



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

***FATIGUE PROPERTIES OF STEEL S355***

***-RESUMEN EN ESPAÑOL-***

TRABAJO DE FIN DE GRADO

AUTOR

D. Álvaro Martín González

SUPERVISOR

Assoc. Prof. Stanislav Seitl, Ph. D.

SUPERVISOR ESPECIALISTA:

Ing. Petr Miarka

BRNO, REPÚBLICA CHECA 2018

## Contenido

1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. ANTECEDENTES TEÓRICOS .....	4
2.1 Mecánica de Fractura Elástico Lineal .....	4
2.1.1 <i>Análisis de tensiones en grietas</i> .....	4
2.1.2 <i>El factor intensidad de tensión</i> .....	5
2.1.3 <i>Tensión T</i> .....	5
2.1.4 <i>Modelos de falla de fatiga</i> .....	6
2.1.5 <i>La probeta CT (ASTM E647)</i> .....	10
2.1.6 <i>Acero estructural S355 (EN 10025)</i> .....	11
3. OBJETIVO DEL TRABAJO .....	12
4. MODELO NUMÉRICO EN ANSYS.....	12
5. RESULTADOS NUMÉRICOS.....	14
5.1 Factor Intensidad de Tensiones .....	14
5.1.1 <i>Cálculos de la literatura de ASTM</i> .....	14
5.1.2 <i>Cálculos de la literatura de Knésl y Bednar</i> .....	14
5.1.3 <i>Cálculos de ANSYS</i> .....	15
5.2 <i>Tensión T</i> .....	15
5.2.1 <i>Cálculos de la literatura de Knésl y Bednar</i> .....	15
5.2.2 <i>Cálculos de ANSYS</i> .....	16
6. VALORES DE S355 PUBLICADOS EN LITERATURA Y EXPERIMENTOS EN IPM.....	17
7. COMPARACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....	17
7.1.1 <i>Comparación del factor de Intensidad de Tensiones</i> .....	17
7.1.2 <i>Comparación de la tensión T</i> .....	18
7.2 Comparación de las curvas S-N.....	18
7.3 Comparación de las curvas de velocidad de propagación de grieta .....	19
8. CONCLUSIONES.....	19

## 1. INTRODUCCIÓN

En general, tal vez la fatiga es el modo de fallo más importante que se debe considerar en el diseño mecánico y estructural.

Además, las fallas de fatiga y fractura son a veces catastróficas, ocurriendo sin advertencia y causando daños materiales significativos y pérdida de vidas. 1

El acero estructural y, en particular, el acero con bajo contenido en carbono, como el S355, es utilizado en pernos, cadenas, bielas, y, en ingeniería civil, en vías de ferrocarril y estructuras metálicas, permitiendo el diseño de estructuras más ligeras, más esbeltas y más sencillas con un alto rendimiento estructural.

Cuando estas grandes estructuras se diseñan y se construyen, diversos componentes individuales son ensamblados (generalmente mediante soldadura). En estas situaciones, no importa cuánto cuidado se tenga y cómo de estricto sea el control de calidad aplicado, la existencia de pequeños defectos (grietas) es inevitable. Las dimensiones de las grietas preexistentes suelen definirse por el límite de detección del método de ensayo no destructivo aplicado en el control de calidad después de la fabricación o en inspecciones periódicas en servicio. 2

Puesto que la primera investigación sobre la fatiga del metal comenzó en el siglo XVIII (Wilhelm Albert 3), un gran número de investigadores de todo el mundo han contribuido a la base de conocimientos que se ha venido acumulando.

De lejos, la persona más influyente al principio del estudio sistemático de la fatiga fue August Wöhler.

El estudio de la *mecánica de la fractura*, que describe la física y las matemáticas detrás del crecimiento de grietas en sólidos frágiles, se inició con Alan Griffith en 1921 4 pero es a principios de los años 60 cuando Paris y otros 5 demostraron que la mecánica de la fractura es una herramienta útil para caracterizar el crecimiento de la grieta por fatiga. Desde entonces, la aplicación de la mecánica de la fractura a los problemas de fatiga se ha vuelto rutinaria.

Por otro lado, el mayor avance en el *tratamiento estadístico* de la fatiga ocurre con la obra de Waloddi Weibull a finales de los años 1930 6. Además, la ASTM ha desempeñado un papel activo en el desarrollo de métodos estadísticos de análisis de datos de fatiga que datan de 1951 7, 8.

Debido a esto, los problemas de fatiga se han enfrentado tradicionalmente desde dos puntos de vista diferentes: los enfoques basados en las curvas de Wöhler (estadística) y los enfoques basados en la mecánica de la fractura, que constituyen dos métodos complementarios pero comprensivos para hacer frente a la predicción de vida a fatiga de elementos mecánicos y estructurales.

## 2. ANTECEDENTES TEÓRICOS

### 2.1 Mecánica de Fractura Elástico Lineal

La Mecánica de Fractura Elástico Lineal (MFEL) es válida siempre que la deformación no lineal del material se confine en una pequeña región que rodea la punta de la grieta.

Hay dos enfoques para la Mecánica de Fractura Elástico Lineal: la energía ( $G$ ) y la intensidad de tensión. En el caso de los materiales perfectamente elásticos, ambos factores son relacionadas mediante la ecuación (1). Esta tesis no se centra en el enfoque energético.

$$G = \frac{K^2}{E'}, \quad (1)$$

donde:

$E' = E$  Módulo de Young en tensión plana Y

$E' = \frac{E}{1-\nu}$  Módulo de Young en deformación plana, donde  $\nu$  es el ratio de Poisson.

#### 2.1.1 Análisis de tensiones en grietas

Si definimos un sistema de coordenadas polares con el origen en la punta de la grieta (Figura 1), se puede demostrar que el campo de tensiones en cualquier cuerpo agrietado elástico lineal viene dado por:

$$\sigma_{ij} = \left(\frac{k}{\sqrt{r}}\right) f_{ij}(\theta) + \sum_{m=0}^{\infty} A_m r^{\frac{m}{2}} g_{ij}^{(m)}(\theta), \quad (2)$$

donde:

$\sigma_{ij}$  = tensor de tensión,

$r$  y  $\theta$  son coordenadas Polares definidas en la Figura 1

$k$  = constante, y

$f_{ij}$  = función adimensional de  $\theta$  en el término principal.

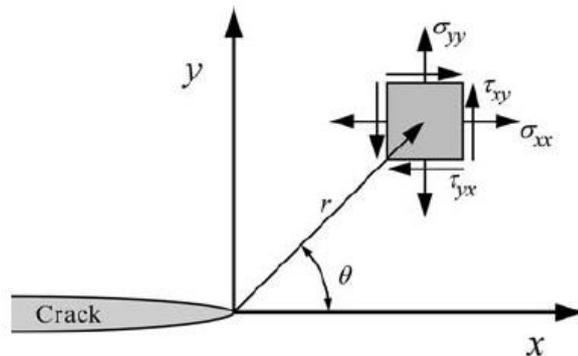


Figura 1-Definición del sistema de coordenadas con origen en punta de grieta: Polar y Cartesiano. 9

Por lo tanto, existe una singularidad en las tensiones en la punta de una grieta elástica porque el campo de tensiones en cualquier cuerpo agrietado elástico lineal contiene un término principal que es proporcional a  $\frac{1}{\sqrt{r}}$ . Según  $r \rightarrow 0$ , el término principal

se acerca infinito, siendo así la tensión asintótica a  $r = 0$  (independientemente de la configuración del cuerpo agrietado) como se muestra en la ecuación (2).

### 2.1.2 El factor intensidad de tensión

Hay tres tipos de carga que una grieta puede experimentar, como ilustra la Figura 2. Un cuerpo agrietado puede ser cargado en cualquiera de estos modos, o una combinación de dos o tres modos.

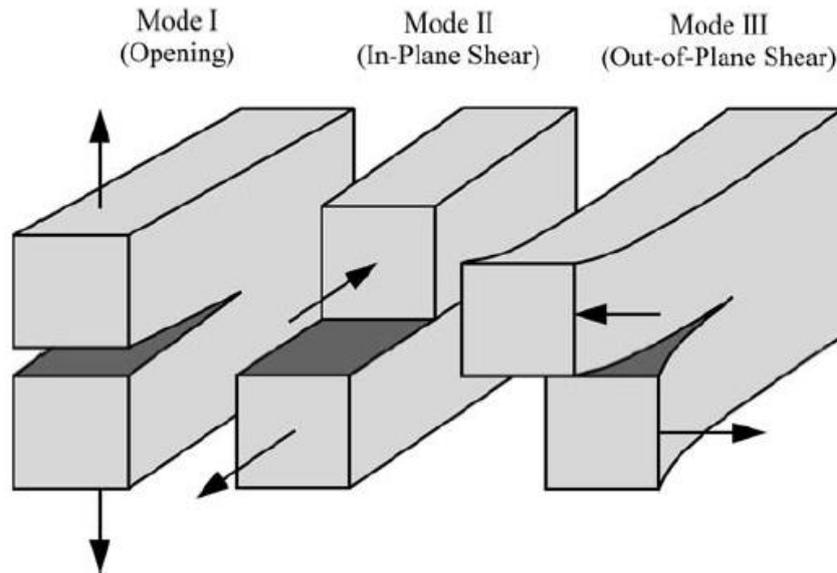


Figura 2- Los tres modos de carga que una grieta puede experimentar. 9

Cada modo de carga produce la singularidad en la punta de la grieta, pero las constantes de proporcionalidad  $k$  y  $f_{ij}$  dependen del modo. Es conveniente en este punto para reemplazar  $k$  por el *factor intensidad de tensión FIT*  $K$ , donde  $K = k\sqrt{2\pi}$ . El factor de intensidad de la tensión se sirve generalmente un subíndice para denotar el modo de carga, es decir,  $K_I$ ,  $K_{II}$  o  $K_{III}$ .

El factor de intensidad de tensión define la amplitud de la singularidad de la extremidad de la grieta. Esto es, las tensiones cerca de la punta de grieta aumentan en proporción a  $K$ . Por otra parte, el factor de intensidad de tensión define completamente las condiciones de la punta de grieta; Si se conoce  $K$ , es posible obtener todos los componentes de la deformación, la tensión, y el desplazamiento en función de  $r$  y  $\theta$ . Esta descripción uniparamétrica de las condiciones de la extremidad de la grieta es uno de los conceptos más importantes en la mecánica de la fractura.

### 2.1.3 Tensión $T$

La tensión  $T$  se utiliza como un segundo parámetro para caracterizar completamente la extremidad de la grieta.

Este parámetro, en condiciones planas, representa la tensión actuando paralelamente a la punta de la grieta en la dirección  $X$ .

La tensión  $T$  puede tener un efecto significativo sobre el tamaño y la forma de la zona plástica que se desarrolla alrededor de la grieta.

La tensión  $T$  se puede determinar de varias maneras, analíticamente o mediante modelización numérica. El método considerado en este trabajo, para  $\theta = 0$  en coordenadas Polares (Figura 3), es:

$$T = \lim_{r \rightarrow 0} (\sigma_{xx} - \sigma_{yy})_{\theta=0}, \quad (3)$$

donde:

$\sigma_{xx}$  la tensión como se define en la Figura 3 para  $\theta = 0^\circ$  y

$\sigma_{yy}$  la tensión como se define en la Figura 3 para  $\theta = 90^\circ$ .

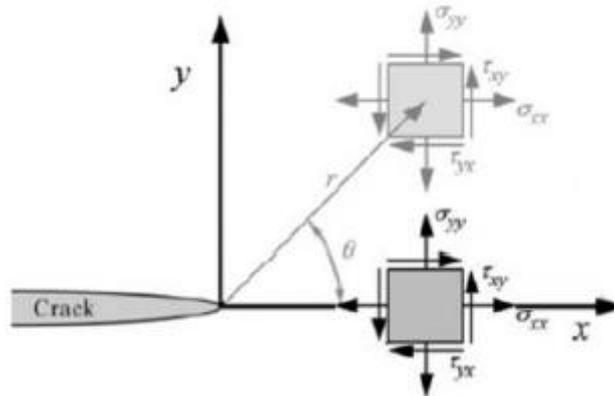


Figura 3-Definición de coordenadas Polares con  $\theta = 0$  y  $90$

#### 2.1.4 Modelos de falla de fatiga

Dependiendo del problema específico a resolver, uno de los dos enfoques es seleccionado:

-Modelos basados en las curvas de Wöhler.

-Modelos basados en la mecánica de la fractura.

A pesar de que estos dos enfoques se han considerado normalmente por separado y se ha obviado la conexión entre ellos, de modo que muchos investigadores los consideran como dos problemas completamente diferentes, en Castillo y otros 10 se presenta una clara conexión entre los dos modelos, mostrando que comparten información común, siendo útil en sendas aplicaciones.

##### 2.1.4.1 Enfoque de la mecánica de la fractura

➤ *Las relaciones funcionales del crecimiento de grietas por ciclo*

- Velocidad de propagación de grieta bajo amplitud constante y deformación plástica a pequeña escala ( $f_1$ )

Como se puede ver en la Figura 4, una zona plástica cíclica se forma en la extremidad de la grieta. Si la zona plástica es suficientemente pequeña, de manera que la grieta yace dentro de la zona de singularidad elástica, las condiciones en la punta de la grieta están definidas únicamente por el valor de  $K$ , y la velocidad de propagación de grieta se caracteriza por  $K_{max}$  y  $K_{min}$  (Gráfico 1).

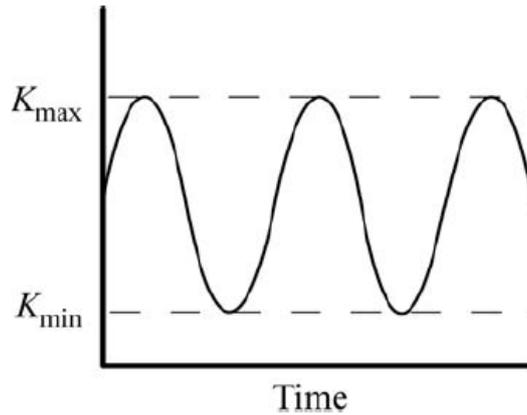


Gráfico 1-Crecimiento constante de la fatiga de la amplitud. 9

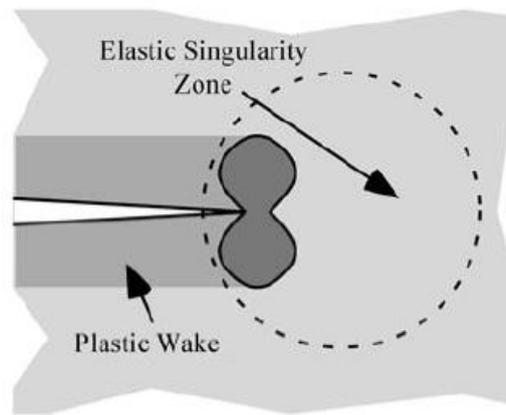


Figura 4-Condición de deformación plástica a pequeña escala. 9

La relación funcional para la velocidad de propagación de grieta se puede expresar como:

$$\frac{da}{dN} = f_1(\Delta K, R), \quad (4)$$

donde:

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

$$R = \frac{K_{\min}}{K_{\max}}, \text{ y}$$

$\frac{da}{dN}$  = crecimiento de grieta por ciclo (velocidad de propagación de grieta),

➤ *Etapas de la propagación de grietas a fatiga y vida útil*

La Figura 5 ilustra la apariencia típica de la sección de un elemento que ha fallado por fatiga. La grieta nuclea alrededor de un punto que actúa como concentrador de tensiones, en este caso, en una discontinuidad geométrica (el chavetero), desde donde se extiende gradualmente dejando lo que se conoce como "marcas de playa". Durante la fractura progresiva de material, se produce fricción entre las caras de la sección, produciendo una superficie lisa y brillante.

Finalmente, el elemento falla repentinamente dejando una superficie áspera como si fuera un material frágil.

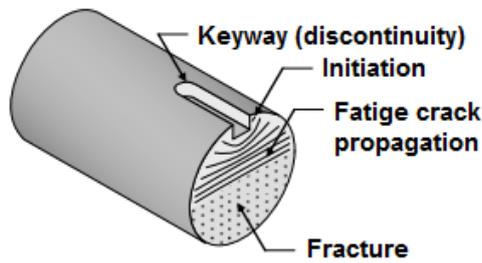


Figura 5-Aspecto típico de la fractura por fatiga.

Generalmente, en la vida de las estructuras cargadas cíclicamente hechas de aleaciones técnicas se divide en tres etapas:

○ 1- Nucleación

La nucleación se produce debido a la acumulación de micro cambios en la estructura del metal debido a reiterativos esfuerzos cortantes. Esto origina deformación plástica hasta que aparece la primera microgrieta. Afecta a unos pocos granos solamente.

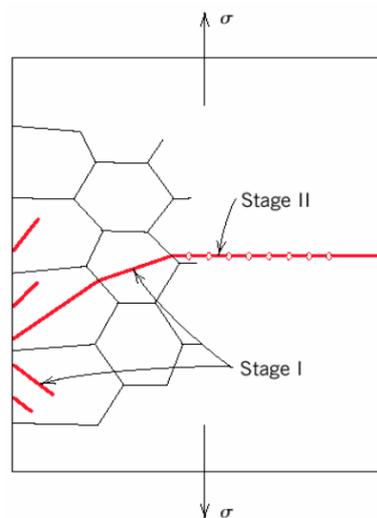


Figura 6-Nucleación y propagación de grietas. 2

Así, el mecanismo de nucleación de grieta depende de varios factores tales como el material (tamaño y orientación de grano), geometría (discontinuidades que actúan como concentradores de tensión), superficie (irregular), ambiente (corrosión), etc.

○ 2- Propagación

Una grieta nucleada en la primera etapa puede propagarse o no. Si se propaga, es en esta etapa donde cambia de orientación la microgrieta para continuar propagándose en un plano perpendicular al de los esfuerzos de tensión aplicados.

**Aplicación de la mecánica de la fractura en la propagación de grietas:**

- El diagrama  $\frac{da}{dN} - \Delta K$

La espina dorsal de la mecánica de la fractura es el diagrama doble logarítmico  $\frac{da}{dN} - \Delta K$ . La curva sigmoidea (Gráfico 2) contiene tres regiones distintas: la región umbral  $\Delta K_{th}$  (I), la llamada Región de Paris (II) y la región en la que se produce la fractura (III).

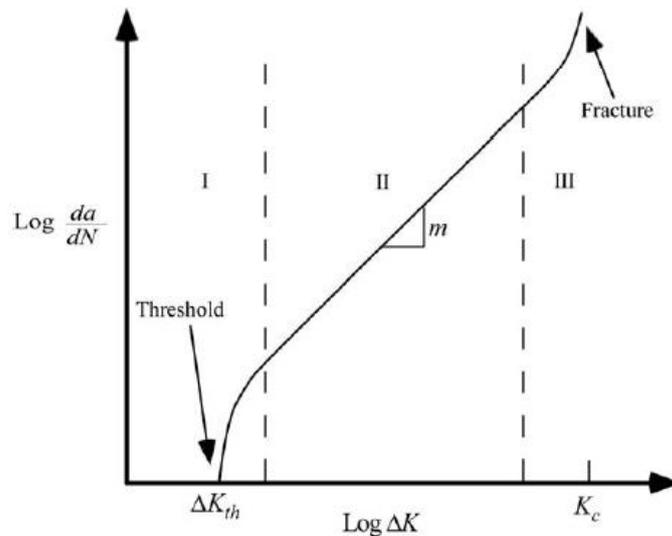


Gráfico 2-Comportamiento típico del crecimiento de grieta por fatiga en metales. 9

La región lineal del Gráfico 2 puede ser descrita por una ley potencial (Ley de Paris):

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m, \quad (5)$$

donde  $C$  y  $m$  son constantes del material que se determinan experimentalmente.

Según ecuación (5), la tasa de crecimiento de grieta por fatiga depende solamente de  $\Delta K$ ;  $\frac{da}{dN}$  es insensible al ratio  $R$  en la región II.

Generalmente, para simplificar los cálculos, las regiones I y III son a menudo ignoradas y la vida estimada a fatiga se hace utilizando exclusivamente la ley de la región II. Bajo este supuesto, integrando la ecuación de París (5), resulta el número de ciclos requeridos para propagar una grieta desde una longitud inicial  $a_o$  hasta una longitud final  $a_f$ :

$$N = \int_{a_o}^{a_f} \frac{da}{C \Delta K^m} \quad (6)$$

### ○ 3- Fallo final

El tipo de fractura producida por la fatiga se llama comúnmente *Progresiva*, debido a la manera gradual en la que ocurre, *Frágil*, porque la ocurre sin deformación plástica apreciable, y *Repentino*, porque ocurre muy rápidamente.

#### 2.1.4.2 Enfoque de las curvas de Wöhler

##### ➤ Curvas Tensión-Número de ciclos

En situaciones de fatiga del alto ciclo, el comportamiento de los materiales es caracterizado comúnmente por la curva  $S-N$  (del inglés, *Stress-Number of cycles*), también conocido como curva de Wöhler.

La progresión de la S-N Curva puede ser influenciado por muchos factores tales como tensión media, frecuencia de carga, material, temperatura, corrosión, tensiones residuales y/o la presencia de muescas.

➤ *Descripción estadística de la prueba de fatiga*

La consecuencia directa de lo previamente explicado en el mecanismo de nucleación es que el comportamiento a fatiga de los materiales es de naturaleza aleatoria y debe estudiarse mediante leyes estadísticas. Esto es, dos idénticos especímenes probados bajo una misma amplitud de tensión no se rompen a igual número de ciclos. Debido a esto, La curva S-N ha de ser, de manera más apropiada, una tensión-ciclos-probabilidad (S-N-P).

Tres modelos son considerados en la literatura para la descripción de la curva S-N: el modelo de Basquin, el modelo de Canteli-Castillo y el modelo de *Kohout-Věchet*, si bien, a la hora de evaluar los resultados, solo se utilizó el de Basquin, por lo que los otros son omitidos en este resumen, pudiéndose consultar en la versión completa.

○ *El modelo de Basquin*

A menudo, la curva Wöhler se representa como una línea recta en un gráfico doble logarítmico. Así, los parámetros materiales ( $A$ ,  $B$ ) de la ecuación de Basquin se dan en la ecuación siguiente:

$$\sigma = AN^B. \quad (7)$$

**2.1.5 La probeta CT (ASTM E647)**

La American Society of Testing and Materials (ASTM), define la probeta compacta de tensión, CT, (del inglés, *Compact Tension*) como una probeta con una entalla practicada en un borde (para facilitar el preagrietamiento por fatiga) y cargada en tensión. La probeta CT tiene la ventaja, sobre muchos otros tipos de probetas, de que requiere la menor cantidad de material para evaluar el comportamiento del crecimiento de grieta.

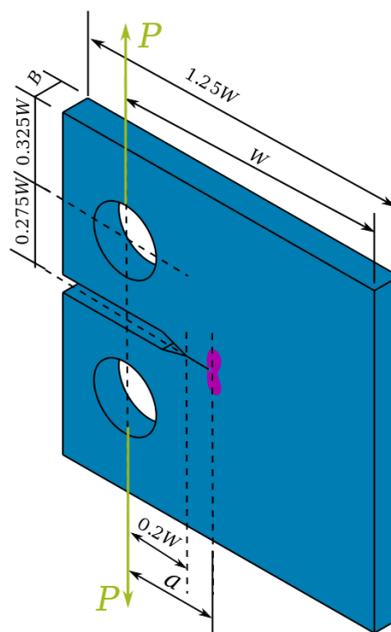


Figura 7-Aspecto típico del CT, con sus principales dimensiones 21.

Una horquilla y un pasador son utilizados tanto en la parte superior como en la inferior de la muestra para permitir la rotación en el plano a medida que se carga la misma, como puede ser observado en la figura 8.

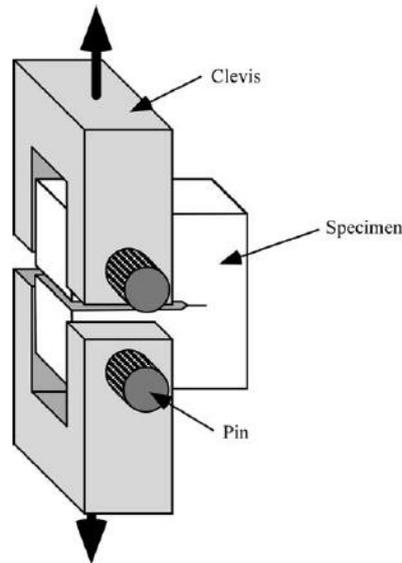


Figura 8-Aparato para la prueba de muestras CT. 9

### 2.1.6 Acero estructural S355 (EN 10025)

En Europa, el acero estructural debe cumplir con la norma europea EN 10025. De acuerdo con esta normativa, en el acero S355, la "S" atiende a "estructural" mientras que "355" es el límite elástico, en MPa.

Además de los códigos de categoría anteriores, hay símbolos que se pueden añadir para identificar cualquier requisito de composición adicional, condiciones de entrega, propiedades mecánicas, etc.

Según esto, y, teniendo en cuenta que vamos a considerar dos grados de acero estructural: S355 J2 y S355 J0, la "J" significa que ha sido probado a una resistencia de 27 J mientras que el "2" y el "0" se corresponden con una temperatura de prueba de -20°C y 0°C respectivamente.

La composición química del acero estructural es extremadamente importante. Es un factor fundamental que define las propiedades mecánicas del material.

Grado	C	Mn	P	S	Si
S355	0,23 máx	1,60 máx	0,05 máx	0,05 máx	0,05 máx

Tabla 1-Composición química del S355.

### 3. OBJETIVO DEL TRABAJO

El objetivo de esta tesis es medir, evaluar y comparar las propiedades de la fatiga de dos grados de acero estructural S355. Se considerarán también las propiedades de fatiga y mecánica de la fractura tales como *FIT* y tensión *T*

Con este fin, se preparará un modelo de Elementos Finitos mediante el software ANSYS de la probeta CT y se calcularán las curvas de calibración.

Las curvas S-N de dos grados estándar de acero S355 ("J0" y "J2") serán evaluadas por el modelo de Basquin y las curvas de la velocidad de propagación por ciclo serán evaluadas mediante probetas CT.

Los datos experimentales del IPM (Institute of Physics and Materials) y los datos numéricos obtenidos mediante el software FEM son evaluados y comparados con la literatura.

### 4. MODELO NUMÉRICO EN ANSYS

El software ANSYS se utiliza para obtener valores numéricos del factor *K* y la tensión *T*.

Para el modelado de la probeta CT, se considera un análisis en dos dimensiones, en condiciones de deformación plana.

$W=50$  mm mientras que *a* depende del ratio  $a/W$ , establecido desde 0,10 hasta 0,90 con un paso de 0,10.

El elemento considerado es el "PLANE 82" (ver Figura 9), en su versión cuadrilátero de 8 nodos. Este elemento tiene dos grados de libertad en cada nodo (las traslaciones en X y en Y).

Se elige este elemento porque proporciona resultados más precisos en este tipo de análisis y porque se requiere el desplazamiento de uno de los nodos a  $\frac{1}{4}$  de la longitud del elemento para el cálculo del factor *K*.

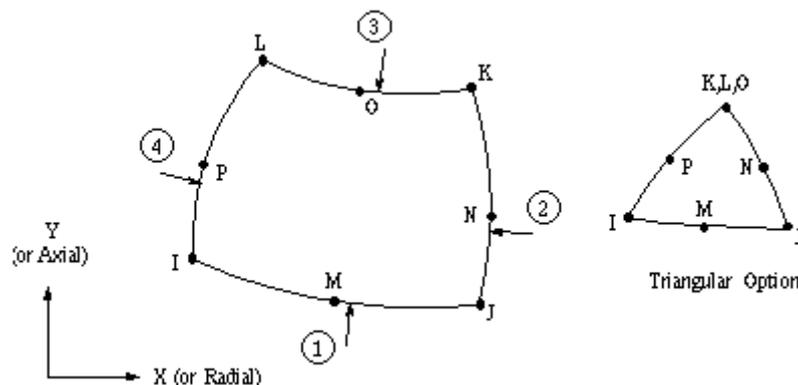


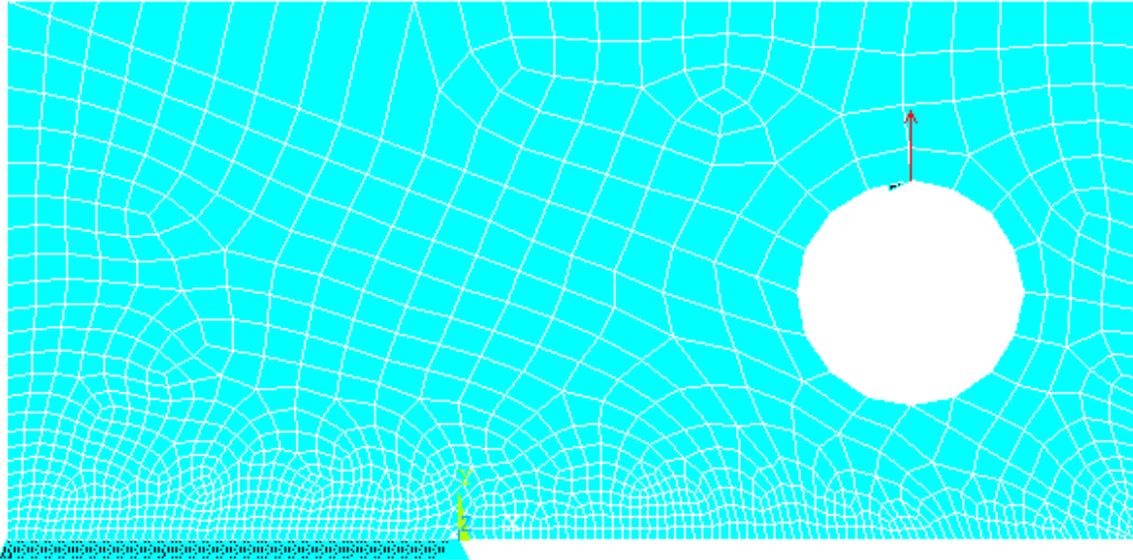
Figura 9-PLANE82, 2D, 8 nodos, sólido estructural. 23

Con respecto al modelado de la probeta, se considera simetría de manera que solo es necesaria la modelización de la mitad superior.

La modelización se hizo primero definiendo los Keypoints, después las líneas, a continuación, las áreas y, finalmente, se hizo el mallado y se le aplicaron las condiciones de contorno.

Con respecto al mallado, se utilizaron elementos de 1 mm cerca de la grieta y elementos de 5 mm lejos de la grieta, para obtener resultados de gran precisión de manera más rápida.

Las condiciones de contorno, que se pueden apreciar en la Figura 10, consisten en una fuerza en la dirección Y positiva y un soporte fijo en dicha dirección. También se puede observar la simetría aplicada en la parte inferior.



*Figura 10-Condiciónes de contorno y simetría aplicadas sobre la muestra.*

Con el modelo creado y resuelto, se procedió a calcular el factor  $K$ , mediante el comando KCALC y la tensión  $T$ , mediante el método comentado previamente, obteniendo las tensiones  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{yy}$  para cada nodo en frente de la grieta.

## 5. RESULTADOS NUMÉRICOS

### 5.1 Factor Intensidad de Tensiones

A continuación, se preparan varios gráficos que muestran los valores de  $K_I$  Obtenido a través de:

- Cálculos de la literatura de ASTM.
- Cálculos de la literatura de Knésl y Bednar.
- Cálculos de ANSYS.

#### 5.1.1 Cálculos de la literatura de ASTM

De la manera detallada en la versión completa en inglés, se obtienen, para valores  $\alpha$  de 0,1 a 0,9 en pasos de 0,1:

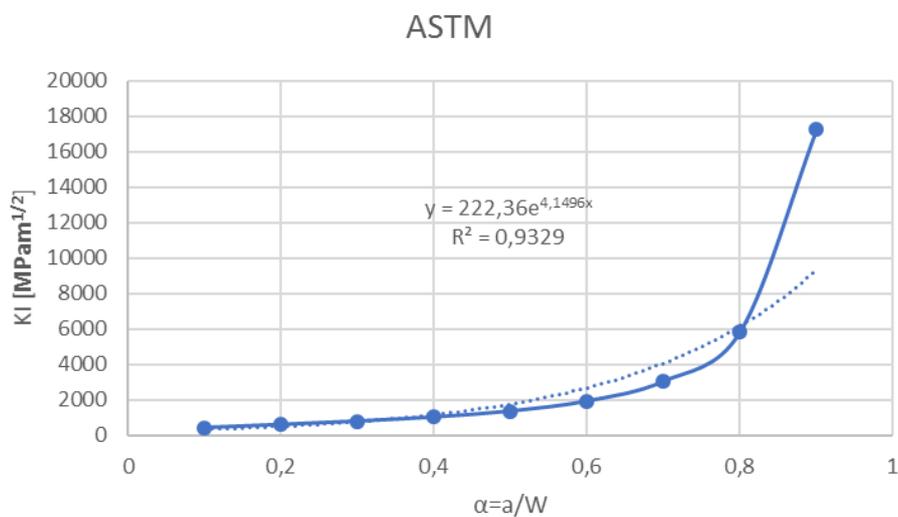


Gráfico 3-SIF vs.  $a/W$  de la literatura ASTM. 22

#### 5.1.2 Cálculos de la literatura de Knésl y Bednar

De la manera detallada en la versión completa en inglés, se obtienen, para valores  $\alpha$  de 0,1 a 0,9 en pasos de 0,1:

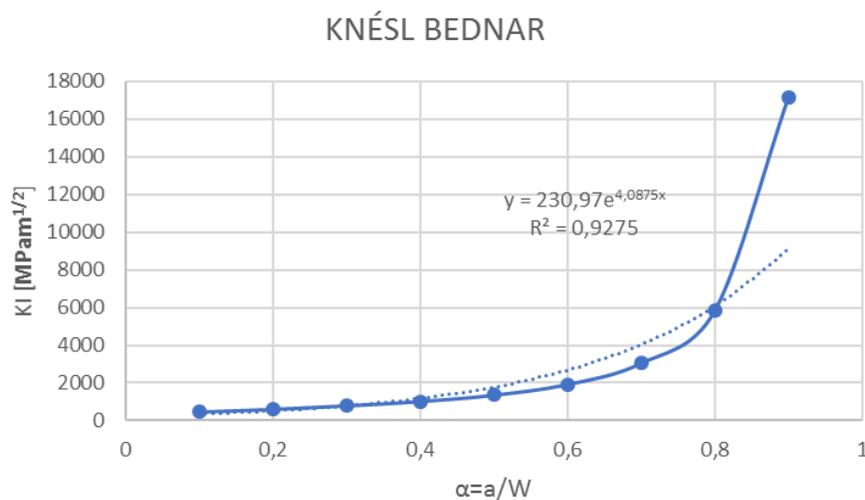


Gráfico 4-SIF vs.  $a/W$  de la literatura de Knésl y Bednar. 24

### 5.1.3 Cálculos de ANSYS

Con el procedimiento explicado anteriormente en el punto 4 -Modelización numérica en ANSYS - complementado por el anejo 10.5- Apéndice V-Macro para el espécimen CT, para valores  $\alpha$  de 0,1 a 0,9 en pasos de 0,1:

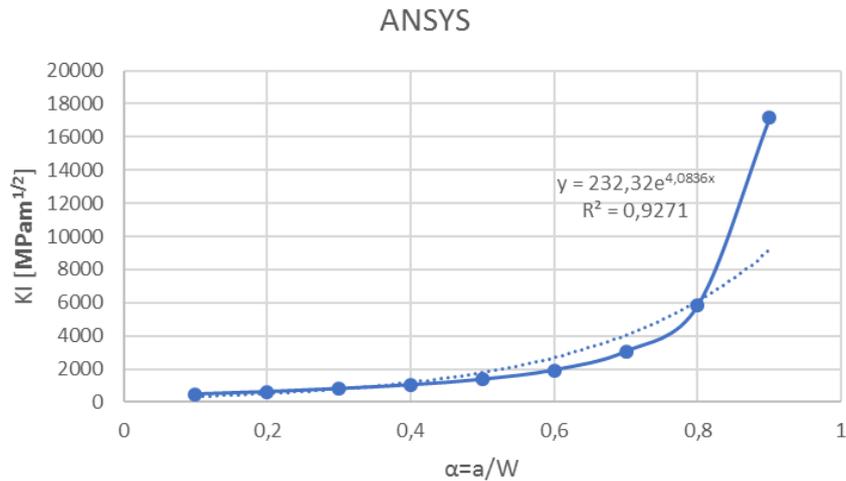


Gráfico 5-SIF vs.  $a/W$  de los cálculos de ANSYS.

### 5.2 Tensión T

A continuación, se preparan varios gráficos que muestran los valores obtenidos a través de:

- Cálculos de la literatura de Knésl y Bednar.
- Cálculos de ANSYS.

#### 5.2.1 Cálculos de la literatura de Knésl y Bednar

De la manera detallada en la versión completa en inglés, se obtienen, para valores  $\alpha$  de 0,1 a 0,9 en pasos de 0,1:

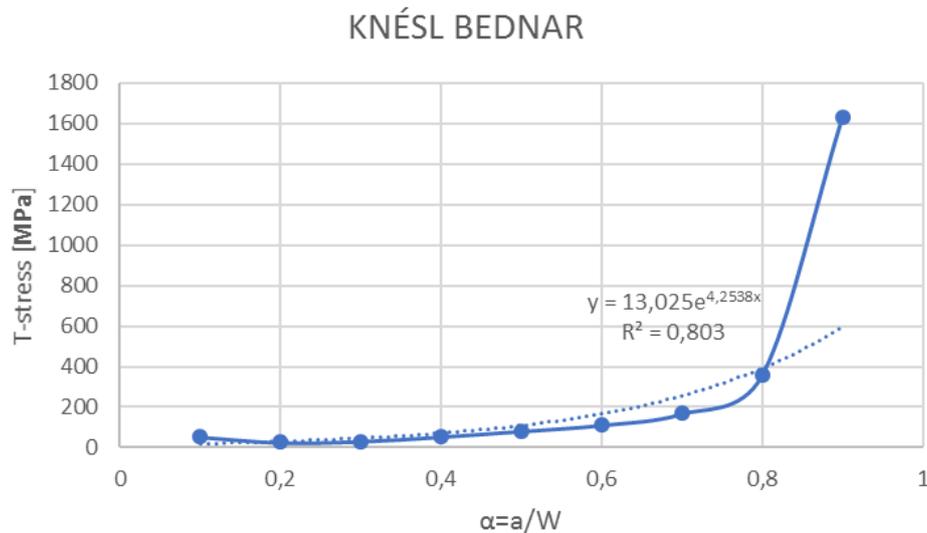


Gráfico 6-Tensión T vs.  $a/W$  de la literatura de Knésl y Bednar. 24

### 5.2.2 Cálculos de ANSYS

Con el procedimiento explicado anteriormente en el punto 4 -Modelización numérica en ANSYS (con mayor detalle en la versión completa)- complementado por el anejo 10.5- Apéndice V-Macro para el espécimen CT, para valores  $\alpha$  de 0,1 a 0,9 en pasos de 0,1:

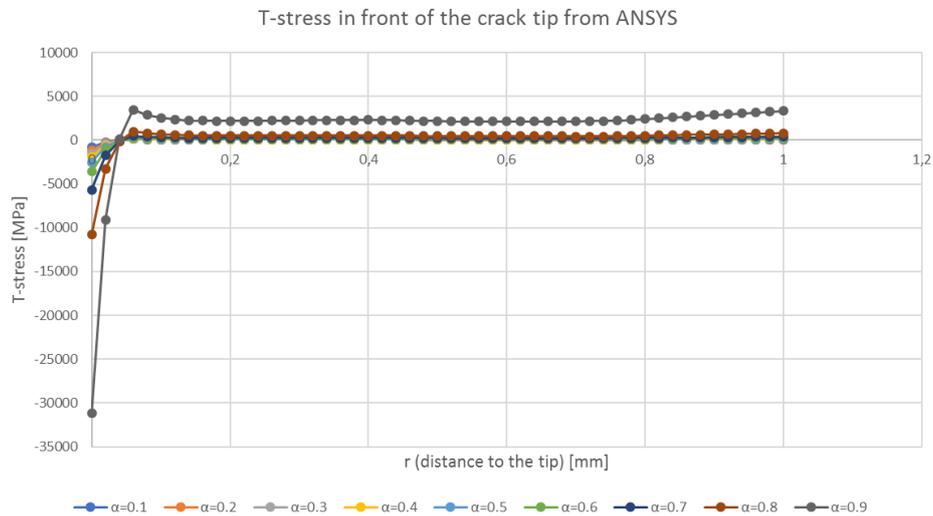


Gráfico 7-Tensión  $T$  vs  $a/W$  delante de la punta de la grieta a lo largo de 1 mm en la dirección X obtenido con ANSYS.

Puesto que es necesario comparar con los cálculos de la literatura de Knésl y Bednar y, en dicha literatura, la tensión  $T$  se calcula en la extremidad de la grieta, los valores para la distancia  $r = 0$  (es decir, en la extremidad de la grieta) se debe extraer del gráfico 7.

Sólo se debe considerar la parte lineal del gráfico, para evitar la desviación observada en los nodos ubicados en la zona cerca de la punta de la grieta (a causa de la singularidad existente comentada en los antecedentes teóricos). Debido a esto, en lugar de extraer los valores de  $r = 0$ , los valores para  $r = 0.66$  (en la parte lineal) serán considerados.

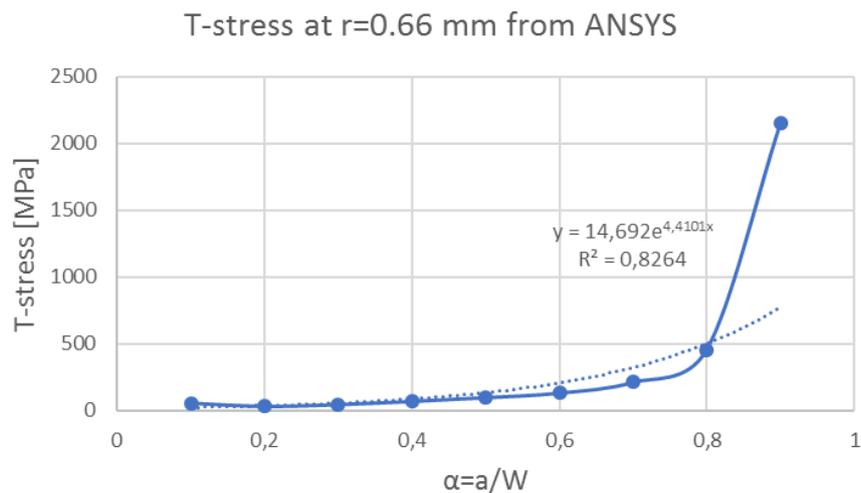


Gráfico 8-Tensión  $T$  vs.  $a/W$  en la distancia a la punta de grieta de  $r = 0.66$  mm extraído del gráfico 7 de cálculos de ANSYS.

## 6. VALORES DE S355 PUBLICADOS EN LITERATURA Y EXPERIMENTOS EN IPM

En este apartado, se van a mostrar los gráficos de los experimentos con acero S355 realizados en varios artículos y en el IPM (Institute of Physics and Materials).

Todos los gráficos se centran en los dos grados diferentes considerados: S355 J0 y S355 J2, además, los obtenidos del IPM, consideran la influencia de la dirección de laminación en la probeta: muestras marcadas con "A" (S355\_J2A/S355\_J0A) significa que la grieta se está propagando en la dirección del laminado mientras que las muestras marcadas con "B" (S355\_J2B/S355\_J0B) significa que la grieta se propaga a través de la dirección de laminación.

Debido al elevado número de gráficos, se omitirán en esta versión resumida, siendo necesario consultar los apartados 6 y 7 del documento original para visualizarlos.

De esta manera, en esta versión, se procederá directamente con la comparación.

## 7. COMPARACIÓN Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

### 7.1 Comparación de las curvas de ANSYS y la literatura

#### 7.1.1 Comparación del factor de Intensidad de Tensiones

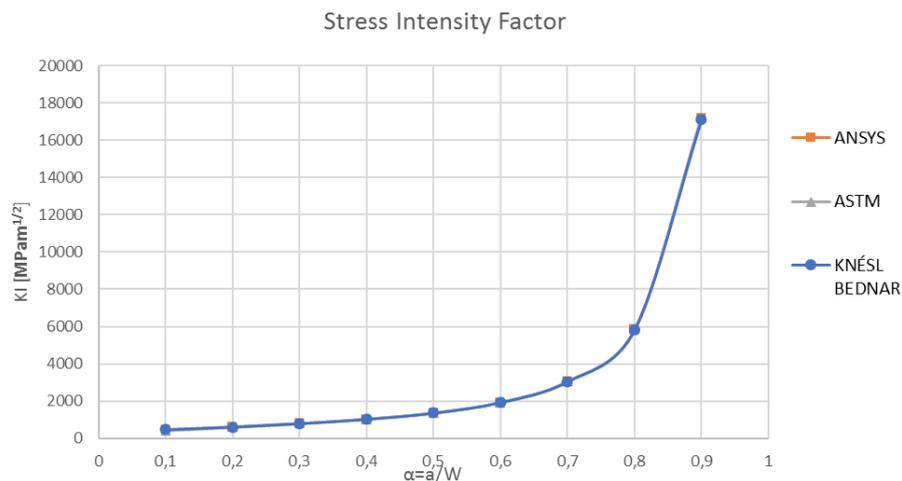


Gráfico 9-Comparación del Factor Intensidad de Tensiones de ASTM, KNÉSL Y BEDNAR y ANSYS.

Puede ser visto claramente que los datos son casi coincidentes para las tres funciones polinómicas consideradas.

### 7.1.2 Comparación de la tensión $T$

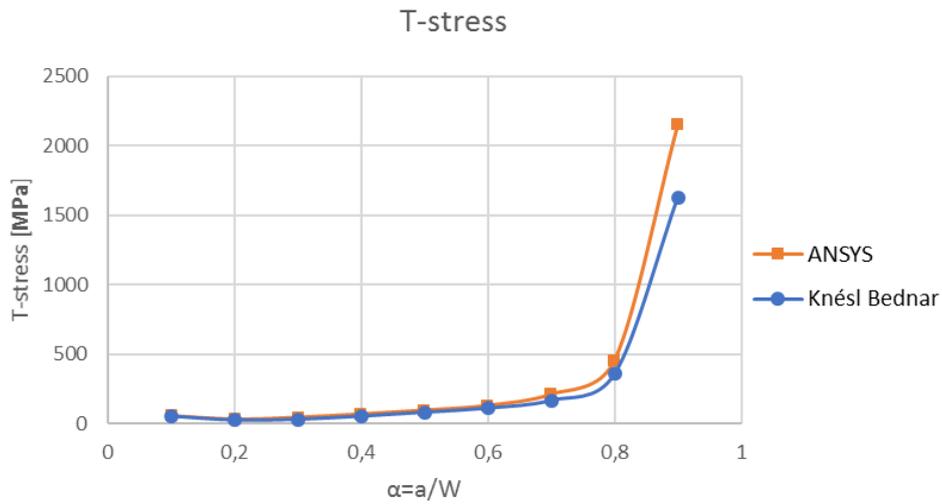


Gráfico 10-Comparación de la tensión  $T$  de KNÉSL Y BEDNAR y ANSYS.

### 7.2 Comparación de las curvas S-N

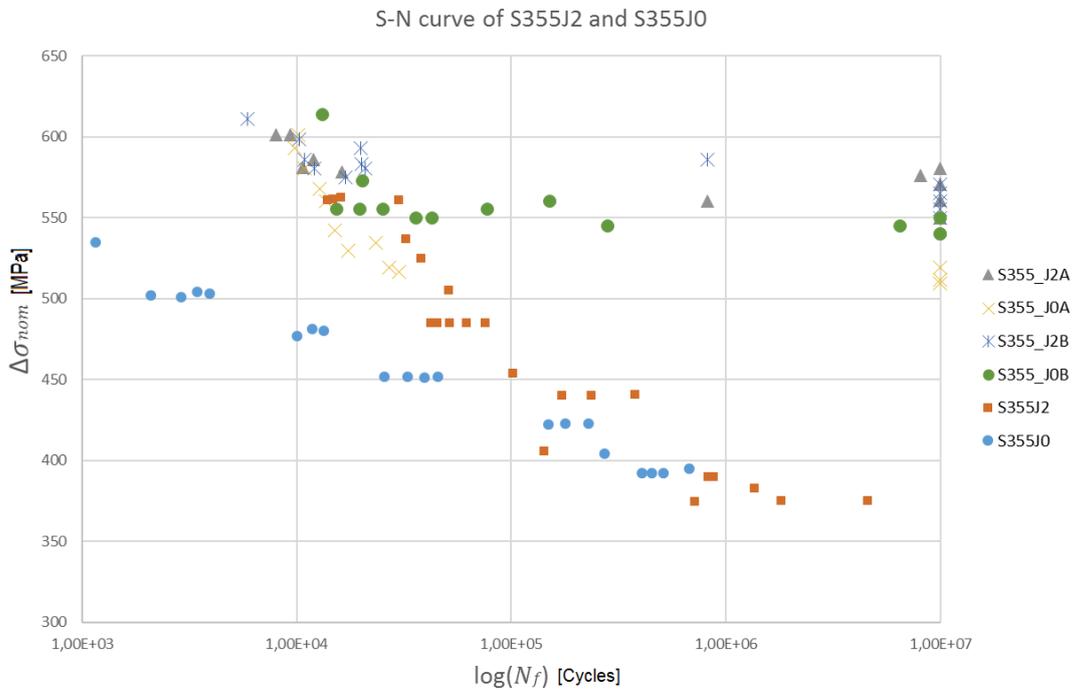


Gráfico 11-Comparación de curvas S-N de IPM y datos experimentales en artículos.

El límite de resistencia a fatiga se determina en base a la curva S-N donde el límite de  $10^7$  ciclos a la fractura se utiliza generalmente para considerar la amplitud de tensión aplicada como segura para la aplicación durante la vida del componente.

De esta manera, se pueden observar en el gráfico 29 dichos límites.

### 7.3 Comparación de las curvas de velocidad de propagación de grieta

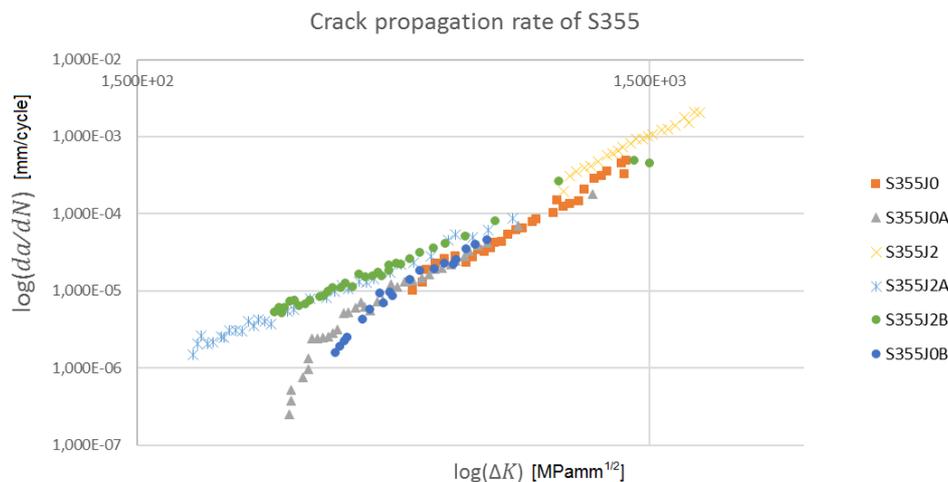


Gráfico 12-Comparación de las curvas de velocidad de propagación de grietas (región de París) del IPM y datos experimentales en artículos.

Las velocidades de crecimiento de las grietas para todos los grados presentados difieren sólo ligeramente, mostrando un buen acuerdo entre los datos de los artículos y el IPM.

## 8. CONCLUSIONES

En este trabajo, dos parámetros diferentes para la definición de las condiciones de la punta de grieta: *Factor Intensidad de Tensión* y *Tensión-T*, y dos enfoques diferentes para el análisis de la fatiga (en dos grados S355 diferentes): estadísticas (*Curvas de Wöhler*) y mecánica de la fractura (*Curva de velocidad de propagación de grieta*), fueron evaluados y comparados con datos experimentales y datos de la literatura.

Se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Las tres fórmulas (funciones polinómicas) para el cálculo del FIT (ANSYS, ASTM, Knésl y Bednar) muestran una muy buena coincidencia entre ellas.
- Los valores obtenidos de ANSYS y Knésl y Bednar parecen ser un buen enfoque para el cálculo de la tensión  $T$  en la extremidad de la grieta puesto que demuestran una buena coincidencia entre ellos.
- En general, el grado S355 J2 exhibe un mayor límite de resistencia a fatiga.
- El grado S355 J2 exhibe velocidades de crecimiento de grieta más altas que el S355 J0.
- Tanto la velocidad de crecimiento de grieta como el límite de resistencia a fatiga parecen ser independientes de la dirección de laminación y, por lo tanto, de la estructura resultante.
- Ambas curvas,  $S-N$  y  $da/dN-\Delta K$  parecen ser influenciadas solamente por la composición química de los dos grados de acero considerados.