



Universidad de Oviedo

ESCUELA POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

**ÁREA DE MECÁNICA DE MEDIOS CONTINUOS Y TEORÍA DE
ESTRUCTURAS**

**INFLUENCIA DEL MATERIAL EN EL CRECIMIENTO DE GRIETA POR FATIGA:
UN ABORDAJE NUMÉRICO EN RELACIÓN AL PICC**

**D. ÁLVAREZ GARCÍA, SERGIO
TUTOR: D. MUÑIZ CALVENTE, MIGUEL**

FECHA: JULIO 2024

Índice

1. Introducción.....	9
1.1.- Contexto.	9
1.2.- Estado del arte.....	10
1.2.1.- Mecánica de la Fractura.	10
1.2.2.- Propiedades Mecánicas de los Materiales.	19
1.2.3.- Ensayo de fatiga con probeta CT.....	21
1.2.4.- Crecimiento de grieta por fatiga.....	24
1.2.5.- Cierre de la grieta inducido por plasticidad (PICC).	26
1.2.6.- Avances recientes en el estudio de la influencia del PICC en el crecimiento de grieta por fatiga.	28
1.3.- Motivación.....	29
1.4.- Objeto y Alcance.....	29
2. Desarrollo de la simulación.	30
2.1.- Software Utilizado.....	30
2.1.1.- Sistema de unidades.....	31
2.2.- Simulación del crecimiento de grieta.	32
2.3.- Geometría.....	34
2.3.1.- Simplificaciones.	35
2.3.2.- Particiones.	37
2.3.3.- Sets.	38
2.3.4.- Superficie Rígida.	38
2.4.- Material.	39
2.5.- Ensamblaje.....	40
2.6.- Interacción.....	41

2.7.- Pasos de análisis.	42
2.8.- Mallado.	43
2.9.- Condiciones de contorno.....	45
2.9.1.- Liberación de nodos.....	47
2.10.- Carga.	48
2.11.- Datos de salida.....	49
3. Resultados.....	51
3.1.- Análisis del factor intensidad de tensión.	51
3.2.- Cierre de grieta inducido por plasticidad.	53
3.2.1.- P_{op}/P_{max} Acero S275.....	54
3.2.2.- P_{op}/P_{max} acero S335.	55
3.2.3.- P_{op}/P_{max} comparativa	56
4. Conclusiones.	57
5. Trabajo futuro.	58
6. Planificación temporal del proyecto.....	59
7. Presupuesto.	61
7.1.- Equipos y programas de software.	61
7.2.- Horas de trabajo empleadas.....	62
7.3.- Presupuesto Final.	63
8. Referencias.....	64
Anexo A: Código implementado para la simulación del modelo.	67
Anexo B: Scripts desarrollados para extraer los resultados de Abaqus.	75

Lista de figuras

Figura 1.1.- Modos de carga.	11
Figura 1.2.- Relación entre la energía potencial y la energía de deformación elástica en un sólido elástico.	12
Figura 1.3.- Probeta CT según norma ASTM-E647-23 [6].	13
Figura 1.4.- Representación zona plástica en el frente de grieta.....	15
Figura 1.5.- Representación del CTOD.	16
Figura 1.6.- Camino de integración utilizado en la Integral J [20].	18
Figura 1.7.- Representación Modulo de Young.....	20
Figura 1.8.- Geometría de la probeta CT definida en la norma ASTM-E647-23 [6].	22
Figura 1.9.- Ciclo de fatiga R=-1.	23
Figura 1.10.- Zonas de crecimiento grieta por fatiga [21].....	24
Figura 1.11.- Representación del PICC [22].	26
Figura 1.12.- Representación incremento SIF efectivo [25].	27
Figura 2.1.- Representación modelo liberación de nodos [13].....	33
Figura 2.2.- Esquema de las filas de nodos que simulan el crecimiento de la grieta [13]...	33
Figura 2.3.-Representación ciclo de carga de la simulación [11].	34
Figura 2.4.- Representación simetría 1/4 probeta CT.	36
Figura 2.5.- Geometría probeta CT utilizada.....	36
Figura 2.6.- Particiones modelo probeta CT.....	37
Figura 2.7.- Superficie Rígida.	39
Figura 2.8.- Ensamblaje de la simulación.....	40
Figura 2.9.- Representación de las interacciones del modelo.	42
Figura 2.10.- Malla en la dirección del espesor, plano XZ.....	44
Figura 2.11.- Malla inicial antes de iterar.....	45
Figura 2.12.- Condiciones de contorno.....	46
Figura 2.13.- Desactivación escalonada de las BC.	48
Figura 3.1.- Distribución del ΔK a lo largo del espesor para el S275	51
Figura 3.2.- Distribución del ΔK a lo largo del espesor para el S335.	52
Figura 3.3.-Evolución del SIF en el nodo de máxima carga S275.....	52

Figura 3.4.-Evolución del SIF en el nodo de máxima carga S335.....	53
Figura 3.5.- Representación P_{op}/P_{max} Acero S275	54
Figura 3.6.- Representación P_{op}/P_{max} Acero S335.	55
Figura 3.7.- Comparativa S275 vs S335.....	56
Figura 6.1.- Diagrama de Gantt del proyecto.....	60

Lista de tablas

Tabla 1.1.- Leyes crecimiento de grieta [24].	26
Tabla 2.1.- Sistema de unidades.	32
Tabla 2.2.- Parámetros de los materiales utilizados [26].	40
Tabla 7.1.- Costes equipos utilizados.	61
Tabla 7.2.- Costes software utilizado.	62
Tabla 7.3.- Coste horas de trabajo.	62
Tabla 7.4.- Presupuesto de ejecución del proyecto.	63

Lista de Abreviaturas

FCG: Fatigue crack Growth (crecimiento de grieta por fatiga).

PICC: Plasticity induced crack closure (cierre de la grieta inducido por plasticidad).

MFEL: Mecánica de la fractura elástico lineal.

MFEP: Mecánica de la fractura elastoplástica.

SIF: Stress intensity factor (factor intensidad de tensión)

CT: Compact tensión (tensión compacta).

CTOD: Crack tip opening displacement (apertura del frente de grieta).

Lista de Símbolos

a: Longitud de grieta.	$r_{p,l}$: Radio plástico de Irwin.
a_c : Longitud de grieta crítica.	$r_{p,d}$: Radio plástico de Dugdale.
a_0 : Longitud de grieta inicial.	R: Relación de carga.
A: Área.	$(\Delta)K$: Factor intensidad de tensión.
B: Espesor.	K_c : Tenacidad a fractura.
W: Ancho.	K_{op} : Tenacidad a fractura al abrirse la grieta.
E: Modulo de Young.	$(\Delta)K_{th}$: Factor intensidad de tensión umbral.
G: Tasa de liberación.	ΔK_{eff} : Incremento del factor intensidad de tensión efectivo.
ν : Coeficiente de Poisson.	$\Delta CTOD$: Incremento del CTOD.
P: Carga.	$CTOD_c$: CTOD crítico.
P_{op} : Carga de apertura.	$CTOD_e$: Componente elástica del CTOD.
σ : Tensión.	$CTOD_p$: Componente plástica del CTOD.
σ_a : Tensión alterna.	Σ : Componentes del tensor de tensiones de Cauchy efectivo.
σ_m : Tensión media.	
σ_y : Limite elástico.	
σ_v : Tensión de Von Mises.	
ϵ : Deformación.	
N: Número de ciclos.	

1. Introducción.

1.1.- CONTEXTO.

Cualquier componente mecánico o estructural posee grietas, defectos o discontinuidades de diversos tamaños. La presencia de estas grietas provoca un aumento de las tensiones locales, actuando como un concentrador de tensiones y disminuyendo la capacidad del componente de soportar esfuerzos [1]. Además, dado que la mayoría de los componentes operan bajo cargas cíclicas durante su vida útil, fenómeno conocido como fatiga, se produce la nucleación de nuevas discontinuidades y el crecimiento de las grietas existentes (*“Fatigue Crack Growth”* (FCG)). Eventualmente, estas grietas pueden alcanzar un tamaño crítico que provoca el colapso del componente.

El fallo por fatiga tiene unas repercusiones económicas importantes, en 1983 el Instituto Nacional de Estándares y Tecnología de Estados Unidos estimó el coste debido a fallos por fatiga en 119 billones de dólares anuales [2]. Además de las repercusiones económicas, es más importante aún destacar las repercusiones medioambientales y sociales, ya que debido al colapso por fatiga de estructuras o componentes mecánicos se han producido accidentes resultando en el vertido de sustancias peligrosas o la pérdida de vidas humanas [3,4].

Podemos observar que, desde un punto de vista ingenieril, es muy importante conocer el fenómeno de fatiga con el fin de prevenir estos accidentes tanto en el diseño como en la evaluación de componentes en servicio. La fatiga produce la nucleación de nuevas grietas [5], por lo que en muchas ocasiones se considera la existencia de grietas o discontinuidades como algo inevitable, que conlleva utilizar enfoques de cálculo centrándose en poder predecir el FCG de las grietas ya existentes. De esta manera, sabiendo la evolución que va a tener la grieta en función de los ciclos de carga, podemos determinar la vida útil del componente y sustituir antes de que se produzca el fallo.

Además, cabe mencionar que la velocidad de crecimiento por fatiga de las grietas está influenciada directamente por la plasticidad del material, ya que materiales con mayor plasticidad tienden a absorber más energía antes de fracturarse, lo que puede ralentizar la propagación de las grietas. En contraste, materiales con menor plasticidad son más susceptibles a una rápida propagación de grietas bajo cargas cíclicas [19].

Por lo tanto, se considera interesante realizar una revisión del estado del arte en cuanto a los principales conceptos que condicionan el crecimiento de vida por fatiga y, posteriormente, desarrollar un modelo numérico que permita evaluar la influencia del tipo de material (plasticidad) en la velocidad de crecimiento.

1.2.- ESTADO DEL ARTE.

Con el fin de permitir al lector entender el enfoque y el desarrollo del trabajo realizado en este proyecto, se realiza una descripción de los principales factores y leyes que afectan al FCG.

1.2.1.- Mecánica de la Fractura.

El objetivo de la teoría de la mecánica de la fractura es poder analizar y predecir el comportamiento mecánico de cualquier elemento estructural agrietado sometido a esfuerzos externos. Para esto, parte de la base de que todos los elementos cuentan con grietas de mayor o menor tamaño. En función de tres parámetros, la tensión aplicada, el tamaño de la grieta más grande y la tenacidad a la fractura, esta teoría define una ecuación mediante la cual conociendo dos parámetros se puede determinar el tercero [7]. La tenacidad a fractura (K_{IC}) es una propiedad mecánica del material la cual define la capacidad que tiene para resistir la propagación inestable de las grietas.

En la mecánica de la fractura se definen tres modos de carga los cuales pueden actuar individualmente o combinados (Figura 1.1):

- Modo I: Tensión aplicada normalmente al plano de fractura

- Modo II: Tensión de cortadura que se aplica en una dirección normal al frente de la grieta
- Modo III: Tensión de cortadura que se aplica en una dirección paralela al frente de la grieta

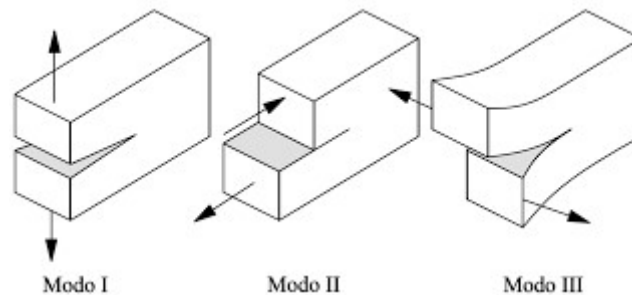


Figura 1.1.- Modos de carga.

En función de las consideraciones respecto a la influencia de la elasticidad y la plasticidad en la fractura, la teoría de la mecánica de la fractura se divide en dos enfoques:

- Mecánica de la fractura elástico lineal (MFEL)
- Mecánica de la fractura elastoplástica (MFEP)

1.2.1.1.- Mecánica de la fractura elástico lineal.

La MFEL define la fractura de los materiales que presentan un comportamiento perfectamente elástico en los que la zona plástica desarrollada delante de la grieta es despreciable.

Los parámetros característicos de la fractura elástico lineal son la tasa de liberación de energía (G) y factor intensidad de tensión (K).

1.2.1.1.1.- Tasa de liberación de energía.

La tasa de liberación de energía define la cantidad de energía liberada por unidad de área de la superficie de grieta creada en el avance de grieta en el material. Esta tasa se calcula como la derivada de la energía potencial total del sistema con respecto al área de la superficie de la grieta. Al tratarse de un sólido completamente elástico, se puede relacionar la energía potencial con la energía de deformación elástica, siendo estas iguales en magnitud, pero de signo contrario (Figura 1.2). De esta manera utilizando la ecuación de Griffith para medir la energía de deformación elástica (ecuación 1.1) podemos definir la tasa de liberación de energía en función de la tensión (σ), el módulo de Young (E) y el tamaño de la grieta (a) (ecuación 1.2).

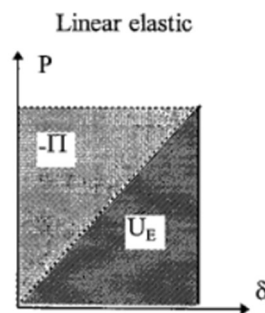


Figura 1.2.- Relación entre la energía potencial y la energía de deformación elástica en un sólido elástico.

$$UE = \frac{\pi \cdot \sigma^2 \cdot a^2 \cdot B}{E} \quad (1.1)$$

$$G = -\frac{1}{2} \frac{\partial \Pi}{\partial A} = \frac{1}{2} \frac{\partial UE}{\partial A} = \frac{\pi \cdot \sigma^2 \cdot a}{E} \quad (1.2)$$

La fractura se produce cuando la tasa de liberación de energía supera la resistencia al avance de la grieta (R), definida por Griffith en un sólido elástico como $R=2 \cdot \gamma$, siendo γ la energía superficial del sólido.

1.2.1.1.2.- Factor de intensidad de tensión.

El factor de intensidad de tensiones (SIF) describe el comportamiento de las tensiones cerca de la punta de grieta. Para calcularlo en el modo I de carga se utiliza la siguiente expresión matemática (ecuación 1.3):

$$K_I = C * \sigma * \sqrt{\pi * a} \quad (1.3)$$

Donde C es un factor adimensional dependiente de la geometría. Existen diferentes publicaciones las cuales recogen los valores de las funciones C características de geometrías muy variadas. En la ecuación 1.4 podemos observar la función que define el factor de intensidad de tensión para una probeta de tensión compacta (CT) (Figura 1.3) definida según la norma ASTM-E647-23 [6].

$$K_I = \frac{P}{B\sqrt{W}} \frac{\left(2 + \frac{a}{W}\right) \left[0.886 + .64\left(\frac{a}{W}\right) - 13.32\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72\left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.6\left(\frac{a}{W}\right)^4\right]}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (1.4)$$

Donde P es el valor de la carga aplicada en cada orificio y el resto son los factores geométricos definidos en la Figura 1.3

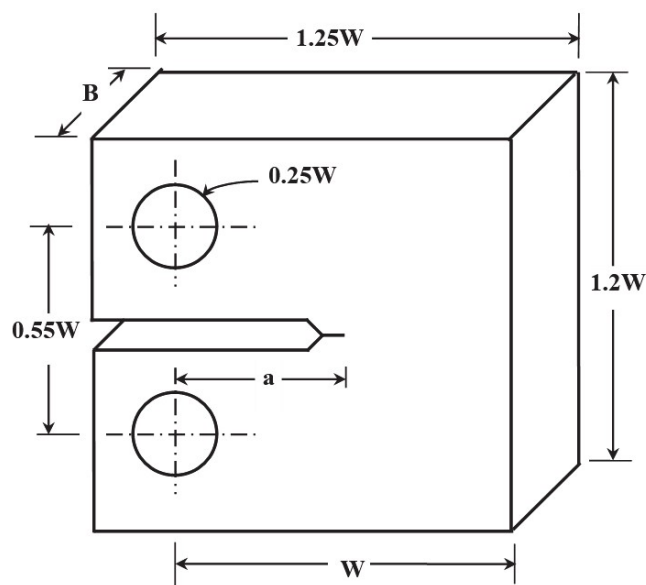


Figura 1.3.- Probeta CT según norma ASTM-E647-23 [6].

El criterio de rotura se establece cuando el valor del SIF alcanza un valor crítico, la tenacidad a fractura del material, para el modo de aplicación, en este caso modo I:

$$K_I = K_{IC} \quad (1.5)$$

En los sólidos completamente elásticos el SIF y la tasa de liberación de nodos están relacionados, pudiendo expresar esta relación según la siguiente ecuación:

$$G = \frac{K^2}{E'} \quad (1.6)$$

Donde E' es igual al módulo elástico del material (E) en situaciones de tensión plana, mientras que en situaciones de deformación plana vale $E/(1-\nu^2)$, siendo ν el coeficiente de Poisson del material.

1.2.1.2.- Mecánica de la fractura elastoplástica.

La teoría de la MFEP busca poder determinar las tensiones y deformaciones que se generan en un frente de grieta en componentes agrietados, los cuales presentan un comportamiento plástico significativo antes de producirse la rotura. Este comportamiento plástico da lugar a una fractura dúctil, en la que el material se deforma antes de producirse la fractura. Debido a que los únicos materiales que tienen un comportamiento perfectamente elástico son los cerámicos y un número reducido de metales y plásticos, la MFEP permite analizar el comportamiento en servicio de la mayoría de los componentes formados por metales, los cuales presentan un comportamiento elastoplástico.

Los principales factores que definen la MFEP son:

- Zona plástica
- Desplazamiento de Apertura en la Punta de la Grieta (más conocido como “*Crack Tip Opening Displacement*” (CTOD))
- Integral J

1.2.1.2.1.- Zona plástica.

El comportamiento plástico que presentan los materiales hace que se origine una zona de deformación plástica alrededor del frente de grieta (Figura 1.4 (a)). En esta zona plástica el material ha sufrido una deformación plástica, es decir, una deformación permanente. En la zona plástica las tensiones se redistribuyen y relajan, previniendo la propagación inmediata de la grieta [8]. Los métodos empleados para la medición de esta zona plástica suelen utilizar un estudio 2D asumiendo un estado de deformación plana, cuando la deformación en una de las tres direcciones principales es despreciable, o tensión plana, cuando una de las tensiones principales es despreciable. En la Figura 1.4(b) se muestra la zona plástica en función de estas aproximaciones.

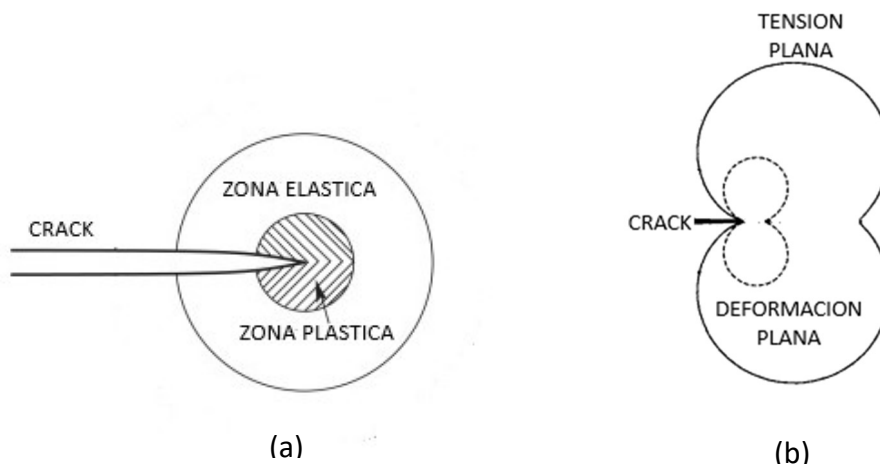


Figura 1.4.- Representación zona plástica en el frente de grieta.

George R. Irwin [7, 8] establece una ecuación (ecuación 1.7) para definir la zona plástica en base a su radio. Para ello toma la consideración de un estado de deformación plana siguiendo la teoría de la MFEL.

$$r_{p,I} = \frac{1}{\pi} \left(\frac{K_{max}}{\sigma_y} \right)^2 \quad (1.7)$$

Por otra parte, Donald S. Dugdale [7, 8] también establece una ecuación para poder medir el radio plástico (ecuación 1.8), en su caso asumiendo una tensión plana siguiendo la teoría de la MFEP.

$$r_{p,D} = \frac{\pi}{8} \left(\frac{K_{max}}{\sigma_y} \right)^2 \quad (1.8)$$

Donde σ_y es el límite a fluencia del material y K_{max} el valor máximo del SIF.

1.2.1.2.2.- Desplazamiento de abertura en la punta de la grieta (CTOD).

El CTOD es una medida de cuánto se abre una grieta en su punta cuando el material está sometido a una carga (Figura 1.5). Representa la distancia entre los labios de la grieta en el punto más cercano a la punta de la misma y es una indicación directa de la ductilidad y la capacidad del material para deformarse plásticamente antes de la fractura.

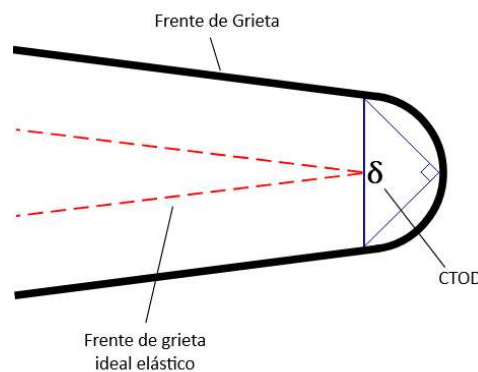


Figura 1.5.- Representación del CTOD.

Se ha podido determinar que el CTOD guarda una relación directa con el SIF (ecuación 1.9). De esta manera se puede establecer un criterio de rotura similar al del SIF en el MFEL, en el que el fallo se produce cuando el CTOD alcanza un valor crítico (CTOD_c) característico de cada material, a partir del cual se produce el crecimiento incontrolado de la grieta dando lugar a la fractura del material [7].

$$CTOD_c = \frac{K^2}{\lambda \sigma_y E'} \quad (1.9)$$

Donde λ es una constante que varía entre 1 (tensión plana) y 2 (deformación plana), σ_y es el límite a fluencia del material y E' es el módulo elástico del material (E) en tensión plana y $E/(1-\nu^2)$ en el caso de deformación plana, siendo ν el coeficiente de Poisson.

Para poder comprender la evolución de la grieta, en base al CTOD, se establece el incremento del CTOD ($\Delta CTOD$). El $\Delta CTOD$ define la evolución del CTOD durante un ciclo de carga y se calcula como la diferencia entre el valor máximo y mínimo de este durante el ciclo (ecuación 1.10).

$$\Delta CTOD = CTOD_{max} - CTOD_{min} \quad (1.10)$$

Debido al comportamiento plástico del material, el $\Delta CTOD$ estará caracterizado por una componente elástica ($\Delta CTOD_e$) y una componente plástica ($\Delta CTOD_p$) (ecuación 1.11), estando la componente plástica relacionada con una deformación de carácter permanente.

$$\Delta CTOD = \Delta CTOD_e + \Delta CTOD_p \quad (1.11)$$

1.2.1.2.3.- Integral J.

Actualmente, la integral de contorno J es el parámetro más empleado para caracterizar la fractura de los materiales con comportamiento elastoplástico. El concepto de la integral J es el mismo utilizado en los apartados anteriores para describir la tasa de liberación de energía en la MFEL. De esta manera la integral J representa energía de fractura, es decir, la energía disponible para el crecimiento de una unidad de superficie de grieta. El valor de la integral J se puede calcular aplicando una integral de contorno a lo largo de un camino que partiendo de una cara de la grieta llegue hasta la otra cara (Figura 1.6).

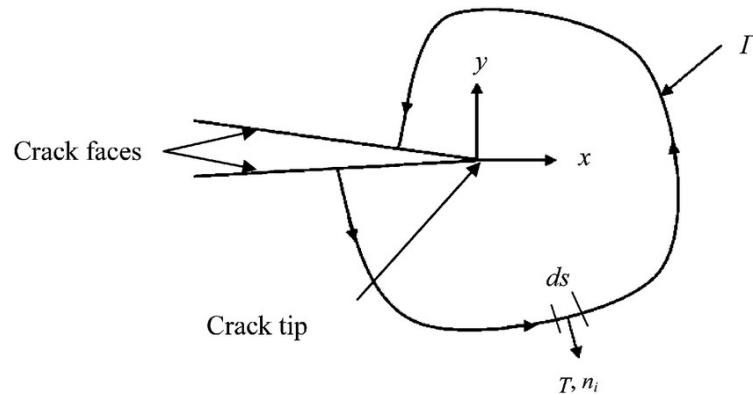


Figura 1.6.- Camino de integración utilizado en la Integral J [20].

Por otra parte, la integral J puede definirse experimentalmente a partir de los datos obtenidos en el ensayo con probeta compacta CT. Para ello se utiliza el área bajo la curva carga-desplazamiento y la energía liberada por la grieta [7]:

$$J = \frac{2 A}{B (W-a)} \quad (1.12)$$

Donde 'A' es el área bajo la curva carga-desplazamiento, 'B' es el espesor de la probeta, 'W' es el ancho de la probeta y 'a' la longitud de la grieta.

De igual manera que en los casos anteriores, se puede definir el criterio de rotura en función de un valor crítico de la integral J (J_c), característico para cada material, a partir del cual se produce el fallo del material.

Por otra parte, al igual que en el caso de la MFEL con los parámetros K y G, se puede relacionar el parámetro J con el CTOD [7]:

$$J = \lambda \sigma_y CTOD \quad (1.13)$$

Donde σ_y es el límite a fluencia del material y es una constante que varía entre 1 y 2 en función del coeficiente de endurecimiento por deformación del material (n), pudiendo considerar aproximadamente 2 en el caso de materiales dúctiles y de relativamente baja resistencia.

1.2.2.- Propiedades Mecánicas de los Materiales.

Las propiedades mecánicas son características propias de cada material las cuales definen su comportamiento bajo las condiciones de carga a las que está sometido. Estas propiedades se caracterizan mediante la realización de diferentes ensayos que permiten definir unos parámetros que reflejen su comportamiento mediante un valor numérico.

En el contexto del crecimiento de grieta por fatiga, los parámetros con una mayor relevancia son aquellos que definen el comportamiento elástico y plástico del material.

1.2.2.1.- Comportamiento elástico.

Los parámetros utilizados para definir el comportamiento elástico de los materiales son el Módulo de Young, el coeficiente de Poisson y el límite elástico.

El Módulo de Young (E), también conocido como módulo de elasticidad, es un parámetro que representa la rigidez del material, es decir, mide la capacidad que tiene el material para resistir una deformación bajo una carga aplicada. Se define como la pendiente de la curva tensión-deformación del material en su rango de comportamiento elástico en forma lineal (Figura 1.7). Matemáticamente se define mediante la ley de Hook (ecuación 1.14) [7].

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (1.14)$$

donde σ representa la tensión en Pascales (Pa) y ε la deformación longitudinal. La deformación longitudinal es el incremento de la longitud en función de la longitud inicial, tratándose de un parámetro adimensional. Por lo tanto, el Módulo de Young se define en el SI en Pascales (Pa).

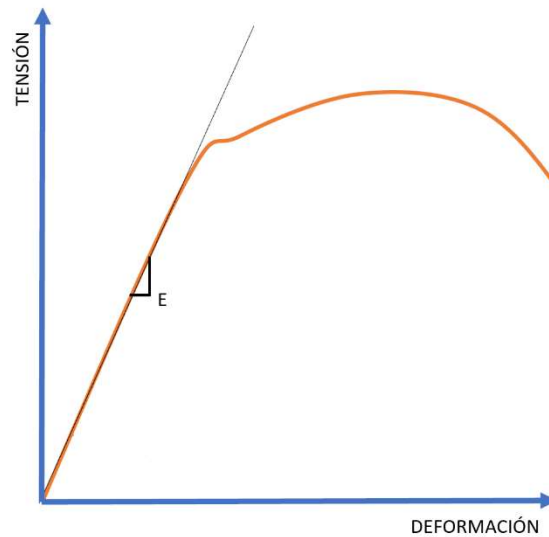


Figura 1.7.- Representación Modulo de Young.

El coeficiente de Poisson (ν) es una propiedad de los materiales que describe la relación entre la deformación transversal y longitudinal que experimenta el material al ser sometido a una carga. Al tratarse de una relación entre deformaciones, se trata de un parámetro adimensional.

El límite elástico define el esfuerzo máximo que un material puede soportar sin experimentar deformación plástica, es decir, la tensión a partir de cual parte de la deformación del material es permanente. Gráficamente (Figura 1.7), corresponde con el punto en el que la gráfica pierde su comportamiento lineal. Sus unidades en el SI son Pa.

1.2.2.2.- Comportamiento plástico.

Existen numerosos parámetros y leyes que pueden definir el comportamiento plástico del material. Acorde al trabajo realizado por F.V. Antunes [15], para representar el comportamiento plástico producido durante el crecimiento de una grieta, se recomienda el uso combinado del criterio de fluencia de Von Mises y la ley de endurecimiento cinemático de Chaboche.

El criterio de fluencia de Von Mises predice el inicio de la fluencia del material bajo cualquier estado de carga. Este criterio supone que la fluencia comienza cuando la energía de distorsión alcanza un valor crítico. Matemáticamente se representa mediante la ecuación:

$$(\Sigma_{22} - \Sigma_{33})^2 + (\Sigma_{33} - \Sigma_{11})^2 + (\Sigma_{11} - \Sigma_{22})^2 + 6(\Sigma_{23}^2 + \Sigma_{13}^2 + \Sigma_{12}^2) = 2\sigma_v^2 \quad (1.15)$$

donde las Σ representan las componentes del tensor de tensiones de Cauchy efectivo y σ_v es la tensión equivalente de Von Mises. La deformación plástica se produce cuando la tensión equivalente de Von Mises alcanza el valor crítico, definido por el límite elástico del material.

La ley de Chaboche define el comportamiento de endurecimiento cinemático no lineal de los materiales bajo cargas cíclicas. Combina tanto el endurecimiento cinemático como isotrópico para obtener una representación precisa de la respuesta del material. La ley de Chaboche se define mediante una ecuación diferencial:

$$d\alpha_i = \frac{2}{3}C_i d\varepsilon^p - \gamma_i \alpha_i d\varepsilon^p \quad (1.16)$$

donde α_i es la variable de endurecimiento cinemático, $d\varepsilon^p$ es el incremento de la deformación plástica y C_i y γ_i son parámetros que definen el material. Por lo tanto, para definir un material es necesario definir sus parámetros característicos C_i y γ_i . El parámetro C representa el endurecimiento cinemático de material y se mide en Pa. El parámetro γ define la velocidad de saturación del endurecimiento cinemático y es adimensional.

1.2.3.- Ensayo de fatiga con probeta CT.

Uno de los ensayos más utilizados para poder analizar las propiedades mecánicas de los materiales y su comportamiento en situaciones de fatiga es el ensayo de fatiga con probeta compacta (“Compact Tensión” (CT)), el cual está definido por la norma ASTM E647-23 [6].

En esta normativa se puede observar la geometría de la probeta CT, donde las dimensiones de la probeta están parametrizadas en función del ancho de esta (W) (ver Figura 1.8)

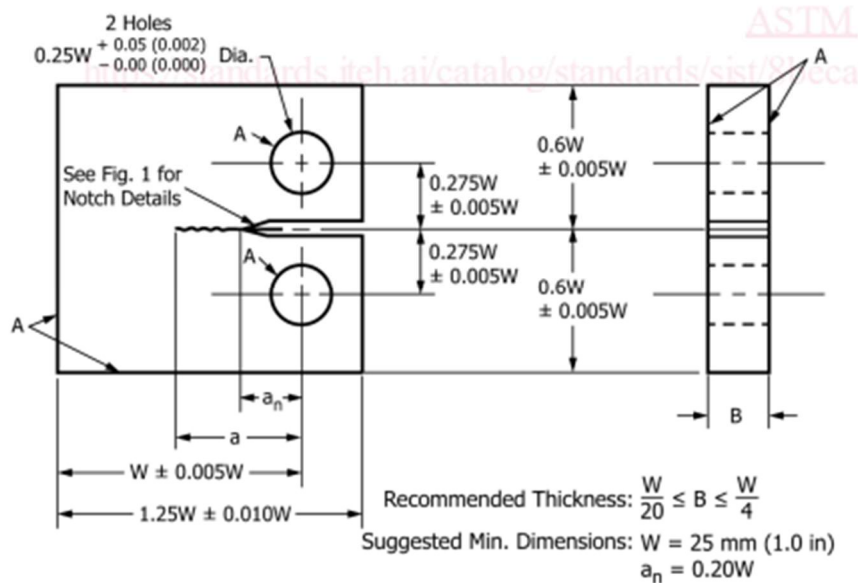


Figura 1.8.- Geometría de la probeta CT definida en la norma ASTM-E647-23 [6].

En este ensayo de fatiga presenta una situación de carga Modo I, en la que la carga se aplica perpendicular al plano de la grieta en los orificios de la probeta. Uno de los parámetros que definen el ciclo de fatiga utilizado es la relación de carga (R), el cual muestra la relación entre la tensión mínima y máxima aplicadas en el ensayo:

$$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \quad (1.17)$$

Un factor R igual a -1 (Figura 1.9) representa un ciclo simétrico donde la carga mínima tiene el mismo módulo que la carga máxima y signo contrario, un factor R igual a 0 representa un ciclo con carga mínima nula.

Los otros parámetros para representar el ciclo de fatiga son (Ver Figura 1.9) la tensión alterna:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \quad (1.18)$$

y la tensión media:

$$\sigma_m = \frac{\Delta\sigma}{2} \quad (1.19)$$

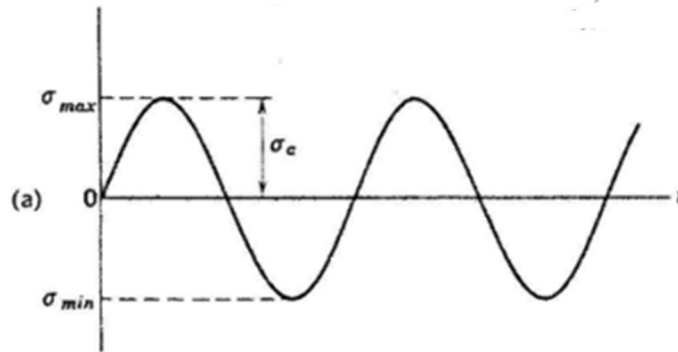


Figura 1.9.- Ciclo de fatiga R=-1.

Durante el ensayo, la probeta cuenta con un extensómetro situado en la zona de la entalla, el cual permite medir la evolución del CTOD durante el ensayo. Además, se registra la evolución de la longitud de la grieta en función de las cargas aplicadas y el número de ciclos.

Uno de los parámetros característicos del ensayo es el incremento del factor de intensidad de tensión (ΔK), el cual describe la amplitud del factor de intensidad de tensión en la punta de una grieta durante un ciclo de carga. Se define como la diferencia entre los valores máximo y mínimo del SIF durante un ciclo de carga (ecuación 1.20).

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \quad (1.20)$$

Además, se puede determinar el valor de las constantes características de cada material utilizadas en la ley de Paris (ecuación 1.21). La ley de Paris permite predecir la tasa de crecimiento de la grieta por ciclo de carga (da/dN) en función del incremento del factor intensidad de tensión.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1.21)$$

Donde C y m son las constantes características del comportamiento del material.

1.2.4.- Crecimiento de grieta por fatiga.

Ya que la presencia de grietas en componentes y estructuras es inevitable, es preciso conocer el proceso de crecimiento de dichas grietas con el fin de poder predecir la vida útil del componente antes de producirse el fallo por fatiga.

El proceso por el que una grieta crece hasta alcanzar un valor crítico en el que se produce el fallo, se suele representar mediante un gráfico que presente el incremento del SIF (ΔK) frente a la velocidad de crecimiento de la grieta por ciclo de carga (da/dN), ambos en escala logarítmica (ver Figura 1.10) [7]. El crecimiento de la grieta representado se puede dividir en tres regiones (I, II y III). Existe un valor umbral del ΔK (ΔK_{th}) por debajo del cual no se produce el crecimiento de la grieta, por lo tanto, en situaciones de carga por debajo de este valor el material podrá aguantar un número infinito de ciclos sin producirse el fallo por fatiga.

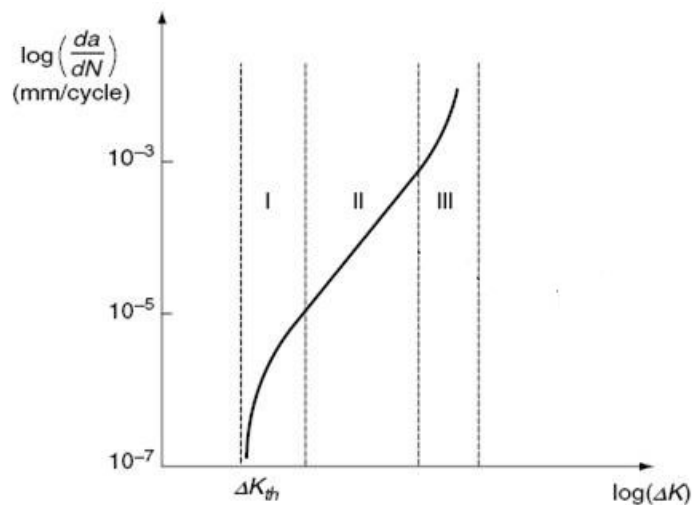


Figura 1.10.- Zonas de crecimiento grieta por fatiga [21].

La región I corresponde a la aplicación de valores de ΔK muy pequeños en los que la velocidad de crecimiento de la grieta también es pequeña.

En la región II se puede apreciar un comportamiento lineal de la grieta en el cual existe una pendiente constante (m). En esta zona el crecimiento de la grieta se puede definir mediante la ley de Paris (ecuación 1.21) [7], donde C y m son las constantes características de cada material. La ley de Paris no depende ni de la forma del ciclo de carga ni de la frecuencia.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1.21)$$

Finalmente, en la región III se aplica un valor del SIF muy alto próximo a la tenacidad a fractura del material. En esta zona la grieta crece a gran velocidad, produciéndose en breves la rotura del material.

Para determinar la vida a fatiga del material se suelen despreciar los efectos en las regiones I y III, estimándose únicamente utilizando la ley de la región II. Por lo tanto, se obtiene el número máximo de ciclos integrando la ecuación de Paris (ecuación 1.22), donde N son el número de ciclos, a_c el tamaño de grieta crítica y a_0 el tamaño de grieta inicial.

$$N = \int_{a_0}^{a_c} \frac{da}{C\Delta K^m} \quad (1.22)$$

La ley de Paris es la ley más empleada para definir el crecimiento de grietas por fatiga debido a su simplicidad y efectividad. Sin embargo, también cabe mencionar la existencia de otras leyes igualmente válidas que pueden ser más precisas, pero de aplicación más compleja (ver Tabla 1.1).

Crack growth law	General expression	Developed expression
Paris	$\frac{da}{dN} = C \Delta K^n$	$\frac{da}{dN} = C \left(K_{\max} \left(1 - \frac{P_{\min}}{P_{\max}} \right) \right)^n$
Walker	$\frac{da}{dN} = C \left(\frac{\Delta K}{(1-R)^{1-m}} \right)^n$	$\frac{da}{dN} = C \left(K_{\max} \left(1 - \frac{P_{\min}}{P_{\max}} \right) \right)^n$
Elber	$\frac{da}{dN} = C \Delta K_{\text{eff}}^n$	$\frac{da}{dN} = C \left(K_{\max} \left(1 - \frac{P_{\text{op}}}{P_{\max}} \right) \right)^n$
Forman and Mettu (NASGRO equation)	$\frac{da}{dN} = C \Delta K_{\text{eff}}^n \frac{\left(1 - \frac{\Delta K_{\text{th}}}{\Delta K} \right)^p}{\left(1 - \frac{K_{\text{max}}}{K_{\text{mat}}} \right)^q}$	$\frac{da}{dN} = C \left(K_{\max} \left(1 - \frac{P_{\text{op}}}{P_{\max}} \right) \right)^n \frac{\left(1 - \frac{\Delta K_{\text{th}}}{\Delta K} \right)^p}{\left(1 - \frac{K_{\text{max}}}{K_{\text{mat}}} \right)^q}$
Gu and Ritchie	$\frac{da}{dN} = \beta \Delta \text{CTOD}$	–
Dowling and Begley	$\frac{da}{dN} = C \Delta J^n$	–

Tabla 1.1.- Leyes crecimiento de grieta [24].

1.2.5.- Cierre de la grieta inducido por plasticidad (PICC).

Debido a la deformación plástica originada en torno al frente de grieta y la consecuente reducción de los efectos de la tensión [9], se produce un cierre parcial del frente de grieta denominado cierre de grieta inducido por plasticidad y conocido por sus siglas en inglés PICC. El PICC reduce la parte del ciclo de carga que es efectivamente aplicada en la punta de la grieta, disminuyendo así la fuerza impulsora para el crecimiento de la grieta. De este modo, durante la aplicación de la carga, el frente de grieta permanecerá cerrado hasta que se supera un cierto valor de la carga, conocido como carga de apertura (P_{op}), a partir de este punto, la grieta permanecerá abierta hasta que la carga disminuya por debajo de un valor, carga de cierre (P_{cierre}), donde nuevamente se volverá a cerrar (Figura 1.11).

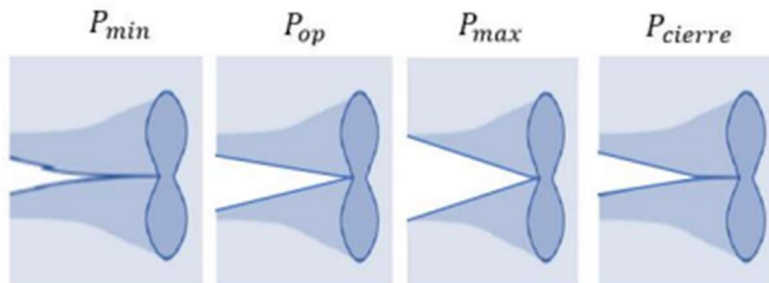


Figura 1.11.- Representación del PICC [22].

El crecimiento de la grieta solo se produce cuando la grieta está abierta [10], por lo que el PICC ayuda a disminuir la propagación de la grieta. Por lo tanto, podemos observar que la carga de apertura es un factor que refleja el efecto del PICC, ya que un valor alto indica que una parte significativa del ciclo de carga no contribuye al crecimiento de la grieta o viceversa.

Acorde a que la carga efectiva no es la misma que la carga aplicada, el incremento del SIF que se produce durante el ciclo de fatiga dependerá de la carga de apertura. De esta manera se define el incremento del SIF efectivo (ΔK_{eff}) para poder caracterizar de una mejor manera el comportamiento en el frente de grieta (Figura 1.12). El ΔK_{eff} es la diferencia entre los valores del SIF entre el punto de carga máxima y el punto de carga de apertura (ecuación 1.23), calculados estos valores en función de la teoría de la MFEP comentada anteriormente.

$$\Delta K_{eff} = K_{max} - K_{op} \tag{1.23}$$

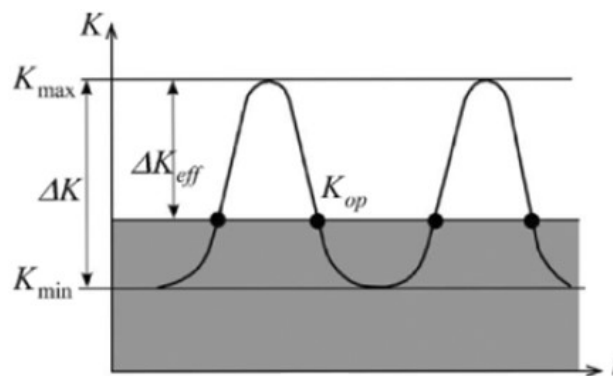


Figura 1.12.- Representación incremento SIF efectivo [25].

Newman [24] establece una relación entre el SIF y la situación de carga en el instante de la apertura, pudiendo representar el ΔK_{eff} según la ecuación (1.23), y quedando este definido por el valor máximo del SIF y el valor máximo y de apertura de la carga aplicada.

$$\Delta K_{eff} = K_{max} \left(1 - \frac{P_{op}}{P_{max}} \right) \tag{1.23}$$

Por lo tanto, la deformación plástica sufrida en el frente de grieta hace que el parámetro $\Delta CTOD$ no sea suficiente para caracterizar el comportamiento plástico del material. Además, se puede observar que la relación existente entre la carga de apertura y la carga máxima ($\frac{P_{op}}{P_{max}}$) es un factor característico que refleja la influencia del PICC. De esta manera, se puede determinar que el estudio de la carga de apertura de apertura es interesante para comprender el comportamiento plástico de diferentes materiales.

1.2.6.- Avances recientes en el estudio de la influencia del PICC en el crecimiento de grieta por fatiga.

En el año 2020, M. Escalero presentó una tesis por compendio de publicaciones en la que estudió los diferentes enfoques empleados para la predicción de crecimiento de grietas en fatiga [24]. Además, publica un artículo proponiendo una metodología para la simulación del PICC y la evolución del frente de grieta mediante programas de elementos finitos [14].

Posteriormente, G. Calvín presento tres artículos [11, 12, 13] en los que también estudio la influencia del espesor en los diferentes modelos 3D utilizados para la simulación del PICC. Paralelamente, M. Martín también desarrolla un modelo para la simulación del crecimiento de grieta teniendo en cuenta los efectos del PICC y la estela plástica.

No obstante, en todos estos estudios el material considerado no era variable, lo que impidió establecer si las conclusiones obtenidas tenían la misma relevancia para otros materiales o comportamientos plásticos. Lo que constituye un área de investigación particularmente interesante.

1.3.- MOTIVACIÓN.

Los estudios previos sobre la influencia del PICC en el crecimiento de grietas por fatiga, han proporcionan una base para el desarrollo de simulaciones mediante modelos de elementos finitos, pero no han abordado completamente el impacto que tendría sobre distintos materiales. Específicamente, la mayoría de estos estudios han centrado su análisis en el mismo material sin explorar cómo diferentes comportamientos plásticos pueden afectar el crecimiento de grietas en fatiga. Además, estos estudios también indican la importancia de investigar la influencia del PICC en otros materiales como una tarea futura.

Desde una perspectiva ingenieril, es crucial entender cómo la plasticidad de diversos materiales influye en la propagación de grietas por fatiga. Esta comprensión es esencial para el diseño y la optimización de componentes estructurales en una amplia gama de aplicaciones industriales.

Por lo tanto, en este trabajo de fin de grado se propone investigar la influencia del material en relación con el PICC y su impacto en el crecimiento de grietas por fatiga, mediante un modelo que permita simular estos efectos de manera ágil y precisa.

1.4.- OBJETO Y ALCANCE.

El objetivo de este TFG es la realización de un modelo que simule el ensayo de fatiga con probeta CT mediante un software de elementos finitos. Este modelo, teniendo en cuenta las propiedades elásticas y plásticas de los materiales metálicos, permitirá analizar y comparar rápidamente su comportamiento plástico caracterizado por el PICC. Adicionalmente, permitirá la obtención de resultados sin la necesidad de realizar ensayos físicos en el laboratorio, suponiendo una reducción de costes.

Asimismo, entra dentro del alcance de este proyecto, emplear el modelo desarrollado para simular el comportamiento de varios materiales metálicos, de uso extendido en sectores del ámbito ingenieril, y analizar y comparar los resultados obtenidos mediante la utilización de graficas que representen la evolución del $\frac{P_{op}}{P_{max}}$ en función del $\Delta CTOD$.

2. Desarrollo de la simulación.

2.1.- SOFTWARE UTILIZADO.

Para realizar el modelo del ensayo de fatiga se ha decidido utilizar el software de elementos finitos Abaqus Unified FEA (Finit Elements Analysis), desarrollado por Dassault Systèmes. La ventaja que ofrece Abaqus frente a otros programas de elementos finitos, como puede ser el caso de ANSYS, es la capacidad de poder programar toda la simulación mediante un script realizado en el lenguaje Python, a este tipo de programación se le conoce como “scripting”.

El scripting en Abaqus permite un gran nivel de automatización y personalización de las tareas, pudiendo destacar las siguientes ventajas:

- **Automatización de Tareas Repetitivas:** Mediante el uso de las diferentes funciones que presenta Python, como por ejemplo los bucles “for” e “if”, es posible automatizar tareas y procesos que se repiten a lo largo de la simulación. De esta manera, además de conseguir un ahorro de tiempo, es posible reducir los errores humanos que se darían al escribir manualmente todas las operaciones de manera repetitiva.
- **Parametrización de la simulación:** Es posible parametrizar tanto la geometría como las condiciones de la simulación y, mediante el ajuste de estos parámetros, conseguir de una manera rápida adaptar la simulación a diferentes geometrías, materiales o condiciones de ensayo, entre otros.
- **Manipulación de resultados:** El uso de scripts facilita el tratamiento y análisis de los resultados obtenidos por Abaqus. Además de permitir tratar y analizar grandes cantidades de datos de manera automatizada, es posible utilizar librerías y funciones de Python que permiten seleccionar y extraer resultados específicos en formato de texto. Estos datos pueden ser utilizados posteriormente en otros programas como Excel y MATLAB.

- **Grabación de macros:** Abaqus permite grabar las operaciones realizadas mediante la utilización de macros y escribirlas en un fichero en el código Python correspondiente. De esta manera se simplifica la creación de los scripts, no siendo necesario conocer todo el código de funcionamiento en Python y simplemente obtener el mismo mediante la realización previa de las operaciones para después adaptarlo en el script.

Abaqus es un software comercial que requiere la adquisición de una licencia para su uso y dispone de una versión para estudiantes de acceso gratuito, con una limitación del número máximo de nodos utilizados en el modelo de 1000. Durante la realización de este TFG se ha empleado la versión de estudiantes 2022 para el desarrollo de la simulación en el equipo personal. Además, mediante el uso de la opción escritorio remoto, se ha podido disponer de la licencia completa perteneciente al departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación de la Universidad de Oviedo. Siendo esta empleada para simular el ensayo de los diferentes materiales, pudiendo usar el número de nodos necesario para una buena precisión de los resultados.

2.1.1.- Sistema de unidades.

Abaqus no impone un sistema de unidades específico, sino que trabaja con las unidades de manera consistente. Esto significa que el usuario es el responsable de que todas las unidades utilizadas sean coherentes entre sí, o en caso contrario los resultados obtenidos no serán válidos.

En el caso de este modelo se utilizarán las unidades del sistema internacional (SI), pero en base a la unidad de longitud en milímetros no en metros. En la Tabla 2.1 se refleja el sistema de unidades utilizado.

Medida	SI (mm)
Longitud	mm
Fuerza	N
Masa	Ton (10^3 Kg)
Tiempo	S
Tensión	MPa (N/mm^2)
Energía	mJ
Densidad	Ton/ mm^3

Tabla 2.1.- Sistema de unidades.

2.2.- SIMULACIÓN DEL CRECIMIENTO DE GRIETA.

Para simular el crecimiento de la grieta, en base a estudios previos realizados por M. Escalero y G. Calvín [[11](#), [12](#), [13](#), [14](#)], se utiliza el método de liberación de nodos. Este método simula el crecimiento de la grieta mediante la eliminación de las condiciones de contorno de la fila de nodos correspondiente al frente de grieta, permitiendo el desplazamiento de estos nodos, fenómeno que se conoce como liberación de nodos (ver Figura 2.1). Los nodos se definen mediante el mallado de la zona de propagación de la grieta, por lo tanto, el frente de grieta estará compuesto por la agrupación en filas de los nodos que se extienden en la dirección Z. Tras ser liberada una fila de nodos, esta se desplaza verticalmente (U_y), simulando la apertura de la grieta, y el frente de grieta pasa a ser la siguiente fila de nodos la cual todavía no se ha liberado.

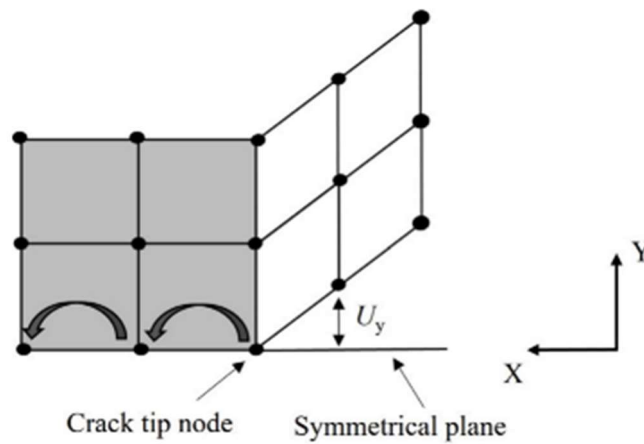


Figura 2.1.- Representación modelo liberación de nodos [13].

La liberación de las filas de nodos se produce en ciclos sucesivos cuando el ensayo se encuentra a máxima carga, dando lugar a un ciclo de Carga-Liberación-Descarga. Además, se simula la longitud de la grieta mediante un total de 20 liberaciones, es decir, 20 filas de nodos (ver Figura 2.2).

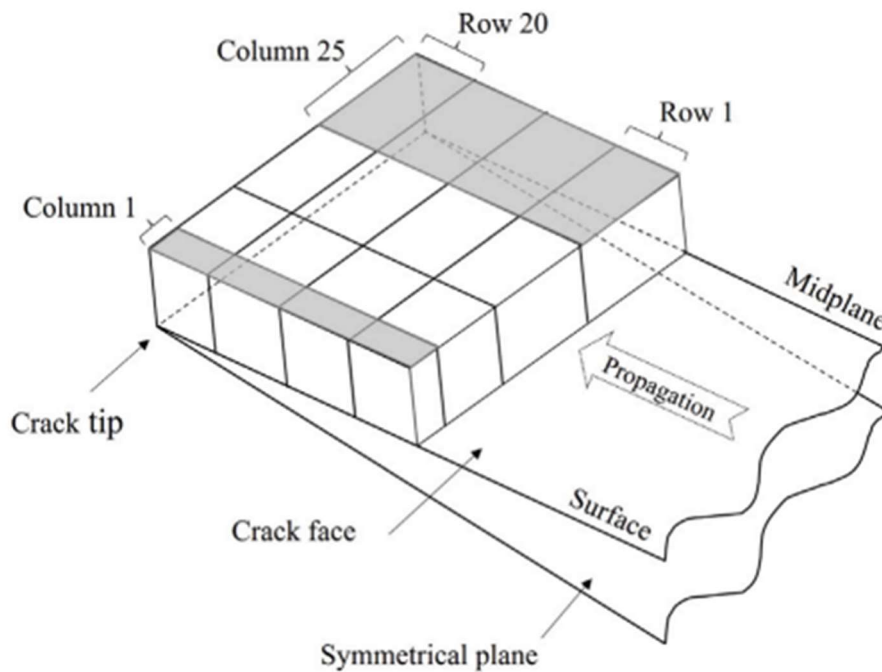


Figura 2.2.- Esquema de las filas de nodos que simulan el crecimiento de la grieta [13].

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se representa el ciclo de carga utilizado para la liberación de las filas de nodos, acorde a la simulación de un ensayo con ratio de esfuerzos R igual 0.1, que establece la carga mínima como 0.1 veces la carga máxima. En primer lugar, se realiza un ciclo de carga descarga, seguido de los sucesivos 20 ciclos de carga-liberación-descarga. Tras la liberación de la última fila de nodos, la grieta llega a su longitud final, donde se realizan 8 ciclos de carga-descarga con el fin de estabilizar los resultados. Finalmente, se realiza un último ciclo de carga donde se realiza la extracción de resultados de la simulación.

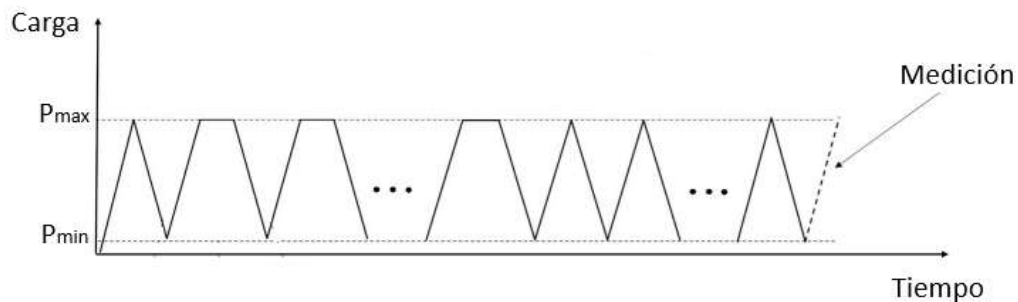


Figura 2.3.-Representación ciclo de carga de la simulación [11].

2.3.- GEOMETRÍA.

Como se ha comentado anteriormente, la geometría de la probeta CT esta normalizada según la norma ASTM E647-23 [6] (Figura 1.8). Dicha geometría depende únicamente de tres parámetros: el ancho de la probeta (W), el espesor (B) y la longitud de la grieta (a). En el script del modelo (ver anexo A) se ha parametrizado la probeta en función de estos tres parámetros, permitiendo modificarla cambiando únicamente su valor numérico.

En Abaqus, el desarrollo de las geometrías se realiza en el módulo “Part”. Este módulo permite una amplia variedad de opciones para construir modelos precisos y detallados, adaptándose a diferentes tipos de análisis y requisitos. Para ello, es necesario ajustar las siguientes características en función del tipo de geometría que se va a crear:

- **Espacio de Modelado:** define las dimensiones y la configuración geométrica de la pieza. En este caso tridimensional (3D).
- **Tipo de pieza:** define la naturaleza y el comportamiento de la pieza. Cada tipo de pieza tiene características y aplicaciones específicas que determinan cómo se comportará bajo las condiciones de simulación. Para la probeta CT, la cual se deforma en función de la carga y las condiciones de contorno, el tipo de pieza que refleja este comportamiento es el de “Deformable”.
- **Característica Base:** este apartado permite seleccionar la forma y el método de construcción de la pieza, estableciendo la base sobre la cual se construirán y desarrollarán las características adicionales de la geometría. Las opciones disponibles son “Solid” y “Shell”, utilizadas para crear piezas tridimensionales que tienen volumen o superficies bidimensionales que tienen un espesor significativo en una dirección respectivamente. Siendo la opción Solid la que se ajusta a el modelo.

2.3.1.- Simplificaciones.

En el modelo desarrollado de la probeta CT, se han llevado a cabo una serie de simplificaciones con el fin de reducir el coste computacional de la simulación.

2.3.1.1.- Simetría.

La probeta CT dispone de simetría respecto a los planos XZ y XY, siendo posible simplificar la geometría simulando únicamente la parte de la probeta situada entre estos dos planos y aplicando unas condiciones de contorno acordes que definan el comportamiento real de la probeta. En la Figura 2.4 se puede observar la sección de la geometría utilizada acorde a los planos de simetría.

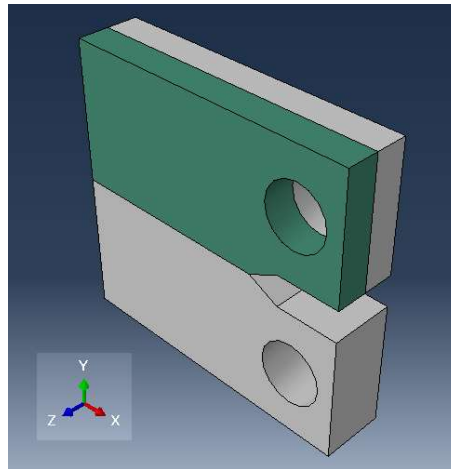


Figura 2.4.- Representación simetría 1/4 probeta CT.

2.3.1.2.- Forma de aplicación de la carga.

La probeta CT cuenta con unos orificios a través de los cuales se conecta con la máquina de ensayo mediante el uso de pasadores, que transmiten la carga del ensayo. Debido a que su función es únicamente necesaria en los ensayos en el laboratorio y no afecta a la evolución de la grieta, para esta simulación se ha decidido eliminar estos orificios y aplicar la carga de manera uniforme sobre el plano superior de la probeta. De esta manera, además de conseguir una pequeña reducción del coste computacional de la simulación, se consigue simplificar significativamente el proceso de mallado, obteniendo una malla más regular.

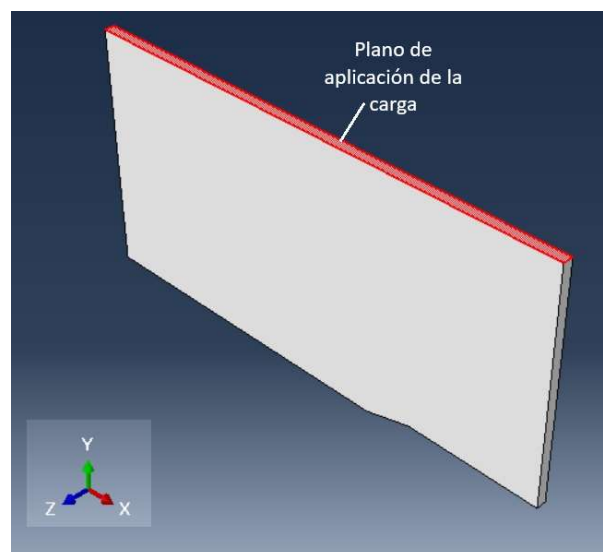


Figura 2.5.- Geometría probeta CT utilizada.

2.3.2.- Particiones.

Abaqus permite dividir la geometría de una pieza en diferentes secciones, a las cuales denomina particiones. Mediante el uso de estas particiones, se pueden aplicar diferentes condiciones en una misma pieza, por ejemplo, diferencias en la densidad del mallado.

En la Figura 2.6 se pueden observar las particiones realizadas en el modelo de la probeta CT. El objetivo es crear las dos particiones correspondientes a las zonas de interés: la zona de propagación de la grieta (1) y la zona posterior al frente de grieta (2), donde se aplicará una malla más densa con el fin de obtener unos resultados más precisos. Además, se realiza otra partición para evitar errores en el mallado en el cambio de sección de la entalla (3).

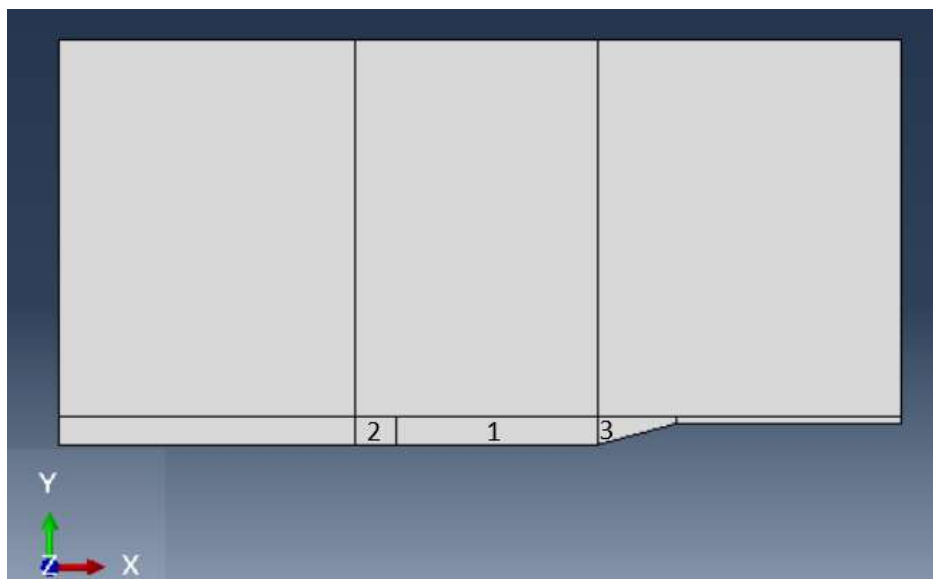


Figura 2.6.- Particiones modelo probeta CT.

La partición correspondiente a la zona de propagación de la grieta (1) está delimitada por la entalla y la posición final de la grieta, definida por la longitud de la grieta (a) acorde a la norma ASTM E647-23 [6]. Para delimitar las dimensiones de la zona posterior de la grieta (2), acorde al trabajo realizado por Giovanna Calvín y Mikel Escalero [11, 12, 13, 14], se aconseja definir tanto la longitud y altura de esta zona en función del radio plástico de Dugdale ($r_{p,D}$), concretamente, 7 veces el $r_{p,D}$ de largo y 5 veces el alto. En el modelo, se realiza una primera iteración con una longitud correspondiente al 20% de la longitud de la zona de propagación y 2mm de alto. Tras obtener los resultados, se calcula el radio plástico del material en función SIF máximo y la ecuación de Dugdale (ecuación 1.8) y se ajustan las dimensiones acordes al radio plástico, realizando seguidamente la simulación para obtener los resultados finales.

2.3.3.- Sets.

Los sets son conjuntos de nodos, elementos, caras, bordes o vértices que se agrupan con el fin de simplificar la selección y manipulación de estas zonas geométricas durante la configuración del modelo.

En el caso de la probeta CT, se crean sets que agrupan todas las combinaciones geométricas necesarias para el posterior desarrollo del modelo, por ejemplo, el “Set_ALL”, que agrupa toda la geometría de la probeta, el “Set_mid”, que incluye las caras correspondientes a la zona de simetría respecto al plano XY, o el “Set_force”, correspondiente al plano superior de la probeta donde se aplica la fuerza.

2.3.4.- Superficie Rígida.

Debido a que se está utilizando un modelo con un cuarto de simetría, con el fin de recrear la situación del cierre de grieta, se crea otra parte geométrica definida como “Superficie Rígida”. Esta parte ira situada en el plano de la grieta correspondiente al plano de simetría XZ, de tal manera que cuando la grieta este cerrada se produzca el contacto entre la superficie de la grieta y la superficie rígida.

La creación de esta geometría sigue los pasos definidos en el apartado anterior para crear la probeta CT, en el correspondiente módulo “Part”. Como el objetivo es crear simplemente un plano que simule el contacto, se selecciona el tipo de parte “Discret Rigid”, la cual define un sólido que no sufre deformaciones bajo condiciones de carga. Además, al tratarse únicamente de un plano sin necesidad de espesor, se selecciona la opción “Shell” de tipo planar, la cual crea la geometría deseada acorde a la Figura 2.7.



Figura 2.7.- Superficie Rígida.

2.4.- MATERIAL.

En Abaqus, el módulo “Property” es el destinado para definir las propiedades físicas y mecánicas de los materiales, así como la asignación de estos a las distintas partes del modelo. En este caso, únicamente será necesario definir las propiedades de la probeta CT, ya que la Superficie Rígida, al tratarse de sólido rígido que no experimenta deformaciones, no necesita la asignación de material.

Para que Abaqus pueda simular el comportamiento elastoplástico del material, es necesario definirlo mediante los parámetros característicos que representan tanto su comportamiento elástico como plástico. Para definir el comportamiento elástico se utiliza el Módulo de Young (E), el límite elástico (σ_y) y el coeficiente de Poisson (ν). Por otra parte, para representar el comportamiento plástico, se utiliza la ley de Chaboche, adaptada a cada material mediante sus parámetros “ C ” y “ γ ”.

En este estudio, se realizará la simulación de dos tipos de acero estructural utilizados comúnmente en la construcción y otras aplicaciones de ingeniería, los aceros S275 y S355. En base al estudio de Paulina Krolo et al [26], en la Tabla 2.2 se recogen los parámetros introducidos en Abaqus para representar su comportamiento elastoplástico.

Material	Comportamiento Elástico				Comportamiento Plástico				
	E (MPa)	ν	σ_{l_0} (MPa)	C_1 (MPa)	γ_1	C_2 (MPa)	γ_2	C_3 (MPa)	γ_3
S275	207000	0.3	285	13921	765	4240	52	1573	14
S355	185000	0.3	386	5327	75	1725	16	1120	10

Tabla 2.2.- Parámetros de los materiales utilizados [26].

2.5.- ENSAMBLAJE.

A continuación, es necesario definir la situación de todas las partes que forman el modelo. En el caso de esta simulación serán la Probeta CT y la Superficie Rígida, las cuales se sitúan de tal manera que la Superficie Rígida queda centrada respecto a la probeta CT y en contacto con el plano de la grieta (Figura 2.8).

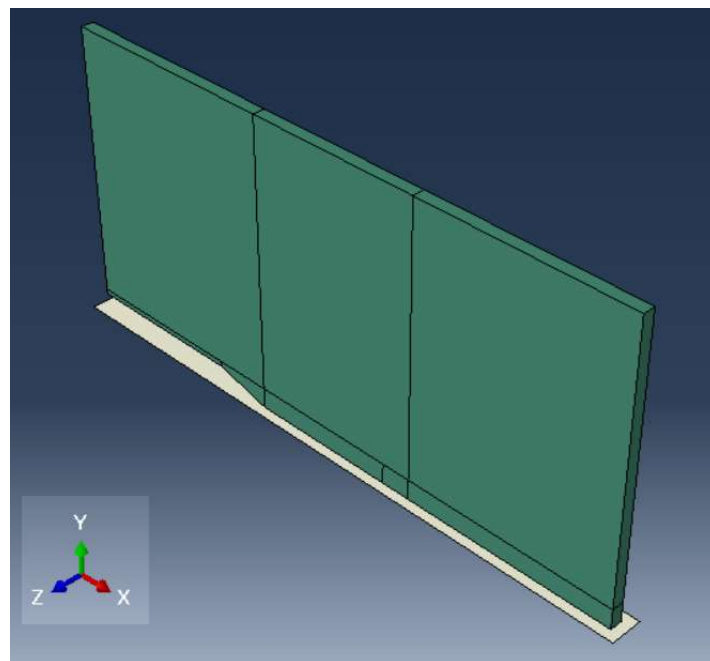


Figura 2.8.- Ensamblaje de la simulación.

Para facilitar el tratamiento de datos y la disposición del modelo, se sitúa el centro de coordenadas en el plano de la grieta. El origen del eje X se hace coincidir con el final de la entalla en la probeta, punto desde el que se mide la longitud de la grieta (a). Por su parte el origen del eje Z se sitúa en el plano medio de la probeta CT (correspondiente con la cara posterior de la Figura 2.8).

2.6.- INTERACCIÓN.

Tras realizar el ensamblaje de las partes que conforman el modelo, es necesario definir cómo interactúan entre sí para que Abaqus pueda interpretar de manera correcta el comportamiento que presentan.

En el modelo, la Superficie Rígida y la probeta CT interactúan dando lugar a un contacto entre ambas partes. Abaqus cuenta con la opción de definir una interacción como “Surface to Surface contact”, la cual representa exactamente el tipo de interacción que tenemos entre la superficie rígida y la probeta CT en su superficie correspondiente al plano de simetría XZ (plano de la grieta). Se requiere designar los pares que forman el contacto como superficie maestra y esclava, siendo la Superficie Rígida la asignada como maestra al ser la más rígida, siguiendo las recomendaciones del programa.

Asimismo, en base al trabajo de M. Escalero [14], se establece un tipo de contacto sin fricción (frictionless) y se permite una penetración de $5e-05$ mm de la superficie esclava en la maestra (la probeta CT en la superficie rígida), con el fin de evitar errores de convergencia durante el desarrollo de la simulación.

Además, con el fin de facilitar la aplicación de la carga, se crea un acoplamiento (conocido como “Coupling” en inglés) entre la superficie donde se aplica la carga y un punto de referencia. De esta manera, aplicando la carga de la simulación de forma puntual sobre el punto de referencia, este transmite dicha carga a toda la superficie (ver Figura 2.9).

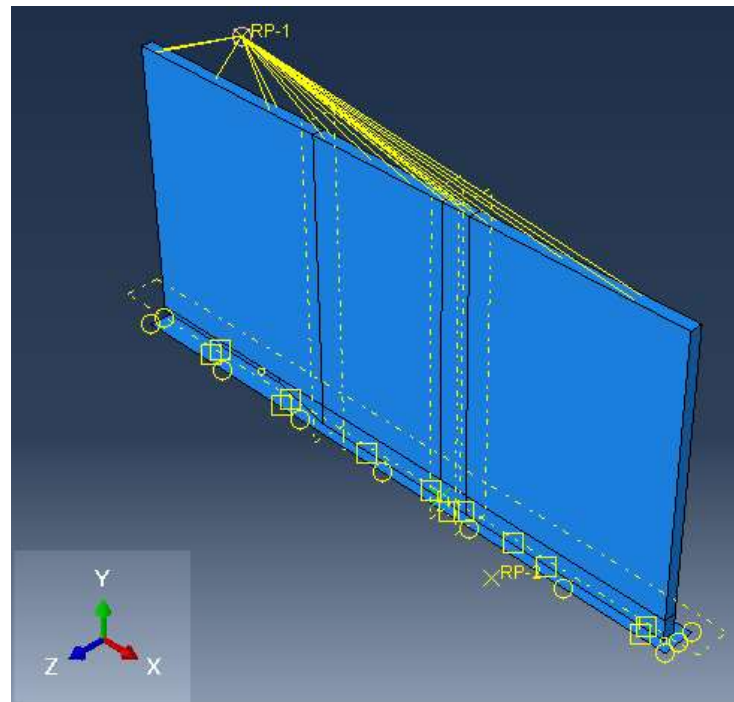


Figura 2.9.- Representación de las interacciones del modelo.

2.7.- PASOS DE ANÁLISIS.

En Abaqus, los pasos de análisis (steps) son las diferentes fases temporales en las que se divide el proceso de simulación, permitiendo variar entre los diferentes pasos las condiciones de la simulación, como son las cargas o las condiciones de contorno.

Acorde al modelo de crecimiento de grieta utilizado en esta simulación (apartado 2.2), se definen los siguientes pasos de análisis:

- Carga: Representa el primer ciclo de carga-descarga y la primera parte del ciclo de carga antes de la primera liberación.
- Liberación: Se crean 20 pasos (steps), en los cuales se realizarán las sucesivas liberaciones de las filas de nodos que simulan el crecimiento de la grieta. Los pasos comienzan en el punto de máxima carga, primero se realiza la liberación de la correspondiente fila de nodos para seguidamente recrear el ciclo descarga-carga.

- Estabilización: Donde se realizarán los ocho ciclos de carga-descarga para estabilizar los resultados.
- Medición: Último paso donde se aplica el último ciclo de carga y se realiza la extracción de resultados acerca del PICC y otros parámetros de interés.

Abaqus divide cada paso en diferentes sub-pasos de análisis (substeps), permitiendo una mayor precisión y control tanto de los cambios en las condiciones de la simulación como en la generación de resultados. Sin embargo, un uso excesivo de substeps aumenta considerablemente el coste computacional de la simulación, siendo importante definir un número óptimo de substeps que ofrezca resultados precisos sin un coste computacional elevado. Acorde al estudio de Tomáš Oplít [16], se considera que entre 20 y 30 substeps en cada ciclo de descarga son suficientes para obtener unos resultados válidos. Por lo tanto, se ha decidido utilizar 20 substeps por cada ciclo de descarga, es decir, 40 substeps el ciclo completo carga-descarga. Además, debido a que la medición de los resultados se realiza en la carga del último ciclo, con el fin de obtener unos resultados precisos, se utiliza el doble de substeps (40) durante la última carga. Al tratarse de un único paso de análisis, este incremento no representa un gran aumento del coste computacional total de la simulación.

2.8.- MALLADO.

El mallado consiste en la división de las partes continuas que forman el modelo en elementos más pequeños delimitados por nodos. La aplicación de las ecuaciones diferenciales individualmente sobre todos los elementos que componen la malla permite realizar una representación del comportamiento global del modelo mediante la resolución y combinación de ecuaciones más sencillas y manejables.

Cuanto menor sea el tamaño de los elementos se obtendrá unos resultados más precisos, pero se aumentará notablemente el coste computacional de la simulación. De esta manera, se realiza un mallado local más denso (elementos más pequeños) en las zonas de especial importancia, mientras que en el resto de las zonas se usará una malla poco densa.

En el caso de este modelo, las zonas que requieren de un mallado más fino son la zona de propagación de la grieta y la zona posterior al final de la grieta (Figura 2.6), ya que serán las zonas donde el análisis de los resultados tenga una mayor importancia. En el resto de la pieza se dispondrá una maya gruesa con elementos de tamaño de 2,5mm. En el borde de la zona de propagación se define el mayado en función del número total de elementos en vez de por el tamaño de estos, designando 20 elementos acorde al número de divisiones en la que queremos simular el crecimiento de la grieta.

La zona posterior al frente de grieta requiere el mallado más denso, acorde al trabajo realizado por Camas [17], se divide el espesor de la probeta CT en 20 elementos (Figura 2.10) y en las otras dos dimensiones (X e Y) el tamaño del elemento se establece en función del radio plástico del material dividido por 50. Como en el caso de las particiones (apartado 2.3.2), ya que no se conoce inicialmente el radio plástico del material, en una primera iteración se establece un valor inicial, concretamente 0.3 mm, para después realizar la simulación final con los datos ajustados (Figura 2.11).

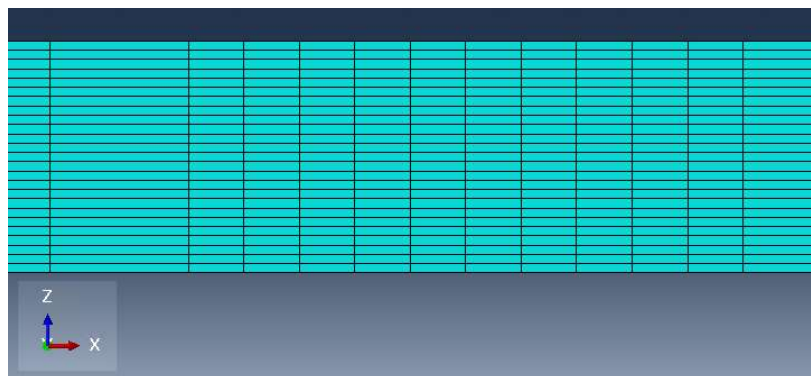


Figura 2.10.- Malla en la dirección del espesor, plano XZ.

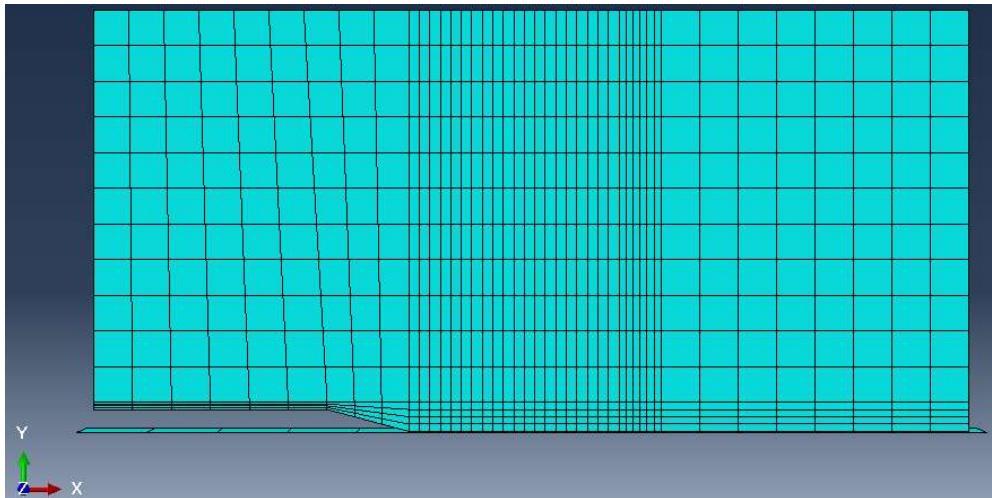


Figura 2.11.- Malla inicial antes de iterar.

Los elementos utilizados en la malla son del tipo C3D20R. Estos elementos tridimensionales cuentan con 20 nodos y emplean interpolación cuadrática, lo que ofrece una mayor precisión en la representación de deformaciones y tensiones dentro del modelo. Además, estos elementos utilizan integración reducida, lo que mejora la eficiencia computacional.

2.9.- CONDICIONES DE CONTORNO.

Las condiciones de contorno (*“Boundary Conditions”* (BC)) son restricciones aplicadas en los bordes o superficies del modelo que definen como interactúa este con el entorno. Las BC pueden restringir el movimiento de translación o la rotación sobre cualquiera de los ejes de la pieza de manera individual o combinada.

En el caso de la superficie rígida, la cual permanece completamente inmóvil e inalterable durante la realización del ensayo, se le aplica una BC de tipo encastre que limita el movimiento y giro respecto a todos los ejes, quedando de manera completamente inmóvil.

En el caso de la probeta CT será necesario aplicar las BC en los planos de simetría, con el fin de conseguir una simulación que refleje el comportamiento real del componente completo. En el plano medio de la probeta (zona roja Figura 2.12) se aplica una condición de simetría respecto al eje Z, en la cual se restringe el movimiento de los puntos en la dirección Z y los giros respecto a los ejes X e Y. Por otra parte, en el plano de la grieta (zonas verde y azul Figura 2.12) se aplica la condición de simetría respecto al eje Y, restringiendo el movimiento en el eje Y y los giros respecto a los ejes X y Z.

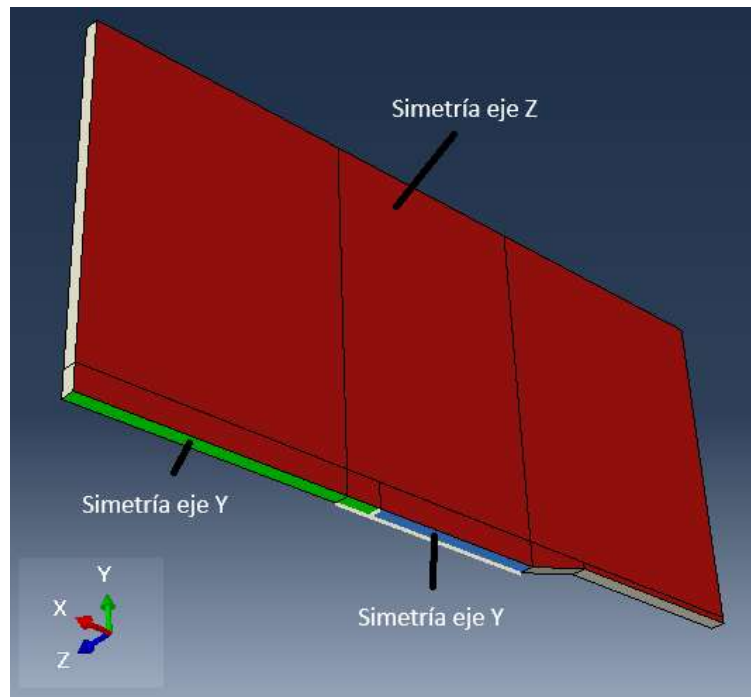


Figura 2.12.- Condiciones de contorno.

La simetría en el plano de la grieta (plano XZ) puede dividirse en dos zonas según el comportamiento que presentan durante la simulación. La zona verde representa la parte de la probeta hasta la que no llega la grieta, siendo las BC invariables en esta zona. Por otro lado, la parte azul representa la zona de propagación de la grieta, es decir, la zona cuyas BC se irán liberando sucesivamente. Para aplicar las BC en la zona de propagación, primero será necesario agrupar en sets las líneas de nodos que forman el frente de grieta para poder definir las BC en cada una de ellas individualmente. Para ello, en el script del modelo se crea un bucle “for” que itera 20 veces agrupando todos los nodos de una misma fila en un set mediante la función “getByBoundingBox”, la cual selecciona todos los nodos entre dos coordenadas dadas. En el mismo bucle a la vez de crear los sets, se les asigna la condición de simetría respecto al eje Y.

En Abaqus, además de los pasos de análisis creados, hay un paso por defecto denominado “Initial”. Para definir las BC también es necesario definir en que paso se producen, por lo tanto, definimos todas las BC en este paso “Initial” para que se propaguen en el resto de los pasos de la simulación y se tengan siempre en consideración.

2.9.1.- Liberación de nodos.

Para simular el crecimiento de la grieta, se desactiva las BC de las filas de nodos de manera sucesiva entre los diferentes pasos de análisis dando lugar a su liberación, es decir, en el Step-1 (que como se ha indicado anteriormente coincide con el ensayo en máxima carga) se desactivan las BC-1 correspondiente a la fila de nodos que forma el frente de grieta. Tras desactivarse las BC se produce el ciclo de descarga-carga posterior, para tras finalizar, volver a repetirse el proceso con el Step-2 y las BC-2. Esto da lugar a una desactivación “escalonada” como se representa en la Figura 2.13.

Name	Initial	Step_Carga	Step-1	Step-2	Step-3	Step-4	Step-5	Step-6	Step-7
✓ BC_1	Created	Propagated	Deactivated						
✓ BC_2	Created	Propagated	Propagated	Deactivated					
✓ BC_3	Created	Propagated	Propagated	Propagated	Deactivated				
✓ BC_4	Created	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Deactivated			
✓ BC_5	Created	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Deactivated		
✓ BC_6	Created	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Deactivated	
✓ BC_7	Created	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Deactivated
✓ BC_8	Created	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated
✓ BC_9	Created	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated
✓ BC_10	Created	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated
✓ BC_11	Created	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated
✓ BC_12	Created	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated	Propagated

Figura 2.13.- Desactivación escalonada de las BC.

2.10.- CARGA.

En primer lugar, se define de qué tipo de carga se trata, así como su magnitud, amplitud y el paso de análisis en el que se produce. Abaqus cuenta con varios tipos de cargas que se adaptan con facilidad a las diferentes situaciones. En el modelo, como se ha mencionado anteriormente, se aplica la carga en forma de carga puntual sobre el punto de referencia acoplado a la superficie superior. En este caso, acorde a G. Calvín [12] y en función del espesor de la probeta, se simula un ensayo con una fuerza total de 1274.56 N, que, al tratarse de un modelo reducido con simetría, será de 637.28 N.

Debido a que se dispone de 4 tipos de pasos de análisis, para definir la fuerza es necesario definir 4 amplitudes que acorde al comportamiento exacto en cada paso de análisis:

- Carga Inicial: Corresponde con el paso inicial en el que la amplitud realiza un ciclo de carga-descarga-carga.
- Carga Liberación: Aplicada a los 20 pasos de análisis en los que se produce la liberación de nodos
- Carga de estabilización: Actúa durante los 8 ciclos de estabilización.
- Carga final: Es la carga aplicada durante el último ciclo de carga en el que se realiza medición de los resultados.

Como se ha indicado, la magnitud de todas las cargas es la misma, siendo lo único que varía entre unas y otras el paso de análisis en el que se introducen y su duración.

2.11.- DATOS DE SALIDA.

En Abaqus, es necesario indicar cuales son los resultados que se desean analizar, así como en paso de carga se quiere registrar. Cuantos más resultados se quieran obtener, mayor será el coste computacional de la simulación, necesitando más tiempo para completarse.

Abaqus agrupa los resultados en dos grupos:

- **Field Output:** Se centra en la recolección de datos de todo el modelo o una gran parte en diferentes momentos de la simulación. Permite obtener una visión general del comportamiento del modelo.
- **History Output:** Se centra en la evolución temporal del comportamiento de unos puntos específicos del modelo durante toda la simulación. Su uso principal es proporcionar un seguimiento en puntos críticos.

En la simulación, los datos que se desea extraer son el SIF máximo y la carga a la que se produce la apertura de la grieta (P_{op}) representada mediante un gráfico P_{op}/P_{max} .

Para obtener el valor del SIF máximo con el que poder calcular el radio plástico, se utiliza el History Output ya que se desea saber la evolución de los resultados en una zona específica a lo largo del tiempo. Para ello, se aplica el History output sobre el dominio de la grieta creada seleccionando el tipo *“Stress intensity factors”*.

Para medir la Pop es necesario conocer en qué instante se empieza a abrir la grieta en la última fila de nodos liberada (BC-20). Por lo tanto, nuevamente en el History Output, se selecciona el dominio del correspondiente a la última fila de nodos liberada (set_BC_20), el paso de análisis final en que queremos realizar la medición y el desplazamiento vertical (U2). Los resultados mostrarán unos valores iniciales negativos acorde a los 5e-05 mm de penetración establecidos previamente. Se considera entonces que la grieta comienza a abrirse cuando el desplazamiento es mayor que 0. Sabiendo el instante en el que se produce la apertura (U2 mayor que 0) y conociendo la evolución que sigue la carga en la simulación, es posible determinar la carga en el momento de apertura de la grieta (P_{op}).

Para extraer los resultados generados por Abaqus, se utilizan una serie de scripts que extraen de forma automática los volares que nos interesan de la Base de datos de resultados (“*Output Database*” (odb)) (ver Anexo B).

3. Resultados.

3.1.- ANÁLISIS DEL FACTOR INTENSIDAD DE TENSIÓN.

Para poder analizar los efectos del PICC entre diferentes materiales, como se ha comentado anteriormente, la primera iteración de la simulación consiste en el cálculo del radio plástico mediante el SIF y la fórmula de Dugdale (ecuación 1.8), para poder determinar en función de este el tamaño óptimo de los elementos de la malla que permitan obtener unos resultados precisos.

En la Figura 3.1 y Figura 3.2 se representa la distribución del incremento del SIF en los aceros S275 y S335 respectivamente, para un ciclo de carga R igual a 0.1. Se puede observar que ambos materiales presentan un patrón de incremento del SIF y unos valores muy similares. En la superficie de la probeta (distancia 1,2 mm del centro) se encuentra el menor valor, el cual aumenta hasta que se estabiliza a aproximadamente a media distancia entre el medio y la superficie de la probeta.

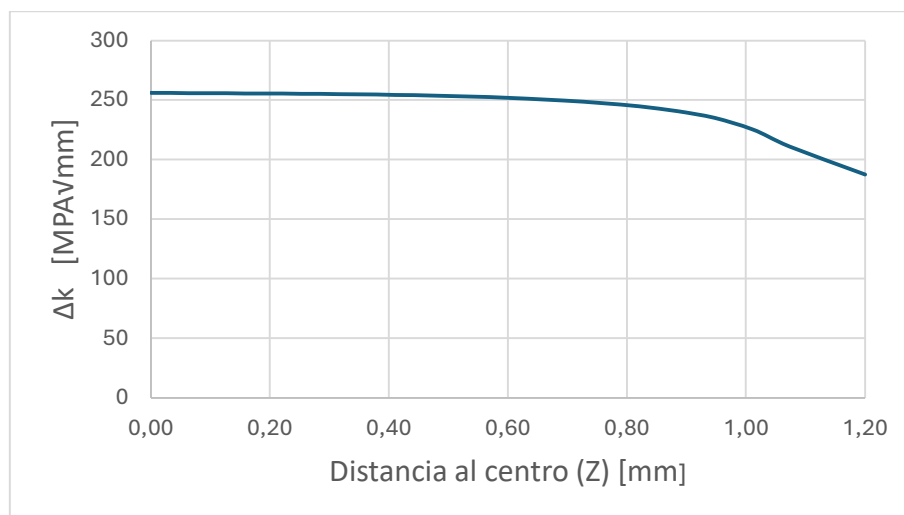


Figura 3.1.- Distribución del ΔK a lo largo del espesor para el S275

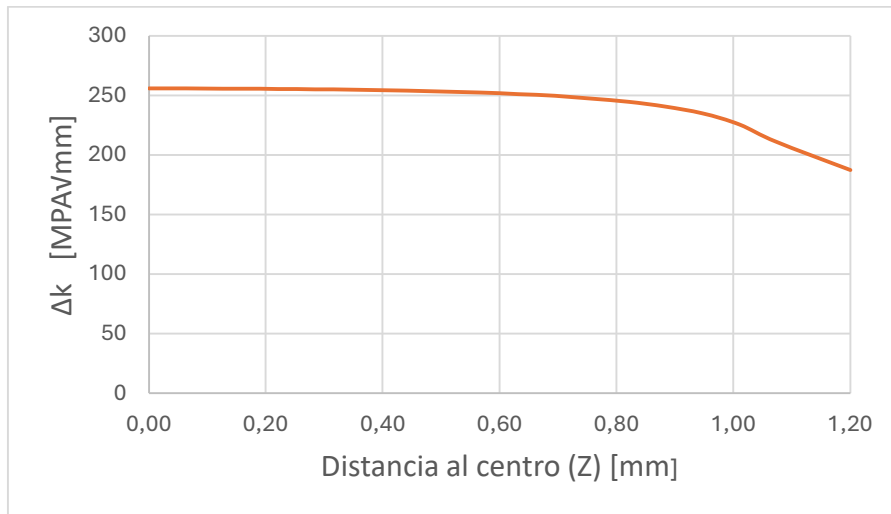


Figura 3.2.- Distribución del ΔK a lo largo del espesor para el S335.

Sin embargo, aunque ambos materiales presentan un comportamiento similar respecto a la distribución del ΔK , no significa que se comporten igual. en la Figura 3.3 y en la Figura 3.4 se representa la evolución del SIF en el nodo de mayor valor (nodo central) de cada material. Se puede observar que en caso del acero S275 tanto el valor mínimo (70,05 MPa√mm) como el máximo (326,04 MPa√mm), son superiores a los del S335 (47,71 y 303,71 MPa√mm respectivamente). Por lo tanto, bajo unas mismas condiciones de carga de fatiga se puede asumir que el acero S275 presenta un peor comportamiento ya que sufre más tensiones y resultando más probable que se propague una grieta.

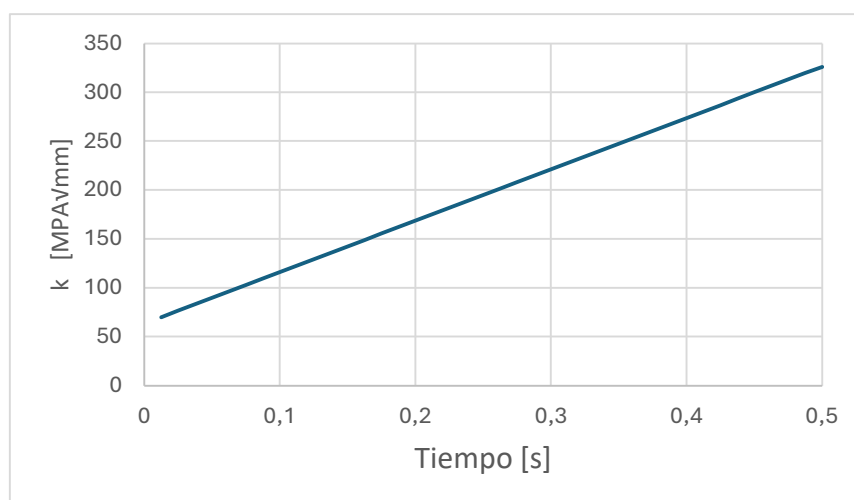


Figura 3.3.-Evolución del SIF en el nodo de máxima carga S275.

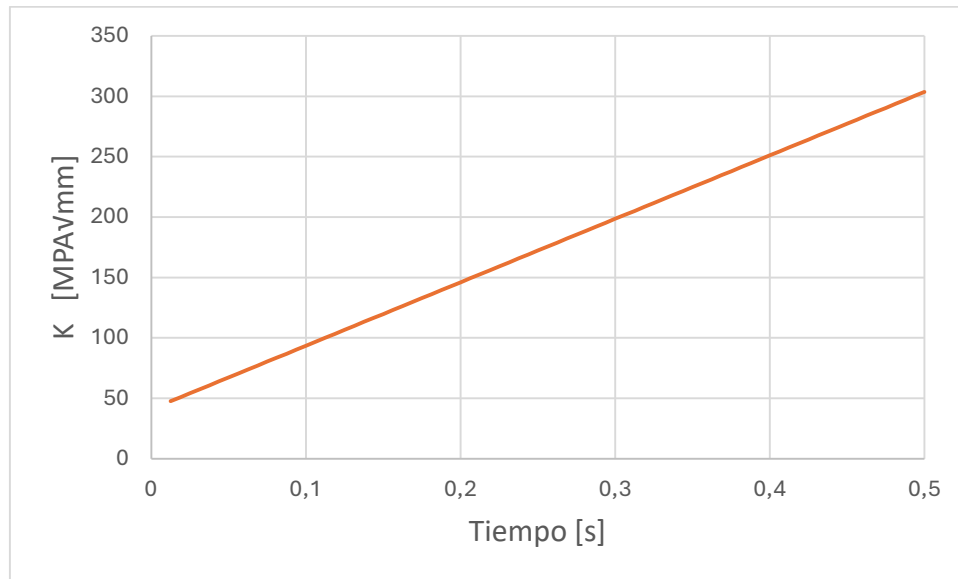


Figura 3.4.-Evolución del SIF en el nodo de máxima carga S335.

En función del K_{max} de cada caso se establecen los radios plásticos y con estos las longitudes recomendadas para los elementos de la malla más densa tras el frente de grieta ($l_e = r_p/50$). Para ello se utiliza el script q:

- **S275:** $r_p = 0.51395$ mm, $l_e \approx 10,3$ μ m
- **S335:** $r_p = 0.24531$ mm, $l_e \approx 4,9$ μ m

Para la extracción de resultados en este apartado, se utiliza un script que almacena la evolución de los valores de K_I (Anexo B.1), y automáticamente guarda en formato de texto (.txt) el valor máximo en cada nodo, el valor máximo total y calcula el radio plástico.

3.2.- CIERRE DE GRIETA INDUCIDO POR PLASTICIDAD.

Con los valores obtenidos en el apartado anterior, se ajusta el código y se procede a realizar la segunda iteración. En este caso, al emplearse elementos más pequeños, pero más precisos, aumentara el coste computacional de la simulación. Como se ha mencionado en apartados anteriores, el PICC se representará mediante un gráfico Pop/P_{max} frente al $\Delta CTOD/2$ (se representa la mitad del CTOD ya que al aplicar simetría solo estamos calculando el desplazamiento de una de las dos partes.)

Para la extracción de estos resultados, se utiliza el script del Anexo B.2, el cual extrae los desplazamientos verticales de la última fila de nodos liberada (set_BC_20) y mediante un bucle calcula el instante en el que la grieta se abre (U2 mayor que 0). Debido a los 5e-05 mm de penetración establecidos, en el inicio de la gráfica existirán valores negativos que se consideran como 0 al ser físicamente imposible.

Sabiendo el instante en el que se abre la grieta y conociendo la función que sigue la carga (R=0.1), línea recta desde (0,0.1*F) hasta (0.5,F) (donde F es la fuerza del ensayo), interpolando obtenemos los valores de P_{op}/P_{max} en el instante de apertura y lo graficamos frente al $\Delta CTOD/2$ extraído también por el script.

3.2.1.- P_{op}/P_{max} Acero S275.

En el caso del Acero S275, el instante en el que se produce la apertura de la grieta es $t=0,0875s$, que se corresponde con una P_{op} de 164,10N y una relación P_{op}/P_{max} de 0,2575 (ver Figura 3.5). El $\Delta CTOD/2$ alcanza un valor máximo de $4,53 \cdot 10^{-3}$ mm. Por lo tanto, se puede ver como la plasticidad afecta al crecimiento de la grieta, aplicando un retardo y haciendo que este se produzca más tarde.

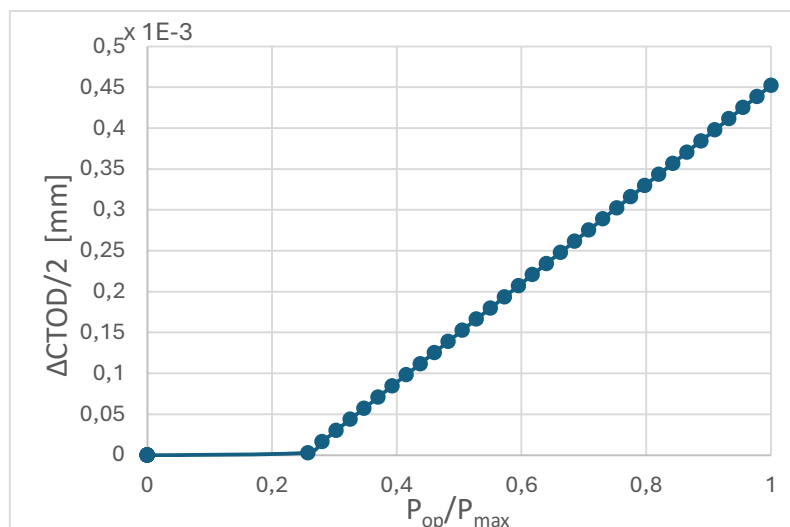


Figura 3.5.- Representación P_{op}/P_{max} Acero S275

Mediante la ecuación 1.23, podemos calcular el ΔK_{eff} en función del SIF máximo y la relación P_{op}/P_{max} :

$$\Delta K_{eff} = 326,04 * (1 - 0,2575) = 242.08 \text{ MPA}\sqrt{\text{mm}}$$

Por lo tanto, debido al efecto del PICC y en relación con lo calculado en la primera iteración, se puede determinar que el ΔK_{eff} que experimenta la probeta es un 5,5% que el valor calculado en el apartado anterior.

3.2.2.- P_{op}/P_{max} acero S335.

Siguiendo el mismo procedimiento que con el Acero S275, el instante de apertura de la grieta en el Acero S335 es $t=0.0375s$, que se corresponde con una P_{op} de 106,74N y una relación P_{op}/P_{max} de 0,1675 (ver Figura 3.6). El $\Delta CTOD/2$ alcanza un valor máximo de $11,8*1e-3 \text{ mm}$.

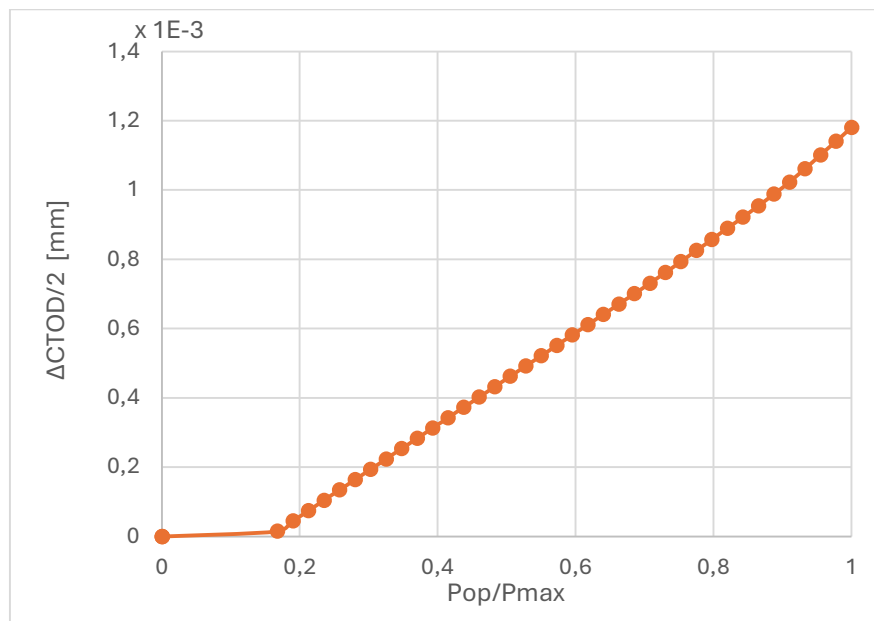


Figura 3.6.- Representación P_{op}/P_{max} Acero S335.

En este caso el ΔK_{eff} es:

$$\Delta K_{eff} = 303,71 * (1 - 0,1675) = 252.84 \text{ MPA}\sqrt{\text{mm}}$$

Lo que supone una reducción respecto al cálculo del ΔK del apartado anterior del 1,25%

3.2.3.- P_{op}/P_{max} comparativa

En la Figura 3.7 se puede observar, como la deformación plástica que experimenta el Acero S275(Azul) genera un mayor retardo en la apertura del frente de grieta, lo que se traduce en $\Delta CTOD$ menor que en el caso del Acero S335.

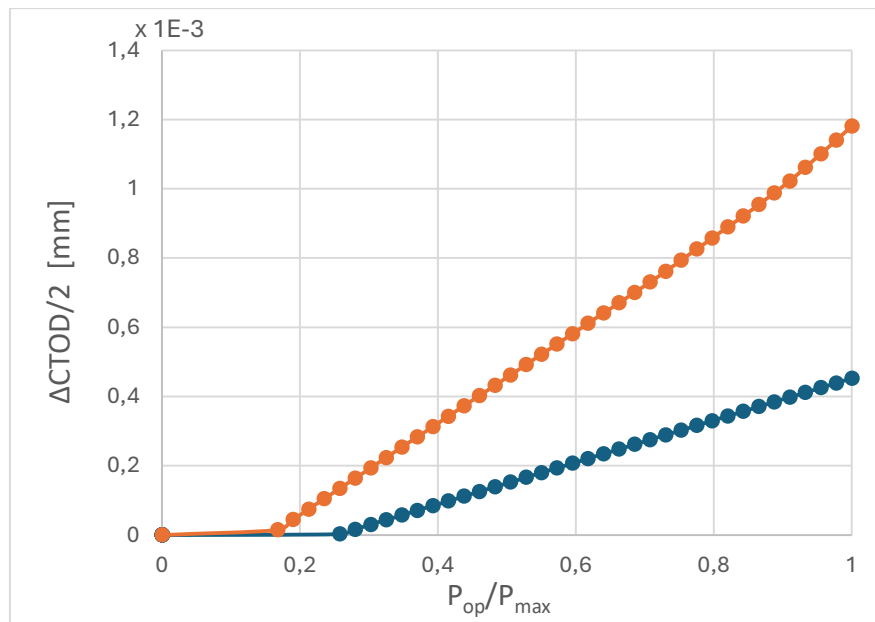


Figura 3.7.- Comparativa S275 vs S335

Además, se puede observar como dos materiales que parecían muy similares en el apartado anterior al calcular sus ΔK , teniendo en cuenta los efectos del PICC además del comportamiento elástico, se puede obtener una mayor representación de su comportamiento real y poder realizar una mejor selección a la hora de elegir un material el cual vaya a estar sometido a esfuerzos de fatiga.

4. Conclusiones.

- A lo largo de este TFG se ha comprobado la influencia y la importancia que tiene la plasticidad, y en concreto el PICC, en el comportamiento de los materiales metálicos sometidos a fatiga. Siendo un factor importante para determinar el material más adecuado en cada situación.
- Mediante el desarrollo de esta simulación, se ha presentado una metodología capaz de analizar y comparar de una manera rápida y efectiva el comportamiento de diferentes materiales, sin la necesidad de realizar ensayos físicos suponiendo una reducción de tiempo y costes.
- El uso de scripts para la automatización de procesos y operaciones repetitivas durante el desarrollo de este estudio, ha demostrado el potencial existente y las ventajas que presenta respecto a otro tipos de software más convencionales en los que solo se puede trabajar por medio de una interfaz.

5. Trabajo futuro.

En el futuro, se considera conveniente abordar las siguientes líneas de investigación que podrán tener interés en relación a los avances realizados en el marco del presente trabajo:

- Cálculo de la componente $\Delta CTOD_p$. Este trabajo se ha centrado en caracterizar el PICC mediante el estudio de la carga de apertura (P_{op}) de la grieta. Además, debido a que el $\Delta CTOD$ es uno de los parámetros más empleados para definir el comportamiento plástico en la MFEP, el análisis de este mediante el cálculo de sus componentes elástico y plástico permitirá disponer de más datos sobre el comportamiento de cada material y, por lo tanto, poder realizar una comparación más precisa entre diferentes materiales.
- Simular la evolución del frente de grieta. Acorde a los estudios realizados por M. Escalero y G. Calvín, sería interesante sustituir el frente de grieta recto empleado en este modelo por un frente de grieta que evolucione en función del crecimiento de la grieta. Permitiendo de esta manera, un análisis más preciso de los efectos en el frente de grieta y su distribución sobre el espesor de la probeta, al representar un modelo más representativo del ensayo físico.
- Analizar la influencia del espesor. El estudio actual se limita a probetas de un mismo espesor, lo cual proporciona una visión parcial de los fenómenos involucrados. Incorporar probetas de diferentes espesores permitiría evaluar cómo este parámetro afecta al PICC y el comportamiento de la propagación de grietas.

6. Planificación temporal del proyecto.

La planificación de este proyecto se ha estructurado detalladamente en un diagrama de Gantt (ver Figura 6.1) que comprende las diferentes fases por las que ha pasado el desarrollo del trabajo, desde el aprendizaje inicial hasta el desarrollo y finalización del proyecto. Además de las fases principales, en el diagrama se muestran las actividades realizadas en cada fase, así como las fechas de inicio y fin y la duración estimada de cada actividad.

El trabajo realizado se estructura en tres fases principales: Aprendizaje, Desarrollo y Documentación, distribuidas a lo largo de varios meses. La primera fase, Aprendizaje, se enfoca en la iniciación y práctica con Abaqus-Scripting. La segunda fase, Desarrollo, se dedica al diseño y programación de la simulación, que incluye la implementación del código del modelo, la verificación de su funcionamiento y la creación de scripts para la extracción de resultados. La fase final, Documentación, se destina a la redacción detallada de la memoria del proyecto.

Para determinar las horas totales de trabajo, se estima una media de 4h de trabajo diarias 5 días a la semana, dando lugar a 20h de trabajo semanales. El proyecto se desarrolla desde el 05/02/2024 hasta el 15/02/2024, lo que se corresponde con 23 semanas, dando lugar a una estimación del tiempo total de trabajo de 460h.

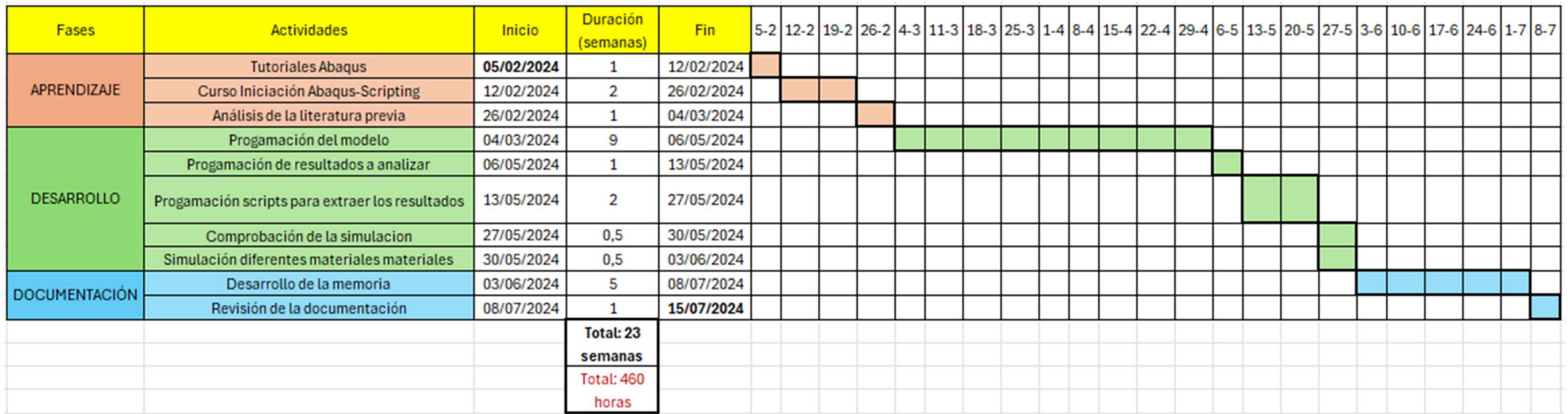


Figura 6.1.- Diagrama de Gantt del proyecto.

7. Presupuesto.

A continuación, se detalla el presupuesto necesario para la elaboración del proyecto. Este incluye la valoración económica de las horas de trabajo empleadas, así como los gastos en equipo y software generados durante el desarrollo.

7.1.- EQUIPOS Y PROGRAMAS DE SOFTWARE.

Comprende los gastos relacionados con el material y programas utilizados durante el desarrollo del trabajo. Para los equipos informáticos, cuya amortización se establece como norma general en 5 años, en función de la duración del proyecto de 23 semanas se establece un porcentaje de amortización del 9%. En el caso de los programas utilizados, los cuales cuentan con licencias anuales, nuevamente en función de la duración del proyecto, se establece un porcentaje de amortización del 45%.

En la Tabla 7.1 y Tabla 7.2 se presentan los costes de quipos y programas desglosados.

<u>Nº</u> <u>Unidades</u>	<u>Concepto</u>	<u>Precio Unidad</u> <u>(€)</u>	<u>Amortización</u> <u>(%)</u>	<u>Importe</u> <u>(€)</u>
1	Ordenador portátil HP-15s-fq4030ns	560,00	9	50,40
1	Monitor secundario LG-M2080D	160,00	9	14,40
1	Ordenador de Sobremesa Hp	600,00	9	54,00
TOTAL				118,80

Tabla 7.1.- Costes equipos utilizados.

<u>Concepto</u>	<u>Precio anual licencia (€)</u>	<u>Amortización (%)</u>	<u>Importe (€)</u>
Abaqus CAE	19.000,00	45	8.550,00
Microsoft 365	69,00	45	31,05
Notepad++	Gratuito	45	-
TOTAL			8.581,05

Tabla 7.2.- Costes software utilizado.

7.2.- HORAS DE TRABAJO EMPLEADAS.

Las horas de trabajo dedicadas a la realización de este proyecto se desglosan en tres grupos en función de las fases en las que se divide: Aprendizaje, Desarrollo y Documentación. Además de las horas empleadas por el autor, se tienen en cuenta las horas empleadas por el tutor en las diferentes reuniones de seguimiento.

En la Tabla 7.3 se muestran las horas de trabajo desglosadas, así como el coste total. Se considera un coste horario de 8€/h para el autor y de 35€/h para el tutor.

Nº Horas	Concepto	Precio Hora (€/h)	Importe (€)
80	Aprendizaje	8,00	640,00
260	Desarrollo	8,00	2.080,00
120	Documentación	8,00	960,00
30	Tutor	35,00	1.050,00
TOTAL			4.730,00

Tabla 7.3.- Coste horas de trabajo.

7.3.- PRESUPUESTO FINAL.

Finalmente, en base a los costes presentados y aplicando un beneficio industrial del 6%, unos gastos generales del 12% y el IVA correspondiente del 21%, en la Tabla 7.4 se presenta el presupuesto de ejecución del proyecto.

ESCUALE POLITÉCNICA DE INGENIERÍA DE GIJÓN		
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN DEL PROYECTO		
Nº	DESIGNACIÓN	PRECIO TOTAL (€)
1	Coste Equipos	118,80
2	Coste programas	8.581,05
3	Coste horas de trabajo	4.730,00
Presupuesto de ejecución material		13.429,85
12% Gastos generales		1.611,58
6% Beneficio industrial		805,79
Suma		15.847,22
21% IVA		3.327,92
Presupuesto de ejecución total en €		19.175,14
<p>El presupuesto total para la ejecución del proyecto asciende a la cantidad de diecinueve mil ciento setenta y cinco euros con catorce céntimos.</p> <p>Gijón, 15 de Julio de 2024</p>		

Tabla 7.4.- Presupuesto de ejecución del proyecto.

8. Referencias.

- [1] Peter S. Pao, et al. “Effect of Crack Tip Stress Concentration Factor on Fracture Resistance in Vacuum Environment”. Naval Research Laboratory, NAVY, USA (2015).
- [2] David Roylance. “Introduction to Fracture Mechanics”, Institute of Technology Cambridge (2001).
- [3] Captain Hiroshi Sekine. “The Grounding of the Exxon Valdez”, www.ukpandi.com (2021).
- [4] Gopal Gutta. “Japan Airlines Flight 123”, www.safetyproductions.com (2019).
- [5] James C. Newman, Jr. (2021). “Fatigue and Crack Growth under Constant- and Variable-Amplitude Loading in 9310 Steel Using ‘Rainflow-on-the-Fly’ Methodology”, Metals (2021).
- [6] ASTM E647-23, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, ASTM International, West Conshohocken, PA (2023).
- [7] Libro de apuntes “Tecnología de Materiales”, Departamento de Ciencia de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica, Universidad de Oviedo.
- [8] David Broek “Elementary engineering fracture mechanics”, Martinus Nijhoff publishers (1982).
- [9] Pippan, R., and Hohenwarter, A. “Fatigue crack closure: a review of the physical phenomena”, Fatigue Fract Engng Mater Struct (2017).
- [10] W Elber. “The significance of Fatigue Crack Closure”, ASTM International (1971).
- [11] Giovanna Calvín, et al. “Distribution of the through-thickness effective stress intensity factor range and its influence on fatigue crack growth rate curves”, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, volume 119 (2022).

- [12] Giovanna Calvín, et al. “A new effective stress intensity factor approach to determine thickness-independent fatigue crack growth rate curve”, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, volume 121 (2022).
- [13] Giovanna Calvín, et al. “Effects of stress ratio on plasticity-induced crack closure through three-dimensional advanced numerical finite element models”, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, volume 127 (2022).
- [14] Mikel Escalero, et al. “A methodology for simulating plasticity induced crack closure and crack shape evolution based on elastic–plastic fracture parameters”, *Engineering Fracture Mechanics*, volume 241 (2021).
- [15] F.V. Antunes, et al. “Fatigue crack growth in the 2050-T8 aluminium alloy”, *International Journal of Fatigue*, volume 115 (2018).
- [16] Tomáš Oplít, et al. “Strategy of plasticity induced crack closure numerical evaluation”, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, volumen 102 (2019).
- [17] Wang, C. H. "Introduction to Fracture Mechanics," DSTO Aeronautical and Maritime Research Laboratory (1996).
- [18] D. Camas et al. “Numerical modelling of three-dimensional fatigue crack closure: Mesh refinement”, *International Journal of Fatigue*, volume 113 (2018).
- [19] Antonio Garcia Gonzalez, et al. “A Literature Review of Incorporating Crack Tip Plasticity into Fatigue Crack Growth Models”, *Materials* 16, 7603 (2023).
- [20] Al Emran Ismai, et al. “Stress intensity factors for surface cracks in round bar under single and combined loadings”, *Meccanica*, volumen 41, number 4 (2012).
- [21] Ariel Rodríguez Arias. “Consideraciones sobre el crecimiento de la grieta por fatiga en materiales de ingeniería”, *Monografias.com*
-

[22] Giovanna Calvín García. “Estudio de los efectos plásticos de la punta de grieta en el crecimiento de grietas por fatiga en muestras CT de acero S275”, Trabajo fin de máster, Universidad de Mondragon (2020).

[23] Mario Martín Blanco. “Desarrollo de un modelo de elementos finitos para la simulación de propagación de grietas por fatiga teniendo en cuenta el efecto del cierre de grieta y la estela plástica”, Trabajo fin de grado, Universidad de Oviedo (2021).

[24] Mikel Escalero Igartua. “Predicción de crecimiento de grietas en fatiga considerando fenómenos plásticos de punta de grieta: limitaciones de enfoques actuales y una metodología novedosa”, Tesis doctoral, Universidad de Oviedo (2020).

[25] Thomas Havelka. “Numerical fatigue-analysis of a threaded connection model based on linear elastic fracture mechanics”, Diploma Thesis, Technische Universität Darmstadt (2016).

[26] Paulina Krolo, Davor Grandić y Celjko Smollić. “Experimental and Numerical Study of Mild Steel Behaviour under Cyclic Loading with Variable Strain Ranges”, Advances in Materials Science and Engineering Volume 2016 (2016).

Anexo A: Código implementado para la simulación del modelo.

A continuación, se presenta el código en lenguaje Python desarrollado durante este TFG. Concretamente, se trata del código empleado para la primera iteración del S275, cuyo objetivo es determinar el radio plástico, y con este valor, realizar una segunda interacción ajustando el parámetro 'e_size', que define el tamaño de los elementos de la maya, en función del resultado obtenido.

```

1  # -*- coding: utf-8 -*-
2  from abaqus import *
3  from abaqusConstants import *
4  import __main__
5  import math
6  import numpy as np
7
8  # -----
9
10 #PARAMETROS
11 #Probeta
12 W = 48. #Ancho, [mm]
13 B = 2.4 #Espesor, [mm]
14 aGrieta = W*0.5 #Longitud de la grieta, [mm]
15 #Modelo
16 test_force= 637.28 #Fuerza del ensayo en la simulación, [N]
17 #Malla
18 e_size = 0.3 #Tamaño de los elementos de la malla, [mm]
19 e_num = 24 #Numero de elementos de la malla segun la dirección del espesor (Z)
20 #Acero S275
21 E = 207000. #Modulo de Young, [Mpa]
22 Poisson = 0.3 #Coeficiente de Poisson
23 Ys = 285. #Limite elástico, [Mpa]
24 C1 = 13921. #Parametros ley de Chaboche
25 gam1 = 765.
26 C2 = 4240.
27 gam2 = 52.
28 C3 = 1573.
29 gam3 = 14.
30
31 # -----
32
33 #Creación del modelo y la base de datos
34 Mdb()
35 mymodel = mdb.models['Model-1']
36
37 # -----
38
39 #MÓDULO PART
40
41 #PROBETA CT
42
43 #CT: sketch and part
44 #Se representa la geometria de la probeta CT con 1/4 de simetria en un
45 #plano 2D (plano XY) paramétricamente
46 s = mymodel.ConstrainedSketch(name='CT_profile', sheetSize=200.0)
47 s.Line(point1=(0.0, 0.0), point2=(0.0, 0.6*W)) #
48 s.Line(point1=(0.0, 0.6*W), point2=(1.25*W, 0.6*W))
49 s.Line(point1=(1.25*W, 0.6*W), point2=(1.25*W, (W/16.)/2.))
50 s.Line(point1=(0.0, 0.0), point2=(W-0.2*W, 0.0))
51 s.Line(point1=(W-0.2*W, 0.0), point2=(W-0.2*W+((W/16.)/2.)/math.tan(math.
52 radians(15.))), (W/16.)/2.))
53 s.Line(point1=(W-0.2*W+((W/16.)/2.)/math.tan(math.radians(15.))), (W/16.)/2.),
54 point2=(1.25*W, (W/16.)/2.))
55 #Se extrulle la geometria 2D para obtener el modelo 3D
56 p = mymodel.Part(name='CT', dimensionality=THREE_D, type=DEFORMABLE_BODY)
57 p.BaseSolidExtrude(sketch=s, depth=B/2.)
58
59 #CT: Datum planes
60 #Se crean planos de referencia
61 f, v, d = p.faces, p.vertices, p.datums
62 p.DatumPlaneByOffset(plane=f[2], point=v[10])
63 crack_end=(0.5-0.2)*W
64 p.DatumPlaneByOffset(plane=d[2], flip=SIDE2, offset=crack_end)
65 p.DatumPlaneByOffset(plane=f[5], flip=SIDE2, offset=2.0)
66 p.DatumPlaneByOffset(plane=d[3], flip=SIDE1, offset=crack_end*0.2)
67
68 #CT: Particiones
69 #Se crean las particiones para dividir la geometria en diferentes secciones
70 c = p.cells

```

```
68 pickedCells = c.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
69 p.PartitionCellByDatumPlane(datumPlane=d[4], cells=pickedCells)
70 p.PartitionCellByDatumPlane(datumPlane=d[2], cells=pickedCells)
71 p.PartitionCellByDatumPlane(datumPlane=d[3], cells=pickedCells)
72
73 pickedCells = c.getSequenceFromMask(mask=('[#2 ]', ), )
74 p.PartitionCellByDatumPlane(datumPlane=d[5], cells=pickedCells)
75
76 pickedCells = c.getSequenceFromMask(mask=('[#8 ]', ), )
77 e1, v, d1 = p.edges, p.vertices, p.datums
78 p.PartitionCellByPlanePointNormal(point=v[25], normal=e1[31],
79 cells=pickedCells)
80
81 pickedCells = c.getSequenceFromMask(mask=('[#20 ]', ), )
82 p.PartitionCellByDatumPlane(datumPlane=d[2], cells=pickedCells)
83 pickedCells = c.getSequenceFromMask(mask=('[#40 ]', ), )
84 d1 = p.datums
85 p.PartitionCellByDatumPlane(datumPlane=d1[5], cells=pickedCells)
86
87 pickedCells = c.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
88 d = p.datums
89 p.PartitionCellByDatumPlane(datumPlane=d[3], cells=pickedCells)
90 #CT: Sets
91 #Se hacen agrupaciones geometricas de la pieza para simplificar la selección
92 #Toda la pieza
93 p.Set(cells=p.cells[:], name='Set_ALL')
94 #Celda correspondiente a la propagacion de la grieta
95 xyz1 = ((1-0.21)*W, 0.1, 0.1)
96 cells = p.cells.findAt((xyz1,))
97 p.Set(cells=cells, name='Set_Prop_Zone')
98 #Celda posterior al final de la grieta
99 xyz2 = ((1-0.51)*W, 0.1, 0.1)
100 cells = p.cells.findAt((xyz2,))
101 p.Set(cells=cells, name='Set_Ext_mesh')
102 #Geometria de la probeta sin la zona de propagacion ni la zona posterior
103 xyz3 = (0.1, 0.1, 0.1)
104 xyz4 = (0.1, 0.5*W, 0.1)
105 xyz5 = ((1-0.19)*W, 1, 0.1)
106 xyz6 = (W, 1.9, 0.1)
107 xyz7 = (W, 0.5*W, 0.1)
108 xyz8 = ((1-0.21)*W, 0.5*W, 0.1)
109 xyz9 = (0.49*W, 4, 0.1)
110 cells = p.cells.findAt((xyz3,),(xyz4,),(xyz5,),(xyz6,),(xyz7,),(xyz8,),(xyz9,))
111 p.Set(cells=cells, name='Set_Rest_Mesh')
112 #Superficie media segun plano de simetria XY
113 all_faces = p.faces[:]
114 lateral_faces = []
115 for face in all_faces:
116     centroid = face.getCentroid()
117     if centroid[0][2] == B/2.:
118         cen=[list(centroid[0]),]
119         lateral_faces.append(cen)
120 faces = p.faces.findAt(*lateral_faces)
121 p.Set(faces=faces, name='Set_mid')
122 #Superficie exterior segun plano XY
123 lateral_faces = []
124 for face in all_faces:
125     centroid = face.getCentroid()
126     if centroid[0][2] == 0:
127         cen=[list(centroid[0]),]
128         lateral_faces.append(cen)
129 faces = p.faces.findAt(*lateral_faces)
130 p.Set(faces=faces, name='Set_surface')
131 #Superficie plano de simetria XZ sin grieta
132 xyz10 = (0.1, 0., 0.1)
133 faces = p.faces.findAt((xyz10,))
134 p.Set(faces=faces, name='Set_no_grieta')
135 #Superficie plano de simetria XZ sin grieta
136 xyz11 = ((1-0.51)*W, 0., 0.1)
137 faces = p.faces.findAt((xyz11,))
```

```

138 p.Set(faces=faces, name='Set_no_grieta_2')
139 #Eje que corresponde con el frente final de la grieta
140 xyz12 = (W-aGrieta, 0., 0.1)
141 edge = p.edges.findAt((xyz12,))
142 p.Set(edges=edge, name='Crack_Front')
143 #Eje X de la celda de propagación
144 xyz13 = ((1-0.21)*W,0.,0.)
145 edge = p.edges.findAt((xyz13,))
146 p.Set(edges=edge, name='Prop_zone_edge')
147 #Eje x de la celda posterior a la grieta
148 xyz14 = (W-aGrieta-0.1,0.,0.)
149 edge = p.edges.findAt((xyz14,))
150 p.Set(edges=edge, name='medida_edge_x')
151 #Eje y de la celda posterior a la grieta
152 xyz15 = (W-aGrieta-crack_end*0.2,0.1,0.)
153 edge = p.edges.findAt((xyz15,))
154 p.Set(edges=edge, name='medida_edge_y')
155 #Superficie de aplicacion de la fuerza
156 xyz16 = (0.1, 0.6*W,0.1)
157 xyz17 = (W, 0.6*W,0.1)
158 xyz18 = ((1-0.21)*W, 0.6*W,0.1)
159 xyz19 = (0.49*W, 0.6*W,0.1)
160 faces = p.faces.findAt((xyz16,),(xyz17,),(xyz18,),(xyz19,))
161 p.Set(faces=faces, name='Surf_force')
162
163 xyz20 = ((1-0.21)*W, 0., 0.1)
164 faces = p.faces.findAt((xyz10,),(xyz11,),(xyz20,))
165 p.Set(faces=faces, name='Surf_contact')
166
167 #CT: Surfaces
168 #Superficie correspondiente al plano de simetria segun XZ
169 sidelFaces = p.faces.findAt((xyz10,),(xyz11,),(xyz20,))
170 p.Surface(sidelFaces=sidelFaces, name='Surf_contact')
171 #Superficie de aplicacion de la fuerza
172 sidelFaces = p.faces.findAt((xyz16,),(xyz17,),(xyz18,),(xyz19,))
173 p.Surface(sidelFaces=sidelFaces, name='Surf_force')
174
175 #SUPERFICIE RÍGIDA
176 #SR: Sketch and part
177 s1 = mymodel.ConstrainedSketch(name='SR_profile_',sheetSize=200.0)
178 s1.rectangle(point1=(0.0, 0.0), point2=(1.25*W+2., B/2.+2.))
179 p1 = mymodel.Part(name='Solid_surface', dimensionality=THREE_D, type=
DISCRETE_RIGID_SURFACE)
180 p1.BaseShell(sketch=s1)
181
182 #SR: Sets
183 f1 = p1.faces
184 faces1 = f1.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
185 p1.Set(faces=faces1, name='Set_ALL_SR')
186
187 #SR: Surface
188 s1 = p1.faces
189 side2Faces = s1.getSequenceFromMask(mask=('[#1 ]', ), )
190 p1.Surface(side2Faces=side2Faces, name='Surf_contact_SR')
191
192 #SR: Datum point
193 e1 = p1.edges
194 p1.DatumPointByOnFace(face=f1[0], edge1=e1[0], edge2=e1[3], offset1=1., offset2=
1.)
195
196 #-----
197
198 #MÓDULO PROPERTY
199
200 #Material
201 #Se crea el material
202 p = mdb.models['Model-1'].parts['CT']
203 mymodel.Material(name='Material-1')
204 mymaterial=mymodel.materials['Material-1']
205 #Se definen las propiedades elásticas

```

```

206 mymaterial.Elastic(table=((E, Poisson),))
207 #Se definen las propiedades plásticas
208 mymaterial.Plastic(hardening=COMBINED,
209     dataType=PARAMETERS, numBackstresses=3, extrapolation=LINEAR,
210     scaleStress=None, table=((Ys, C1, gam1, C2, gam2, C3, gam3), ))
211
212 #Sección
213 #Se crea una sección con el material definido
214 mymodel.HomogeneousSolidSection(name='Section-1',
215     material='Material-1', thickness=None)
216 #Se asigna la sección a la probeta CT
217 region = p.sets['Set_ALL']
218 p.SectionAssignment(region=region, sectionName='Section-1', offset=0.0,
219     offsetType=MIDDLE_SURFACE, offsetField='',
220     thicknessAssignment=FROM_SECTION)
221
222 #-----
223
224 #MÓDULO ASSEMBLY
225 #Se disponen las dos partes
226 a = mymodel.rootAssembly
227 i1 = a.Instance(name='CT-1', part=p, dependent=OFF)
228 i2 = a.Instance(name='Solid_surface-1', part=p1, dependent=ON)
229 #Se coloca la SR en posición respecto a la probeta CT
230 a.rotate(instanceList=('Solid_surface-1', ), axisPoint=(0.0, 0.0, 0.0),
231     axisDirection=(69.6, 0.0, 0.0), angle=90.0)
232 a.translate(instanceList=('Solid_surface-1', ), vector=(-1.0, 0.0, -1.0))
233
234 #Mover centro de coordenadas
235 #Se mueven ambas piezas para centrarlas respecto al centro de coordenadas
236 p.DatumPointByCoordinate(coords=(W, 0., B/2.))
237 a.translate(instanceList=('CT-1', 'Solid_surface-1'), vector=(-W, 0.0, -B/2.))
238 e1 = a.instances['CT-1'].edges
239 d1 = a.instances['CT-1'].datums
240 a.rotate(instanceList=('CT-1', 'Solid_surface-1'), axisPoint=(0.0, 0.0, 0.0),
241     axisDirection=(0.0, 10.0, 0.0), angle=180.0)
242
243 #Crack
244 #Se define la grieta
245 crackFront = a.instances['CT-1'].sets['Crack_Front']
246 crackTip = a.instances['CT-1'].sets['Crack_Tip']
247 a.engineeringFeatures.ContourIntegral(name='Crack-1', symmetric=ON,
248     crackFront=crackFront, crackTip=crackTip,
249     extensionDirectionMethod=CRACK_NORMAL, crackNormal=((0.0, 0.0, 0.0), (
250     1.0, 0.0, 0.0)), midNodePosition=0.5, collapsedElementAtTip=NONE)
251
252 #-----
253
254 #MÓDULO MESH
255
256 #CT:
257 e1 = a.instances['CT-1'].edges #Zona de la maya de poca relevancia, tamaño de
258     elemento 5 mm
259 pickedEdges = e1.getSequenceFromMask(mask=('[#ffffffffff #dfdc8fff #7 ]', ), )
260 a.seedEdgeBySize(edges=pickedEdges, size=5.0, deviationFactor=0.1,
261     constraint=FINER)
262 #Zona de propagación de la grieta
263 pickedEdges = e1.getSequenceFromMask(mask=('[#0 #20000000 ]', ), )
264 a.seedEdgeByNumber(edges=pickedEdges, number=20, constraint=FINER)
265 #Ejes de la zona posterior al frente de grieta
266 pickedEdges = e1.getSequenceFromMask(mask=('[#0 #1000 ]', ), )
267 a.seedEdgeBySize(edges=pickedEdges, size=e_size, deviationFactor=0.1,
268     constraint=FINER)
269 pickedEdges = e1.getSequenceFromMask(mask=('[#0 #200 ]', ), )
270 a.seedEdgeBySize(edges=pickedEdges, size=e_size, deviationFactor=0.1,
271     constraint=FINER)
272 #Espesor
273 pickedEdges = e1.getSequenceFromMask(mask=('[#0 #2000 ]', ), )
274 a.seedEdgeByNumber(edges=pickedEdges, number=e_num, constraint=FINER)
275 #Se genera la malla

```

```

275 partInstances =(a.instances['CT-1'], )
276 a.generateMesh(regions=partInstances)
277
278 #SR:
279 p1.setMeshControls(regions=p1.faces[:], elemShape=QUAD, technique=STRUCTURED)
280 p1.seedPart(size=B*2, deviationFactor=0.1, minSizeFactor=0.1)
281 p1.generateMesh()
282
283 #-----
284
285 #MÓDULO STEP
286
287 #Pasos de análisis
288 #Se define la duracion de cada sub-step
289 i_i = 0.025 # [s]
290 #Step para el primer ciclo carga-descarga y la primera carga
291 mymodel.StaticStep(name='Step_Carga', previous='Initial',
292   timePeriod=1.5, maxNumInc=60, initialInc=i_i, minInc=1e-05, maxInc=i_i)
293 #1º Step para la liberacion de nodos
294 mymodel.StaticStep(name='Step-1', previous='Step_Carga',
295   timePeriod=1.0, maxNumInc=40, initialInc=i_i, minInc=1e-05, maxInc=i_i)
296 #19 steps restantes para el total de 20 liberaciones de nodos
297 for i in range(1,20):
298   step = 'Step-' + str(i+1)
299   p_step = 'Step-' + str(i)
300   mymodel.StaticStep(name=step, previous=p_step,
301     timePeriod=1.0, maxNumInc=40, initialInc=i_i, minInc=1e-05, maxInc=i_i)
302   #Step de estabilización de resultados
303   mymodel.StaticStep(name='Step_esta', previous='Step-20',
304     timePeriod=7.5, maxNumInc=300, initialInc=i_i, minInc=1e-05, maxInc=i_i)
305   #Step final de medición
306   mymodel.StaticStep(name='Step_final', previous='Step_esta',
307     timePeriod=0.5, maxNumInc=45, initialInc=0.0125, minInc=1e-05, maxInc=0.0125
308   )
309 #-----
310
311 #MÓDULO INTERACCIÓN
312
313 #Contacto
314 #Se definen las propiedades del contacto
315 mymodel.ContactProperty('contacto')
316 mymodel.interactionProperties['contacto'].TangentialBehavior(
317   formulation=FRICITIONLESS)
318 mymodel.interactionProperties['contacto'].NormalBehavior(
319   pressureOverclosure=HARD, allowSeparation=ON, contactStiffness=DEFAULT,
320   contactStiffnessScaleFactor=1.0, clearanceAtZeroContactPressure=0.0,
321   constraintEnforcementMethod=AUGMENTED_LAGRANGE)
322 #Superficie maestra por se la mas rigida
323 region1=a.instances['Solid_surface-1'].surfaces['Surf_contact_SR']
324 #Superficie esclava
325 region2=a.instances['CT-1'].surfaces['Surf_contact']
326 mymodel.SurfaceToSurfaceContactStd(name='Int-2',
327   createStepName='Initial', main=region1, secondary=region2,
328   sliding=FINITE, thickness=ON, interactionProperty='contacto',
329   adjustMethod=NONE, initialClearance=OMIT, datumAxis=None,
330   clearanceRegion=None)
331 #Se permite una penetracion de 5e-05 mm
332 mymodel.StdContactControl(name='ContCtrl-1', penetrationTolChoice=ABSOLUTE,
333   absolutePenetrationTolerance=5e-05)
334
335 #SR:
336 #Se define el comportamiento rigido de la SR
337 rp1 = a.ReferencePoint(point=(1.25*W/2, -5 , B/2.))
338 a.Set(referencePoints=(a.referencePoints[rp1.id]), name='Reference Point_SR')
339
340 a = mymodel.rootAssembly
341 region2=a.instances['Solid_surface-1'].sets['Set_ALL_SR']
342 region1=a.sets['Reference Point_SR']
343 mymodel.RigidBody(name='Rigid_body', refPointRegion=region1,

```



```

343     bodyRegion=region2)
344
345     #-----
346
347     #MÓDULO LOAD
348
349     #BC: CT
350     #Simetría respecto eje XZ
351     region = a.instances['CT-1'].sets['Set_mid']
352     mymodel.ZsymmBC(name='BC_mid_plane', createStepName='Initial',
353         region=region, localCsys=None)
354     #Simetría respecto eje XY
355     region = a.instances['CT-1'].sets['Set_no_grieta']
356     mymodel.YsymmBC(name='BC_no_grieta', createStepName='Initial',
357         region=region, localCsys=None)
358     region = a.instances['CT-1'].sets['Set_no_grieta_2']
359     mymodel.YsymmBC(name='BC_no_grieta_2', createStepName='Initial',
360         region=region, localCsys=None)
361     #Se limita el desplazamiento en el eje X de la superficie de la carga
362     region = a.instances['CT-1'].sets['Surf_force']
363     mymodel.DisplacementBC(name='BC_Load_plane',
364         createStepName='Initial', region=region, u1=SET, u2=UNSET, u3=UNSET,
365         ur1=UNSET, ur2=UNSET, ur3=UNSET, amplitud=UNSET,
366         distributionType=UNIFORM, fieldName='', localCsys=None)
367
368     l_e_x=(aGrieta-0.2*W)/20         #Longitud de elementos de la malla eje x
369     inicial_crack_ms = (0.2*W,0,0) #Punto inicial de la grieta
370     #Simetría respecto eje XZ en las filas de nodos que forman la zona de
371     #propagación
372     for i in range(1,21):
373         BC_name = 'BC_' + str(i)
374         set_name = 'set_BC_' + str(i)
375         n_f = i-1
376         n1 = a.instances['CT-1'].nodes
377         nodes1 = n1.getByBoundingBox((inicial_crack_ms[0]+n_f*l_e_x)-0.1,-0.1,-0.1,(
378             inicial_crack_ms[0]+n_f*l_e_x)+0.1,0.1,B/2.+0.1)
379         region = a.Set(nodes=nodes1, name=set_name)
380         mymodel.YsymmBC(name=BC_name, createStepName='Initial',
381             region=region, localCsys=None)
382
383     #BC: SR
384     #Se define el encastre de la SR
385     region = a.sets['Reference Point_SR']
386     mymodel.EncastreBC(name='BC_RB', createStepName='Initial',
387         region=region, localCsys=None)
388
389     #Liberar nodos
390     #Se liberan las BC de cada fila de nodos en su correspondiente Step
391     for i in range(1,21):
392         BC_name = 'BC_' + str(i)
393         for j in range(i,22):
394             step = 'Step-' + str(j)
395             mymodel.boundaryConditions[BC_name].deactivate(step)
396
397     #Load
398     #Se define la amplitud del step carga
399     mymodel.TabularAmplitude(name='Amp-carga', timeSpan=STEP,
400         smooth=SOLVER_DEFAULT, data=((0.0, 0.0), (0.5, 1.0), (1.0, 0.1), (1.5, 1.0)
401         )))
402     #Se crea la fuerza y se asigna la amplitud y magnitud
403     region = a.instances['CT-1'].surfaces['Surf_force']
404     mymodel.Pressure(name='Carga_ini', createStepName='Step_Carga',
405         region=region, distributionType=TOTAL_FORCE, field='', magnitud=-test_force
406         ,
407         amplitud='Amp-carga')
408     #Se desactiva antes de que comience el siguiente step
409     mymodel.loads['Carga_ini'].deactivate('Step-1')
410     #Se define la carga de los steps de liberación de nodos
411     mymodel.TabularAmplitude(name='Amp-liberacion', timeSpan=STEP,
412         smooth=SOLVER_DEFAULT, data=((0.0, 1.0), (0.5, 0.1), (1.0, 1.0)))

```

```

409 mymodel.Pressure(name='Carga_libera', createStepName='Step-1',
410     region=region, distributionType=TOTAL_FORCE, field='', magnitude=-test_force
411     ,
412     amplitude='Amp-liberacion')
412 mymodel.loads['Carga_libera'].deactivate('Step_esta')
413     #Se define la carga del step de estabilización
414 mymodel.TabularAmplitude(name='Amp-esta', timeSpan=STEP,
415     smooth=SOLVER_DEFAULT, data=((0.0, 1.0), (0.5, 0.1), (1.0, 1.0),
416     (1.5, 0.1), (2.0, 1.0), (2.5, 0.1), (3.0, 1.0), (3.5, 0.1), (4.0, 1.0),
417     (4.5, 0.1), (5.0, 1.0), (5.5, 0.1), (6.0, 1.0), (6.5, 0.1), (7.0, 1.0), (7.5
418     , 0.1)))
418 mymodel.Pressure(name='Carga_esta', createStepName='Step_esta',
419     region=region, distributionType=TOTAL_FORCE, field='', magnitude=-test_force
420     ,
421     amplitude='Amp-esta')
421 mymodel.loads['Carga_esta'].deactivate('Step_final')
422     #Se define la carga del step final de medición
423 mymodel.TabularAmplitude(name='Amp-final', timeSpan=STEP,
424     smooth=SOLVER_DEFAULT, data=((0.0, 0.1), (0.5, 1.0)))
425 mymodel.Pressure(name='Carga_final', createStepName='Step_final',
426     region=region, distributionType=TOTAL_FORCE, field='', magnitude=-test_force
427     ,
428     amplitude='Amp-final')
429 #-----
430
431 #History Outout
432     #Se borran los campos por defecto para no calcular de más
433 del mymodel.fieldOutputRequests['F-Output-1'], mymodel.historyOutputRequests[
434     'H-Output-1']
434     #Para medir el SIF
435 mymodel.HistoryOutputRequest(name='K',
436     createStepName='Step_final', frequency=1, contourIntegral='Crack-1',
437     sectionPoints=DEFAULT, rebar=EXCLUDE, numberOfContours=1,
438     stressInitializationStep='Step_esta',
439     contourType=K_FACTORS)
439     #Para medir el desplazamiento vertical
440 regionDef=a.sets['set_BC_20']
441 mymodel.HistoryOutputRequest(name='H-Output-5',
442     createStepName='Step_final', variables=('U2', 'CDISP'), frequency=1,
443     region=regionDef, sectionPoints=DEFAULT, rebar=EXCLUDE)
444
445 #-----
446
447 #Job
448 myjob = mdb.Job(name='Job-1', model='Model-1', description='', type=ANALYSIS,
449     atTime=None, waitMinutes=0, waitHours=0, queue=None, memory=90,
450     memoryUnits=PERCENTAGE, getMemoryFromAnalysis=True,
451     explicitPrecision=SINGLE, nodalOutputPrecision=SINGLE, echoPrint=OFF,
452     modelPrint=OFF, contactPrint=OFF, historyPrint=OFF, userSubroutine='',
453     scratch='', resultsFormat=ODB)
454     #Lanzar el job
455 myjob.submit()
456 myjob.waitForCompletion()

```

Anexo B: Scripts desarrollados para extraer los resultados de Abaqus.

A continuación, se presenta el código desarrollado en lenguaje Python, con el que se extrae de Abaqus el valor máximo del factor intensidad de tensión y se calcula el radio plástico mediante la ecuación 1.8.

```
1  # -*- coding: utf-8 -*-
2  from odbAccess import openOdb
3  import math
4  from abaqus import *
5  from abaqusConstants import *
6  import __main__
7  #Se accede al fichero de resultados de la simulación (odb)
8  odb = openOdb(path='Job-1.odb')
9  #Paso de análisis t region en el que se realiza la medición
10 step = odb.steps['Step_final']
11 history_region = step.historyRegions['ElementSet ALL ELEMENTS']
12 # Para calcular el radio plástico es necesario disponer del valor máximo del
13   SIF.
14 # Mediante el siguiente bucle, se accede uno por uno a los valores del SIF en
15   los 20 nodos que forman el frente de grieta
16 # y se añade a una lista el valor máximo en cada nodo.
17 max_k1_list = [] #Lista vacía para guardar los resultados
18 max_k1 = 0 #Parámetro para almacenar el SIF máximo
19 for i in range(1, 21):
20     k1_data = history_region.historyOutputs['K1 at K_CRACK-1_CT-1_CRACK_FRONT-F'
21     +str(i)+'_Contour_1'].data
22     t, k1 = zip(*k1_data)
23     np.savetxt('275_k_node_'+str(i)+'.txt',np.transpose([t,k1]), fmt='%12.6f')
24     #Se utiliza otro bucle para ir calculando cual es el valor máximo del SIF
25     for data_point in k1_data:
26         if data_point[1] > max_k1:
27             max_k1 = data_point[1]
28     max_k1_list.append(max_k1) #Se añade el valor maximo a la lista
29     max_k1 = 0 #Se resetea el parámetro para el siguiente nodo
30
31 #El SIF máximo se calcula como el máximo de todos los nodos
32 K_max = max(max_k1_list)
33 #Cálculo del radio plástico según la fórmula de Dugdale
34 rp = (math.pi/8) * (K_max/Ys)**2 #[mm]
35 #Se presenta el resultado en la consola de Abaqus
36 print("El valor del radio plástico es: "+str(rp)+' mm')
37
```

Finalmente, se presenta el código implementado para extraer en formato de texto la evolución del desplazamiento vertical en cada nodo, así como la obtención del instante en el que se produce la apertura de la grieta.

```
1  # -*- coding: utf-8 -*-
2  from odbAccess import openOdb
3  import math
4  from abaqus import *
5  from abaqusConstants import *
6  import __main__
7  import numpy as np
8  #Se accede al fichero de resultados de la simulación (odb)
9  odb = openOdb(path='Job-1.odb')
10 #Paso de análisis en el que se realiza la medición
11 step = odb.steps['Step_final']
12 #Se selecciona el set correspondiente a la última fila de nodos liberados
13 node_set = a.sets['set_BC_20']
14 #Se agrupan todos los nodos en una variable
15 nodes = node_set.nodes
16
17 #Mediante un bucle se itera sobre todos los nodos y se extraen los resultados
18 #individuales.
19 CTOD_list = [] #Lista vacia para acumular el valor del CTOD
20 t_opening_list = [] #Lista vacia para acumular el instante de apertura de la
21 #grieta
22 for i in nodes:
23     num = i.label
24     history_region = step.historyRegions['Node CT-1.'+str(num)]
25     u2_data = history_region.historyOutputs['U2'].data
26     t, u2 = zip(*u2_data)
27     #Se guardan los resultados de tiempo-desplazamiento de cada nodo en un
28     #archivo de texto para poder exportarlos a otro programa
29     np.savetxt('275_displacement_node_'+str(num)+'.txt',np.transpose([t,u2]),
30               fmt='%12.6f')
31     #Se utiliza otro bucle para iterar entre las 40 mediciones que se realizan
32     #y se guarda el instante temporal en el que la grieta se abre, es decir,
33     #cuando el desplazamiento vertical es mayor que
34     0
35
36     tiempo = 0
37     CTOD = 0
38     for i in range(0,40):
39         if u2_data[i][1]>0.:
40             tiempo=u2_data[i][0]
41             break
42     CTOD=u2_data[-1][1] #El CTOD sera el último valor medido a máxima carga
43     #Se almacenan en las listas el tiempo de apertura y el CTOD de cada nodo
44     t_opening_list.append(tiempo)
45     CTOD_list.append(CTOD)
```