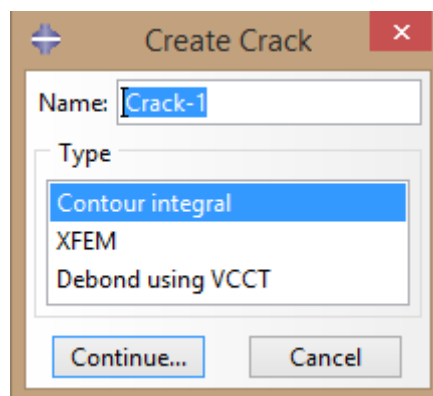
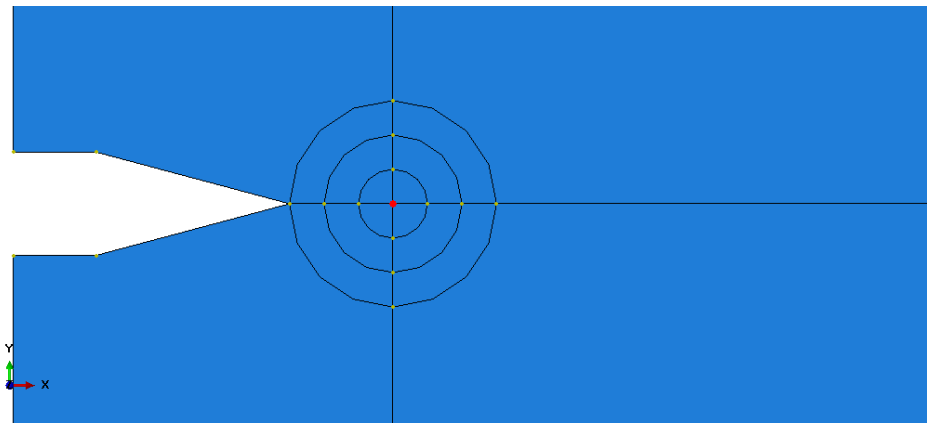
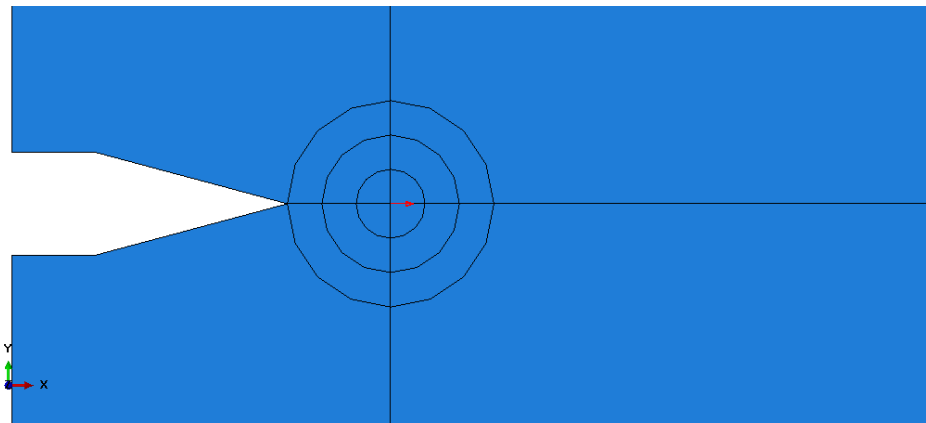


Figura 4.11 Create crack

Ahora se deberá seleccionar la dirección de avance de la grieta. Primero, se señala el punto final de la grieta, que corresponde al centro de los círculos concéntricos mostrados en la Figura 4.12 (a). A continuación, aparecerán dos tipos diferentes de creación del vector, se elegirá la opción 'q vectors' y se indicará la dirección de avance que se busca (Figura 4.12 (b)). Se abrirá un menú donde vendrá especificada la dirección de avance de la grieta y aparecerá la opción de la singularidad de la grieta (Figura 4.13 (a)). En la singularidad de la grieta se introducen los parámetros que se muestran en la Figura 4.13 (b).

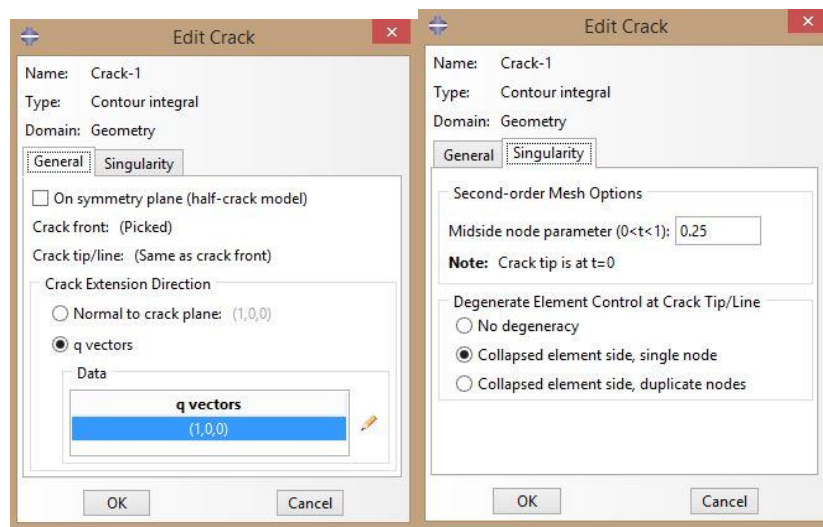


(a)



(b)

Figura 4.12 (a) Punto final de la grieta, (b) Dirección de avance de la grieta



(a)

(b)

Figura 4.13 (a) Menú de la dirección, (b) Singularidad de la grieta de la grieta

4.6. Creación del Step

El Step es un paso previo a la introducción de las condiciones de contorno. Se selecciona el módulo Step, dentro de éste la opción Create Step (Figura 4.14). Se abrirá un menú donde se señala la opción Static, General (Figura 4.15 (a)), se selecciona la opción continuar y aparecerá otra ventana (Figura 4.15 (b)) donde se mantendrá la linealidad geométrica, ya que la no linealidad geométrica solamente se tendría en cuenta si hubiese grandes desplazamientos y en este trabajo los desplazamientos son pequeños.

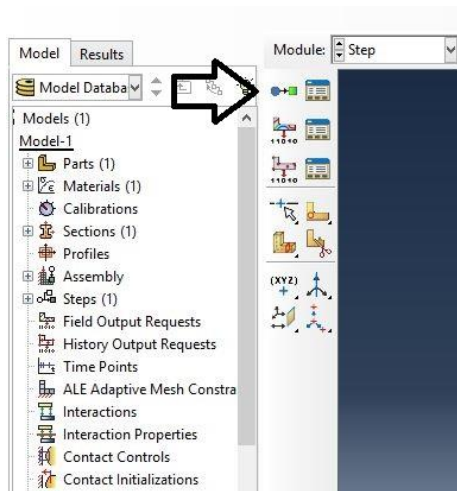
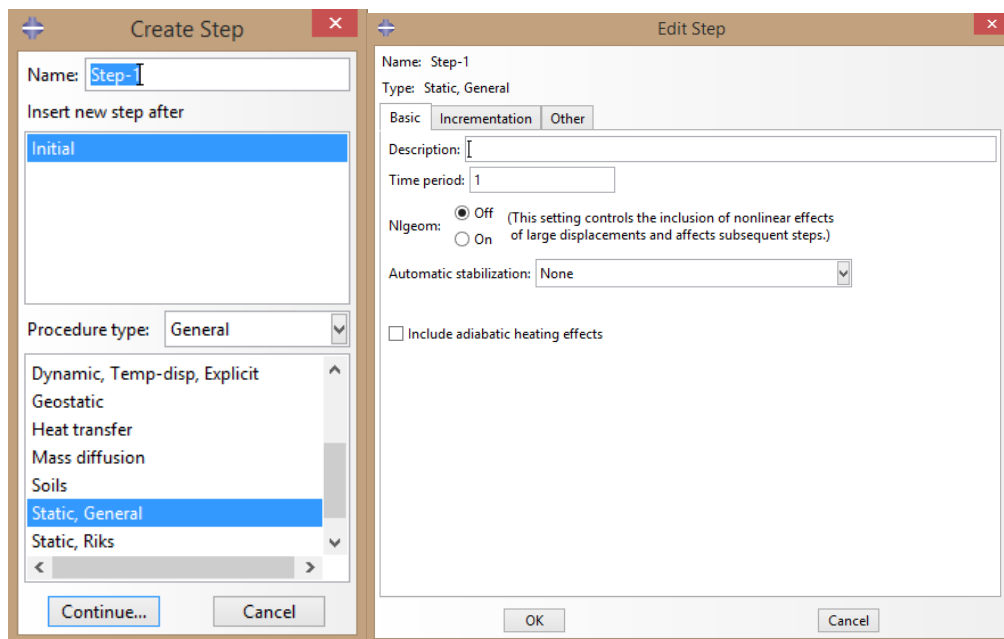


Figura 4.14 Opción Create Step



(a)

(b)

Figura 4.15 (a) Create Step, (b) Menú Step

4.7. Condiciones de contorno y carga

Este paso es importante ya que se introduce el estado al que va a estar sometida la probeta. Para introducir la carga, se selecciona el módulo Load y la opción Create Load (Figura 4.16 (a)). Se abrirá un menú (Figura 4.16 (b)) en el que dependiendo de la probeta que se vaya a utilizar se seleccionará una fuerza concentrada en un punto o una tensión en una zona concreta, como principalmente se trabajará con la probeta DEN, se selecciona la opción Pressure como ejemplo y se introduce el valor de la tensión. En este trabajo se trabajará con una fuerza de 750 N para la probeta CT y una fuerza de 2500 N para las probetas MT y DEN. Esta tensión será sometida en la parte superior de la probeta (Figura 4.17).

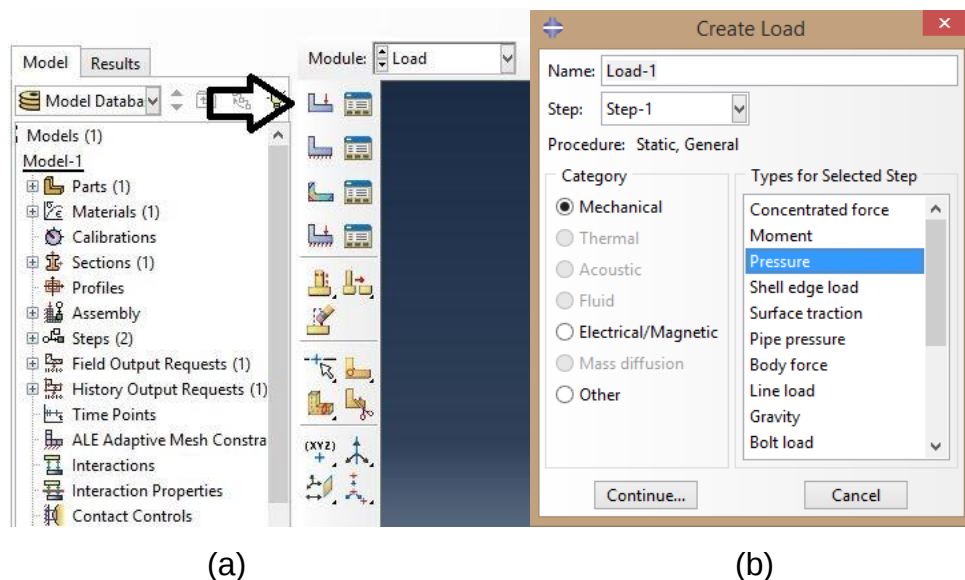


Figura 4.16 (a) Create Load, (b) Menú de la elección de carga

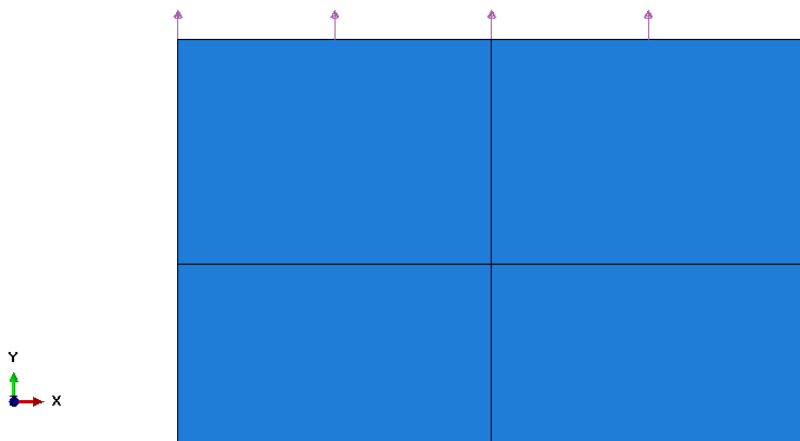


Figura 4.17 Tensión en la parte superior de la probeta

Después, se introducen las condiciones de contorno siguiendo al ejemplo de una probeta DEN. Dentro del módulo Load, se selecciona Create Boundary Condition (Figura 4.18). Aparecerá un menú donde se selecciona la opción Symmetry/Antisymmetry/Encastre (Figura 4.19 (a)), se señala la zona de la probeta donde se quiere aplicar las condiciones de contorno. En este caso sería la parte inferior de la probeta y por último se elige la opción de Encastre que indica que en esa zona se quiere un empotramiento donde los giros y desplazamientos serán cero (Figura 4.19 (b)).

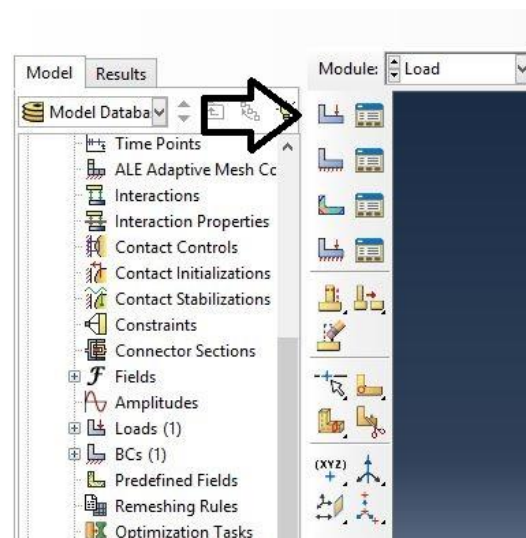
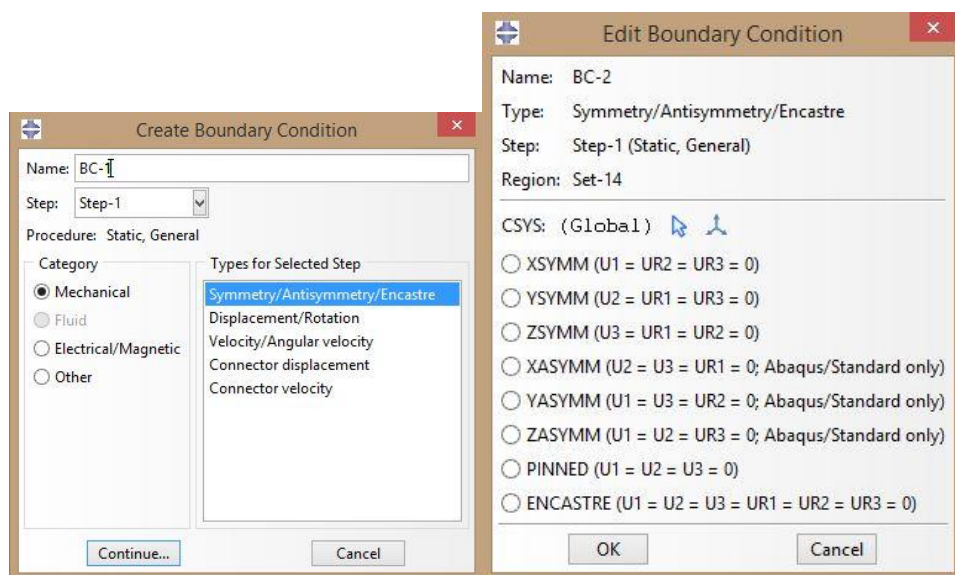


Figura 4.18 Opción Create Boundary Condition



(a)

(b)

Figura 4.19 (a) Create Boundary Condition, (b) Menú de las condiciones de contorno

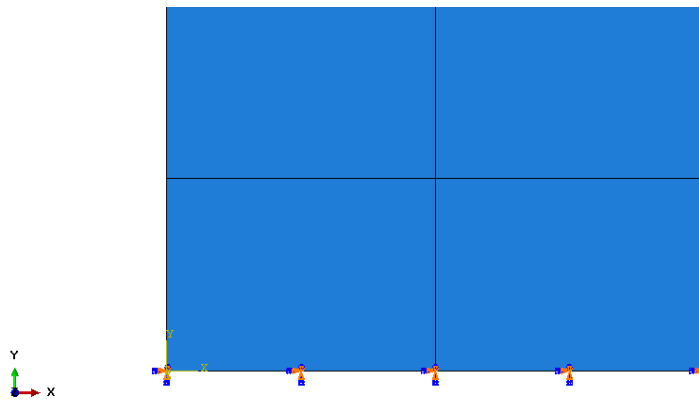


Figura 4.20 Condiciones de contorno en la parte inferior de la probeta

4.8. Mallado

Este es el paso más importante en la realización de la simulación numérica ya que en él se define el tipo de mallado, el tipo elemento y el tamaño del mismo. El tipo de mallado se analizará con más detenimiento en los siguientes capítulos ya que no se va a emplear el mismo mallado en todas las probetas. Por tanto, se explicará de manera general los pasos a seguir para realizar el mallado de cualquier probeta.

En primer lugar, se selecciona el módulo Mesh. El primer paso para realizar el mallado es la asignación del tipo de elemento. A diferencia de lo indicado anteriormente para la densidad de la malla, el tipo de elemento empleado será el mismo para las tres probetas ya que, aunque se tratan de distintas geometrías, el problema no deja de ser el mismo y el tipo de elemento elegido está directamente relacionado con la aplicación o problema que se desea analizar. De esta forma, el tipo de elemento elegido ha sido un elemento CPS8. Se trata de un elemento con 8 nodos característico de una pieza bajo condiciones de tensión plana como son las que se dan en el problema analizado en el presente trabajo. Este elemento permite obtener una mayor precisión en los resultados cuando está sometido a esfuerzos de tracción. Para ello, se selecciona la opción Assign Element Type (Figura 4.21). Se abrirá un menú en el cual se señala lo que aparece en la Figura 4.22.

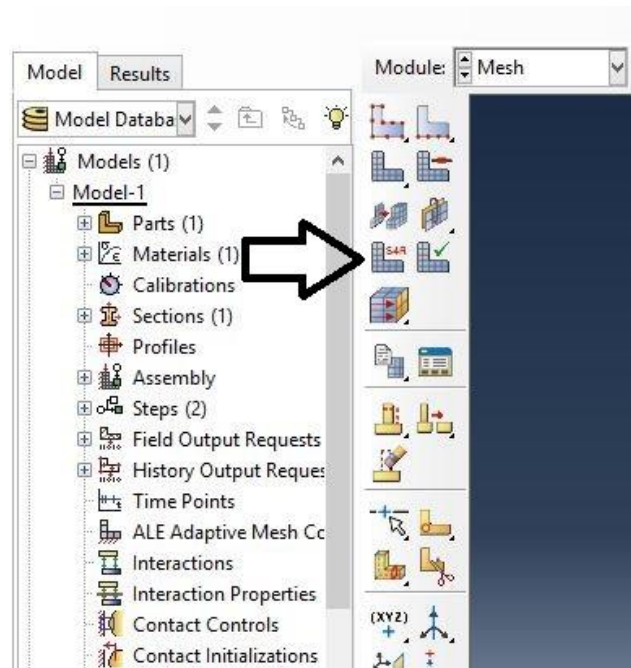


Figura 4.21 Assign Element Type

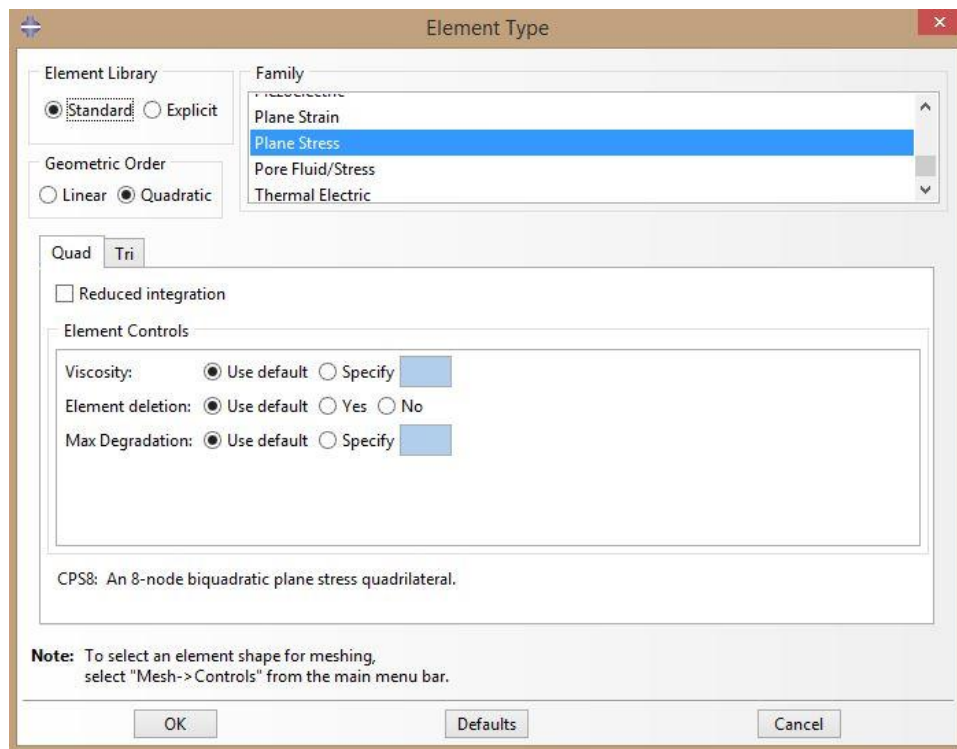


Figura 4.22 Element Type

Una vez definido el tipo de elemento, se fijara el tipo de mallado. Para ello es importante haber hecho las particiones como ya se comentó anteriormente. El vértice de la grieta estará delimitado por una serie de círculos como se ven en la Figura 4.23, se selecciona la zona de los círculos y aparecerá un menú en el cual se

elige la opción tipo sweep, que es un barrido (Figura 4.24 (a)). Para el resto de la probeta se señala un mallado tipo libre (Figura 4.24 (b)).

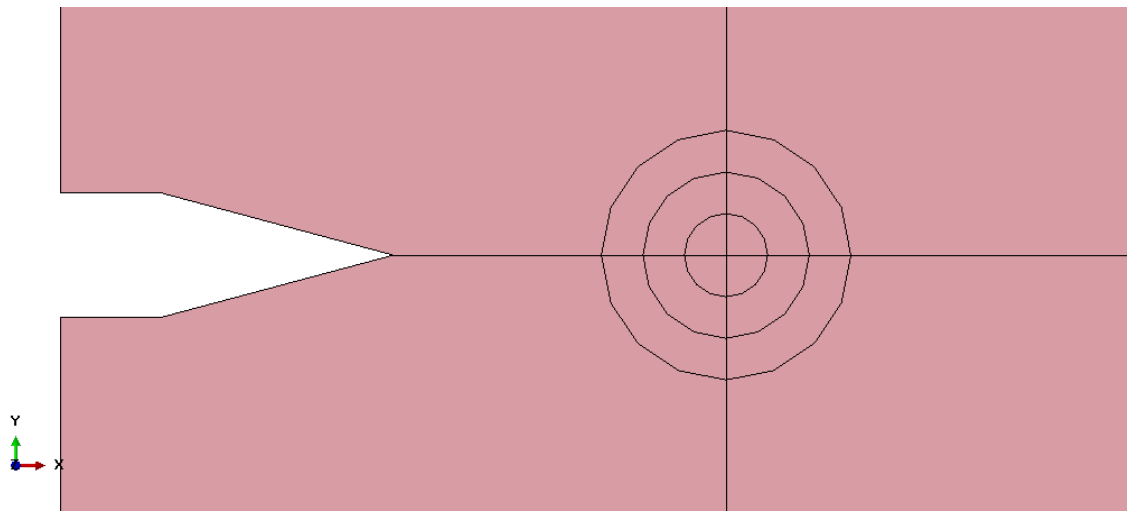


Figura 4.23 Zona del vértice de grieta

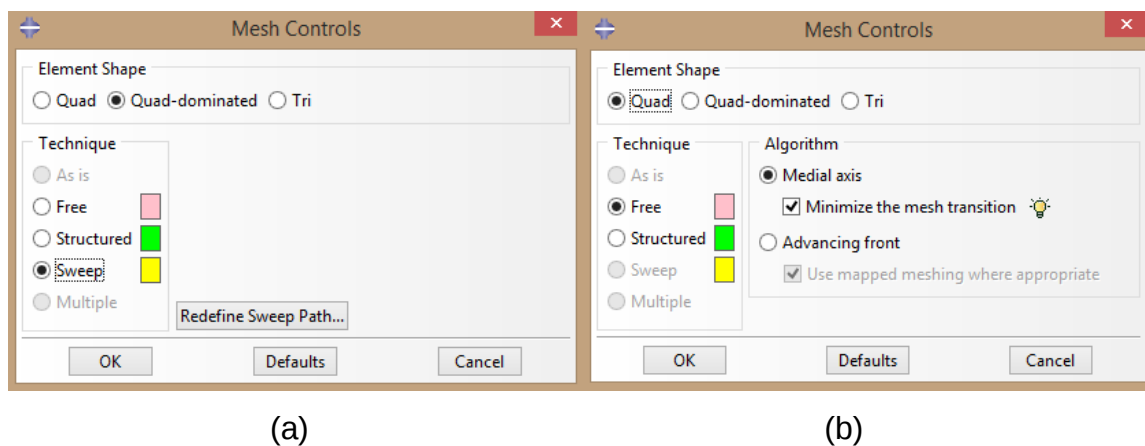


Figura 4.24 (a) Tipo de mallado en la zona central del vértice de grieta con elementos CPS8, (b) Tipo de mallado en el resto de la pieza con elementos CPS8

Y finalmente se seleccionará el tamaño de los elementos. Para introducir el tamaño de elemento se selecciona la opción Seed Edges (Figura 4.25 (a)).

Una vez definido el tipo de elemento, el tipo de mallado y el número de elementos, se selecciona la opción Mesh Part Instance (Figura 4.25 (b)) y toda la probeta aparecerá mallada (Figura 4.26).

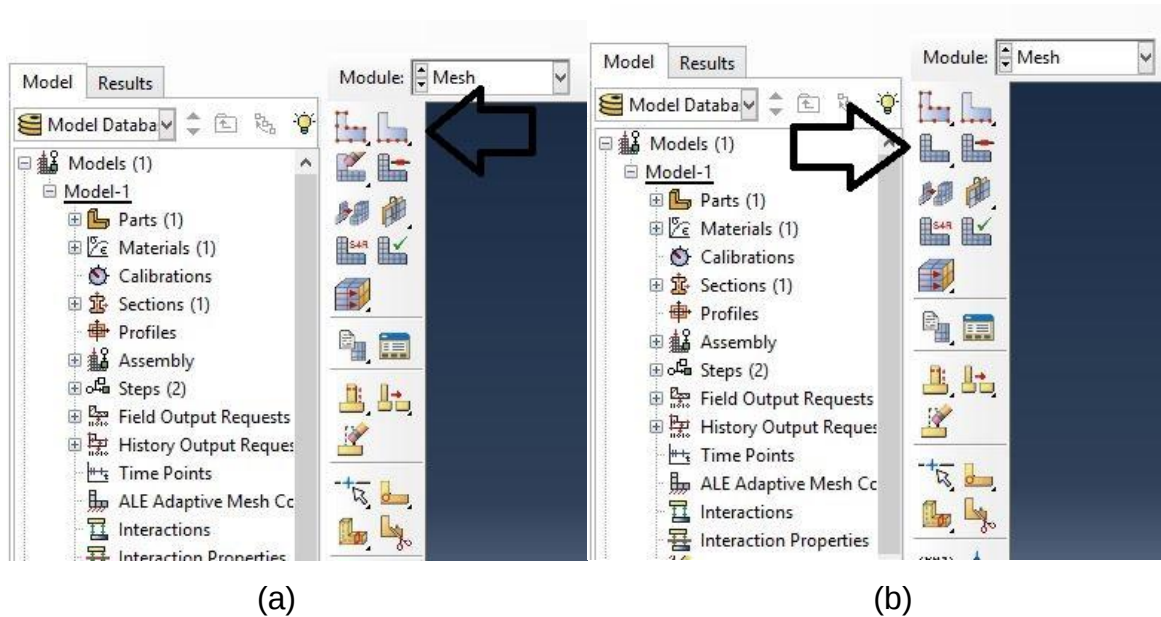


Figura 4.25 (a) Seed Edges, (b) Mesh Part Instance

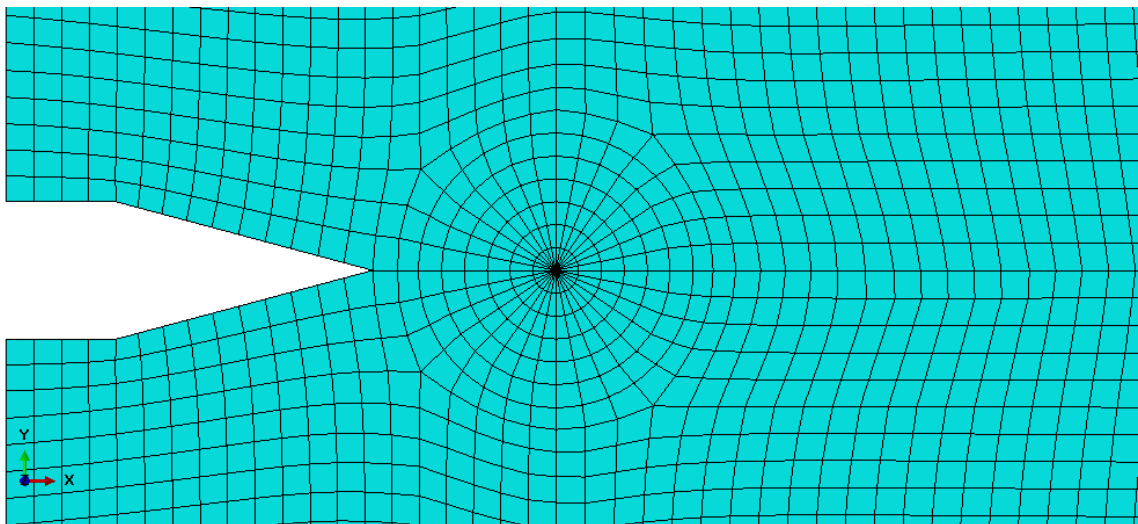


Figura 4.26 Mallado de la zona del vértice de la grieta

4.9. Salida de la variable J

Por último, hay que indicar la variable de salida. Para ello desde el árbol de módulos se selecciona la opción History Output Requests (Figura 4.27 (a)). Se abrirá un menú y se define como dominio la grieta creada anteriormente, el número de contornos, que se explicará en los capítulos posteriores y el tipo J-integral, para que la variable de salida sea ésta (Figura 4.27 (b)).

Una vez hechos todos los pasos anteriores, lo único que faltaría sería crear el trabajo ('Job') donde se vería reflejado los datos de salida que se quieren obtener.

Para ello desde el módulo Job, se elige la opción Create Job (Figura 4.28), se selecciona continuar y ya estará todo listo para arrancar la simulación y obtener los datos de salida.

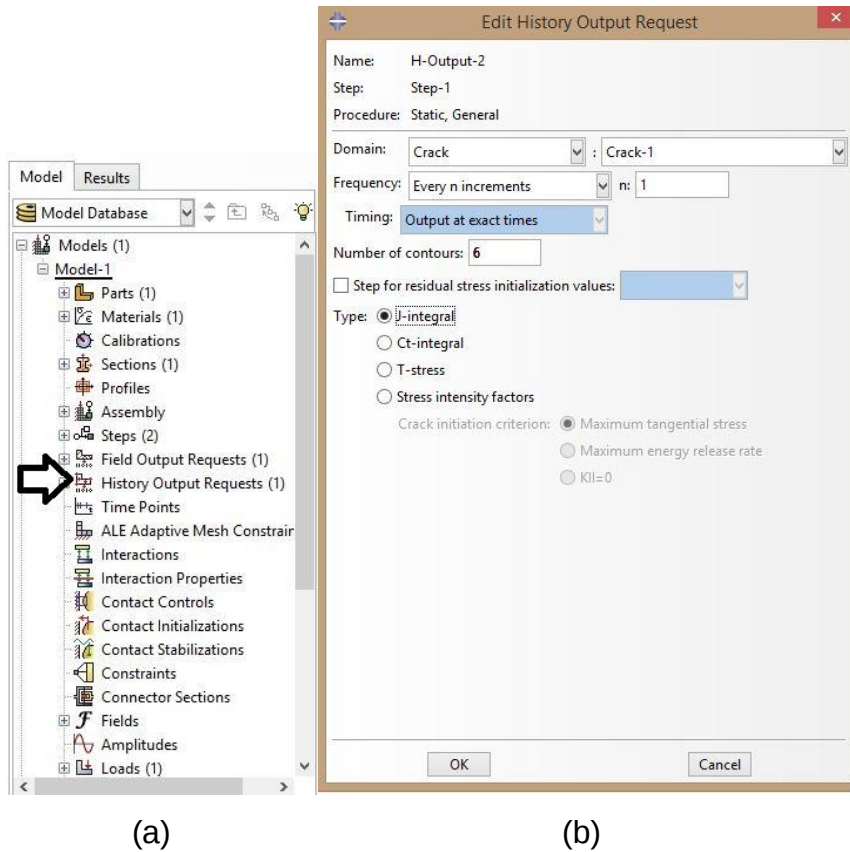


Figura 4.27 (a) History Output Resquests, (b) Menú History Output Requests

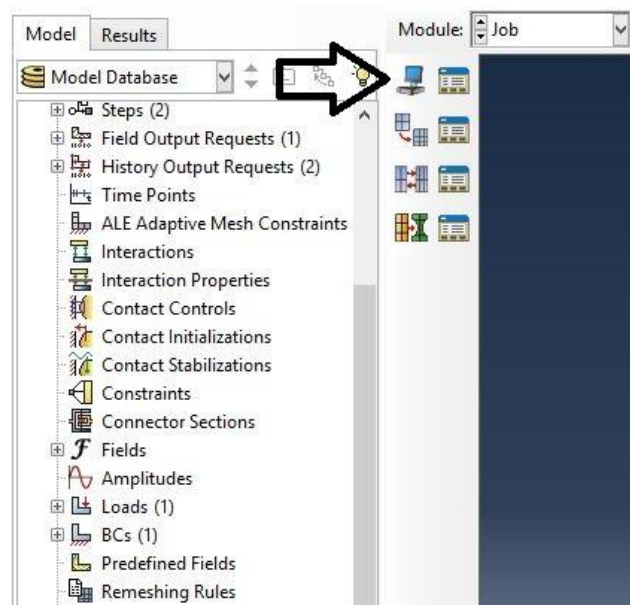


Figura 4.28 Create Job

5. ESTUDIO Y ANÁLISIS DE VARIABLES

En el presente capítulo se analizarán las variables más destacables que se han de tener en cuenta para desarrollar el análisis numérico de la probeta DEN. En primer lugar, se hará uso de las probetas CT y MT para analizar la influencia de las variables. Una vez resuelto el primer paso, se profundizará en el estudio de las variables en la probeta DEN. La geometría junto con las dimensiones de las probetas analizadas en el presente trabajo se muestran en las Figuras 5.1, 5.2 y 5.3.

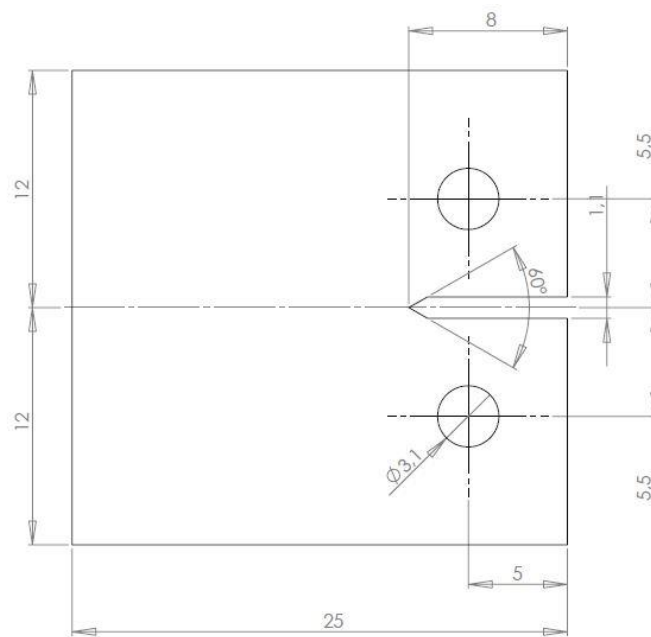


Figura 5.1 Plano de probeta CT (Compact Tension)

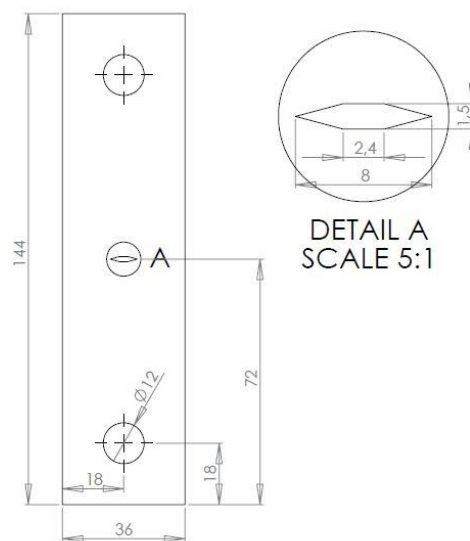


Figura 5.2 Plano de probeta MT (Middle Tension)

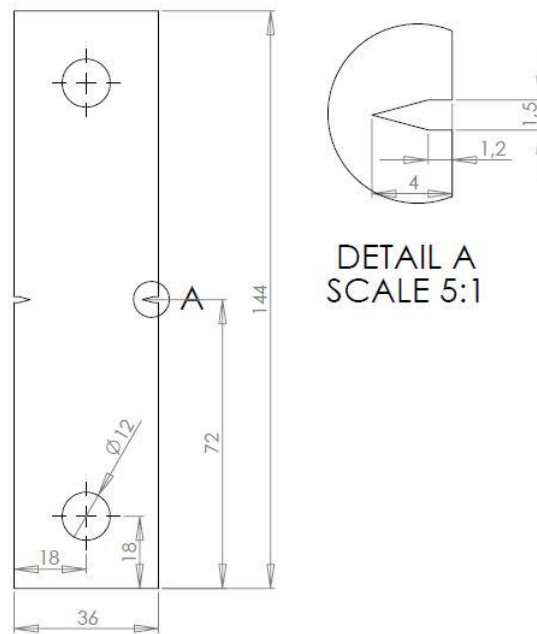


Figura 5.3 Plano de probeta DEN (Double Edge Notched)

Las variables que se han tenido en cuenta y se consideran relevantes en el análisis de sensibilidad son: las particiones del vértice de grieta, el tamaño de los elementos en el mallado y el número de contornos. Para poder sacar conclusiones a partir de las simulaciones realizadas en las probetas CT y MT, se estudiarán los resultados obtenidos para el factor de intensidad de tensiones. A continuación, en la probeta DEN se estudiará principalmente el campo de tensiones de manera visual, el factor de intensidad de tensiones y el número total de elementos en el mallado.

5.1. Probeta CT (Compact Tension)

Se comienza con la probeta CT para el análisis de las variables. Las dimensiones de la probeta CT se han mostrado en la Figura 5.1. Se utilizará una longitud de grieta de 6 mm ya que esta longitud fue la que se usó en el ensayo experimental. Como se mencionó en el capítulo anterior, se trata de una probeta de titanio cuyas propiedades elásticas y plásticas se encuentran en dicho capítulo. Se utilizará una fuerza de 750 N aplicada en dirección positiva en el eje y en el bulón superior. Se usará el valor de 750 N ya que fue el utilizado en el ensayo experimental. En relación a las condiciones de contorno, el desplazamiento en el eje x será nulo tanto en el bulón superior como en el inferior mientras que el desplazamiento en el eje y solamente será nulo en el bulón inferior.

5.1.1. Sensibilidad de malla

Para analizar la sensibilidad de la malla hay que especificar que habrá dos zonas de diferente mallado, una zona correspondiente al vértice de grieta y la segunda zona que corresponde al resto de la probeta. Si se observa la Figura 5.4 la zona que corresponde al vértice de grieta es el área amarillenta.

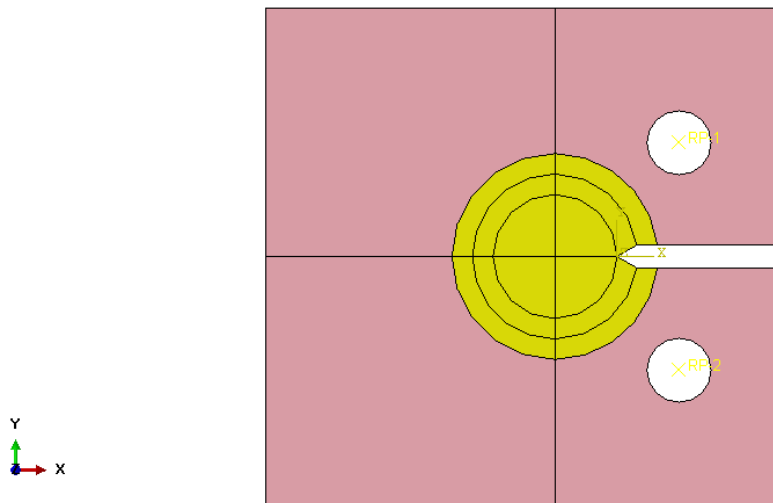


Figura 5.4 Probeta CT modelada en Abaqus CAE

Para el mallado hay que detallar que en la zona del vértice de grieta se hablará de número de elementos interiores por cada cuarto de dicha partición mientras que en la zona restante se hablará de tamaño entre los nodos exteriores. La anterior aclaración será para todas las probetas. Dicho esto, en primer lugar se mantendrá un tamaño fijo entre nodos exteriores de 1 mm y se variará el número de elementos interiores obteniendo los siguientes resultados en la Tabla 5.1.

	Número de elementos interiores				
	3	6	9	12	15
$K \text{ (MPa}\sqrt{m}\text{)}$	32.77	32.77	32.77	32.77	32.77

Tabla 5.1 Resultados de K variando el número de elementos interiores

Como se puede ver en los resultados obtenidos variando el número de elementos interiores el resultado del factor de intensidad de tensiones es el mismo.

Ahora se mantendrá fijo el valor del número de elementos interiores en 6 y se variará el tamaño entre nodos exteriores, siendo los resultados los mostrados en la Tabla 5.2.

	Tamaño entre nodos exteriores (mm)				
	3	1.5	1	0.75	0.5
$K \text{ (MPa}\sqrt{m})$	32.35	32.65	32.77	32.85	32.93

Tabla 5.2 Resultados de K variando el tamaño entre nodos exteriores

Observando estos valores a simple vista parece que hay mucha variación. En términos relativos se comprueba que no es así, ya que si se toma como referencia el valor de 32.77 se puede observar que para 3 mm se tendría un error del 1.3%, mientras que para el tamaño de 0.5 mm se tendría un error del 0.5%.

5.1.2. Particiones del vértice de grieta

Para analizar las particiones, se considerará para la simulación un tamaño entre nodos exteriores de 1 mm y un número de elementos interiores de 6. De esta forma, se variará el número de contornos y el radio de éstos, evaluando cómo cambia el valor del factor de intensidad de tensiones. El número de contornos es referido al número de círculos que se definen en la partición del vértice de grieta, si se observa la Figura 5.4 se puede ver un número de contornos igual a tres.

	Radio (mm) y número de contornos (entre paréntesis)					
	0.5, 1, 1.5	1.5	1.5, 2.25, 3	1.5, 3, 4.5	3	3, 4, 5
	(3)	(1)	(3)	(3)	(1)	(3)
$K \text{ (MPa}\sqrt{m})$	32.92	32.85	32.85	32.85	32.77	32.77

Tabla 5.3 Resultados de K variando las particiones del vértice de grieta

De los resultados obtenidos en la Tabla 5.3, se puede comprobar como el primer contorno es el más influyente. Se observa que si la partición realizada es de uno, el resultado es el mismo que si introducimos tres contornos. Se observa que para un contorno de menor radio, el factor de intensidad de tensiones es ligeramente superior a un contorno con mayor radio.

5.1.3. Número de contornos para obtener la variable J

Para la elección del número de contornos que hay que introducir en el apartado “4.9 Salida de la variable J ”, se observarán los resultados de los análisis de sensibilidad de malla realizados anteriormente. En dichos análisis se ha asignado un número de contornos igual a 6. Si se analizan las Tablas 5.4 y 5.5, se puede comprobar como para un número de contornos igual a 6, el resultado del factor de intensidad de tensiones se estabiliza, pudiendo dar como resultado correcto aquél que aparece en el contorno número 6.

	Número de elementos interiores				
	3	6	9	12	15
NºContornos	$K \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}})$	$K \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}})$	$K \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}})$	$K \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}})$	$K \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}})$
1	29.34	29.39	29.40	29.40	29.40
2	32.53	32.57	32.57	32.57	32.57
3	32.77	32.77	32.77	32.77	32.77
4	32.77	32.77	32.77	32.77	32.77
5	32.77	32.77	32.77	32.77	32.77
6	32.77	32.77	32.77	32.77	32.77

Tabla 5.4 Resultados de K variando el número de elementos interiores para los diferentes números de contornos

	Tamaño entre nodos exteriores (mm)				
	3	1.5	1	0.75	0.5
NºContornos	$K \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}})$	$K \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}})$	$K \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}})$	$K \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}})$	$K \text{ (MPa}\sqrt{\text{m}})$
1	31.78	30.52	29.40	28.76	28.10
2	32.35	32.65	32.57	31.84	30.21
3	32.35	32.65	32.77	32.85	32.93
4	32.35	32.65	32.77	32.85	32.93
5	32.35	32.65	32.77	32.85	32.93
6	32.35	32.65	32.77	32.85	32.93

Tabla 5.5 Resultados de K variando el tamaño entre nodos exteriores para los diferentes números de contornos

5.1.4. Conclusiones

- Del análisis de sensibilidad de malla se puede afirmar que el número de elementos interiores y el tamaño entre nodos exteriores son iguales de influyentes a la hora de obtener el factor de intensidad de tensiones.
- De las particiones del vértice de grieta observamos que el primer contorno es el más influyente, por tanto si solamente hacemos la partición de un contorno el resultado de K será válido.
- Un contorno con un radio pequeño da un valor del factor de intensidad de tensiones ligeramente más alto que un contorno con un radio de más tamaño.
- Un número de contornos igual a 6 será adecuado para obtener resultados correctos.

5.2. Probeta MT (MiddleTension)

Tras el análisis realizado con la probeta CT, a continuación se analizan las mismas variables para la probeta MT. Las dimensiones de esta probeta se muestran en la Figura 5.2. La longitud de grieta será de 14 mm ya que fue la longitud usada en el ensayo experimental. Las propiedades elásticas y plásticas serán las mismas al ser la probeta de titanio. En esta probeta se aplicará una fuerza de 2500 N en dirección positiva en el eje y sobre el extremo superior de la probeta, mientras que el extremo inferior de la probeta estará empotrado anulando giros y desplazamientos. Se usará el valor de 2500 N ya que fue el utilizado en el ensayo experimental.

5.2.1. Sensibilidad de la malla

Para el análisis de la sensibilidad de la malla, al igual que en la probeta anterior, se establecen dos zonas diferentes para el mallado. Por tanto, actuando de la misma manera, para esta probeta se partirá de un tamaño fijo entre nodos exteriores igual a 1 mm y se variará el número de elementos interiores obteniendo los resultados de la Tabla 5.6.

	Número de elementos interiores				
	3	6	9	12	15
$K \text{ (MPa}\sqrt{m}\text{)}$	11.44	11.44	11.44	11.44	11.44

Tabla 5.6 Resultados de K variando el número de elementos interiores

Se observa lo mismo que en la probeta CT, el valor de K es el mismo para los distintos números de elementos interiores.

A continuación, se mantendrá fijo el valor del número de elementos interiores en 6 y se variará el tamaño entre nodos exteriores.

	Tamaño entre nodos exteriores (mm)				
	15	10	6	2	0.5
$K \text{ (MPa}\sqrt{m}\text{)}$	11.42	11.43	11.43	11.43	11.47

Tabla 5.7 Resultados de K variando el tamaño entre nodos exteriores

Se observa lo mismo que se comentó con la probeta CT, hablando en términos relativos los errores son muy pequeños y prácticamente los resultados son iguales.

5.2.2. Particiones del vértice de grieta

Para analizar las particiones del vértice de grieta se va a hacer una comparación entre dos mallados diferentes, primer caso de un mallado con un número de elementos interiores igual a 6 y con un tamaño entre nodos exteriores de 1 mm y el segundo caso será mallado con un número de elementos interiores igual a 3 y un tamaño entre nodos exteriores de 10 mm. Al igual que en la probeta anterior se variará el número de contornos de las particiones del vértice de grieta y el radio de éstos.

	Radio (mm) y número contornos				
	0.5 (1)	0.5, 1, 1.5 (3)	0.5, 1.5, 2.5 (3)	1.5 (1)	3 (1)
$K \text{ (MPa}\sqrt{m}\text{)}$	11.46	11.46	11.46	11.44	11.43

Tabla 5.8 Primer caso, malla más refinada

	Radio (mm) y número contornos				
	0.5 (1)	0.5, 1, 1.5 (3)	0.5, 1.5, 2.5 (3)	1.5 (1)	3 (1)
$K \text{ (MPa}\sqrt{m}\text{)}$	11.44	11.44	11.44	11.41	11.37

Tabla 5.9 Segundo caso, malla menos refinada

De los resultados obtenidos se ve como el primer contorno es el más influyente al igual que ocurría en la probeta anterior. Si aumentamos el valor del radio en el caso de tener solamente un contorno podemos observar como el factor de intensidad de tensiones disminuye ligeramente.

5.2.3. Número de contornos para obtener la variable J

Para analizar el número de contornos se actuará de la misma manera que en la probeta anterior. Si se observan las tablas que aparecen a continuación se ve que al igual que ocurría en la probeta CT, para un número de contornos igual a 6 se obtendrán resultados correctos.

	Número de elementos interiores				
	3	6	9	12	15
NºContornos	$K \text{ (MPa}\sqrt{m})$	$K \text{ (MPa}\sqrt{m})$	$K \text{ (MPa}\sqrt{m})$	$K \text{ (MPa}\sqrt{m})$	$K \text{ (MPa}\sqrt{m})$
1	11.38	11.39	11.39	11.39	11.39
2	11.44	11.44	11.44	11.44	11.44
3	11.44	11.44	11.44	11.44	11.44
4	11.44	11.44	11.44	11.44	11.44
5	11.44	11.44	11.44	11.44	11.44
6	11.44	11.44	11.44	11.44	11.44

Tabla 5.10 Resultados de K variando el número de elementos interiores para los diferentes números de contornos

	Tamaño entre nodos exteriores (mm)				
	15	10	6	2	0.5
NºContornos	$K \text{ (MPa}\sqrt{m})$	$K \text{ (MPa}\sqrt{m})$	$K \text{ (MPa}\sqrt{m})$	$K \text{ (MPa}\sqrt{m})$	$K \text{ (MPa}\sqrt{m})$
1	11.40	11.40	11.40	11.40	11.33
2	11.42	11.42	11.42	11.43	11.47
3	11.42	11.42	11.42	11.43	11.47
4	11.42	11.42	11.42	11.43	11.47
5	11.42	11.42	11.42	11.43	11.47
6	11.42	11.42	11.42	11.43	11.47

Tabla 5.11 Resultados de K variando el tamaño entre nodos exteriores para los diferentes números de contornos

5.2.4. Conclusiones

- En el caso de la sensibilidad de malla se afirma lo mismo que para la probeta CT, el número de elementos interiores y el tamaño entre nodos exteriores son iguales de influyentes en el resultado del factor de intensidad de tensiones.
- En el caso de las particiones del vértice de grieta coincide con la probeta CT, el primer contorno es el más influyente.
- Para el número de contornos se afirma lo dicho para una probeta CT, un número de contornos igual a 6 es suficiente para obtener resultados correctos.
- Se podría realizar las mismas simulaciones considerando la mitad de la probeta y actuando en las condiciones de contorno como simetría. Así se reduciría el coste computacional y se obtendrían los mismos resultados.
- Finalmente, empleando un prontuario (Figura 5.5) y empleando las mismas condiciones de carga, se puede determinar el valor analítico para el factor de intensidad de tensiones. Por tanto, emplearemos la ecuación (7) vista en el capítulo de fundamentos teóricos.

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a}$$

Donde Y será $f_1\left(\frac{a}{W}, \frac{h}{W}\right)$ según la Figura 5.5.

$$Y = f_1\left(\frac{a}{W}, \frac{h}{W}\right) = f_1\left(\frac{7}{18}, \frac{72}{18}\right) = 1.11$$

$$K = 1.11 * \frac{2500 \text{ N}}{36 \text{ mm} * 1 \text{ mm}} \sqrt{\pi 0.007} = 11.43 \text{ MPa}$$

El resultado analítico de K es de 11.43 MPa. Los resultados obtenidos mediante el análisis numérico son muy próximos a este valor, por tanto, se puede afirmar que el análisis numérico es correcto.

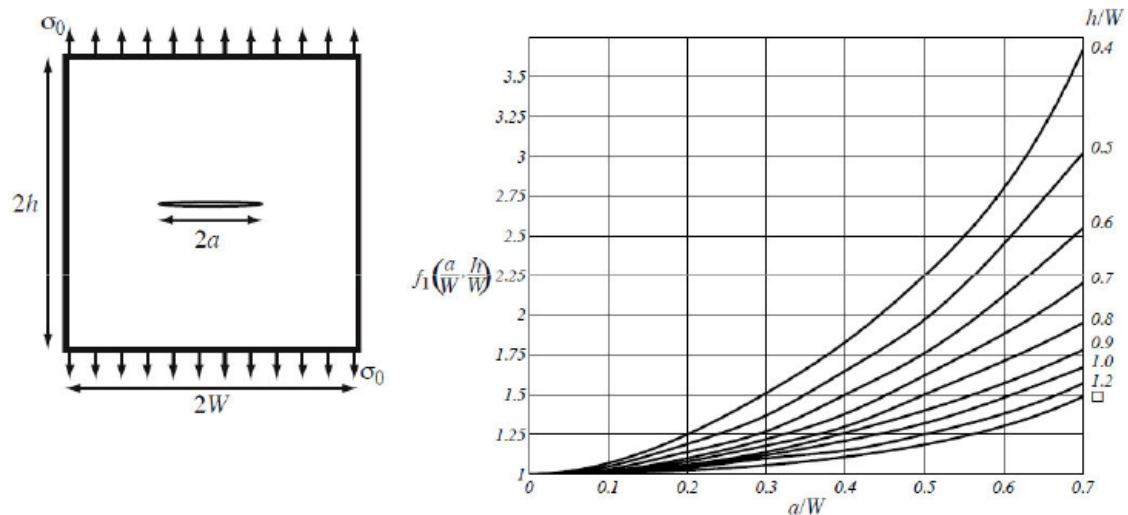


Figura 5.5 Obtención del resultado K de forma analítica para probeta MT [3]

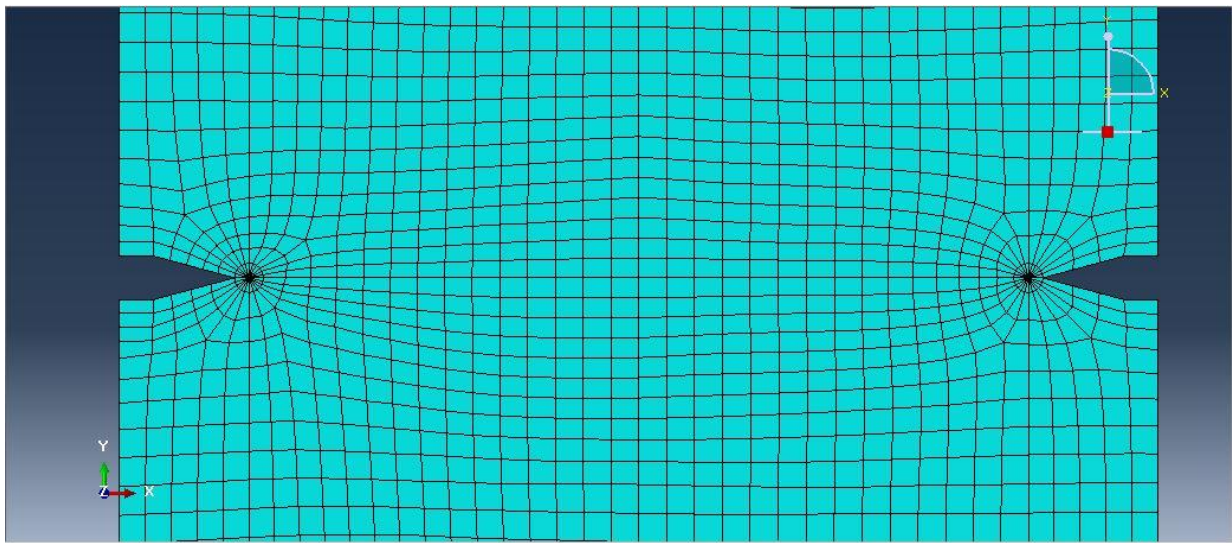
5.3. Probeta DEN (Double Edge Notched)

Se finalizará el estudio de variables con la probeta DEN. En esta probeta se aplicará la misma carga y condiciones de contorno que en la probeta MT. Se utilizará una longitud de grieta de 6 mm que actuará como referencia. La geometría y las dimensiones de la probeta se muestran en la Figura 5.3.

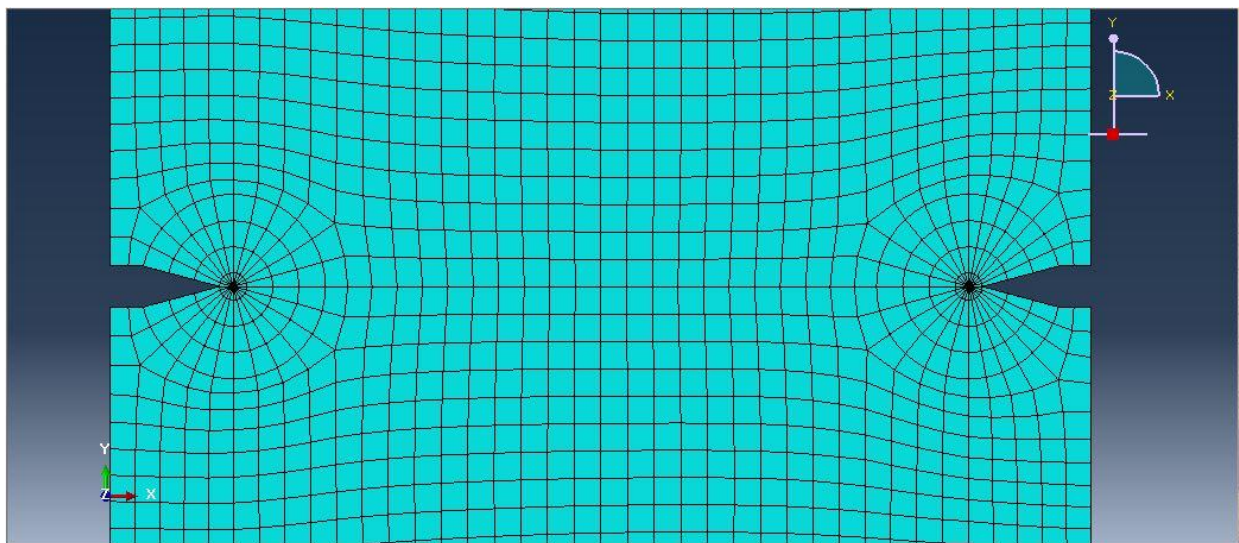
Anteriormente, al analizar solamente las variables para observar cómo influían en las simulaciones, no se había prestado mucha atención a la reducción del coste computacional. Sin embargo, para la finalidad de este trabajo, que es analizar la interacción entre grietas, sí ha de ser tenido en cuenta. Por tanto, este análisis de variables tendrá el objetivo de reducir el coste computacional obteniendo los resultados precisos.

Después de realizar algunos análisis numéricos con la probeta DEN, se puede comprobar en las siguientes ilustraciones que las particiones del vértice de grieta tienen mucha importancia a la hora de obtener un mallado correcto. Con un buen mallado se obtiene un campo de tensiones adecuado. Por tanto, como se ve en las ilustraciones siguientes, si únicamente se tiene un contorno en la partición del vértice de grieta, se obtendría un mallado muy irregular; mientras que si se definen dos contornos, el mallado mejora notablemente, obteniendo una malla más homogénea con la forma tradicional de “tela de araña”. Además, con dos contornos se reduciría

el número total de elementos en el mallado y, por tanto, se reduce también el coste computacional.



(a)



(b)

Figura 5.6 (a) Mallado con un contorno en la partición del vértice de grieta, (b) Mallado con dos contornos en la partición del vértice de grieta

Así que, aunque en los análisis de las probetas CT y MT se afirmara que con un contorno se obtenían buenos resultados del factor de intensidad de tensiones, se analizará más detenidamente el número de contornos que hay que introducir en las particiones del vértice de grieta para obtener un mallado correcto, que a su vez nos permitirá observar un campo de tensiones más preciso y fidedigno.

Las variables que hay que tener en cuenta para el análisis de esta probeta son: el número de contornos en las particiones del vértice de grieta, el número de elementos interiores para el mallado de dichas particiones y, por último, para reducir el coste computacional y ya que el campo de tensiones en las inmediaciones de las grietas se concentrará en una zona de la probeta, se dividirá el mallado exterior a las particiones del vértice de grieta en dos partes. La primera parte será un mallado en las proximidades del vértice de grieta y la segunda parte será un mallado externo a las proximidades del vértice de grieta. Para conseguir esto último habrá que hacer las particiones adecuadas para realizar un mallado de las proximidades del vértice de grieta y un mallado externo a éste. Las particiones realizadas se muestran en la Figura 5.7, donde se encuentran señalizadas las zonas para el mallado de las proximidades y para el mallado externo. La zona del mallado de las proximidades tiene una longitud de 15 mm ya que, según unas simulaciones previas, es en esa zona donde se concentra el campo de tensiones alrededor del vértice de grieta.

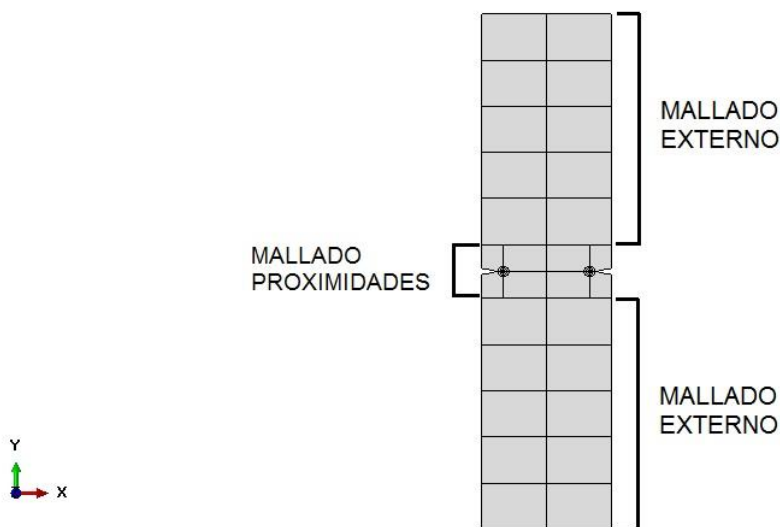


Figura 5.7 Particiones de la probeta DEN

Realizadas las aclaraciones anteriores, ya se puede realizar el análisis de las variables. El número de contornos para obtener la variable J será de seis como vimos en los análisis de las probetas CT y MT.

5.3.1. Número de contornos en las particiones del vértice de grieta

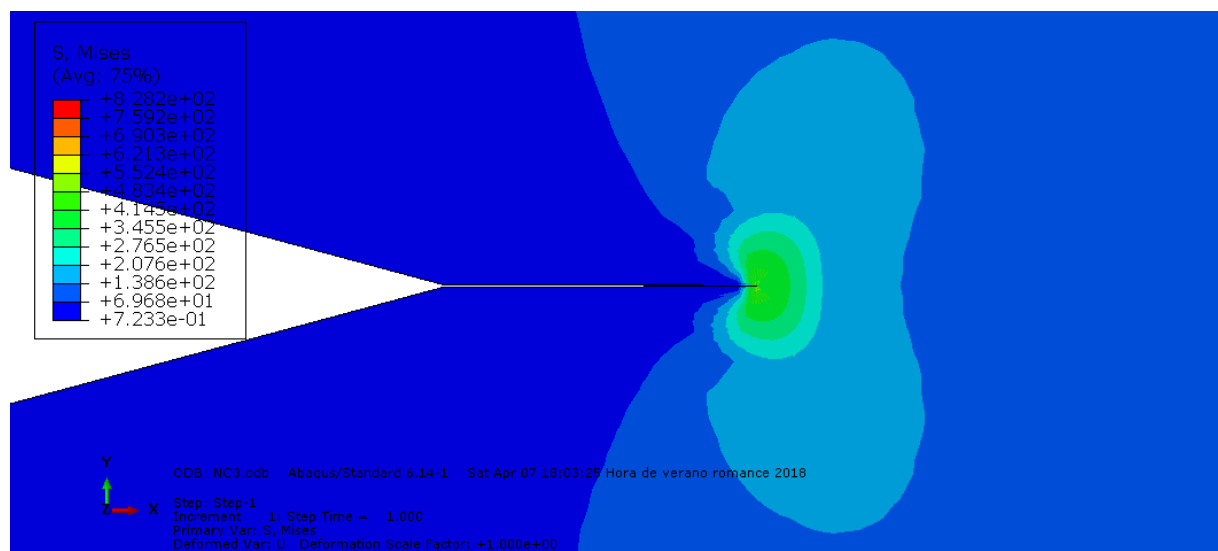
Para empezar a analizar esta variable, se variará el número de contornos en las particiones del vértice de grieta y se mantendrán unos valores fijos para las tres

variables restantes. El primer contorno tendrá un radio de 0.5 mm y a medida que se introduzcan más contornos irán incrementando el radio de éstos en 0.5 mm. El número de elementos interiores será de ocho, el tamaño entre nodos en las proximidades será de 1 mm y el tamaño entre nodos externo será de 1.5 mm. En la Tabla 5.12 se muestran los resultados.

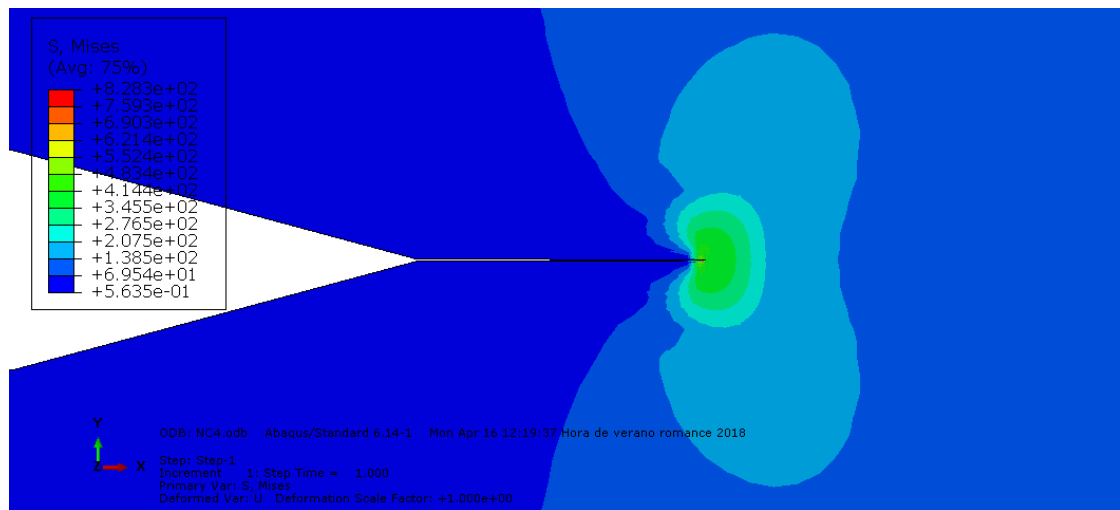
	Número de contornos en las particiones del vértice de grieta					
	1	2	3	4	5	6
Nº						
Elementos	4543	4366	3856	3890	3914	3920
Totales						
$K \text{ (MPa}\sqrt{m}\text{)}$	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70

Tabla 5.12 Resultados para diferentes números de contornos en las particiones del vértice de grieta

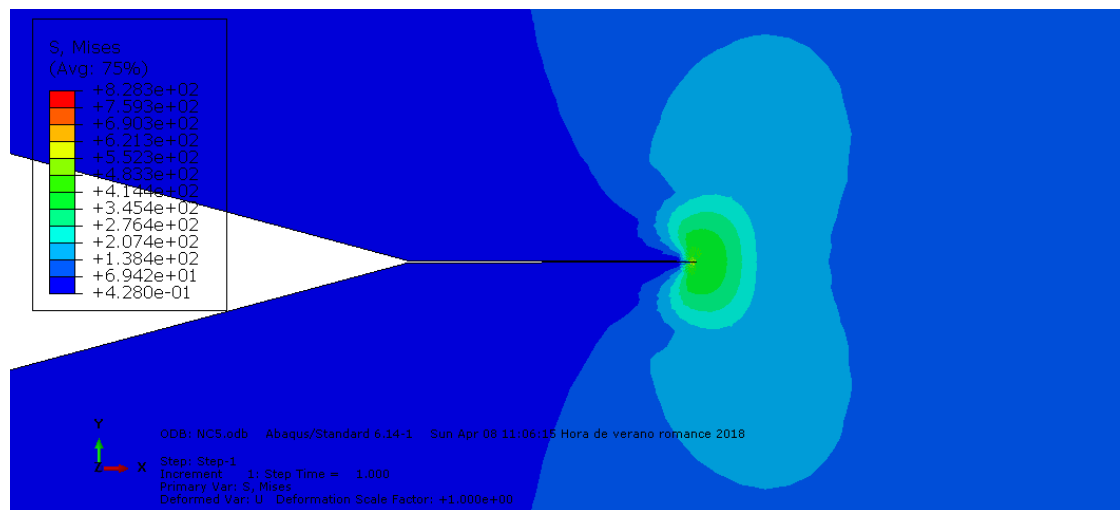
Se descartan los dos primeros análisis ya que Abaqus muestra un error de mallado. De los cuatro restantes se selecciona el de tres contornos ya que es el que menos elementos totales tiene en el mallado y, por tanto, se reduce el coste computacional. Además, si se analiza los campos de tensiones de los análisis se observa que no hay diferencias entre unos y otros, así que la elección es correcta.



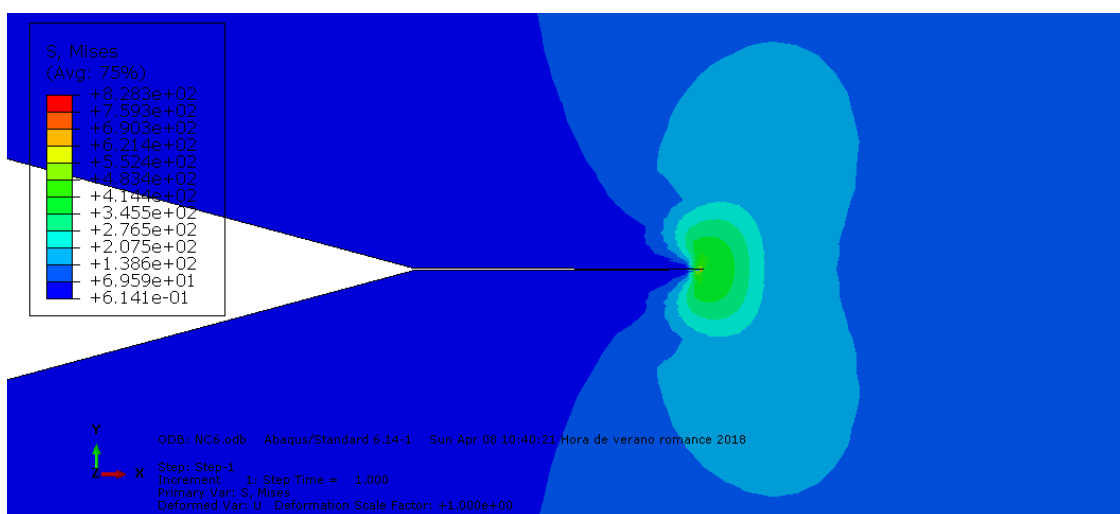
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.8 Campo de tensiones para un número de contorno de (a) tres,
(b) cuatro, (c) cinco, (d) seis

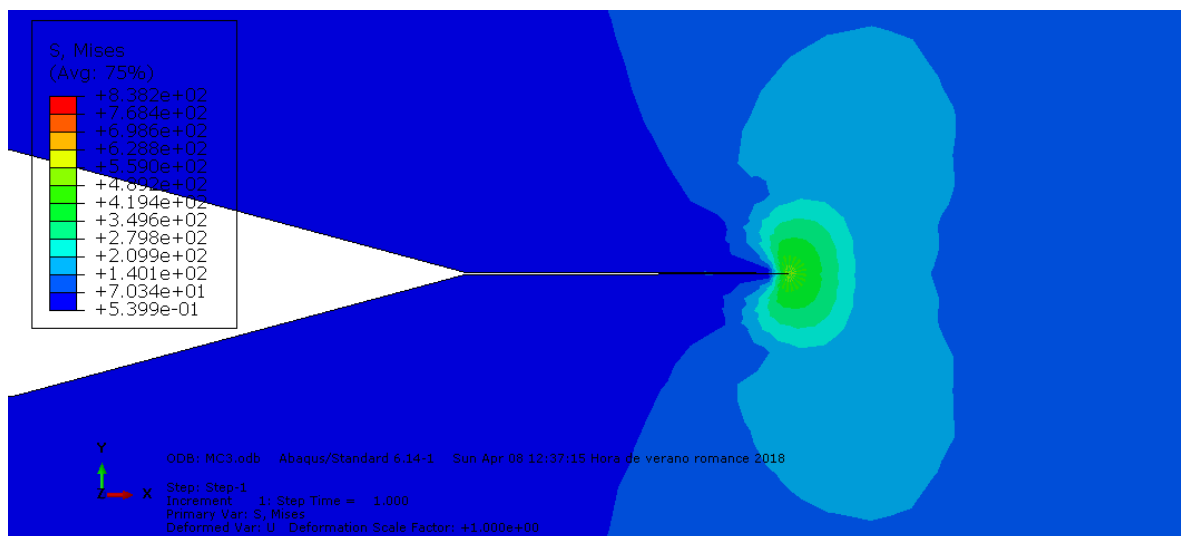
5.3.2. Mallado de los contornos

A continuación, se realiza el análisis del mallado en las particiones del vértice de grieta. Se hablará de número de elementos interiores como ya se especificó para las anteriores probetas. Se variará esta variable manteniendo fijo el tamaño entre nodos en las proximidades de 1 mm y el externo de 1.5 mm y los tres contornos para las particiones del vértice de grieta calculado anteriormente.

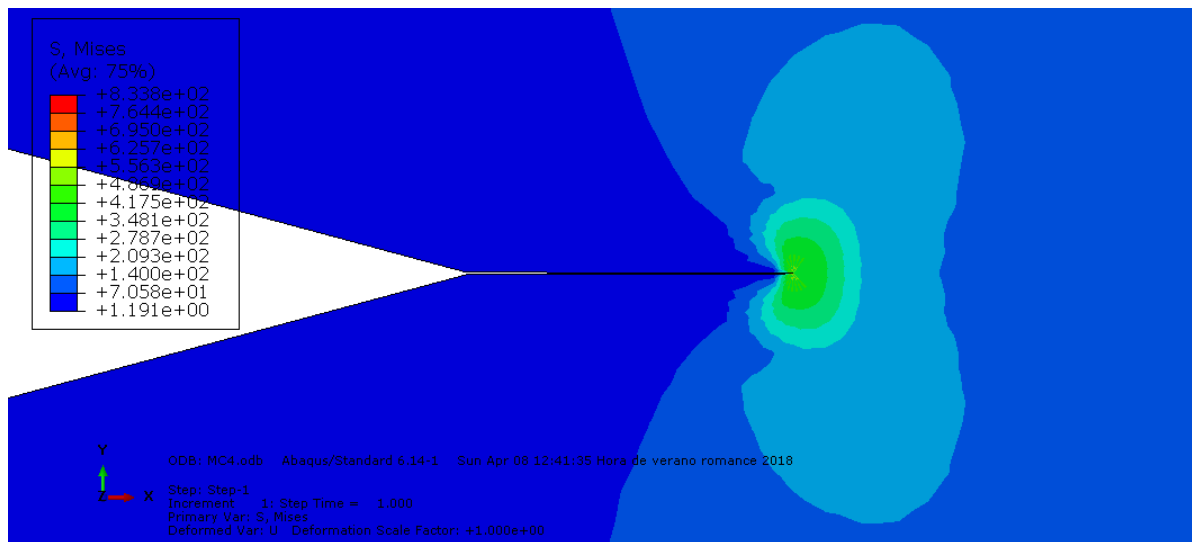
	Número de elementos interiores						
	3	4	5	6	7	8	9
Nº							
Elementos	3680	3696	3760	3768	3848	3856	3952
Totales							
$K \text{ (MPa}\sqrt{m})$	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70

Tabla 5.13 Resultados para diferentes números de elementos interiores en el mallado de la partición del vértice de grieta

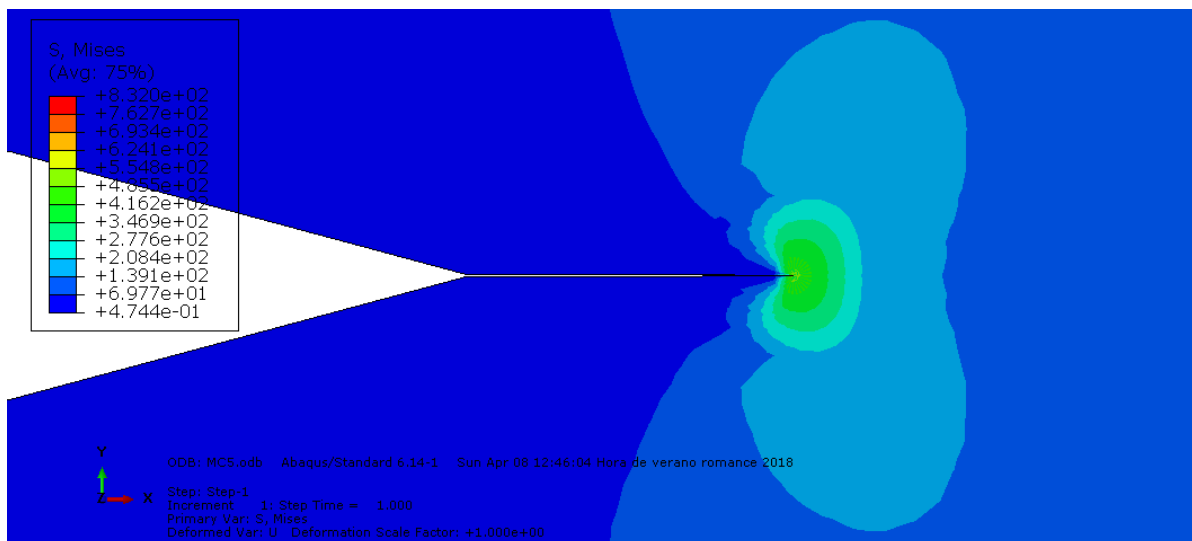
Se descartan los dos primeros análisis y el último debido a errores de mallado. De los análisis restantes se seleccionaría el que menor número de elementos totales tiene, pero en este caso si hay diferencia en la forma de los campos de tensiones y, por tanto, se elegirá un número de elementos interiores igual a ocho ya que el campo de tensiones experimenta una pequeña mejoría.



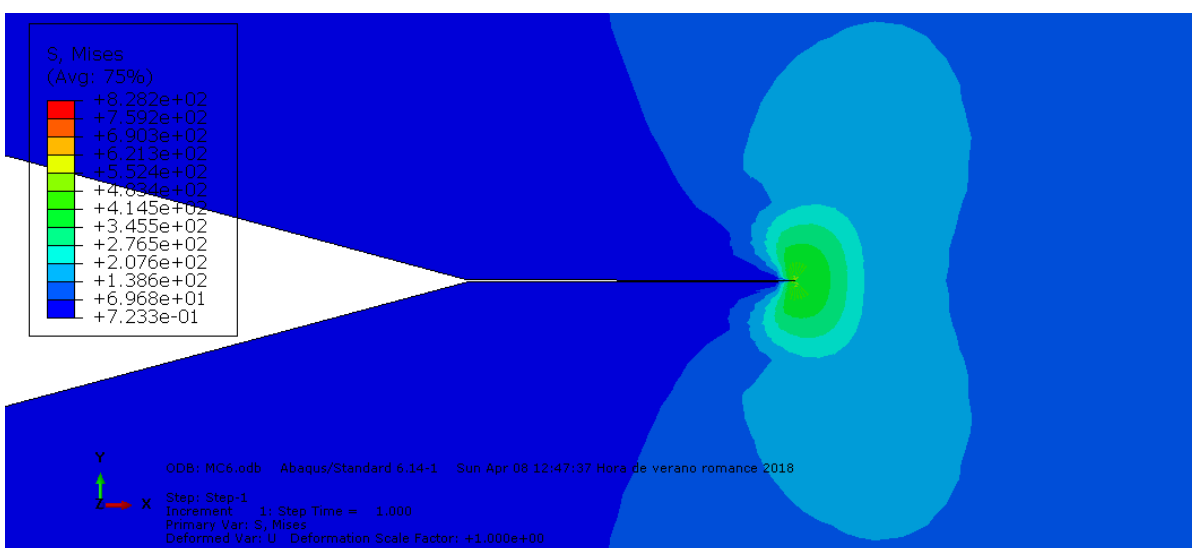
(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 5.9 Campo de tensiones para un número de elementos interiores de (a) cinco, (b) seis, (c) siete, (d) ocho

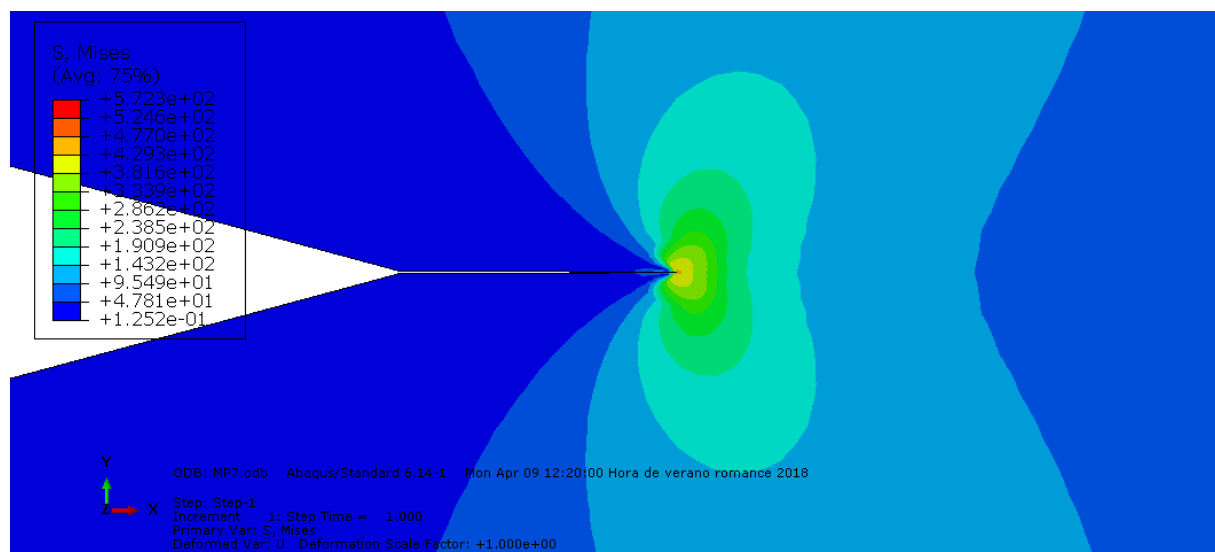
5.3.3. Mallado de las proximidades

A continuación, se analizará el mallado de las proximidades, donde se estudiará el tamaño entre nodos. Ya hay dos variables definidas, el número de contornos igual a tres y el número de elementos interiores para el mallado de estos contornos de ocho. Se mantendrá fijo el tamaño entre nodos exteriores de 1.5 mm y se variará el tamaño entre nodos de las proximidades.

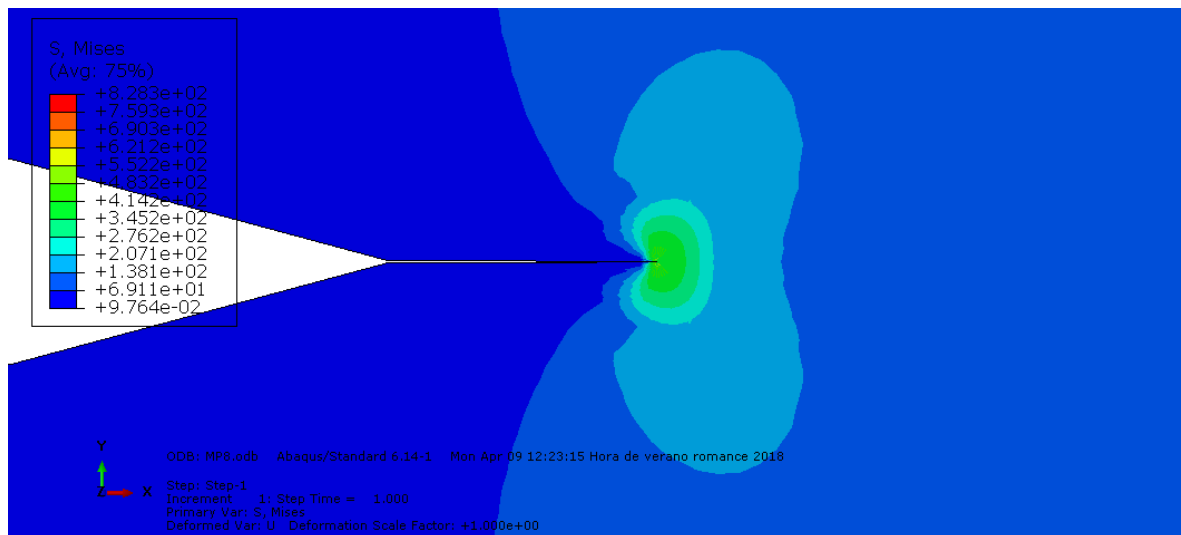
	Tamaño entre nodos en las proximidades (mm)						
	0.25	0.3	0.35	0.5	0.75	1	1.25
Nº Elementos Totales	21083	16752	13316	8456	5280	3856	3208
$K \text{ (MPa}\sqrt{m})$	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70

Tabla 5.14 Resultados para diferentes tamaños entre nodos en las proximidades

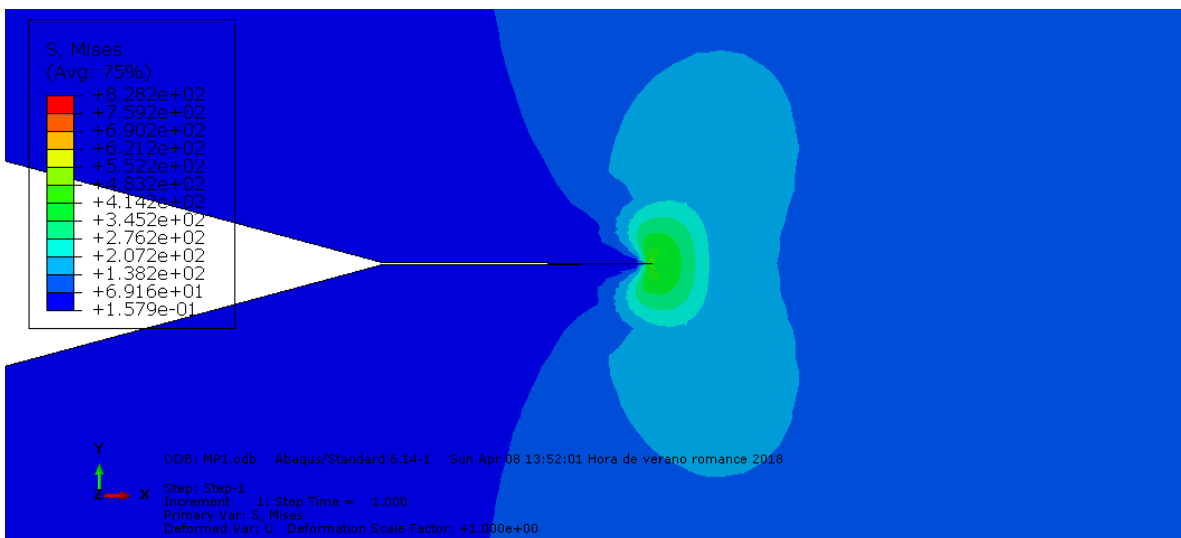
Se descartan el primer y último análisis por errores de mallado. Observando los campos de tensiones se puede ver una mejora muy notable, y por tanto, se define un tamaño entre nodos de 0.3 mm aunque sea el que más elementos totales tenga en el mallado.



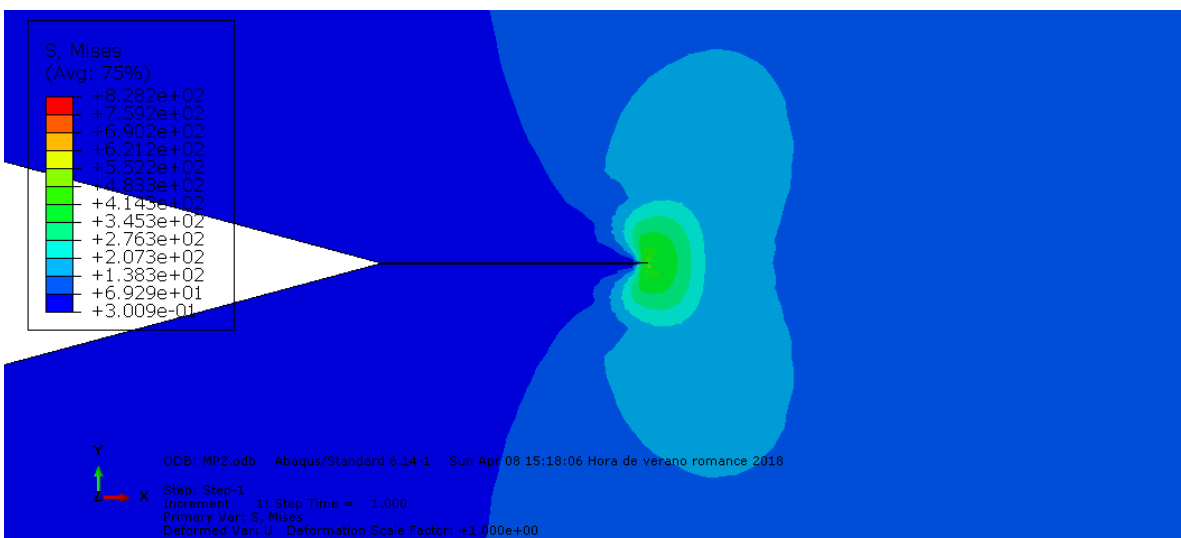
(a)



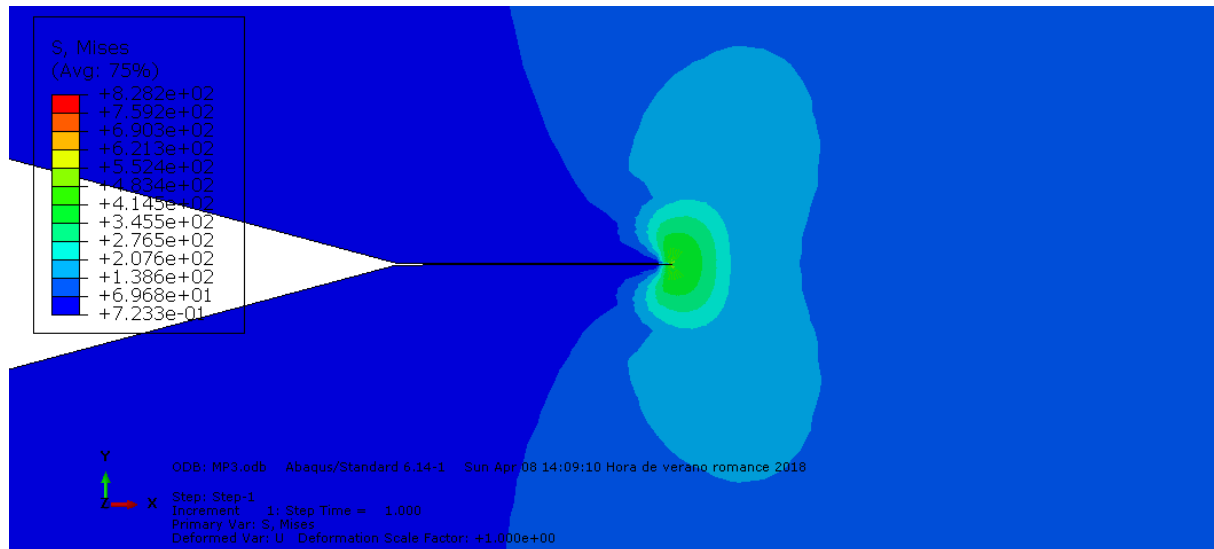
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 5.10 Campo de tensiones para un tamaño entre nodos de (a) 0.3 mm, (b) 0.35 mm, (c) 0.5 mm, (d) 0.75 mm, (e) 1 mm

5.3.4. Mallado externo

Por último, solamente queda el análisis del mallado externo, donde se estudiará el tamaño entre nodos en esta zona. Ya están definidas las variables anteriores, un número de contornos en las particiones del vértice de grieta de tres, un número de elementos interiores para el mallado de estos contornos de ocho y un tamaño entre nodos en la zona de las proximidades de 0.3 mm.

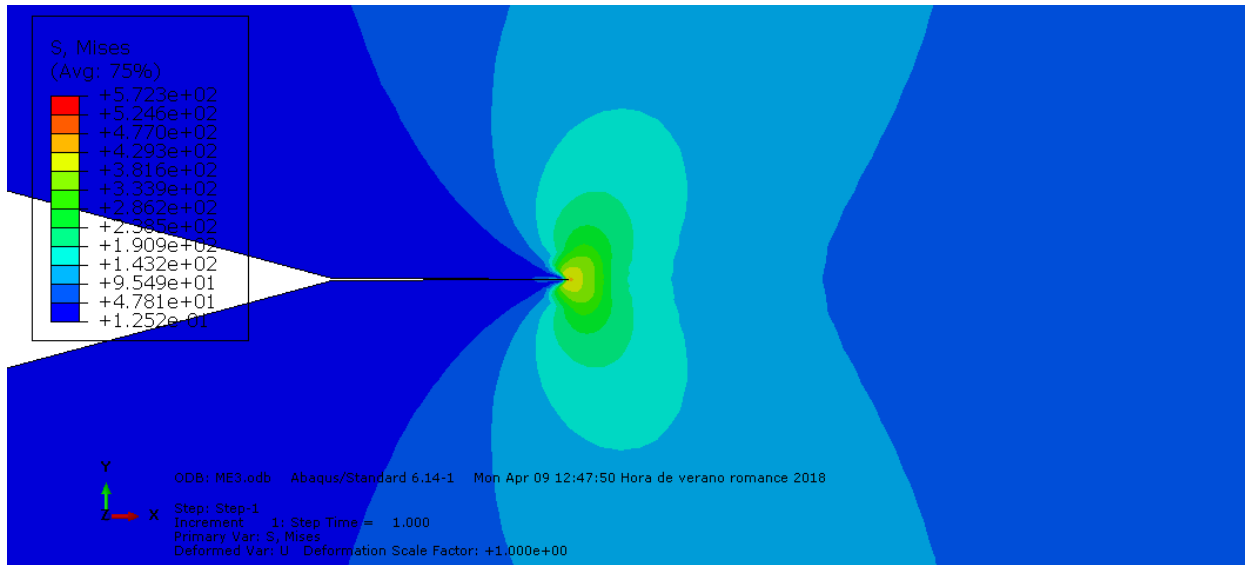
	Tamaño entre nodos externos (mm)					
	1	1.5	2	3.5	5	12.9
Nº						
Elementos	21896	16572	13668	10420	9220	7300
Totales						
$K (MPa\sqrt{m})$	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70	10.70

Tabla 5.15 Resultados para diferentes tamaños entre nodos en el mallado externo

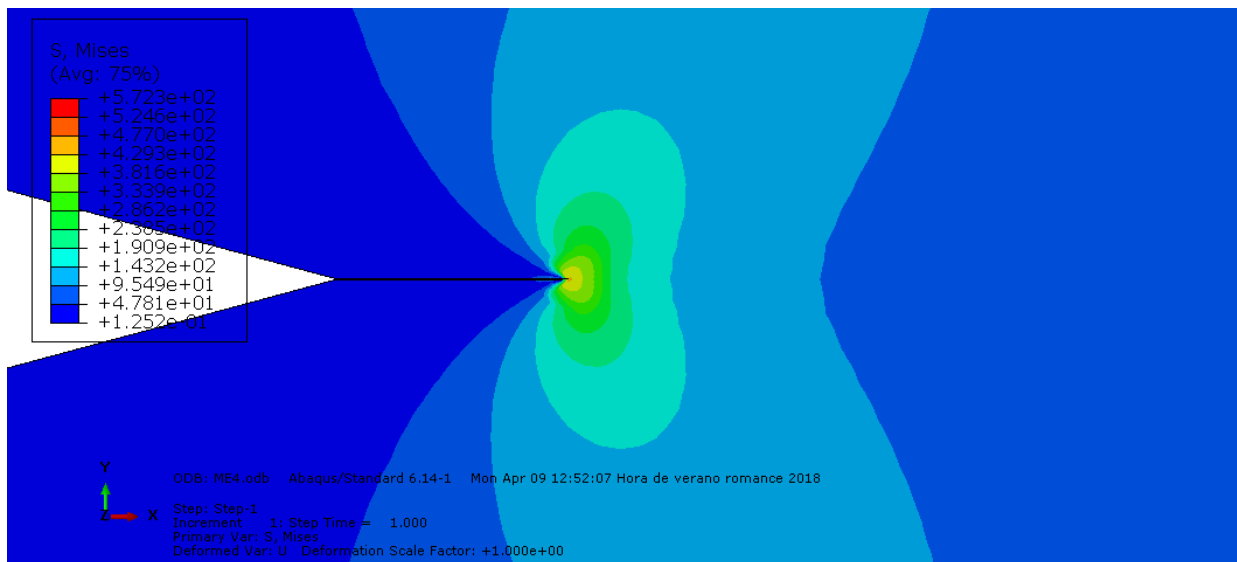
Como se puede observar en los resultados obtenidos, para un tamaño de 12.9 mm entre nodos se obtendría el menor número de elementos totales, y por tanto, una reducción del coste computacional obteniendo los resultados correctos. Como se puede comprobar en los campos de tensiones, no hay variación del campo de

tensiones para los diferentes tamaños entre nodos externos, por lo que la elección de 12.9 mm es correcta.

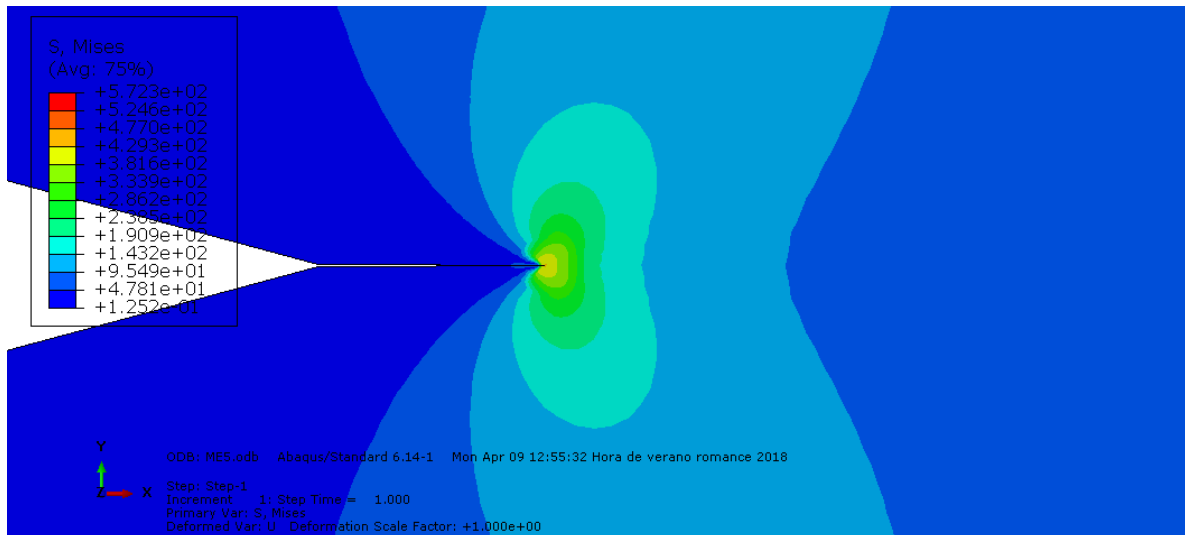
Hay que destacar que la distancia de 12.9 mm se refiere a la distancia que hay entre particiones en el mallado externo, por tanto, es la distancia máxima. Además, la distancia de 12.9 mm entre nodos será a lo largo del eje y, ya que, la distancia entre nodos en el eje x es de 0.3 mm, distancia calculada en el subapartado anterior.



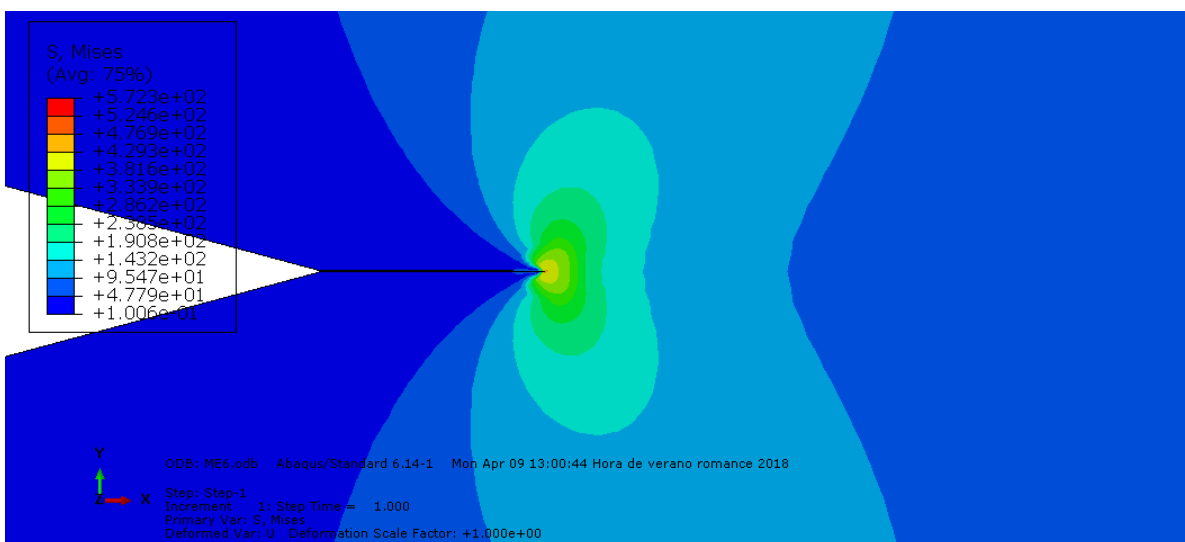
(a)



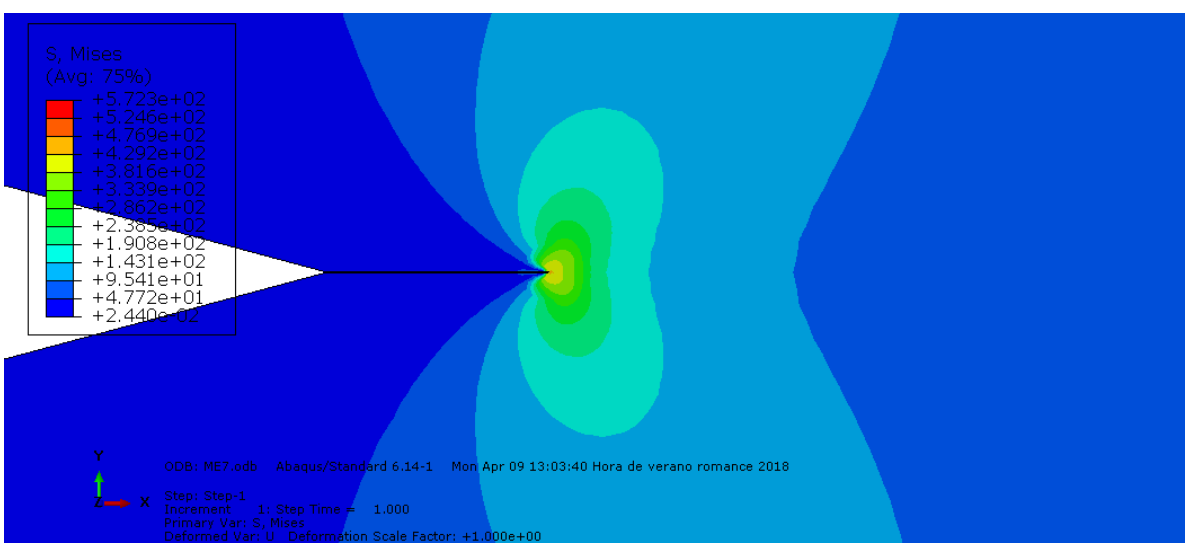
(b)



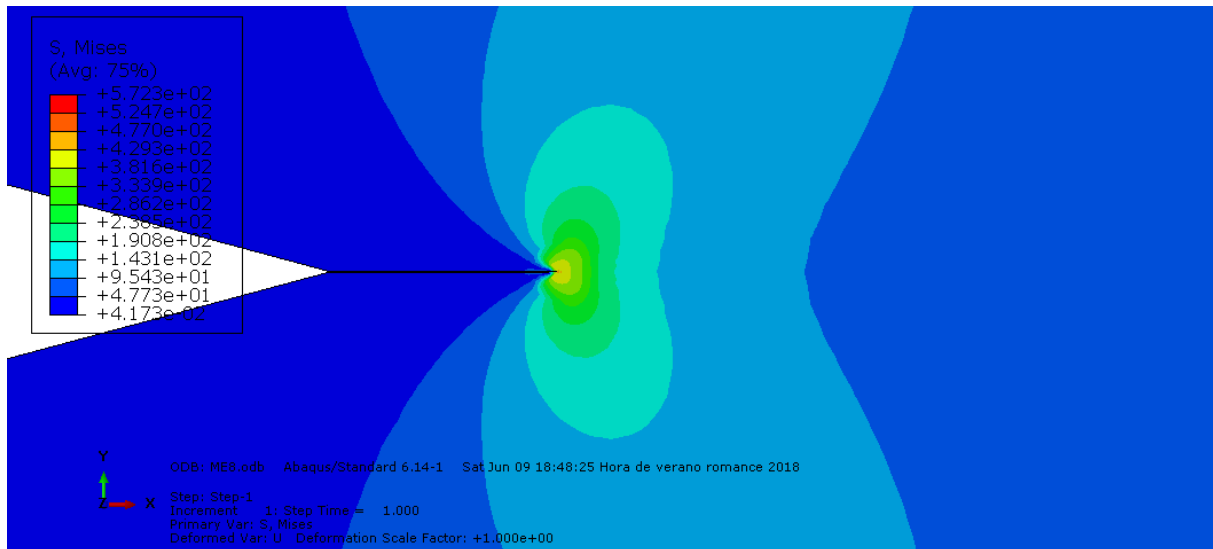
(c)



(d)



(e)



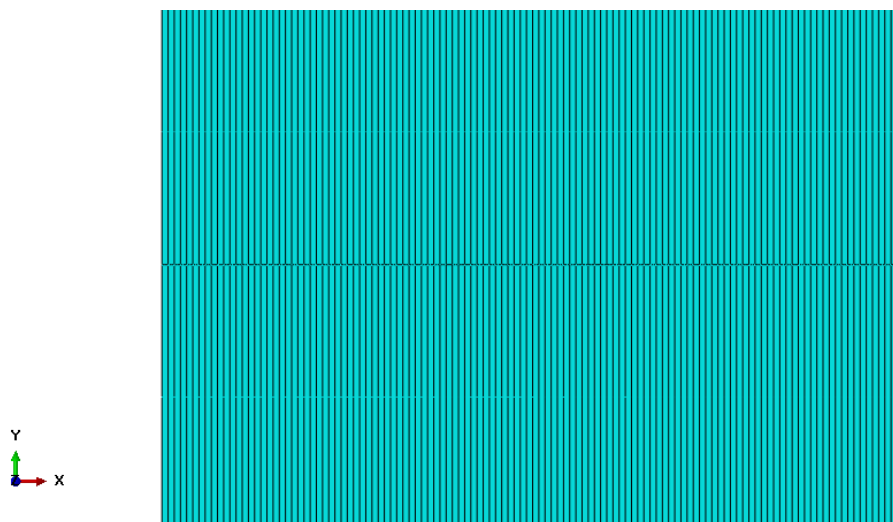
(f)

Figura 5.11 Campo de tensiones para un tamaño entre nodos de (a) 1 mm, (b) 1.5 mm, (c) 2 mm, (d) 3.5 mm, (e) 5 mm, (f) 12.9 mm

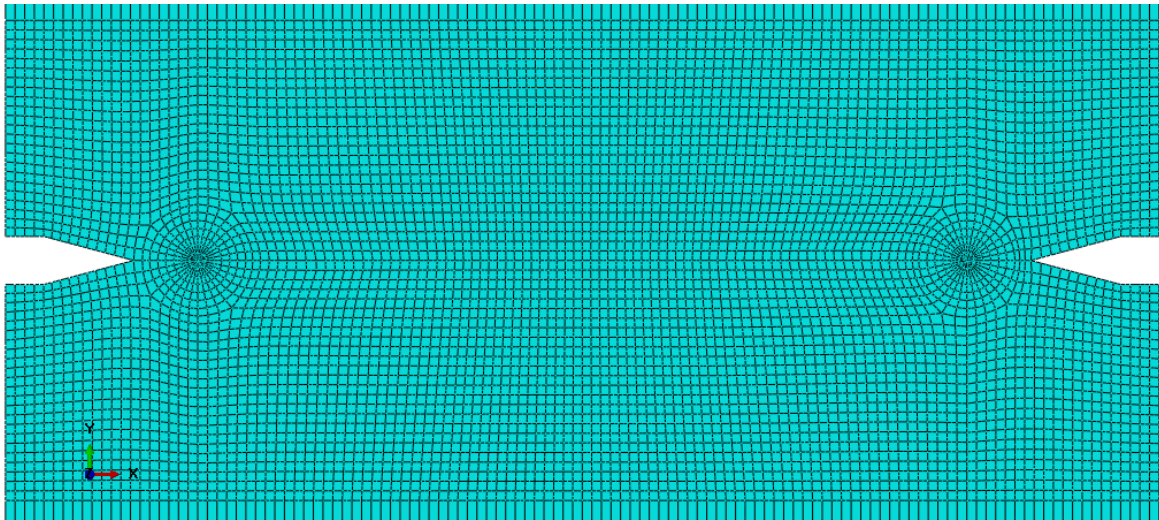
5.3.5. Conclusiones

Estudiadas todas las variables, ya se puede realizar el análisis numérico del efecto debido a la interacción entre grietas. El valor de las variables es el siguiente:

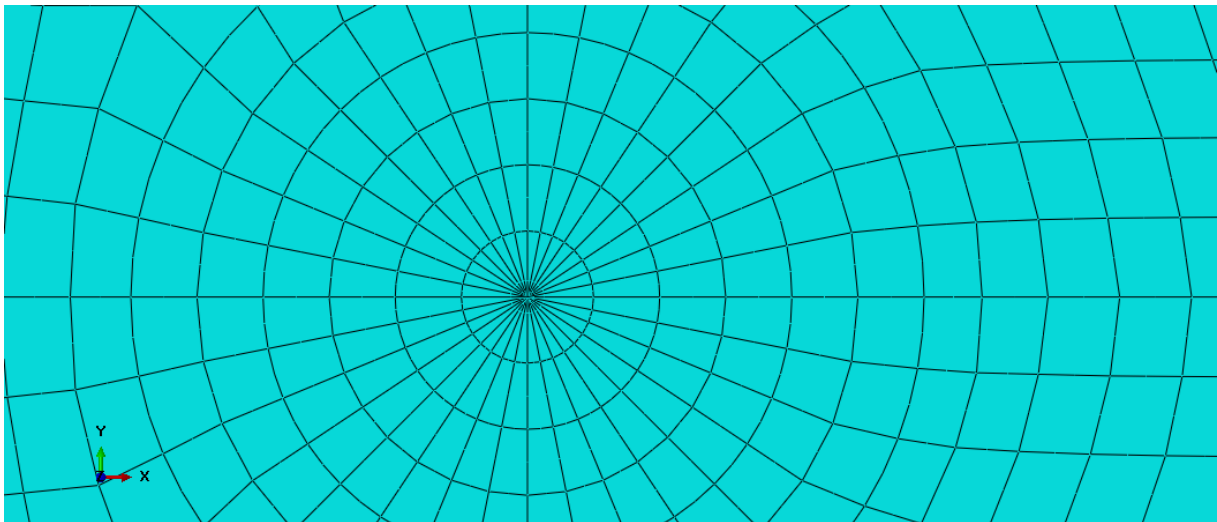
- Un número de contornos en las particiones del vértice de grieta de tres.
- Un número de elementos interiores para el mallado de los contornos de ocho.
- Un tamaño entre nodos para el mallado de las proximidades de 0.3 mm.
- Un tamaño entre nodos para el mallado externo de 12.9 mm.
- En la Figura 5.12 se muestra el mallado seleccionado.



(a)



(b)



(c)

Figura 5.12 Mallado final: (a) Zoom del mallado externo, (b) Mallado zona central, (c) Zoom del mallado en el vértice de grieta

- En este caso, al igual que con la probeta MT, se podría analizar las variables considerando solamente la mitad de la probeta por simetría, obteniendo los mismos resultados y reduciendo el coste computacional.
- Finalmente, empleando un prontuario (Figura 5.13) y empleando las mismas condiciones de carga, se puede determinar el valor analítico para el factor de intensidad de tensiones. Por tanto, emplearemos la ecuación (7) vista en el capítulo de fundamentos teóricos

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a}$$

Donde Y será $f_4\left(\frac{a}{W}\right)$ según la Figura 5.13.

$$Y = f_1\left(\frac{a}{W}\right) = f_1\left(\frac{6}{18}\right) = 1.125$$

$$K = 1.125 * \frac{2500 \text{ N}}{36 \text{ mm} * 1 \text{ mm}} \sqrt{\pi 0.006} = 10.72 \text{ MPa}$$

El resultado analítico de K es de 10.72 MPa, los resultados obtenidos mediante el análisis numérico son muy próximos a este valor, por tanto, podemos afirmar que el análisis numérico es correcto.

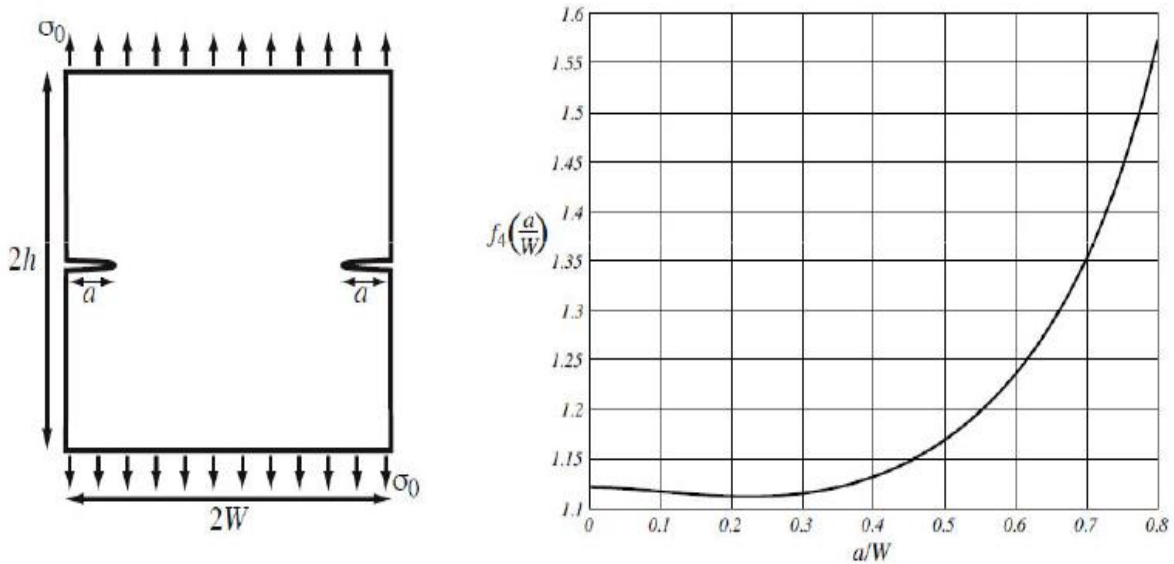


Figura 5.13 Obtención del resultado K de forma analítica para probeta MT [3]

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez realizado el estudio y análisis de variables se está en disposición de realizar el análisis numérico de la probeta DEN para estudiar los efectos derivados de la interacción entre grietas. Habrá dos variables fundamentales, como ya se comentó anteriormente, la longitud de la grieta y la separación entre las entallas. Se irá variando estos dos parámetros y se observará la influencia que tienen con respecto al factor de intensidad de tensiones.

El análisis de sensibilidad realizado anteriormente, donde se definió la metodología a seguir y las variables más influyentes, se empleará para desarrollar el

análisis numérico. Dicho análisis se comenzará con grietas alineadas, analizando diferentes longitudes de grieta para observar la evolución del factor de intensidad de tensiones y el campo de tensiones en las inmediaciones del vértice de grieta. A continuación, se irá aumentando la distancia entre entallas y, a su vez para cada distancia, se estudiarán los distintos tamaños de longitud de grieta al igual que con grietas alineadas.

Las longitudes de grieta (a) que se estudiarán serán: 4.5 mm, 5 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm y 14 mm. Se ha decidido estudiar hasta 14 mm para hacer la comparativa con los diferentes tamaños de entallas ya que en el caso de tener grietas alineadas este es el valor máximo que se alcanzará antes de la fractura. Las distancias entre entallas (s) que se analizarán son las siguientes: 0 mm, 1 mm, 2 mm, 4 mm, 8 mm, 16 mm, 32 mm, 48 mm, 52 mm y 64 mm.

En la tabla 6.1 se recogen los distintos valores obtenidos del factor de intensidad de tensiones para los diferentes valores estudiados de la longitud de grieta y la separación entre grietas. Como se comentó anteriormente, los parámetros empleados para la determinación de los distintos factores de intensidad de tensiones son un número de contornos para obtener la variable J de seis, un número de contornos en las particiones del vértice de grieta de tres, un número de elementos interiores para el mallado de los contornos de ocho, un tamaño entre nodos para el mallado de las proximidades de 0.3 mm y un tamaño entre nodos para el mallado externo de 12.9 mm.

Hay que destacar que en ciertos análisis numéricos se ha tenido que variar el valor de alguna variable ya que los campos de tensiones no son iguales en cada análisis y, para obtener resultados correctos, se necesitaba hacer alguna modificación. Las modificaciones que se han hecho son:

- Variar la densidad del mallado en las proximidades al vértice de grieta, ya que como se ha comentado anteriormente, los campos de tensiones serán diferentes y en algunos análisis se necesitará una mayor precisión para la definición de los campos.
- Para todos los análisis donde la longitud de grieta es de 14 mm, el tamaño entre nodos de las proximidades al vértice de grieta ha sido

aumentado a 0.33 mm, porque con el tamaño de 0.3 mm, que había sido definido anteriormente, había errores en el mallado y no se obtenían resultados representativos.

		a (mm)						
		4.5	5	6	8	10	12	14
s (mm)	0	9.21	9.72	10.7	12.68	14.92	17.9	22.88
	1	9.21	9.72	10.71	12.69	14.94	17.95	23.08
	2	9.22	9.73	10.73	12.73	15.01	18.1	23.62
	4	9.25	9.77	10.79	12.85	15.24	18.63	25.19
	8	9.39	9.94	11.02	13.27	16.02	20.05	27.48
	16	9.73	10.36	11.63	14.37	17.75	22.36	29.19
	32	10.12	10.86	12.37	15.68	19.63	24.61	31.24
	48	10.17	10.92	12.46	15.88	19.93	25	31.66
	52	10.18	10.93	12.47	15.88	19.94	25	31.66
	64	10.17	10.92	12.47	15.87	19.93	25	31.65

Tabla 6.1 Resultados de K ($\text{MPa}\sqrt{m}$) para los diferentes valores de grietas y entallas.

A continuación, se discutirán los resultados obtenidos del análisis numérico. Se hará uso de gráficas donde se mostrarán los resultados para dar una explicación clara y concisa. En primer lugar, se discutirán los resultados del factor de intensidad de tensiones en función de la longitud de grieta y de la distancia entre entallas. Seguidamente, se analizará el campo de tensiones.

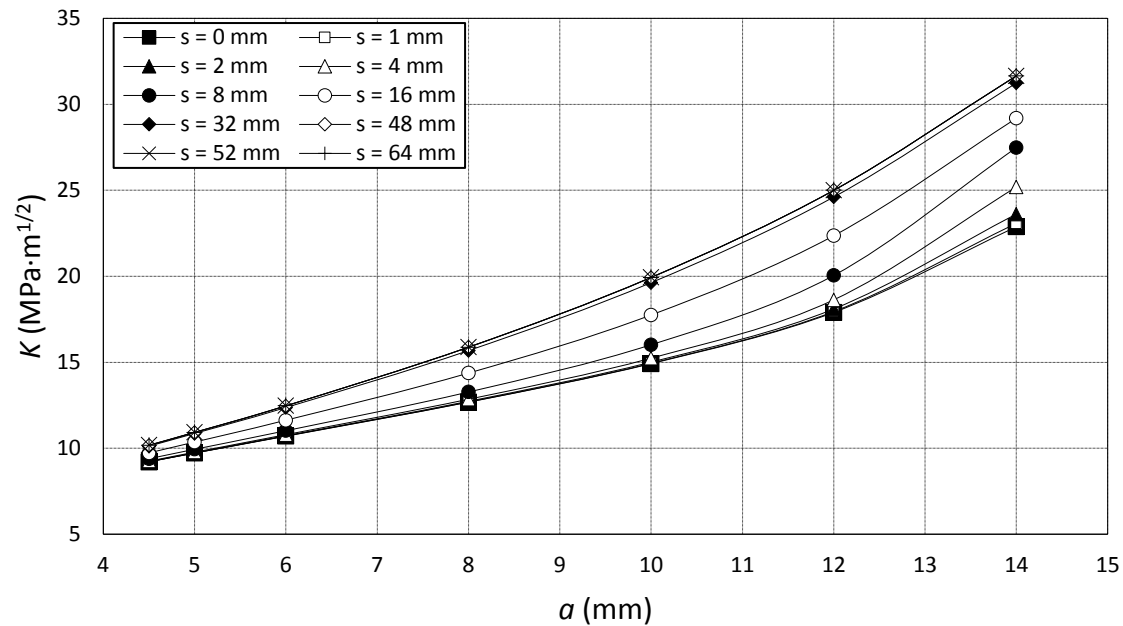


Figura 6.1 Factor de intensidad de tensiones frente a la longitud de grieta para las diferentes distancias entre las entallas

Como se puede observar en la Figura 6.1, para todas las separaciones entre grietas, a medida que la longitud de grieta va aumentando, el factor de intensidad de tensiones también lo hace, pero no de forma lineal, sino que dicho incremento del factor de intensidad de tensiones va siendo mayor a medida que aumenta la longitud de grieta. Este resultado es lógico si se tiene en cuenta que el factor de intensidad de tensiones es proporcional a la raíz cuadrada de la longitud de grieta (Ecuación 7).

Otro análisis que se puede establecer, y de mayor interés desde el punto de vista investigador o industrial, es aquél correspondiente al estudio de los valores del factor de intensidad de tensiones con la separación entre grietas. A medida que la distancia entre entallas aumenta, el factor de intensidad de tensiones también aumenta. Se puede observar como, para una distancia entre entallas pequeña de 0 mm a 2 mm, el factor de intensidad de tensiones prácticamente es el mismo para un mismo valor de longitud de grieta. Sin embargo, a partir de 4 mm de distancia entre entallas, el factor de intensidad de tensiones tiene un aumento progresivo hasta que llega a un valor de distancia entre entallas donde se estabiliza. El valor de distancia entre entallas donde comienza a estabilizar el factor de intensidad de tensiones es de 32 mm, esto significa que a partir de este valor el efecto o la influencia de la interacción entre grietas sobre el campo de tensiones va desapareciendo.

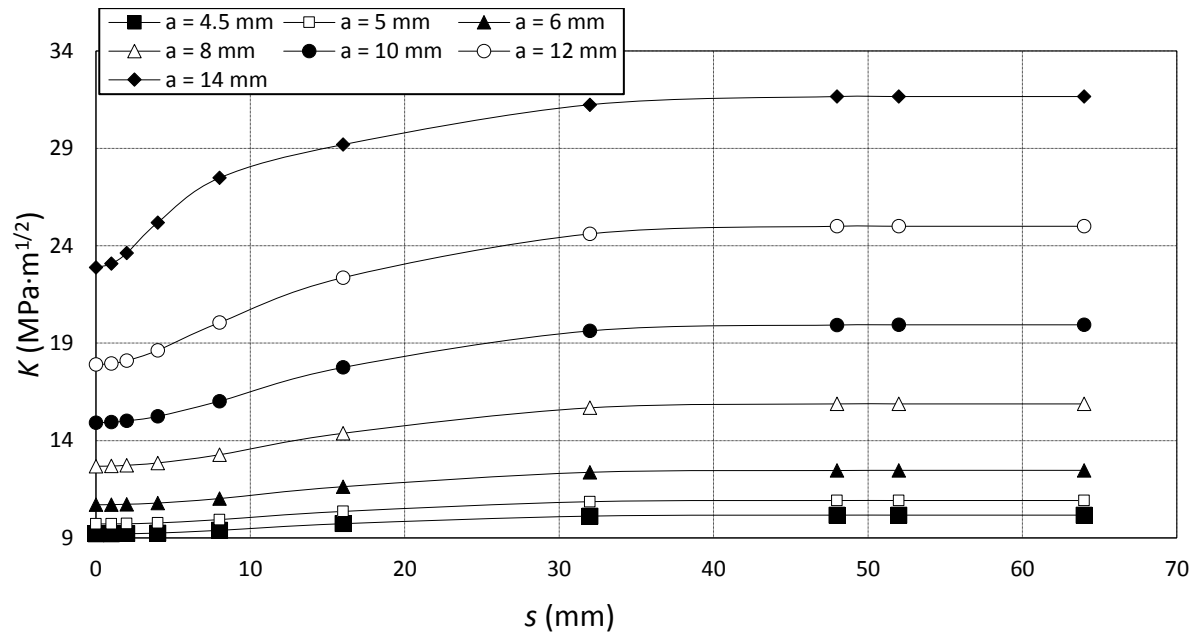


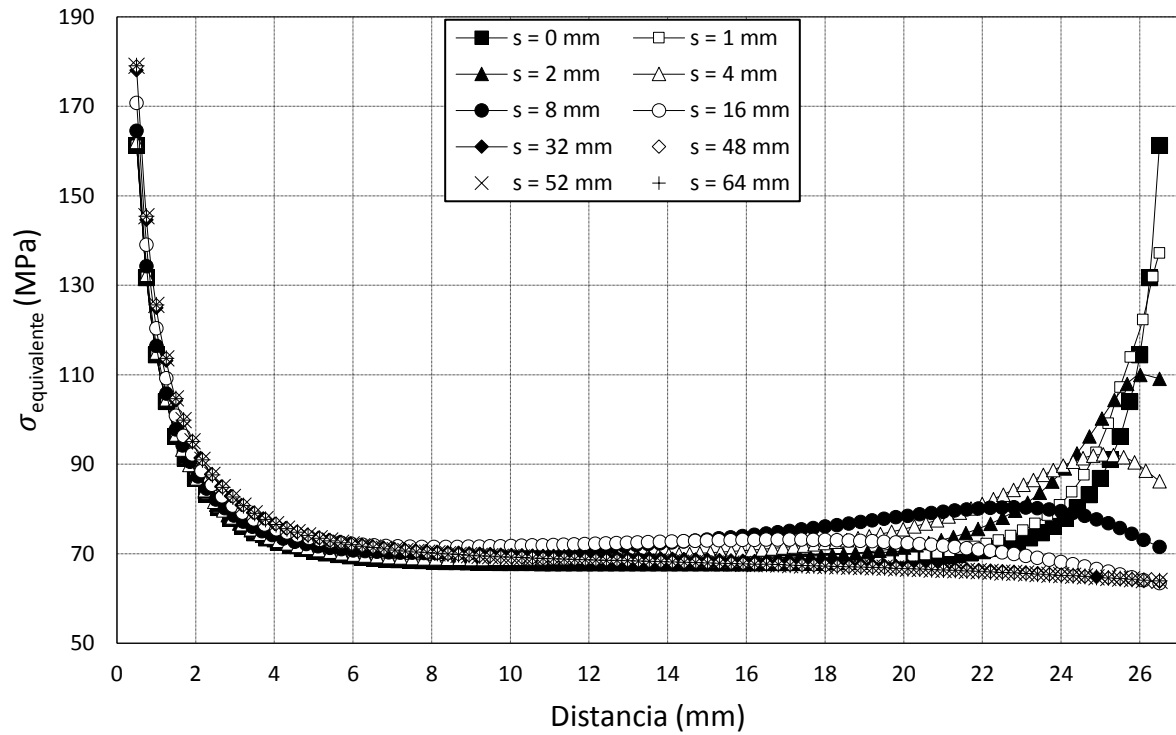
Figura 6.2 Factor de intensidad de tensiones frente a la distancia entre entallas para los diferentes valores de longitud de grieta

Con el fin de observar mejor el anterior análisis establecido, en la Figura 6.2 se ha representado el factor de intensidad de tensiones frente a la separación entre grietas para las distintas longitudes de grieta analizadas. Se puede comprobar algunas de las aclaraciones anteriores, se observa como para un valor en torno a 30-40 mm de distancia entre entallas, el factor de intensidad de tensiones se estabiliza y, por tanto, el efecto de la interacción entre grietas desaparece.

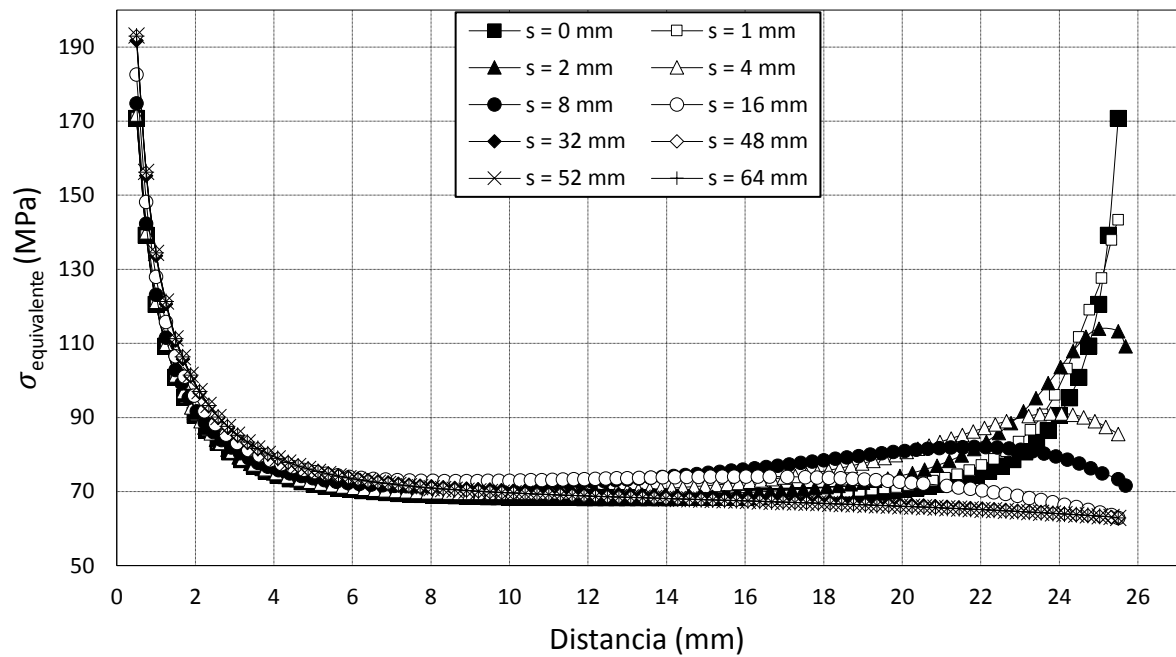
Se puede observar como para una de longitud de grieta mayor, como es el caso de 14 mm, el factor de intensidad de tensiones presenta un mayor rango de valores para las distintas separaciones entre entallas. Sin embargo, para una grieta de pequeño tamaño (4.5 mm), el rango de valores del factor de intensidad de tensiones para las distintas separaciones entre entallas es muy pequeño. Por tanto, para una misma longitud de grieta, la variabilidad del factor de intensidad de tensiones es mayor a medida que la separación entre grietas va aumentando hasta alcanzar un valor estable para una separación entre entallas determinada.

Una vez analizado el factor de intensidad de tensiones. Otro concepto de interés ingenieril es, como ya se indicó anteriormente, el campo de tensiones. A continuación, se analizará el perfil de tensión equivalente de Von Mises, ya que es

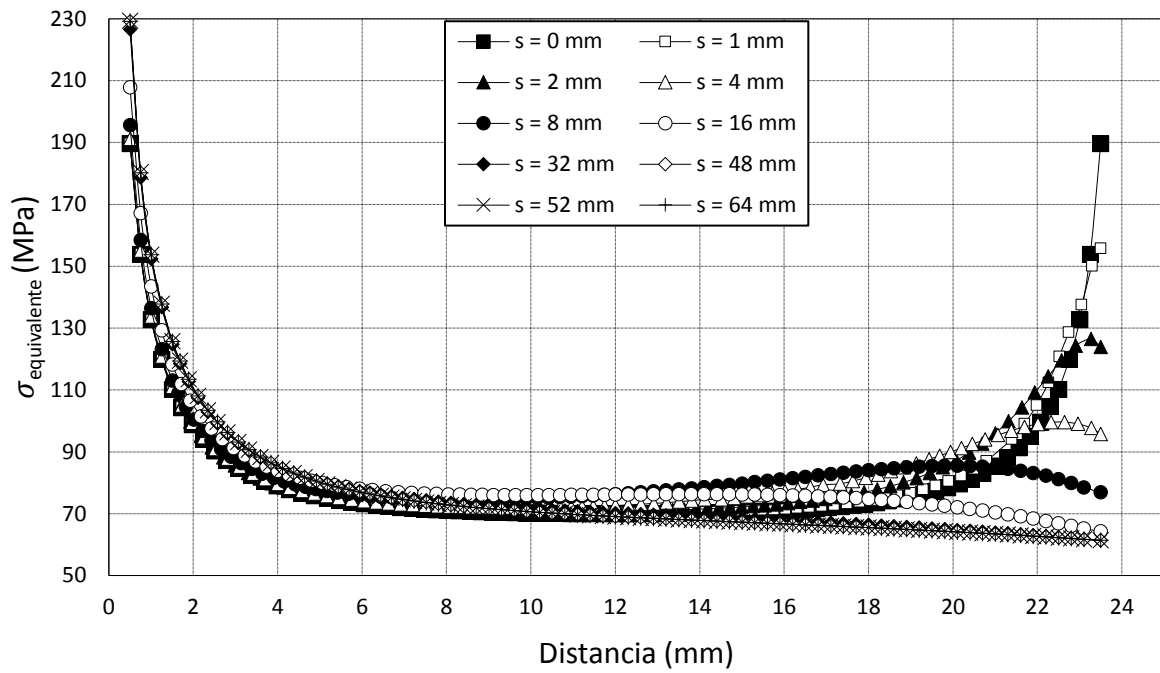
más exacta que la tensión equivalente de Treska, frente a la distancia para las distintas longitudes de grietas analizadas.



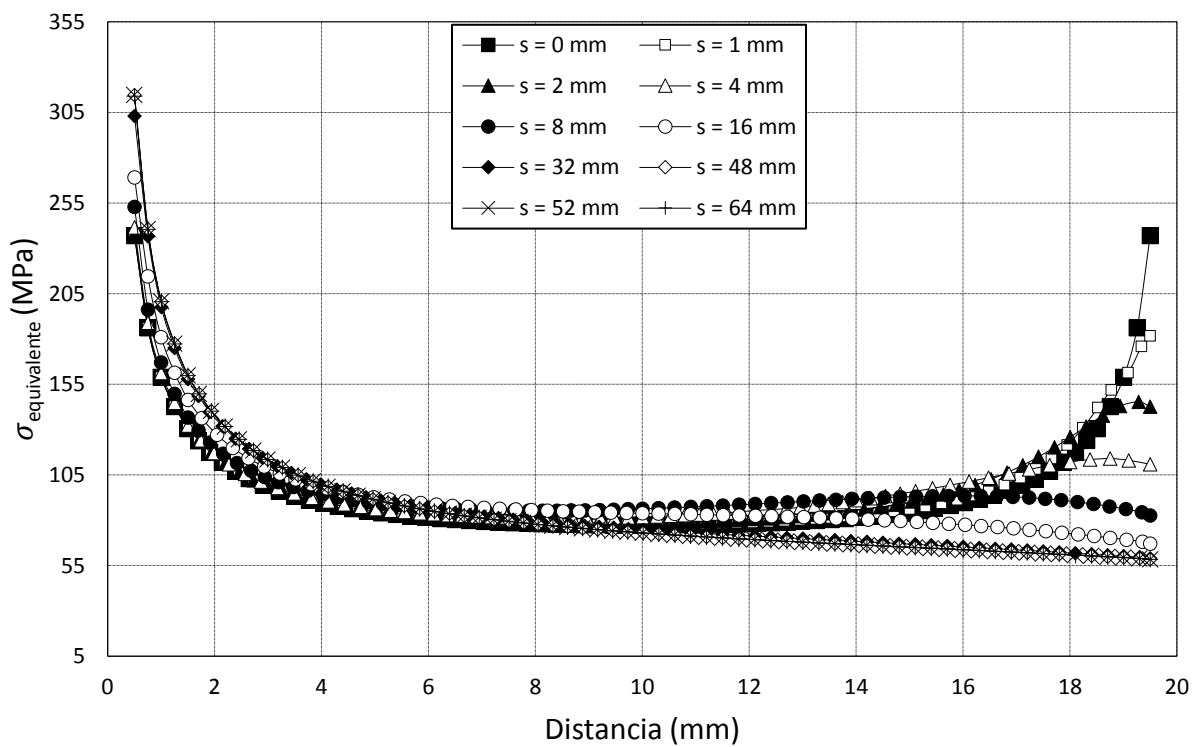
(a)



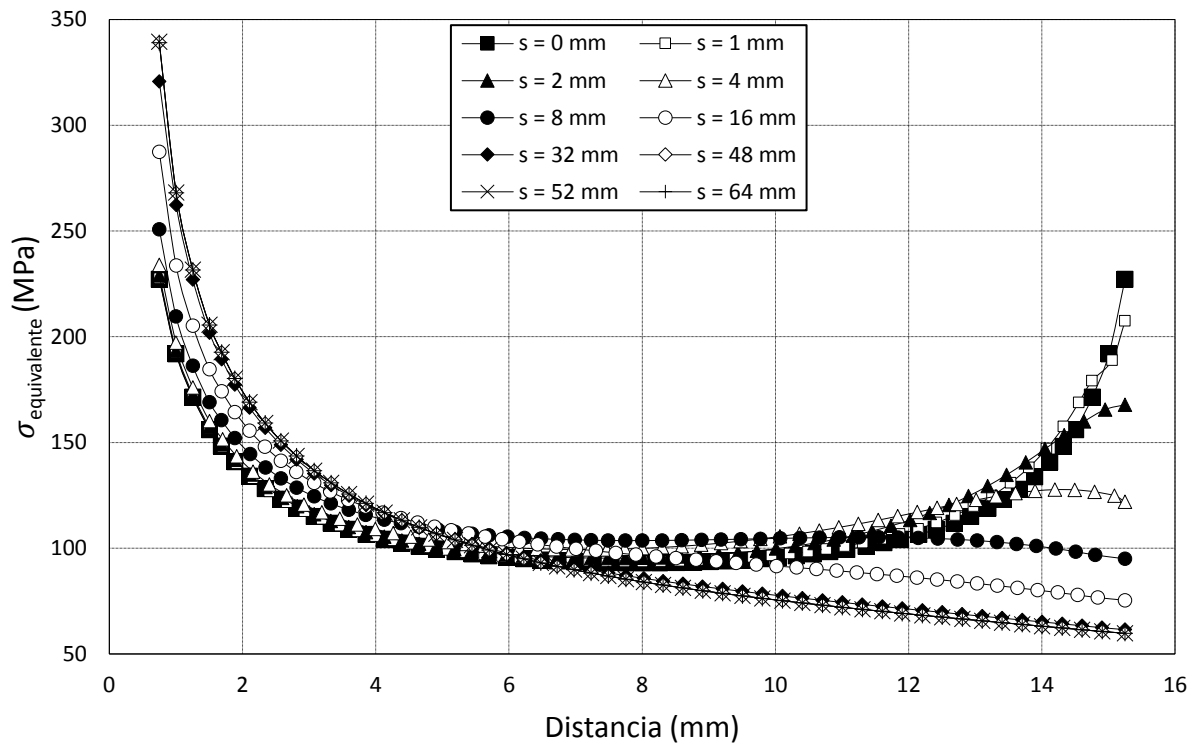
(b)



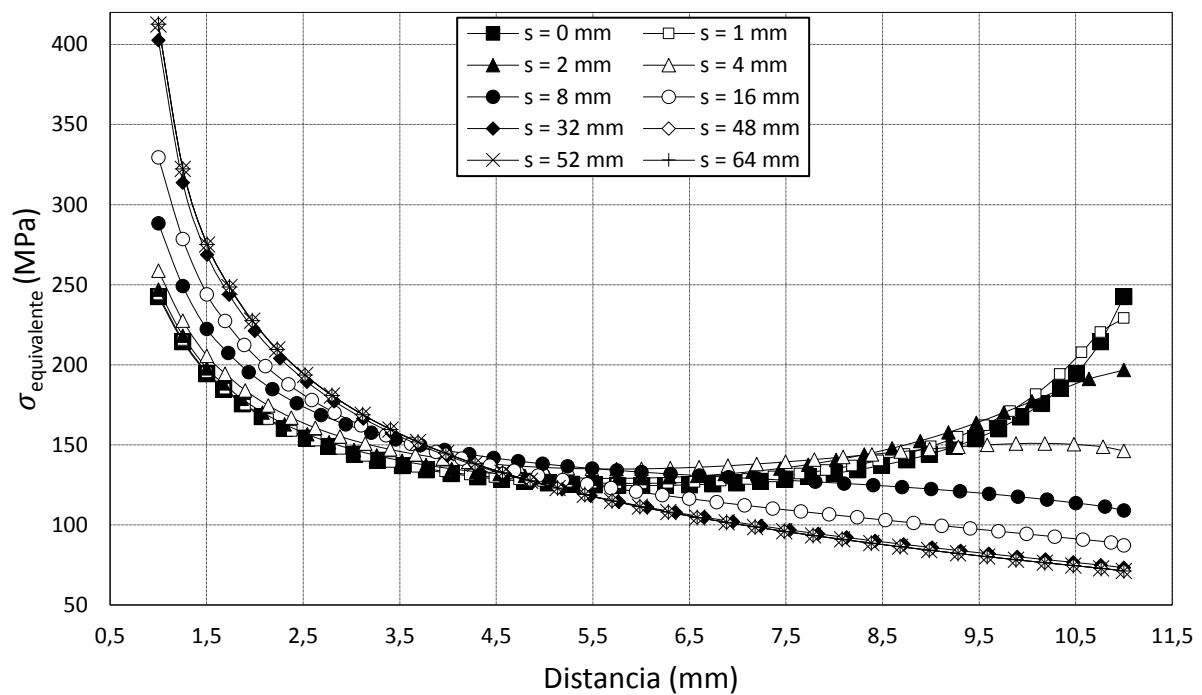
(c)



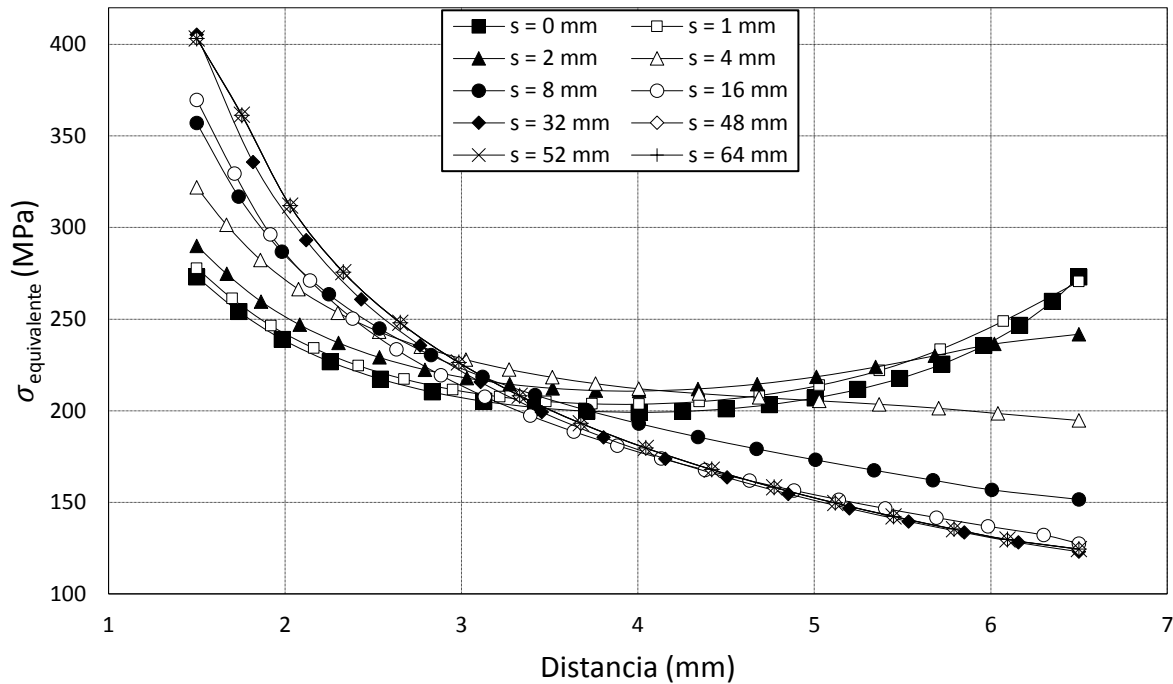
(d)



(e)



(f)



(g)

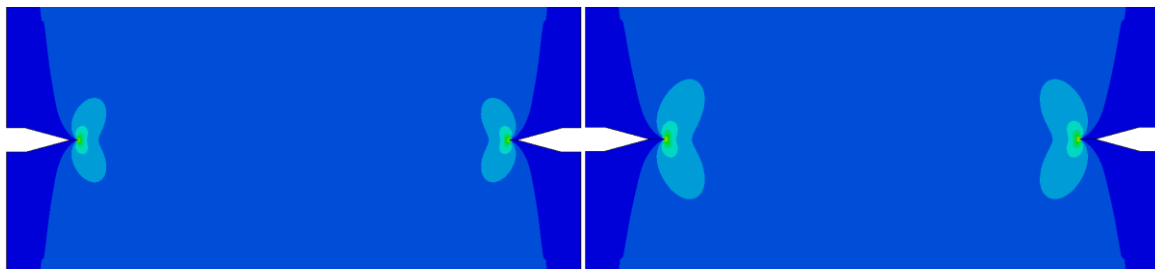
Figura 6.3 Perfil de la tensión equivalente frente a la distancia entre grietas para los tamaños de longitudes de grieta de (a) 4.5 mm, (b) 5 mm, (c) 6 mm, (d) 8 mm, (e) 10 mm, (f) 12 mm, (g) 14 mm

De la Figura 6.3 se observa que el valor de la tensión va aumentando a medida que la longitud de grieta también lo hace. Esto no es de extrañar y es algo esperado ya que a medida que la longitud de grieta incrementa, el daño sobre la probeta va siendo mayor.

Se puede observar como para grietas alineadas, los perfiles de la tensión son simétricos, como era de esperar, dada la simetría presente en la probeta. Sin embargo, a medida que la separación entre entallas va aumentando, la simetría de los perfiles de la tensión se va perdiendo ya que se va perdiendo también la simetría de la probeta.

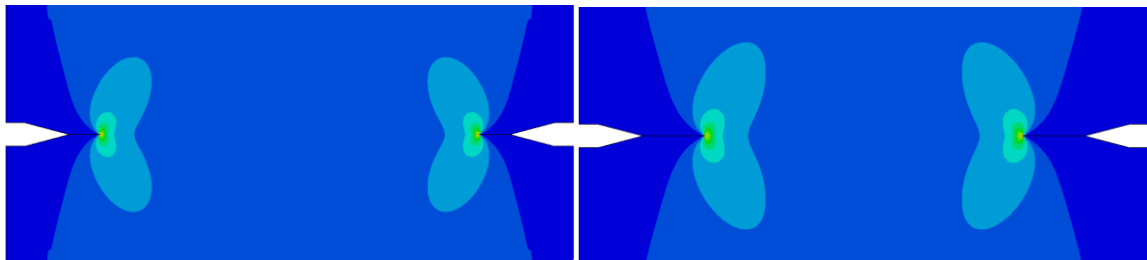
Se puede analizar también el efecto de la interacción entre grietas. Se observa como a distancias entre entallas mayores, 32 mm en adelante, el valor de la tensión se estabiliza para cualquier distancia entre grietas indicando que desaparece el efecto de la interacción entre grietas.

Además de este análisis cuantitativo, se ha considerado interesante la inclusión de un análisis cualitativo mediante la visualización de la distribución de los campos de tensiones en las inmediaciones de los vértices de grieta. De esta forma, a continuación se muestran los campos de tensiones para distintas distancias entre entallas variando la longitud de grieta: 4.5 mm (a), 5 mm (b), 6 mm (c), 8 mm (d), 10 mm (e), 12 mm (f) y 14 mm (g). A su misma vez, cada figura corresponde a una separación entre entallas distinta: Figura 6.4 ($s = 0$ mm), 6.5 ($s = 2$ mm), 6.6 ($s = 8$ mm), 6.7 ($s = 16$ mm), 6.8 ($s = 32$ mm), 6.9 ($s = 48$ mm) y 6.10 ($s = 52$ mm).



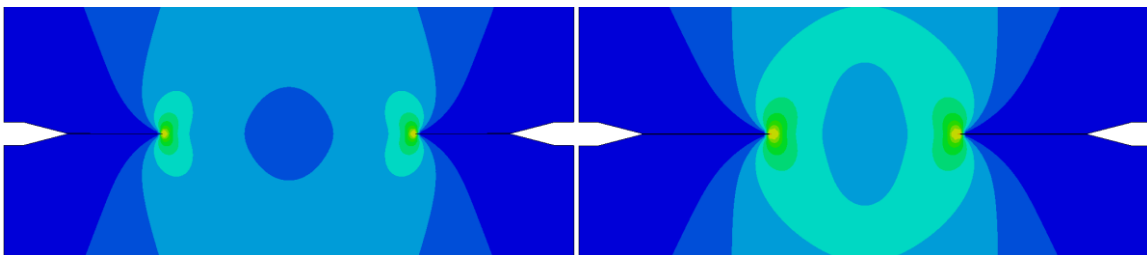
(a)

(b)



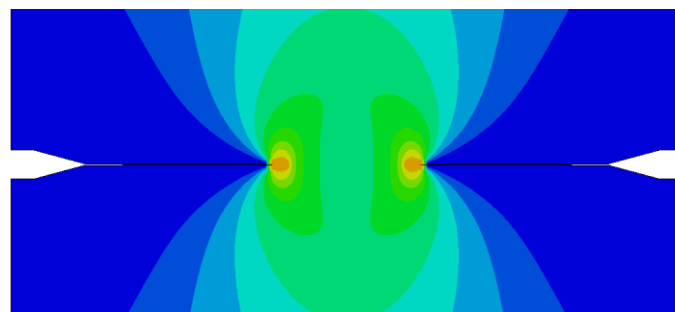
(c)

(d)



(e)

(f)



(g)

Figura 6.4 Campo de tensiones para grietas alineadas con una longitud de grietas de (a) 4.5 mm, (b) 5 mm, (c) 6 mm, (d) 8 mm, (e) 10 mm, (f) 12 mm, (g) 14 mm

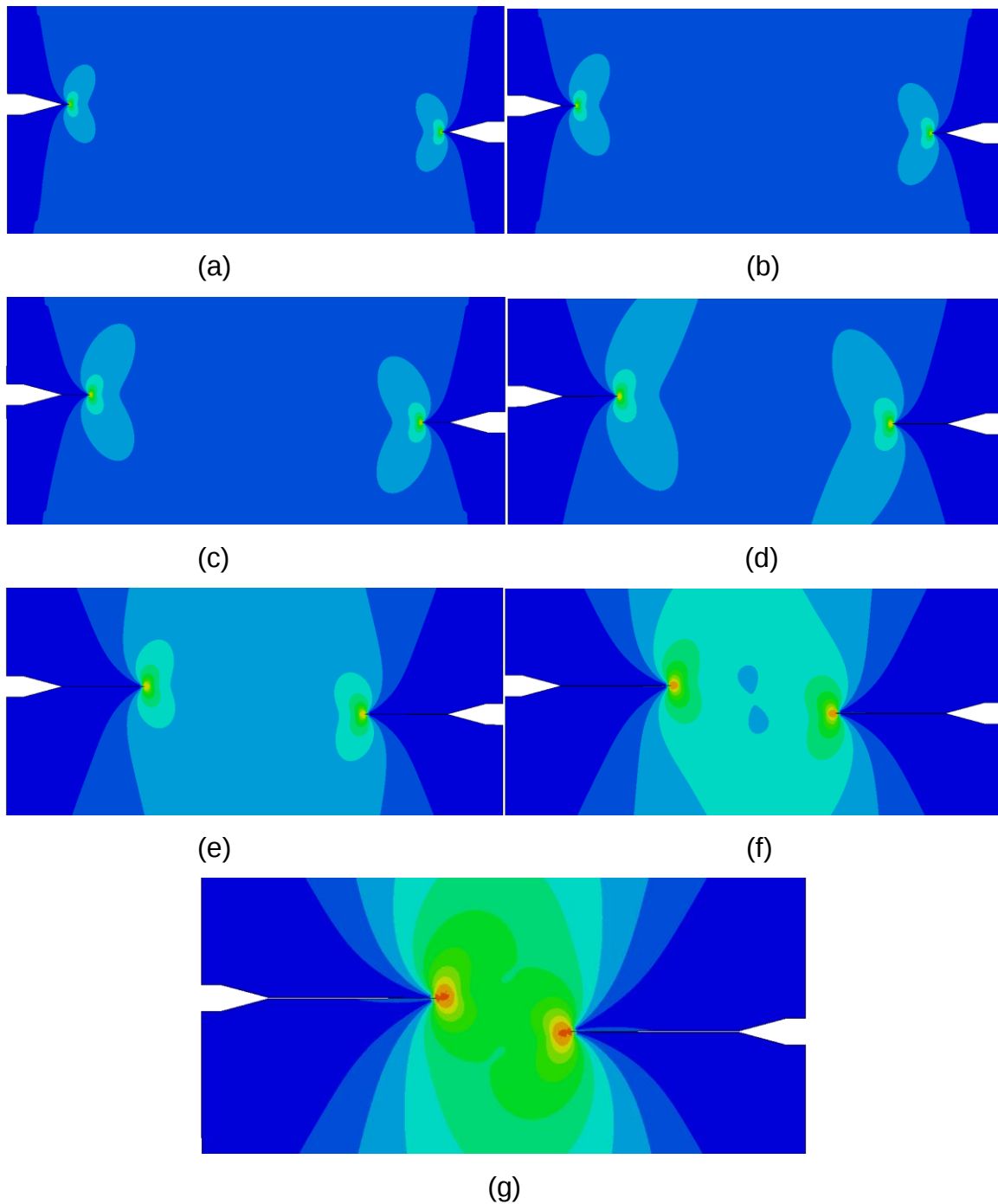


Figura 6.5 Campo de tensiones para una distancia entre entallas de 2 mm con una longitud de grietas de (a) 4.5 mm, (b) 5 mm, (c) 6 mm, (d) 8 mm, (e) 10 mm, (f) 12 mm, (g) 14 mm

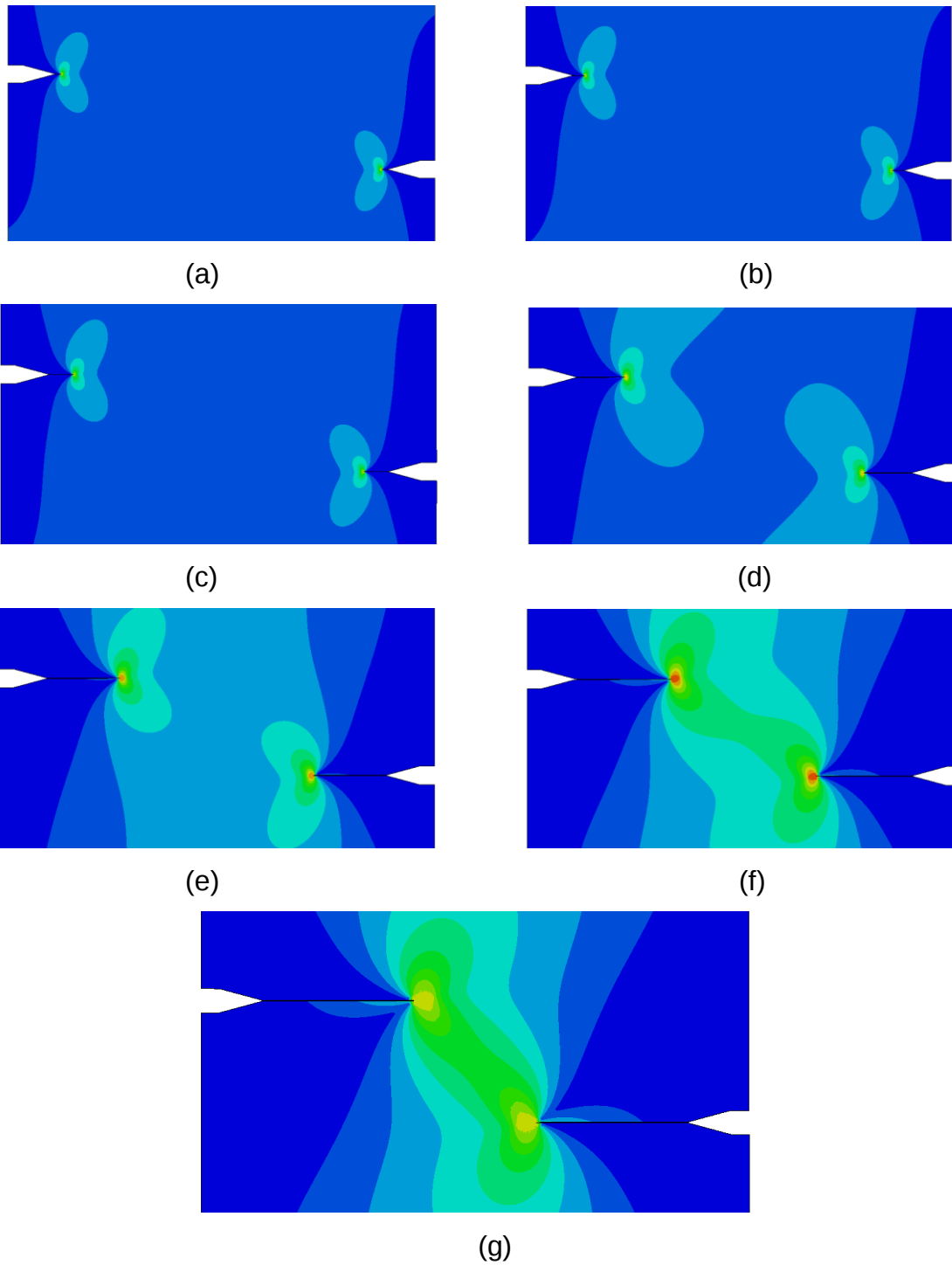
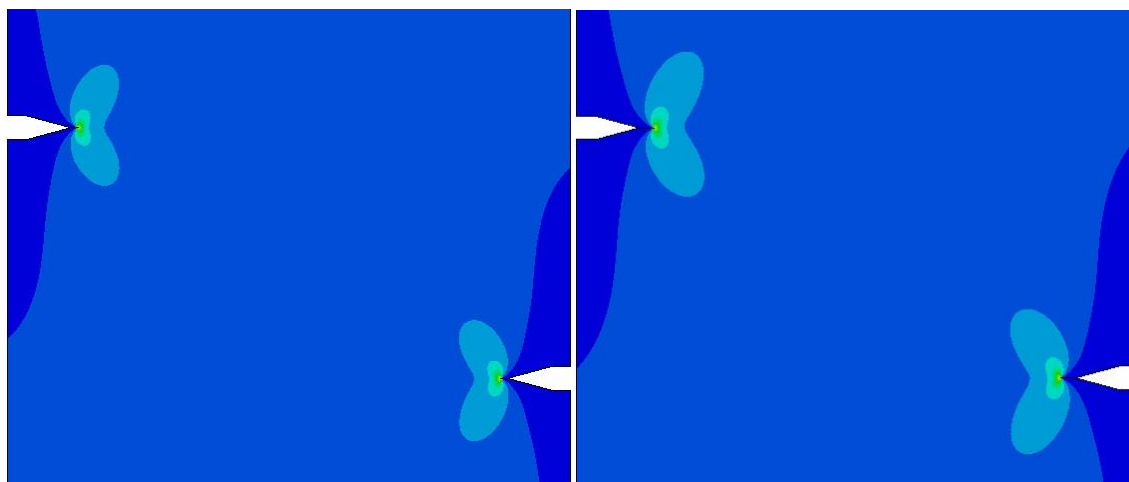
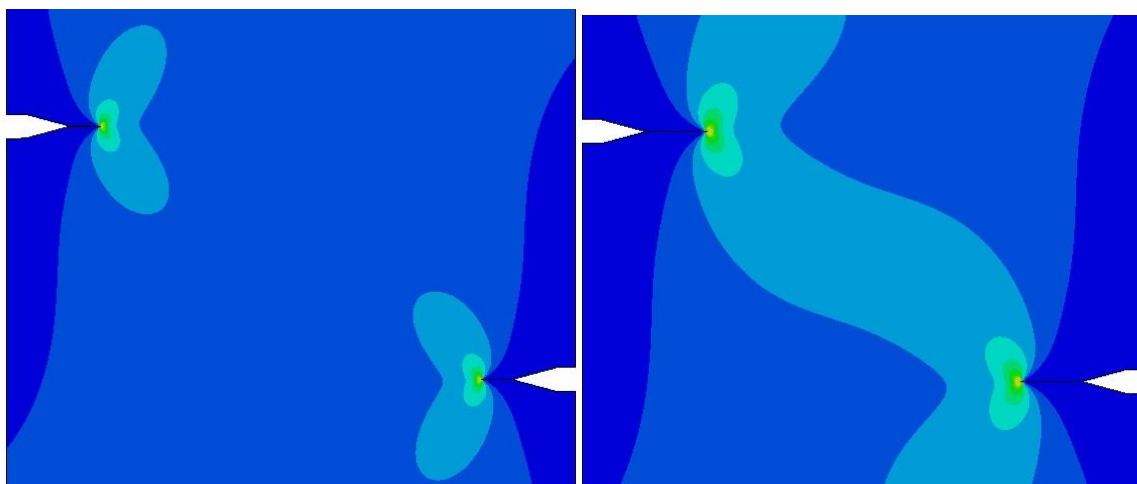


Figura 6.6 Campo de tensiones para una distancia entre entallas de 8 mm con una longitud de grietas de (a) 4.5 mm, (b) 5 mm, (c) 6 mm, (d) 8 mm, (e) 10 mm, (f) 12 mm, (g) 14 mm



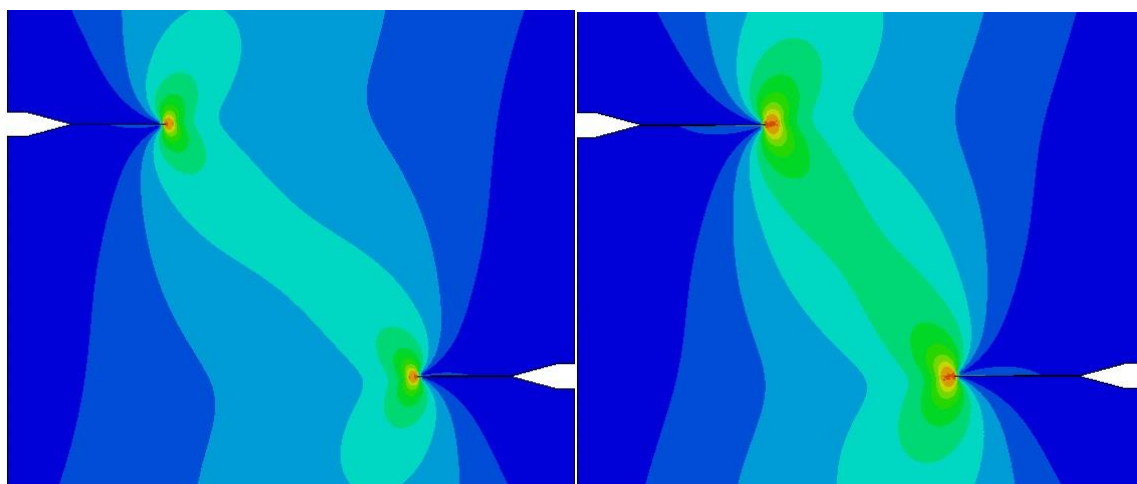
(a)

(b)



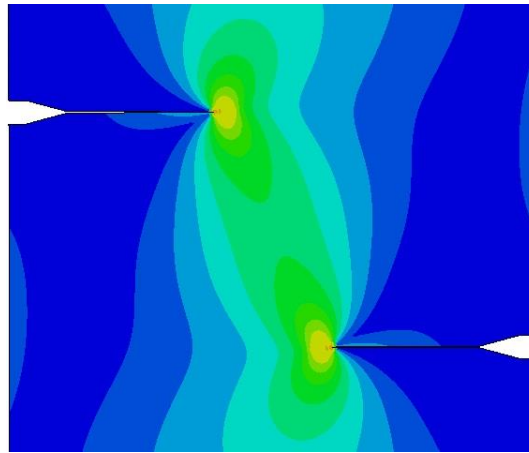
(c)

(d)



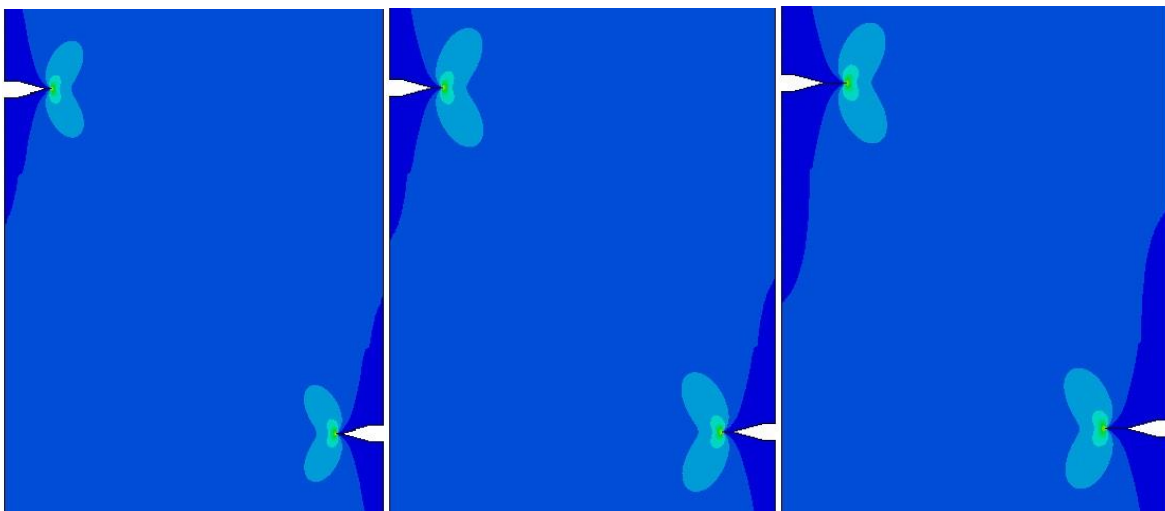
(e)

(f)



(g)

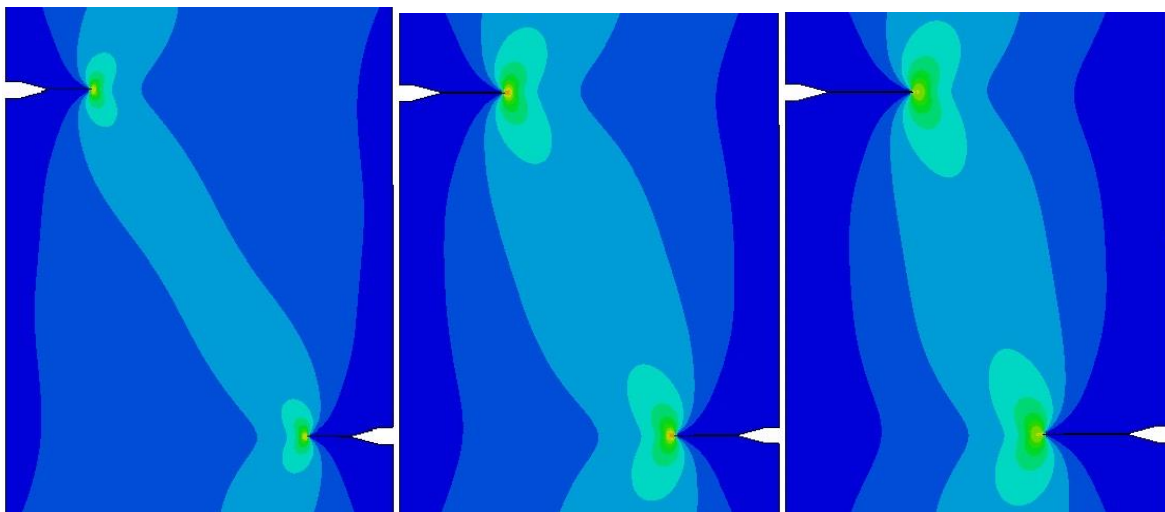
Figura 6.7 Campo de tensiones para una distancia entre entallas de 16 mm con una longitud de grietas de (a) 4.5 mm, (b) 5 mm, (c) 6 mm, (d) 8 mm, (e) 10 mm, (f) 12 mm, (g) 14 mm



(a)

(b)

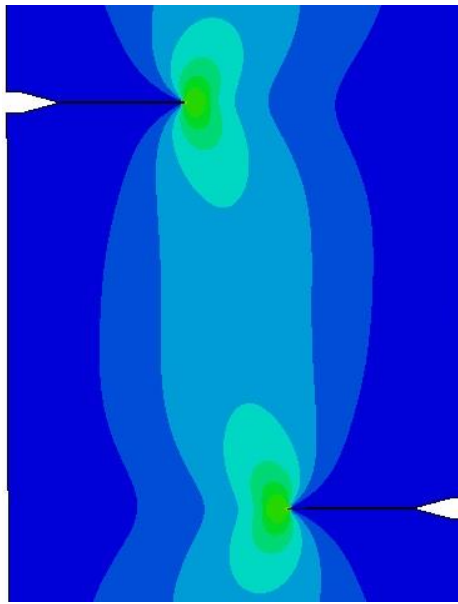
(c)



(d)

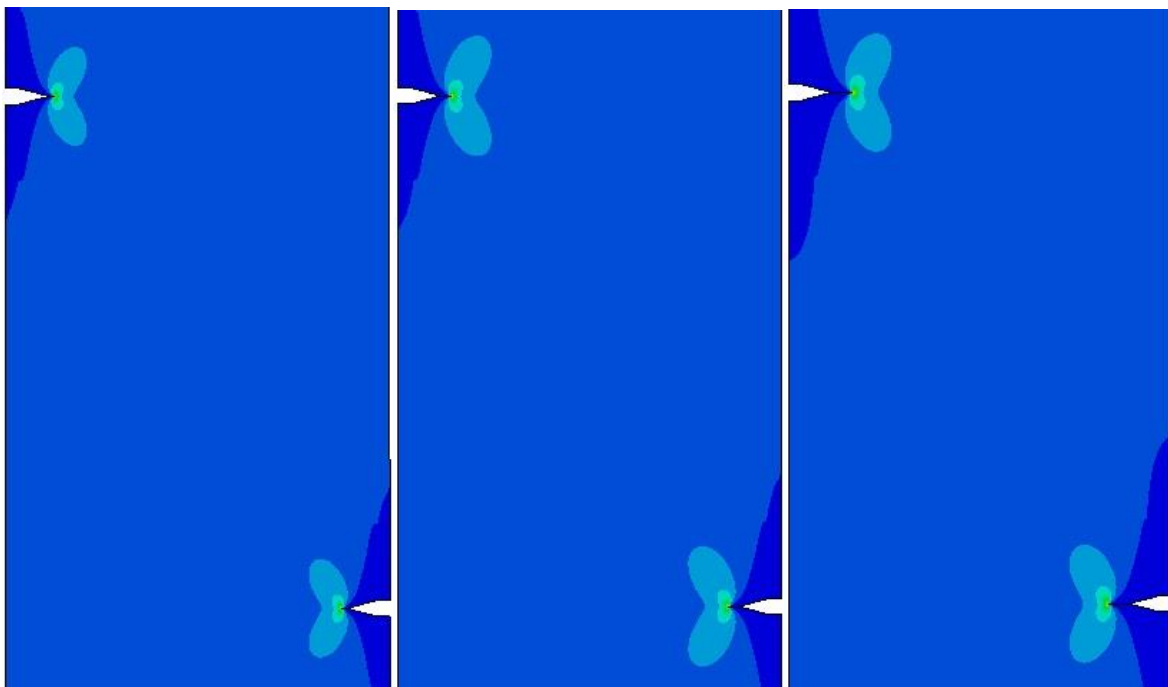
(e)

(f)



(g)

Figura 6.8 Campo de tensiones para una distancia entre entallas de 32 mm con una longitud de grietas de (a) 4.5 mm, (b) 5 mm, (c) 6 mm, (d) 8 mm, (e) 10 mm, (f) 12 mm, (g) 14 mm



(a)

(b)

(c)

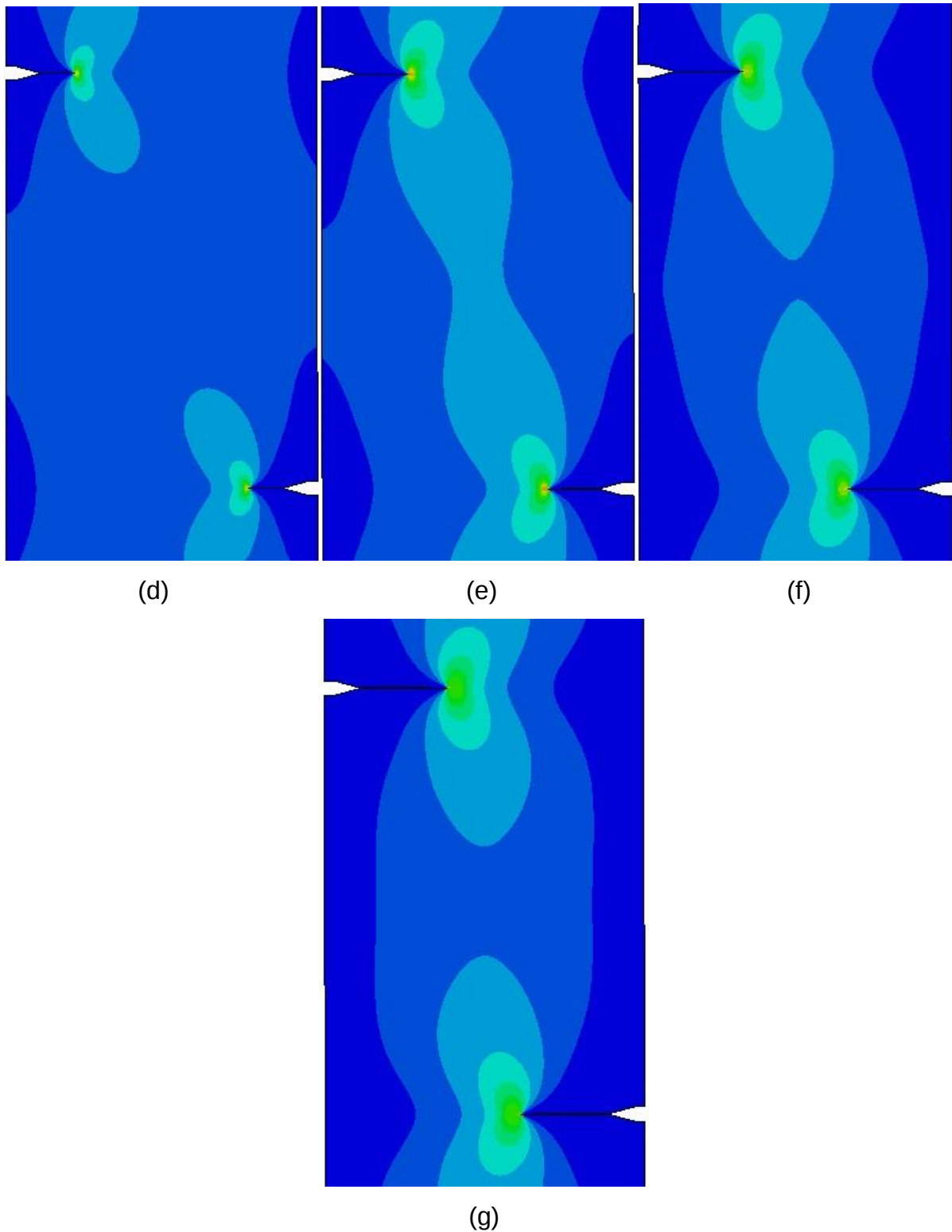
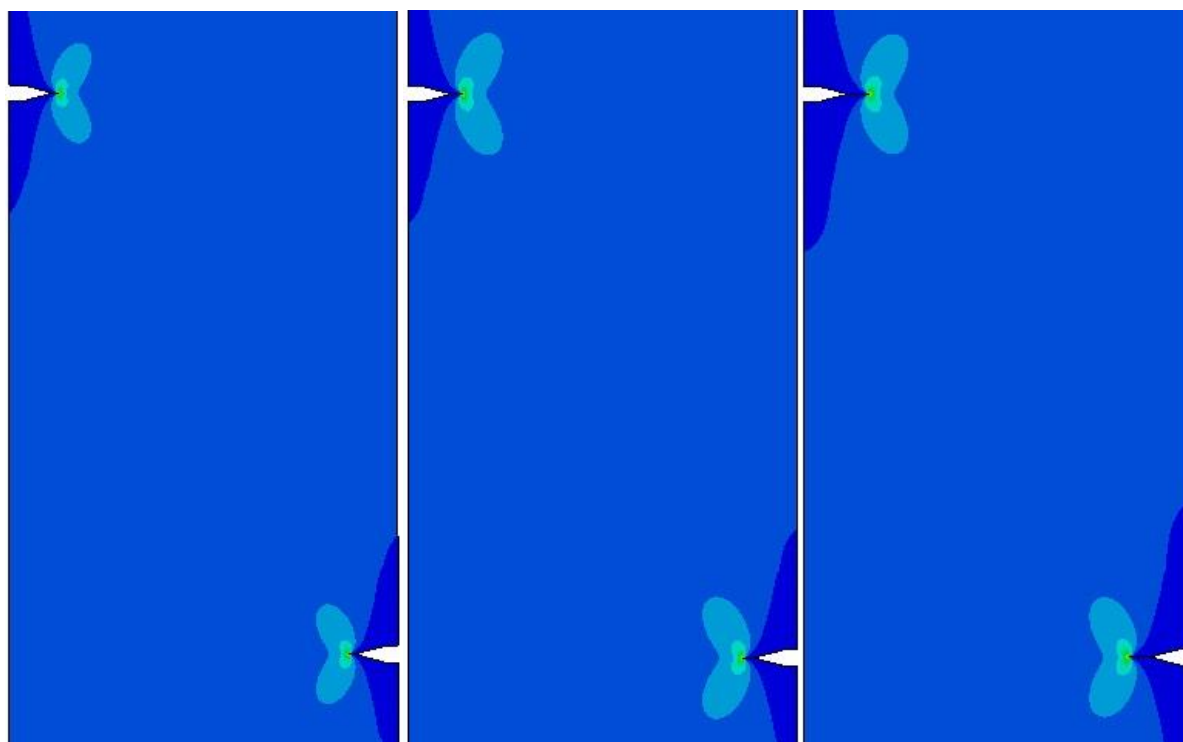


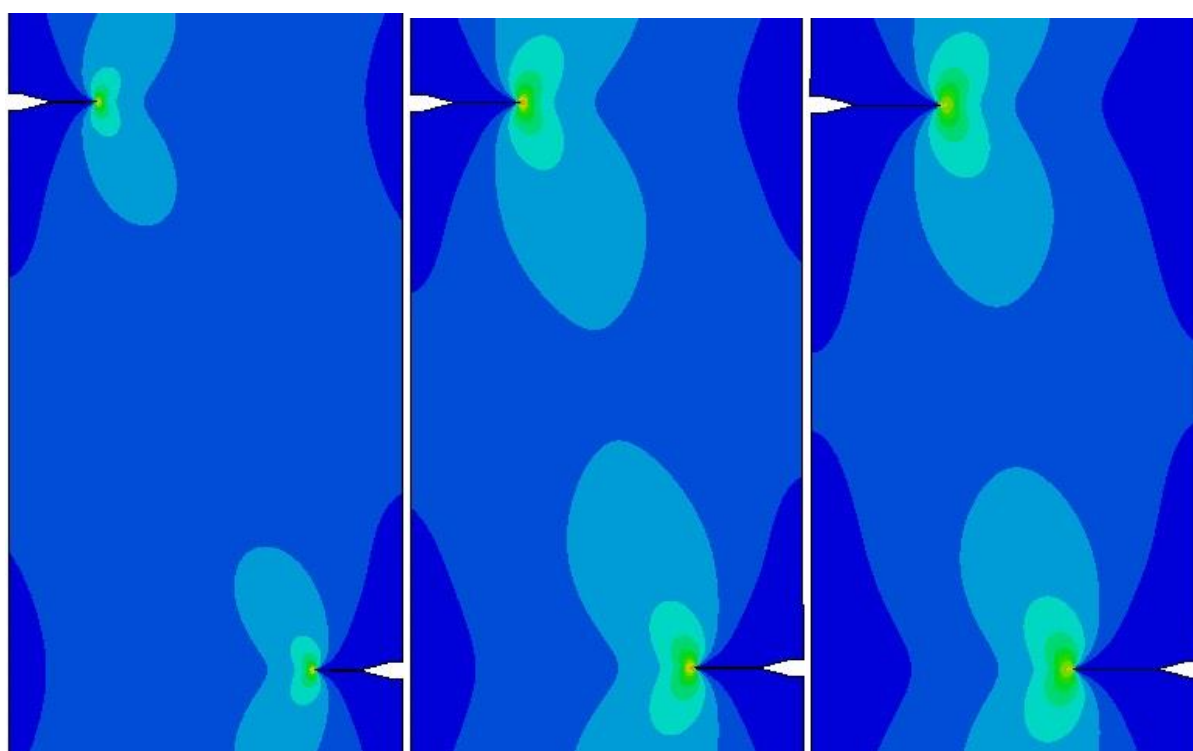
Figura 6.9 Campo de tensiones para una distancia entre entallas de 48 mm con una longitud de grietas de (a) 4.5 mm, (b) 5 mm, (c) 6 mm, (d) 8 mm, (e) 10 mm, (f) 12 mm, (g) 14 mm



(a)

(b)

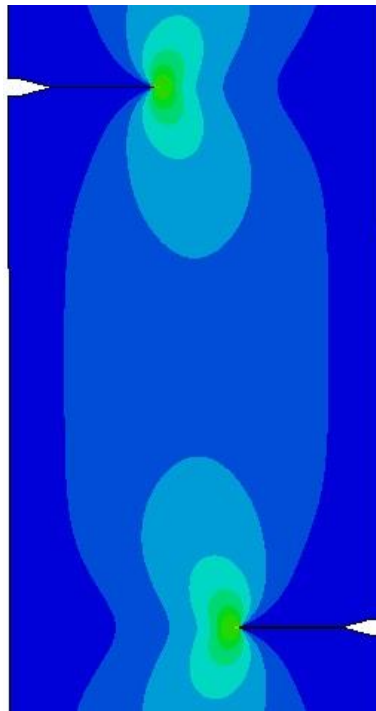
(c)



(d)

(e)

(f)



(g)

Figura 6.10 Campo de tensiones para una distancia entre entallas de 52 mm con una longitud de grietas de (a) 4.5 mm, (b) 5 mm, (c) 6 mm, (d) 8 mm, (e) 10 mm, (f) 12 mm, (g) 14 mm

Como se puede observar en las figuras anteriores referentes al campo de tensiones de manera cualitativa, se comprueba lo dicho en el análisis de manera cuantitativa. A medida que la longitud de grieta aumenta el campo de tensiones también lo hace. Y a medida que la distancia entre entallas aumenta hay una interacción entre las grietas pero que llega un instante en el que a partir de una cierta distancia entre entallas el efecto de la interacción entre grietas desaparece.

Para poder dar veracidad a estos resultados, se calculará analíticamente el factor de intensidad de tensiones para el caso de grietas alineadas mediante un prontuario. Para los restantes casos de grietas desalineadas no hay un prontuario donde comprobar los resultados pero, como la metodología empleada ha sido la misma en los diferentes análisis numéricos, se darán por correctos los resultados si coinciden los valores analíticos calculados para el caso de grietas alineadas con los valores obtenidos mediante el análisis numérico. Por tanto, como se ha dicho se hará uso de un prontuario (Figura 6.11).

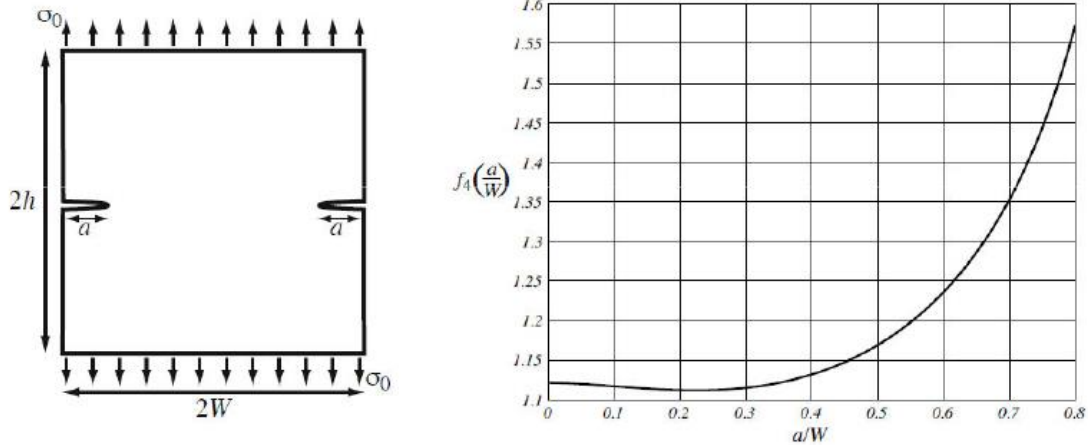


Figura 6.11 Obtención del resultado K de forma analítica para probeta DEN [3]

Se hará el cálculo para una grieta de 4.5 mm de longitud y se procederá de la misma forma a calcular K para las distintas longitudes de grieta. Se empleará la ecuación (7) vista en el capítulo de fundamentos teóricos.

$$K = Y\sigma\sqrt{\pi a}$$

Donde Y será $f_4\left(\frac{a}{W}\right)$ según la Figura 6.11.

$$Y = f_4\left(\frac{a}{W}\right) = f_4\left(\frac{4.5}{18}\right) = 1.115$$

$$K = 1.115 * \frac{2500 \text{ N}}{36 \text{ mm} * 1 \text{ mm}} \sqrt{\pi 0.0045} = 9.21 \text{ MPa}$$

En la tabla 7.2 se muestran todos los resultados analíticos para las distintas longitudes de grieta.

	s = 0 mm						
a (mm)	4.5	5	6	8	10	12	14
<i>K numérico</i> (MPa√m)	9.21	9.72	10.7	12.68	14.92	17.9	22.88
<i>K analítico</i> (MPa√m)	9.21	9.70	10.68	12.66	14.77	17.66	22.57

Tabla 7.2 Comparación entre los resultados de K analíticos y numéricos para el caso de grietas alineadas.

Como se puede comprobar los resultados analíticos de K coinciden con los resultados de K obtenidos mediante el análisis numérico. Hay más diferencia entre estos valores para un tamaño de grietas de 10 mm, 12 mm y 14 mm pero haciendo el error relativo se ve como el error cometido es mínimo, 1%, 1.34% y 1.35% respectivamente. Por tanto, se puede afirmar que los análisis numéricos realizados según la metodología desarrollada se pueden considerar correctos.

7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Para finalizar este trabajo se mencionarán las principales conclusiones observadas y posibles trabajos futuros. Como principales conclusiones, se establecen las siguientes:

- El factor de intensidad de tensiones se ve influenciado principalmente de la longitud de grieta y de la distancia entre entallas. A medida que la longitud de grieta va aumentando, el factor de intensidad de tensiones también lo hará. Y lo mismo ocurre con la distancia entre entallas, a medida que ésta aumenta el factor de intensidad de tensiones también lo hace. Sin embargo, para este último parámetro se ha observado que a partir de una determinada distancia el valor del factor de intensidad de tensiones se estabiliza, lo cual indica que a partir de esta distancia se pierden los posibles efectos originados por la interacción entre grietas.
- En relación a los campos de tensiones, se ha podido comprobar como la tensión equivalente aumenta a medida que la longitud de grieta también lo hace. Como se ha comentado anteriormente, esto era de esperar debido a que se produce un mayor daño sobre la probeta a medida que la longitud de grieta aumenta. Se ha comprobado también que para grietas alineadas se obtiene un perfil de tensiones simétrico pero que a medida que se pierde la simetría de la probeta se pierde la simetría del campo de tensiones. Esta observación se ha ratificado a través de un análisis cualitativo donde se representaron los campos de tensiones en las inmediaciones de los vértices de las grietas.
- En relación a la metodología, cabe destacar que el paso más importante para la realización de un análisis numérico es el mallado de la probeta. A través de un análisis de sensibilidad, se ha comprobado la influencia que

tiene en el campo de tensiones y como puede variar éste si no se seleccionan los valores correctos de las variables.

En vista de los resultados obtenidos y la metodología desarrollada, se podrían establecer los siguientes trabajos futuros:

- Estudio comparativo numérico-experimental: Realizar los ensayos experimentales oportunos con la finalidad de realizar un estudio comparativo entre los resultados experimentales y los numéricos.
- Comparación de métodos numéricos: En trabajos fin de grado previos se han llevado a cabo distintos análisis numéricos del crecimiento de grieta a fatiga en distintas geometrías de probeta empleando el método “XFEM”. Sin embargo, en el presente trabajo se ha empleado el método “Contorno Integral” ya que la determinación del factor de intensidad de tensiones era necesario. De esta forma, se podría emplear el método XFEM para modelar el crecimiento de grieta a fatiga en las mismas probetas DEN analizadas en este trabajo con el fin de establecer las distintas similitudes y diferencias que se observen en ambos métodos.

8. REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFÍA

- [1] Velázquez, G. (2004). *Mecánica de fractura* (2ª Edición ed.). Mexico: LIMUSA.
- [2] Anderson, T. (2005). *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications* (3ª Edición ed.). Boca Raton: CRC Press.
- [3] Temario de la asignatura Integridad estructural en elementos mecánicos.
- [4] ABAQUS Documentation