



**Universidad  
de Holguín**

---

FACULTAD DE INGENIERIA  
CENTRO DE ESTUDIOS CAD/CAM

Evaluación numérica del estado tensional en probetas prefisuradas de acero CT3  
sometidas a torsión cíclica

## TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

Autor: Claudia Guevara Velázquez

Tutor: M.Sc. Pavel Michel Almaguer Zaldivar

HOLGUÍN 2018



## RESUMEN

La mecánica de la fractura es una rama de la mecánica de sólidos deformables ocupados del estudio de la estabilidad de materiales, considerando la formación y propagación de grietas o defectos en materiales y analizando condiciones tensionales con concentración de tensiones debida a dichos defectos.

El crecimiento deliberado de una grieta de fatiga se presenta debido a que la geometría de la punta de la fisura es un alto concentrador de esfuerzos, que conlleva al incremento en longitud de la irregularidad con el aumento en el número de ciclo de carga en tensión aplicada al componente.

En el presente trabajo, se simularon los ensayos de fatiga torsional realizados en trabajos previos donde se obtuvo un número de ciclos en correspondencia a la amplitud de la grieta en probetas de acero CT3. En el capítulo uno se realizó una valoración teórica donde se abordaron temas relacionados con la fatiga, su definición, las características y etapas de los fallos, así como la fractura mecánica. Además se describe como el Factor de Intensidad de Tensiones es un elemento que influye en la velocidad de crecimiento de la grieta. En el capítulo dos se muestran los resultados de los ensayos simulados por el Método de los Elementos Finitos. Se determinó la ecuación de ajuste que se corresponde con la función de forma para el factor de intensidad de tensiones en las probetas estudiadas.



## ABSTRACT

The mechanics of the fracture is a branch of the mechanics of deformable solids occupied of the study of the stability of materials, considering the formation and propagation of cracks or defects in materials and examining conditions tensionales with concentration of proper the aforementioned tensions defects.

The free growing of a crack hole is present due to geometry of tip that is a high stress concentrator it takes with time to grow in longitud of the irregularity with the growing in the number of load cycle applied to the component.

In this work, the essays were put on of fatigue torsional earned in previous works where a cycles of number corresponding to the size of the crack in specimens of CT3 Steel. In chapter one was done a theoretical valuation where were aboard topics related with tires, it definition, the characteristics and stages of the failures, as well as the mechanical fracture, else it is described how Stress Intensity Factor is a thing that care in the speed of crack growing. In chapter two are shown the results of this work done, since this results was realized the simulation in the Method of the Finite elements to determinate the adjust equation that is corresponding with the shape function for the stress intensity factor in studied specimens.



## ÍNDICE

<b>Introducción</b> .....	
Error! Bookmark not defined.	
<b>Capítulo 1. Fundamentación teórica sobre la fatiga y la fractura mecánica ...</b>	<b>5</b>
<b>1.1 Introducción al capítulo.....</b>	<b>5</b>
<b>1.2 Generalidades sobre la mecánica de fractura .....</b>	<b>5</b>
1.2.1 Definición.....	6
1.2.2 Características de las fallas por fatiga.....	7
1.2.3 Etapas de un fallo por fatiga .....	8
1.2.4 Fractura mecánica.....	9
<b>1.3 Factor de intensidad de tensiones .....</b>	<b>11</b>
<b>1.4 Ensayos a fatiga y fractura .....</b>	<b>14</b>
<b>1.5 El método de elementos finitos (FEM) y el cálculo por fatiga.....</b>	<b>11</b>
<b>Capítulo 2. Evaluación del Factor de Intensidad de Tensiones mediante la simulación numérica de las probetas torsionadas .....</b>	<b>19</b>
<b>2.1 Introducción al capítulo .....</b>	<b>19</b>
<b>2.2 Característica de la máquina de ensayos construida en la Universidad de Holguín “Sede Oscar Lucero Moya”.....</b>	<b>Error! Bookmark not defined. 19</b>
2.2.1 Principio de funcionamiento.....	20
<b>2.3 Selección del material.....</b>	<b>20</b>
<b>2.4 Probetas utilizadas para los ensayos en la máquina torsional construida en la Universidad de Holguín “Sede Oscar Lucero Moya”.....</b>	<b>221</b>
<b>2.5 Evaluación del Factor de Intensidad de Tensiones mediante el MEF ...</b>	<b>22</b>
2.5.1 Modelos geométricos.....	22
2.5.2 Simulación numérica.....	23
2.5.3 Parámetros del mallado.....	25
2.5.4 Representación de las restricciones y fuerzas aplicadas en el estudio.	29
2.5.5 Valores de tensiones y desplazamientos en las probetas.....	30
2.5.6 Función de forma para las probetas estudiadas.....	36



**Conclusiones** .....

Error! Bookmark not defined.

**Recomendaciones** .....

Error! Bookmark not defined.

**Bibliografía** .....

Error! Bookmark not defined.

**Anexos** ..... 45

## INTRODUCCIÓN

La fatiga es una forma de fractura que se produce en estructuras metálicas sujetas a tensiones variables. El término fatiga es usado debido a que este tipo de fractura se produce normalmente después de un período de tensiones cíclicas, las cuales se producen por el efecto de cargas repetitivas. Las tensiones cíclicas aplicadas pueden ser de naturaleza axial, flexional o torsional [1].

Las propiedades de la fatiga de los materiales pueden ser determinadas a partir de ensayos en laboratorios. Dichos ensayos deben, en lo posible, reproducir con exactitud las condiciones de servicio del material y es en este tipo de situación donde el análisis estadístico tiene un papel importante para dar buenas previsiones sobre la vida útil del material [1].

Las cargas cuyas amplitudes son variables a lo largo del tiempo producen la rotura sobre las estructuras para valores de tensión inferiores a los que suceden en casos de cargas de amplitud constante. A este fenómeno es al que denominamos fatiga. Es definido de una manera más general por las normativas ASTM como “el proceso de cambio estructural permanente, progresivo y localizado que ocurre en un punto del material sujeto a tensiones y deformaciones de amplitudes variables y que produce grietas que conducen a una fractura total tras un número de ciclos” [2].

La fatiga es la causante de la mayor parte de las roturas de las piezas en servicio, y su estudio precisa comprender que no es un fenómeno asociado al concepto clásico de plasticidad o daño, y que la rotura se produce bajo cargas que están aún dentro del período elástico del comportamiento del material. Las roturas por fatiga son especialmente peligrosas porque no suelen presentar indicios de fallo inminente, sino que este se produce de modo repentino y sin observar deformaciones plásticas de conjunto, lo que a lo largo de la historia ha provocado importantes accidentes. Citando un famoso ejemplo en aviación, en el año 1988 el avión Boeing 737-200, durante el vuelo 243 de Aloha Airlines sufrió el desprendimiento del techo de la parte delantera a 3 048 m de altura. Las investigaciones determinaron que la causa del accidente fue la fatiga del metal [2].

La comprensión del fenómeno de la fatiga de los materiales es muy importante para todo ingeniero, ya que es la primera causa de rotura de los materiales metálicos (aproximadamente el 90 %), aunque también está presente en polímeros (plásticos, composites...), y en cerámicas [2].

La fatiga es una forma de rotura que ocurre en estructuras sometidas a tensiones dinámicas y fluctuantes (puentes, automóviles, aviones, etc.). Su principal peligro es que puede ocurrir a una tensión menor que la resistencia a tracción o el límite elástico para una carga estática, y aparecer sin previo aviso, causando roturas catastróficas [3].

Sin embargo, hasta finales del siglo XIX no se comenzó a analizar sistemáticamente este aspecto del comportamiento de los materiales. William John Macquorn Rankine, ingeniero y físico escocés, mientras trabajó con su padre en la Edinburgh & Dalkeith Railway (la primera vía férrea de Edimburgo), propuso en 1843 una teoría para explicar las roturas por fatiga que se producían en los ejes de los coches de los trenes. La gran cantidad de datos disponibles para materiales férricos (y algunos otros materiales metálicos) ha permitido desarrollar “procedimientos de cálculo” razonablemente bien comprobados por multitud de diseños. Estos procedimientos permiten diseñar piezas para una duración dada cuando están sometidas a un estado de tensiones variables conocido. Por otro lado, la teoría de la fractura por fatiga permite predecir, entre otras cosas, el crecimiento de la grieta con los ciclos de carga. Es por ello por lo que los métodos tradicionales de cálculo junto con la teoría de la fractura por fatiga proporcionan una sólida base para el diseño de sistemas estructurales metálicos [2].

En la Universidad de Holguín “Sede Oscar Lucero Moya” se desarrolla un proyecto para el acondicionamiento de los laboratorios docentes. En este sentido se construyó una máquina torsional de ensayos a fatiga que se encuentra ubicada en el laboratorio de Resistencia de Materiales de la Facultad de Ingeniería. Una de las prestaciones de esta máquina es la evaluación del crecimiento de grietas de fatiga en probetas solicitadas por momentos torsionales variables en el tiempo. Como parte de investigaciones que desarrolla el tutor de este Trabajo de Diploma

se encuentra la caracterización mecánica de los materiales utilizados en la construcción de estructuras portantes, donde uno de los parámetros que se desean obtener es la función de forma de grietas en probetas torsionadas. Lo expresado en este párrafo constituye los antecedentes que dan origen a este trabajo. En el trabajo titulado “Evaluación a fractura de probetas de acero CT3 sometidas a torsión cíclica” [4] se realizaron ensayos a fatiga de probetas torsionadas.

Se establece entonces como **problema de investigación:** el Factor de Intensidad de Tensiones en probetas solicitadas a torsión cíclica simétrica ha sido poco estudiado.

**Objeto de estudio:** las probetas cilíndricas preagrietadas de acero CT3 sometidas a torsión cíclica simétrica en la máquina de ensayos a fatiga torsional construida en la Universidad de Holguín.

**Campo de acción:** la fractura de probetas de acero CT3 solicitadas a torsión cíclica.

**Hipótesis:** si se vinculan los ensayos a torsión cíclica para evaluar el tamaño de las grietas en el tiempo en probetas prefisuradas y el método de elementos finitos para conocer el Factor de Intensidad de Tensiones en la punta de la grieta, es posible proponer una ecuación para la función de forma de la misma.

**Objetivo general:** determinar una ecuación para evaluar la función de forma durante el crecimiento de grietas en probetas cilíndricas preagrietadas de acero CT3 sometidas a torsión cíclica simétrica.

Para desarrollar este Trabajo de Diploma se utilizaron las probetas empleadas en investigaciones anteriores [4].



## **Tareas de Investigación**

1. Caracterizar el material.
2. Definir el tipo de probetas.
3. Simular el comportamiento de la probeta para obtener el Factor de Intensidad de Tensiones (SIF, por las siglas en inglés de *Stress Intensity Factor*).
4. Obtener la ecuación de la función de forma que relacione el diámetro de la probeta y el tamaño de la grieta.
5. Redactar el informe del Trabajo de Diploma.

## **Métodos de Investigación empleados**

### **Métodos empíricos:**

- **Entrevista:** a profesionales que se desempeñan en laboratorios de ensayos a materiales para conocer sus experiencias en el tema.
- **Consultas a expertos:** para la selección de los materiales con lo que se modelarán las probetas y los procedimientos para realizar las simulaciones.

### **Métodos teóricos:**

- **Histórico – Lógico:** para realizar el estudio bibliográfico del tema y analizar el desarrollo del mismo.
- **Inducción – deducción:** para deducir resultados del análisis realizado en el método anterior.

**Resultados Esperados:** con la realización de este trabajo se pretende obtener la ecuación para la función de forma que relacione el tamaño de la grieta con el diámetro inicial de la probeta.

## **Capítulo 1. Fundamentación teórica sobre la fatiga y la fractura mecánica.**

### **1.1 Introducción al capítulo**

En este capítulo se abordan las características y definición del fenómeno de la fatiga y la fractura mecánica, así como las diferentes características y etapas de fallos, además se explican los tipos de ensayos a fatiga y fractura. También se indica cómo determinar el Factor de Intensidad de Tensiones para las diferentes modos de apertura de la grieta y donde para la realización de las simulaciones se hizo uso de los modelos constitutivos del material, en cual nos apoyamos en el método de elementos finitos MEF para modela y realizar los diferentes análisis para determinar el Factor de Intensidad de Tensiones.

### **1.2 Generalidades sobre la mecánica de fractura**

Cuando un componente estructural se encuentra sometido a tensiones variables con el tiempo, puede fracturarse a tensiones mucho menores que aquellas que podría soportar bajo la aplicación de una carga estática. Dado que los elementos de máquina están con frecuencia sometidos a este tipo de solicitaciones, y que en la práctica totalidad de los casos su efecto es más perjudicial que el de las solicitaciones estáticas, el análisis del fenómeno de fatiga es de importancia decisiva para el diseño mecánico [3].

El mecanismo de fractura más probable a ser encontrado en un análisis de fallas es la fatiga del metal. Para realizar un análisis de falla es esencial entender las causas básicas de la fatiga en metales y la importancia del origen de la fractura de fatiga. En un análisis, el centro de atención es el origen de la fractura y es en ese lugar donde el análisis metalográfico se enfoca. El descubrimiento de la fatiga se produjo en el siglo XVIII cuando varios investigadores en Europa observaron que los puentes y los componentes del ferrocarril estaban agrietándose cuando se sometían a cargas repetidas. Como avanzaba el siglo, se fue incrementando el uso de metales con el incremento del uso de las máquinas, y más fallas se registraron.

Sin lugar a dudas, las fallas anteriores ocasionadas por cargas cíclicas estimularon la necesidad de desarrollar procedimientos de diseño que pudieran

evitar fallos de las cargas cíclicas de todos los tipos de equipos. Esta actividad fue intensa desde mediados de los años 1800. Aunque se ha avanzado mucho, el desarrollo de procedimientos de diseño para evitar las fallas por las aplicaciones de cargas cíclicas, es todavía una tarea de enormes proporciones. Se trata de la interacción de las distintas áreas del conocimiento, es decir, ingeniería de materiales, ingeniería de manufactura, análisis estructural, la inspección no destructiva y evaluación, ingeniería de confiabilidad, pruebas de campo, de la tecnología de reparación y mantenimiento, y los procedimientos de diseño integral. Todos estos deben ser colocados en una actividad de diseño coherente que puede ser denominado como una política de diseño de fatiga [3]. Obviamente, si otros modos de falla relacionados con el tiempo se producen de forma similar con cargas cíclicas e interactúan de forma sinérgica, entonces la tarea llega a ser aún más difícil. Hasta los primeros años de la década de 1900, no se sabía mucho sobre las bases físicas de la fatiga. Sin embargo, con una mayor comprensión de los materiales, que se aceleró a principios de 1900, una gran cantidad de conocimientos fueron desarrollados debido a los reiterados efectos producidos por cargas en los materiales de ingeniería.

### **1.2.1 Definición**

Es el cambio permanente y localizado que ocurre en un material sujeto a deformaciones repetidas o fluctuantes, bajo la acción de esfuerzos que son inferiores a la fluencia del material. Este mecanismo suele extenderse hasta terminar en grietas o fracturas, después de un número determinado de fluctuaciones [3].

La fatiga es una forma de fractura que se produce en estructuras sujetas a tensiones dinámicas y fluctuantes (ej. Puentes, aviones y componentes de máquinas). Bajo estas circunstancias es posible que la fractura se produzca a niveles de tensiones considerablemente bajas.

El término fatiga es usado debido a que este tipo de fractura normalmente se produce después de un periodo de tensiones repetitivas o cíclicas. Se estima que la fatiga comprende aproximadamente un 90% de todas las fracturas metálicas, siendo de tipo catastrófica y ocurriendo rápidamente sin aviso [3].

La fractura por fatiga es semejante en naturaleza a la fractura frágil aún en metales normalmente dúctiles en los que hay muy poco, o ninguna deformación plástica asociada con la fractura.

### **1.2.2 Características de las fallas por fatiga**

A continuación, se presentan características de los fallos que se producen en componentes que se encuentran expuestos a cargas cíclicas [3].

- La falla se produce sin aviso.
- Daña la pieza totalmente.
- Ocurre en tres instancias:
  1. Iniciación de la fisura.
  2. Propagación de fisuras.
  3. Fractura final.

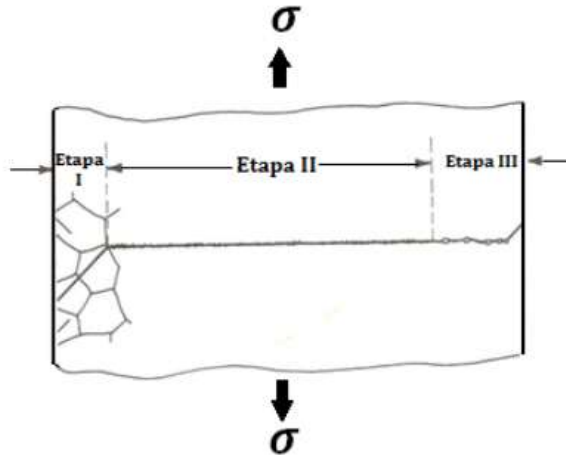
### **1.2.3 Etapas de un fallo por fatiga**

**Etapa I (Iniciación):** una o más grietas se desarrollan. Las grietas pueden aparecer en cualquier punto del material, pero en general, ocurren alrededor de algún concentrador de esfuerzos y en la superficie exterior donde los esfuerzos fluctuantes son más elevados.

La formación de las grietas de fractura es fortalecida por imperfecciones en el material tales como inclusiones o muescas, o por algún defecto superficial, como, por ejemplo: Defectos de fundición, inclusiones, temple o grietas asistidas por hidrógeno.

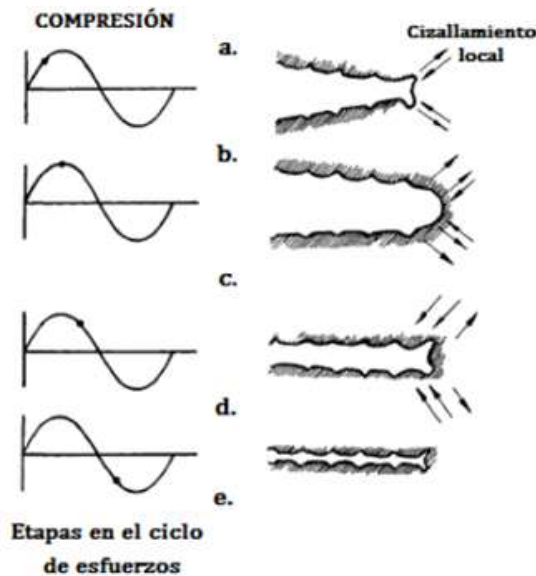
**Etapa II (Propagación):** las grietas se propagan como resultado de una deformación plástica local en la punta de la grieta, esto ocurre durante cada periodo de carga de tensión. Las grietas a fatiga no se propagan bajo condiciones de carga de compresión.

Cuando esta etapa comienza, la velocidad de propagación de la fisura aumenta pronunciadamente. Además, en este punto hay también un cambio en la dirección de propagación siendo globalmente perpendicular a las tensiones aplicadas (ver figura 1.1).



**Figura 1.1** Las tres etapas de la propagación de grietas. **Fuente:** [3]

La longitud de la etapa I es generalmente pequeña y sus superficies por lo general no tienen rasgos distintivos. En la etapa II de propagación, la cual cubre una gran distancia, se forman rasgos distintivos denominados estrías (ver figura 1.1). Las morfologías de estas estrías varían extensamente con el material y el medio. Durante esta etapa de propagación, el crecimiento de la fisura se produce por un proceso repetitivo de redondeo y afinado de la punta de la fisura, mecanismo que se ilustra en la figura 1.2.

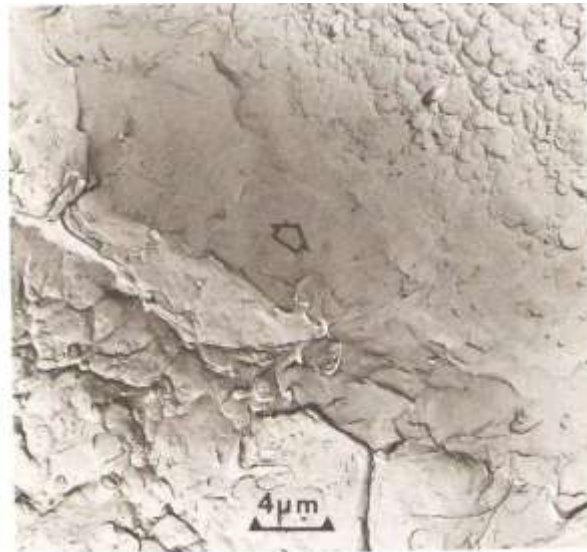


**Figura 1.2** Ilustración esquemática de los mecanismos de propagación de las fisuras (Etapa II). **Fuente:** [3]

1. Carga cero.
2. Carga de tracción pequeña.
3. Carga de tracción máxima.
4. Carga compresiva pequeña.
5. Carga compresiva máxima.

**Etapa III (Rotura):** la pieza continúa deteriorándose por el crecimiento de la grieta quedando tan reducida la sección neta de la pieza; que es incapaz de resistir la carga desde un punto de vista estático produciéndose la rotura por fatiga.

La etapa III del proceso de propagación es una etapa caracterizada por el crecimiento rápido de las fisuras, coalescencia de micro cavidades y formación de huecos; además, es un precursor de la ruptura final. Antes de que esto ocurra, un estiramiento puede tener lugar en la punta de la grieta durante la carga, formando una zona extendida como se muestra en la figura 1.3.



**Figura 1.3** Zona extendida justo antes de la fractura final en acero de alta resistencia fatigado. **Fuente:** [3]

#### 1.2.4 Fractura mecánica

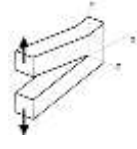
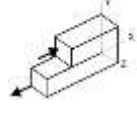
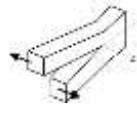
Los conceptos de Mecánica de Fractura, establecidos antes de la década de 1960, son solamente aplicables a materiales que cumplen la Ley de Hooke. A pesar de las correcciones introducidas a principios de 1948, incluyendo la plasticidad a

pequeña escala, estos análisis están restringidos a estructuras en las que el comportamiento es elástico lineal [5].

Desde 1960, las teorías de mecánica de fractura se han desarrollado teniendo en cuenta varios tipos de comportamiento no-lineal (plasticidad, viscoplasticidad y viscoelasticidad) así como los efectos dinámicos. No obstante, todos estos resultados recientes son extensiones de la mecánica de fractura elástica lineal (MFEL). Por lo tanto, un sólido conocimiento de los fundamentos de la MFEL es esencial para entender los conceptos más avanzados de la Mecánica de Fractura [6].

La fractura frágil de materiales que normalmente tienen un comportamiento dúctil exige un mejor conocimiento de la mecánica de la fractura. Las investigaciones efectuadas en años anteriores han provocado el desarrollo de la mecánica de la fractura. El conocimiento adquirido permite la cuantificación de la relación entre las propiedades de los materiales, los niveles de tensión, la presencia de defectos que producen grietas y los mecanismos de propagación de grietas. Esto pone en manos de los ingenieros un grupo de herramientas importantes para prevenir las roturas de los elementos de máquina y estructuras. En la literatura al respecto se plantean tres modos de crecimiento de las grietas (Tabla 1.1):

**Tabla 1.1** Modos de apertura de grietas.

Modo	Solicitación	Ejemplo
I	Tracción	
II	Deslizamiento	
III	Torsión	

- Modo I. Los flancos de la grieta se separan uno respecto del otro. También conocido como modo de tracción.

- Modo II. Las caras de la grieta deslizan perpendicularmente al borde de la misma. Modo de deslizamiento tangencial en el plano.
- Modo III. También llamado deslizamiento tangencial fuera del plano. Los flancos de la grieta deslizan paralelamente al frente de la grieta.

Para cualquiera de estos modos, el campo de tensiones próximo al frente de la grieta presenta una singularidad justo en el vértice de esta. Dicha singularidad es caracterizada mediante un escalar, que recibe el nombre de Factor de Intensidad de Tensiones (SIF, siglas en inglés de *Stress Intensity Factor*), el cual es función de la carga aplicada, la longitud de la grieta y la geometría de la pieza.

### 1.3 Factor de intensidad de tensiones

El comportamiento del estado tensional y deformacional alrededor de la punta de la grieta influye en el crecimiento de esta. En este sentido numerosos autores describen un Factor de Intensidad de tensiones  $K_{III}$  para evaluar el comportamiento mecánico alrededor de la punta de la grieta. Este depende de las tensiones que surgen por las solicitaciones exteriores y de la geometría de la grieta [6]. El subíndice se refiere al modo de apertura de la grieta. Una expresión comúnmente utilizada para determinar el SIF es la ecuación 1.1:

$$K_{III} = Y\tau\sqrt{\pi a} \dots\dots\dots (1.1)$$

Donde:

Y: es la función de forma. Esta función depende de la geometría del elemento y de las dimensiones de la grieta.

$\tau$  : es la tensión nominal debida a las cargas externas.

a: es la longitud de la grieta.

Otra manera de determinar el SIF es mediante el método del CTOD (siglas en inglés de *Crack Tip Opening Displacement*) utilizando la técnica del desplazamiento de cuatro puntos [6].

La expresión de cálculo utilizada es 1.2:



$$K_{III} = \frac{E}{8(1-\mu^2)} \sqrt{\frac{2\pi}{L} [4(V_2 - V_4) - (V_3 - V_5)]} \dots\dots\dots (1.2)$$

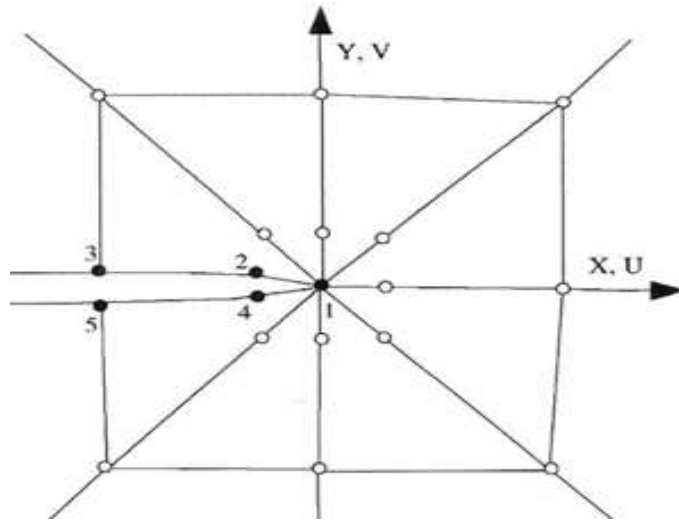
Donde:

E: es el Módulo Young.

L: es la longitud de los elementos singulares (1-3 o 1-5 en la Figura 1.4).

$\mu$ : es el cociente de Poisson.

$V_i$ : son los desplazamientos paralelos a la superficie de la grieta.



**Figura 1.4** Elementos de cuatro puntos para desarrollar los cálculos del factor de intensidad de tensiones. **Fuente:** [5]

De acuerdo con Paris, dado que el SIF proporciona una descripción completa del estado tensional en el entorno del pico de la grieta, este debe controlar su ritmo de crecimiento. Esta idea se materializa con la ley de Paris, que expresa la velocidad de crecimiento de grieta como una función del Factor de Intensidad de Tensiones ecuación 1.3:

$$\frac{da}{dN} = C\Delta K^m \dots\dots\dots (1.3)$$

Donde 'C' y 'm' son constantes a determinar experimentalmente para cada material y condiciones de carga.  $\Delta K$  es el rango de variación del SIF que se define

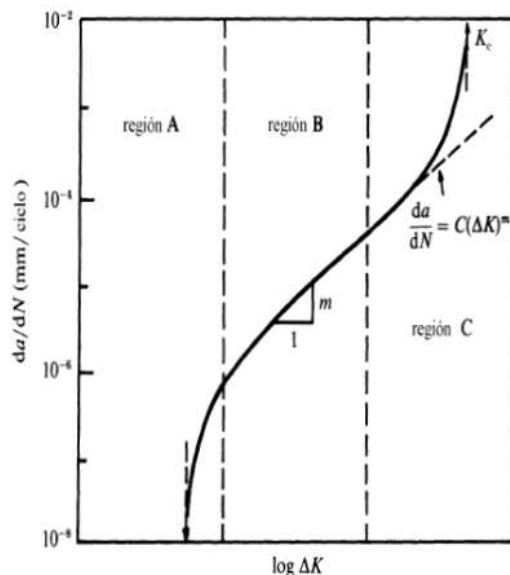
como el valor máximo del SIF menos el mínimo. Con esta ecuación es posible estimar la vida de propagación por fatiga conocida una grieta inicial [6].

La evolución típica de la velocidad de crecimiento frente a la variación del SIF tiene la forma mostrada en la figura 1.5. En ella podemos distinguir tres regiones bien diferenciadas.

**Región A.** La primera región está asociada a un valor umbral del SIF por debajo del cual la grieta en principio no es capaz de crecer o al menos su crecimiento es indetectable. Este rango se comentará en detalle seguidamente debido a un comportamiento especial y complejo.

**Región B.** La segunda región es la asociada a la ley de Paris con un comportamiento cuasilineal.

**Región C.** En esta región la velocidad se incrementa rápidamente hasta causar el fallo del componente cuando se alcanza un cierto valor crítico conocido como 'Kc', denominado tenacidad a la fractura del material. El valor de 'Kc' es una propiedad del material y representa el máximo valor de SIF que una grieta puede soportar bajo carga estática antes de propagarse inestablemente.

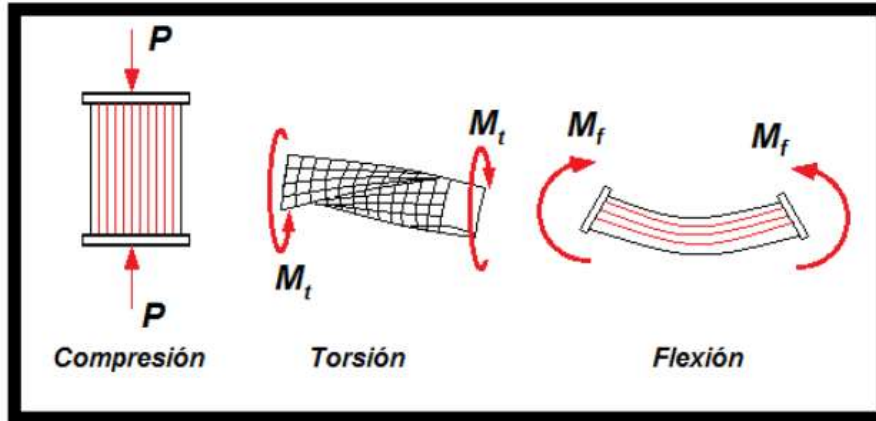


**Figura 1.5** Ley de crecimiento. Fuente: [6]

#### **1.4 Ensayos a fatiga y fractura**

El objetivo de un ensayo de fatiga es evaluar el tiempo de vida, que se define como el número de ciclos hasta la fractura. La prueba se realiza aplicando una onda de carga de forma, amplitud y frecuencia predeterminada y registrando el número de ciclos transcurridos. La deformación, los esfuerzos y el crecimiento de grietas se registran dependiendo el tipo de prueba. Se pueden adoptar diferentes tipos de pruebas, desde las realizadas en los laboratorios hasta las pruebas realizadas en estructuras o equipos reales [7]. Las pruebas más comunes en los ensayos de laboratorios son: pruebas de vida S – N: estas pruebas se realizan en probetas sin grietas ni entallas. Se aplica una magnitud de esfuerzo constante con una relación de esfuerzos, temperatura y frecuencia constantes, en condiciones ambientales controladas y se mide el número de ciclos hasta que ocurre la falla. Estas son las pruebas más realizadas por ser utilizadas para el diseño. Los resultados son extrapolables y rápidos de realizar, son económicos y son utilizados para el control de calidad. Pruebas de fatiga de bajos ciclos: por lo general las probetas son de geometría regular sin entallas ni grietas. Se aplica una amplitud de esfuerzo constante y se mide la deformación cíclica en la probeta. Este tipo de prueba se utiliza para la investigación, son relativamente costosas por el equipo y la instrumentación. Pruebas de propagación de grietas: en estas pruebas se aplica una magnitud de carga constante a una probeta preagrietada y el crecimiento de grieta es medido continuamente, junto con el número de ciclos. Son pruebas muy versátiles y los resultados pueden aplicarse para una variedad de propósitos, como la predicción de vida, la evaluación de materiales y la investigación de los mecanismos de fatiga [8].

Como se mencionó anteriormente los ensayos de fatiga también se pueden clasificar de acuerdo al tipo de acción deformante que se le aplique a la probeta, estos pueden ser de esfuerzo axial, flexión, torsión, y esfuerzos combinados o complejos; en la figura se observan los tres tipos de cargas más utilizados.



**Figura 1.6** Tipos de esfuerzo a compresión, torsión y flexión. **Fuente:** [7]

La fatiga de los materiales está influenciada por varios parámetros, cada uno de ellos influyendo de una manera distinta sobre el comportamiento del elemento sometido a la carga variable, de aquí que se aprecien gran dispersión en los resultados experimentales. Uno de los factores que más se tiene en cuenta es, sin duda alguna, la concentración de tensiones de manera local que tiene lugar en aquellos puntos donde existen cambios de sección propios de la geometría del elemento, o defectos que tengan lugar durante el proceso de fabricación [9].

### 1.5 El método de elementos finitos (MEF) y el cálculo por fatiga

El método de los elementos finitos (MEF en castellano o FEM en inglés) es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy utilizado en diversos problemas de ingeniería.

El MEF está pensado para ser usado en computadoras y permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas. Se usa en el diseño y mejora de productos y aplicaciones industriales, así como en la simulación de sistemas físicos y biológicos complejos. La variedad de problemas a los que puede aplicarse ha crecido enormemente, siendo el requisito básico que las ecuaciones constitutivas y ecuaciones de evolución temporal del problema a considerar sean conocidas de antemano [10].

El MEF permite obtener una solución numérica aproximada sobre un cuerpo, estructura o dominio sobre el que están definidas ciertas ecuaciones diferenciales en forma débil o integral que caracterizan el comportamiento físico del problema

dividiéndolo en un número elevado de subdominios no-intersectantes entre sí denominados «elementos finitos». El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también denominada desratización. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados «nodos». Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito; además, un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se llama «malla» [10].

Los cálculos se realizan sobre una malla de puntos (llamados nodos), que sirven a su vez de base para desratización del dominio en elementos finitos. La generación de la malla se realiza usualmente con programas especiales llamados generadores de mallas, en una etapa previa a los cálculos que se denomina pre-proceso.

El método de los elementos finitos es muy usado debido a su generalidad y a la facilidad de introducir dominios de cálculo complejos (en dos o tres dimensiones). Además, el método es fácilmente adaptable a problemas de transmisión de calor, de mecánica de fluidos para calcular campos de velocidades y presiones (mecánica de fluidos computacional, CFD) o de campo electromagnético. Dada la imposibilidad práctica de encontrar la solución analítica de estos problemas, con frecuencia en la práctica ingenieril los métodos numéricos y, en particular, los elementos finitos, se convierten en la única alternativa práctica de cálculo [11].

El MEF convierte un problema definido en términos de ecuaciones diferenciales en un problema en forma matricial que proporciona el resultado correcto para un número finito de puntos e interpola posteriormente la solución al resto del dominio, resultando finalmente sólo una solución aproximada. El conjunto de puntos donde la solución es exacta se denomina conjunto nodos. Dicho conjunto de nodos forma una red, denominada malla formada por retículos. Cada uno de los retículos contenidos en dicha malla es un "elemento finito". El conjunto de nodos se obtiene dividiendo la estructura en elementos de forma variada (pueden ser superficies, volúmenes y barras) [10].

El Método de los Elementos Finitos se ha consolidado durante las últimas cuatro décadas como el método numérico más versátil para el análisis de problemas de

la mecánica del sólido. Tras el establecimiento de las bases del método, muy pronto surgieron aplicaciones directas a la Mecánica de la Fractura, desde entonces el número de referencias en la literatura acerca de la aplicación del MEF a la Mecánica de la Fractura ha crecido de forma imparable.

En 1954, dos accidentes en los que se vio involucrado el primer avión de pasajeros del mundo, el de Havilland Comet, llevaron las palabras “fatiga del metal” a los titulares periodísticos, y se quedaron grabadas en la conciencia del público. El avión, además de ser uno de los primeros en poseer una cabina presurizada, tenía ventanas cuadradas. La presurización, en combinación con cargas en vuelo repetidas, provocó la formación de fisuras en las esquinas de las ventanas. Estas fisuras se extendieron con el paso del tiempo hasta que se desintegró la cabina. Los accidentes del Comet fueron una tragedia humana en la que murieron 68 personas, pero también permitieron tomar conciencia del problema a los ingenieros que intentaban realizar diseños seguros y sólidos [11].

Desde entonces, la fatiga ha sido responsable del fallo de muchos componentes mecánicos como, por ejemplo, turbinas y otros equipos rotatorios que funcionan bajo intensas cargas cíclicas repetidas. La principal herramienta para comprender, predecir y evitar la fatiga es el análisis por elementos finitos (FEA).

Normalmente, los diseñadores consideran que el factor de seguridad más importante es la resistencia global del componente, ensamblaje o producto. Para ello, quieren crear un diseño que aguante la carga final probable y agregarle un factor de seguridad como garantía adicional.

Sin embargo, durante el funcionamiento, es poco probable que el diseño experimente cargas estáticas. Normalmente, experimentará una variación cíclica y será sometido a varias aplicaciones de esta variación de carga, lo que podría provocar fallos con el paso del tiempo [12].

El FEA puede predecir las zonas de concentración de tensión y ayudar a que los ingenieros de diseño pronostiquen cuánto tiempo aguantarán sus diseños antes de que comiencen a experimentar los síntomas de la fatiga [12].

El análisis de tensiones por elementos finitos (FEA) puede predecir la aparición de fisuras. Existen otras tecnologías, como el análisis dinámico por elementos finitos

no lineal, que pueden estudiar los problemas de deformación unitaria en la propagación. Dado que los ingenieros de diseño por lo general quieren evitar que se comiencen a producir fisuras de fatiga, este informe se centrará principalmente en la fatiga desde este punto de vista [12].

El FEA proporciona excelentes herramientas para estudiar la fatiga con el método SN, ya que la entrada consiste en un campo de tensión elástica lineal y el FEA permite la consideración de posibles interacciones de varios casos de carga. Si se establece para calcular el entorno de carga en el peor de los casos (un enfoque típico), el sistema puede proporcionar varios resultados diferentes de cálculo de fatiga, incluidos los trazados de vida, de daños y de factor de seguridad. Además, el FEA puede proporcionar trazados de la relación de la tensión principal alternante más pequeña dividida por la tensión principal alternante más elevada (denominada trazado de indicador de biaxialidad), además de un gráfico de matriz de rainflow [10].

Este último es un histograma tridimensional en el que los ejes X-Y representan las tensiones alternantes y medias y el eje Z representa el número de ciclos contados para cada recipiente. Las herramientas y los métodos que se describen en este informe pueden ayudar a los ingenieros a mejorar la seguridad de los componentes a la vez que reducen los diseños de ingeniería aparatosos y costosos. Al utilizar la tecnología actual para evitar la fatiga, con frecuencia se pueden evitar catástrofes. De manera diaria, un diseño que tiene en cuenta la fatiga reduce los fallos de servicio y ayuda a los ingenieros a concentrarse en el diseño de nuevos productos en lugar de tener que corregir problemas heredados [11].

## **Capítulo 2. Evaluación del Factor de Intensidad de Tensiones mediante la simulación numérica no lineal de las probetas torsionadas**

### **2.1 Introducción al capítulo**

En este capítulo se describe las características de la máquina torsional a fatiga construida en la Universidad de Holguín “Sede Oscar Lucero Moya”, además se hace una caracterización del material de las probetas utilizadas en las simulaciones de crecimiento de grieta donde se muestran los resultados obtenidos. También se realizó la evaluación del factor de intensidad de tensiones mediante el MEF a través de una modelación geométrica de las probetas y una simulación numérica, para lograr establecer una metodología de cálculo correcto de los SIF, y proporcionar varias y diversas recomendaciones para crear un acoplamiento correcto relacionado con el tipo adecuado de elementos, el tamaño y el número óptimo de elementos, y las mejores transiciones del mallado.

### **2.2 Característica de la máquina de ensayos construida en la Universidad de Holguín “Sede Oscar Lucero Moya”**

Esta máquina diseñada y fabricada en nuestra universidad realiza ensayos con probetas a fatiga, con la que se podrá aumentar la gama de experimentos que se realizan en el laboratorio de Resistencia de Materiales de la Universidad de Holguín. Será posible mejorar el proceso docente educativo, permitiendo que los estudiantes de la carrera de ingeniería obtengan una mejor preparación y desempeño.

La función para la cual fue fabricada esta máquina fue para ensayos a torsión cíclica. Esta ocurre cuando a determinada sección transversal de un elemento se aplica un momento torsor o una fuerza que produce un momento torsor alrededor del eje longitudinal. La torsión se puede medir observando la deformación que produce en un objeto un par determinado. Por ejemplo, se fija un objeto cilíndrico de longitud determinada por un extremo, y se aplica un par de fuerzas al otro extremo; la cantidad de vueltas que de un extremo con respecto al otro es una medida de la torsión. Este desplazamiento angular es el ángulo de giro. Los



materiales empleados en ingeniería para elaborar elementos de máquinas rotatorias, como los cigüeñales y árboles motores, deben resistir las tensiones de torsión que les aplican las cargas que mueven [13].

### **2.2.1 Principio de funcionamiento**

El funcionamiento de la máquina está comprendido por un grupo de mecanismos los cuales definen al final del sistema un movimiento torsional alterno sobre la probeta, este movimiento se inicia en el motor eléctrico con una potencia de 0,75 kW y velocidad de salida de  $n = 24$  rad/min el cual trasmite su torque a una transmisión flexible por correa y patea con una relación de transmisión de 2,33:1, de la patea de salida del sistema flexible se encuentra acoplada a un reductor de tornillo sin-fin con relación de transmisión de 28:1, a través del cual se trasmite el movimiento a un volante-excéntrica predeterminado que es la base del sistema, transformando el movimiento giratorio continuo del mecanismo excéntrica-biela en movimientos lineales alternativos o angulares en el pie de la biela conectada al balancín del mandril provocando las oscilaciones torsionales en la probeta [8].

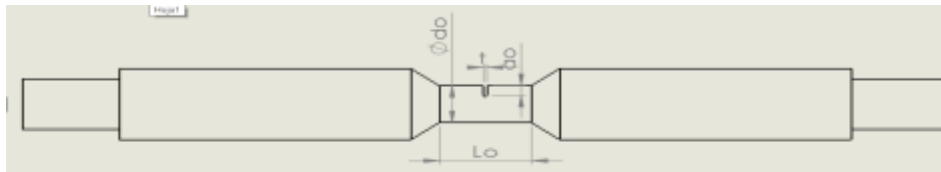
### **2.3 Selección del material**

De acuerdo a la referencia [4] el material utilizado para las probetas de ensayos es un acero CT3 el cual pertenece al grupo de los aceros para construcción, este grupo presenta un contenido de carbono en porcentaje de (0,08 - 0,7) % los cuales son los que se dedican a la construcción de elementos de máquinas, deben de tener amplias propiedades mecánicas como resistencia a la rotura, alto límite de fluencia y resistencia al desgaste. Los aceros para construcción se subdividen varios grupos, dentro de los cuales se encuentran los aceros de bajo porcentos de carbono al cual pertenecen los aceros CT3 que dentro del mismo pertenece al grupo de aceros para estructura, estos aceros se dedican a la construcción de puentes, gasoductos, oleoductos, armaduras, calderas, etc. Por lo general, todos los aceros para estructuras son soldables y son de bajo contenido de carbono,  $C < (0,22 - 0,25)$  %. El aumento de su resistencia se consigue aleándolo con elementos baratos, como el manganeso y el silicio. En este caso y siendo bajo el

contenido de carbono, el límite de fluencia aumenta hasta (400 – 500) MPa y la resistencia a la rotura hasta (500 – 600) MPa [14].

#### 2.4 Probetas utilizadas para los ensayos en la máquina torsional construida en la Universidad de Holguín “Sede Oscar Lucero Moya”.

Las probetas utilizadas para los ensayos a fatiga torsional fueron fabricadas en el taller de maquinado en la Universidad de Holguín “Sede Oscar Lucero Moya”, el material que presentan es acero CT3, se utilizó un torno C11MT para elaborar las diferentes superficies y una fresadora universal para elaborar los planos de sujeción en la máquina de ensayos, estas probetas fueron prefisuradas para obligar el crecimiento de la grieta a partir de la fractura ocasionada, e ir tomando las diferentes mediciones a partir del tamaño inicial de la grieta ( $a_0$ ) a medida que va aumentando su amplitud ( $a_1$ ) según el aumento del número de ciclo, en la figura 2.1 se describen las dimensiones de las probetas para los ensayos.



**Figura 2.1** Dimensiones de la probeta para la simulación.

Donde:

$d_o$  : diámetro inicial de la superficie de ensayo.

$L_o$  : longitud de la superficie de ensayo.

$a_o$  : profundidad de la grieta.

$t_o$  : ancho de la grieta.

**Tabla 2.1** Dimensiones de la probeta 1

Probeta 1	Dimensiones (mm)
$d_o$	10,43
$L_o$	28,6
$a_o$	3,1
$t_o$	0,74

**Tabla 2.2** Dimensiones de la probeta 2.

Probeta 2	Dimensiones (mm)
do	10,23
Lo	23,81
ao	1,92
to	0,82

**Tabla 2.3** Dimensiones de la probeta 3.

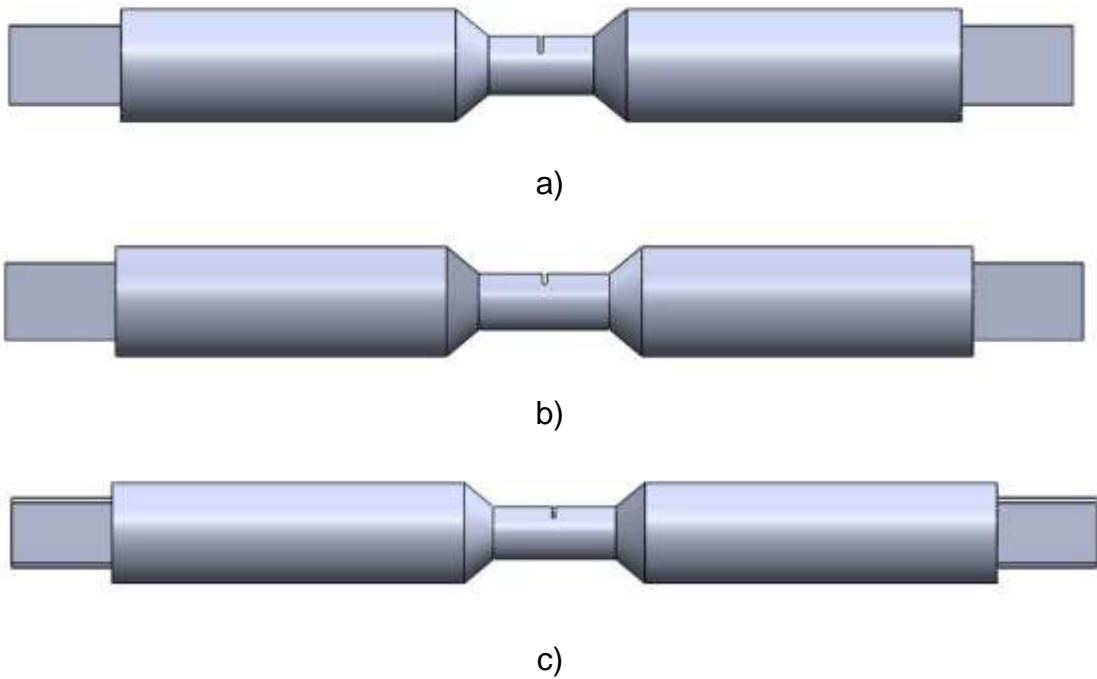
Probeta 3	Dimensiones (mm)
do	10,46
Lo	24,39
ao	2,3
to	0,64

## **2.5 Evaluación de Factor de intensidad de tensiones mediante el MEF**

Para determinar el Factor de Intensidad de Tensiones se utilizó la simulación numérica.

### **2.5.1 Modelos geométricos**

Los modelos de las probetas utilizadas en esta tesis es el propuesto en el trabajo [4]. Para la construcción de los modelos geométricos se empleó el software profesional *SolidWorks 2016*. Se tuvo en cuenta la forma y dimensiones de cada probeta ensayada, se elaboró un modelo geométrico para cada una por separado ya que son diferentes, con las dimensiones expuestas en las tablas 2.1, 2.2 y 2.3. Los modelos se realizaron a partir de croquis quedando de la siguiente manera:



**Figura 2.2** Modelo geométrico de las probetas simuladas, a) probeta uno, b) probeta dos, c) probeta 3.

### 2.5.2 Simulación numérica

El método utilizado para el cálculo de los factores de intensidad de tensiones para los diferentes casos es el método del CTOD técnica del desplazamiento de cuatro puntos, según lo anteriormente expuesto en el epígrafe 1.3, con la utilización de la ecuación 1.2.

Las propiedades mecánicas necesarias del material estudiado para resolver esta ecuación son: el Módulo de Young E y el coeficiente de Poisson como los valores que se muestran en la Tabla 2.4 a continuación.

**Tabla 2.4** Propiedades mecánicas del acero CT3

Módulo elástico	200 000 MPa
Coefficiente de Poisson	0,29
Módulo cortante	80 000 MPa
Límite elástico	180 MPa

Los valores de los desplazamientos  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ ,  $V_4$  y  $V_5$  son los resultados a obtener en la simulación por el método de los elementos finitos.

Siendo  $L$  la longitud de los elementos singulares en la grieta, con valor en mm.

La función de forma  $Y$ , que se define como el cociente entre el SIF calculado a través de la ecuación 1.2 y 1.1 respectivamente.

Para obtener los valores de desplazamientos y de tensión nominal en las probetas se realizó el cálculo de estos parámetros mediante el método de los elementos finitos. En las figuras 2.7, 2.8, 2.9, 2.10, 2.11 y 2.12 se muestran los resultados para la probeta uno y en las figuras 2.13, 2.14, 2.15, 2.16, 2.17 y 2.18 para la probeta tres.

Consecuentemente, para la obtención de los valores relacionados con el Factor de Intensidad de Tensiones se desarrollaron 8 estudios a la probeta uno y 9 estudios a la probeta tres con el paquete de análisis del software profesional de diseño *SolidWorks Simulation* versión 2016, los desplazamientos que se han de introducir en la técnica del desplazamiento de cuatro puntos.

Estos estudios tienen una variación entre sí de la longitud de la grieta que se estudia, por lo que esta diferenciación se muestra en la Tabla 2.5 a continuación.

**Tabla 2.5** Tamaños de grietas en la probeta 1.

No.	Tamaño de grietas (mm)
1	3,1
2	4,1
3	5,1
4	6,1
5	7,1
6	8,1
7	9,1
8	10,1

**Tabla 2.6** Tamaños de grietas en la probeta 3.

No.	Tamaño de grietas (mm)
1	2,3
2	3,3
3	4,3
4	5,3
5	6,3
6	7,3
7	8,3
8	9,3
9	10,3

Se decidió mostrar solamente en este informe tres estudios de cada probeta estudiada, con las amplitudes de grieta mínima, media y máxima.

### **2.5.3 Parámetros del mallado**

El mallado de un modelo sólido se compone de dos fases básicas. En la primera, el mallado coloca nodos sobre el contorno. Esta fase se llama mallado superficial. Si esta fase se completa correctamente, el mallado comienza la segunda fase, durante la cual se crean nodos en el interior, se llena el volumen con tetraedros en toda la superficie.

El mallado es un paso crucial en el análisis del diseño. El mallado automático del software genera un mallado basándose en un tamaño de elemento global, además de contar con una tolerancia determinada y especificaciones locales de control de malla. Este último le permite especificar diferentes tamaños de elementos de componentes, caras, aristas y vértices [10].

El software estima un tamaño de elemento global para el modelo tomado en cuenta su volumen, área de superficie y otros detalles geométricos. El tamaño de la malla generada (número de nodos y elementos) depende de la geometría y las cotas del modelo, el tamaño del elemento, la tolerancia de la malla, el control de la misma y las especificaciones de contacto. En las primeras etapas del análisis de diseño donde los resultados aproximados pueden resultar superficiales, se debe

especificar un tamaño de elemento mayor para una solución más rápida. Para obtener una solución más precisa, es posible que sea necesario utilizar un tamaño de elemento más pequeño.

El mallado genera elementos sólidos tetraédricos en 3D, elementos de vaciado triangulares en 2D y elementos de viga en 1D. Una malla está compuesta por un tipo determinado de elementos, a no ser que se especifique el tipo de malla mixta. Los elementos sólidos son apropiados para modelos de gran tamaño. Los elementos de vaciado resultan adecuados para modelar piezas delgadas, como las chapas metálicas, y las vigas y cabezas de armadura son apropiadas para modelar miembros estructurales [10].

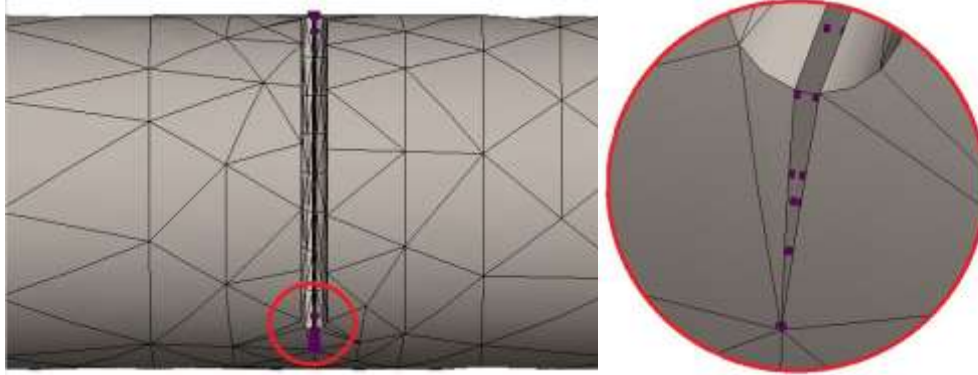
Debido a que el mallado de los elementos finitos tiene una gran influencia en los resultados numéricos que se obtienen, se desarrollará un estudio previo del mallado para así analizar el efecto del tamaño, número y tipo de elementos que se han de utilizar; y de esta forma poder determinar la transición del mallado entre los elementos cercanos y lejanos, que respectivamente pueden tener una exactitud importante en la extremidad de la grieta.

Siendo así se pudo llegar a la conclusión de que el tamaño del mallado en la zona de la grieta se realizará con elementos de mallado de pequeño tamaño y respectivamente ir incrementando el tamaño se aleje del área de análisis.

Para optimizar el mallado se aplica un control de mallado en la zona donde se ha de obtener los resultados más relevantes y así poder disminuir la complejidad y tiempo que pueda desarrollar el estudio por lo que así se muestra en la figura 2.3 el control del mallado.



**Figura 2.3** Representación del mallado de las probetas.



**Figura 2.4** Representación del control de malla.

En las tablas que se muestran a continuación podemos observar los detalles de uno de los mallados que se realizaron a la probeta uno y a la probeta tres.

**Tabla 2.5** Detalles del control de malla en la probeta 1.

Nombre de estudio	Estudio 1 (-Predeterminado-)
Tipo de malla	Malla sólida
Entidades	2 cara(s)
Unidades	mm
Tamaño	136,547
Coeficiente	1,5
Identificador	1

**Tabla 2.6** Detalles de la malla en la probeta 1.

Nombre de estudio	Estudio 1 (-Predeterminado-)
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla basada en curvatura
Puntos jacobianos	4 puntos
Control de malla	Definida
Tamaño máx. de elemento	7,28251 mm
Tamaño mín. de elemento	1,4565 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden



Número total de nodos	3 906
Número total de elementos	2 239
Cociente de aspecto máximo	41,101
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto < 3	92,6
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto > 10	0,804
% de elementos distorsionados (Jacobiano)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	0:00:02

**Tabla 2.7** Detalles del control de malla en la probeta 3.

Nombre de estudio	Estudio 1 (-Predeterminado-)
Tipo de malla	Malla sólida
Entidades	2 cara(s)
Unidades	mm
Tamaño	104,558
Coeficiente	1,5
Identificador	3

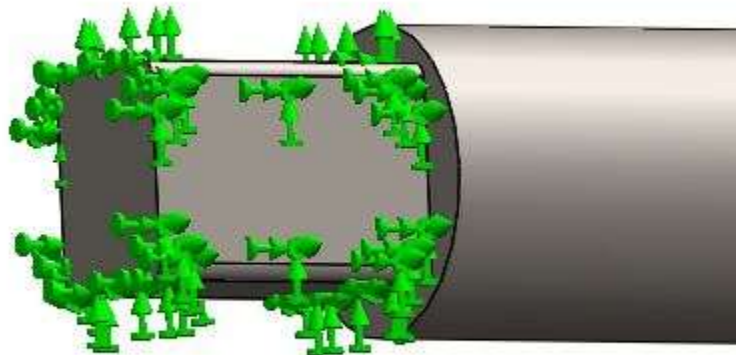
**Tabla 2.8** Detalles de la malla en la probeta 3.

Nombre de estudio	Estudio 1 (-Predeterminado-)
Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla basada en curvatura
Puntos jacobianos	4 puntos
Control de malla	Definida
Tamaño máx. de elemento	7,60423 mm
Tamaño mín. de elemento	1,52085 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Número total de nodos	17 913
Número total de elementos	10 785

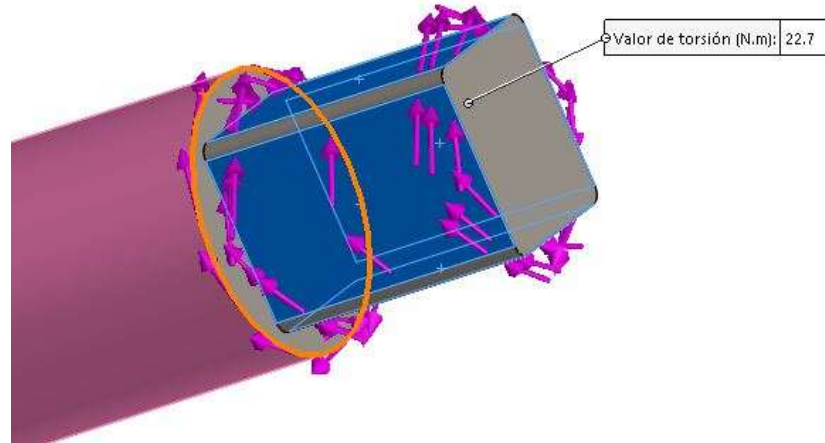
Cociente de aspecto máximo	91,455
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto < 3	94
Porcentaje de elementos con cociente de aspecto > 10	0
% de elementos distorsionados (Jacobiano)	0:00:00
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	0:00:04

#### 2.5.4 Representación de las restricciones y fuerzas aplicadas en el estudio.

La sujeción de la probeta está dada por la importancia en los extremos que presenta la probeta con el tipo de geometría fija (Figura 2.5) y con un momento torsional aplicado en el otro extremo de la probeta con un valor de 22,7 Nm (Figura 2.6), en dirección al plano YZ.



**Figura 2.5** Representación de la sujeción fija aplicada a las probetas.

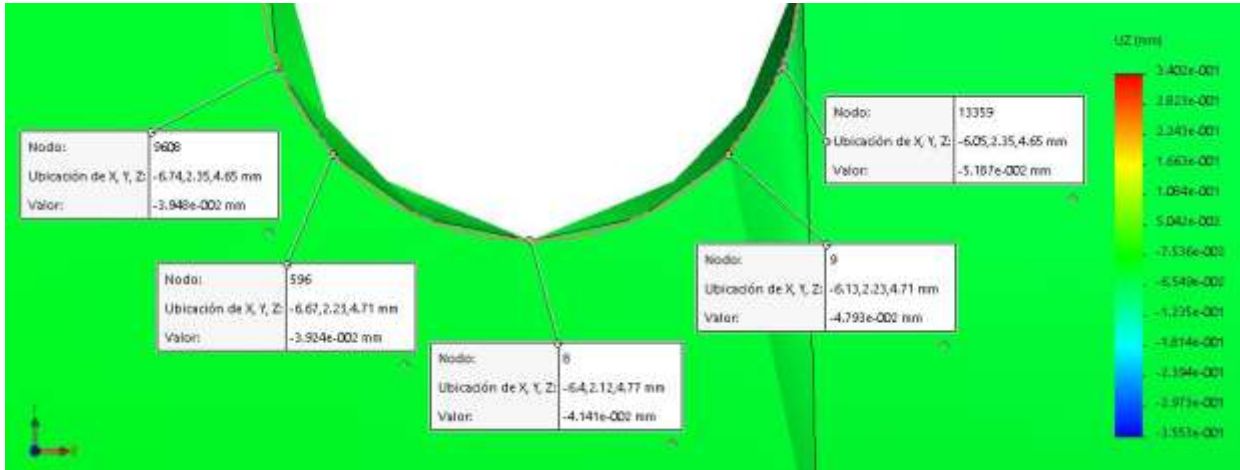


**Figura 2.6** Representación del momento torsor aplicada a las probetas.

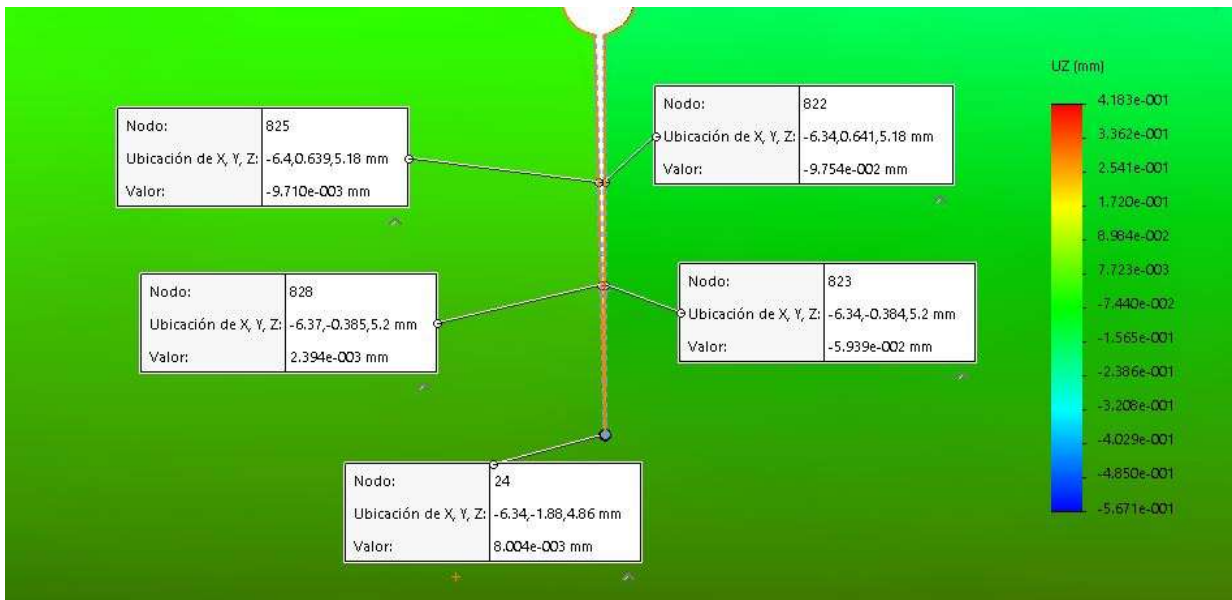
El primer, segundo y tercero estudio seleccionado de la probeta uno se realizó con un tamaño de grieta de 3,1 mm, 7,1 mm y 10,1 mm respectivamente en la región delimitada que se va a analizar y en la zona que no se analiza, con una malla predeterminada por el paquete de elementos finitos que utiliza el *Simulation*, dado que estos son los estudios en sí con el menor, medio y mayor tamaño de grieta respectivamente, mientras que para la probeta tres se realizó con un tamaño de grieta de 2,3 mm, 6,3 mm y 10,3 mm correspondientes con el menor, medio y mayor tamaño de grieta respectivamente.

### **2.5.5 Valores de tensiones y desplazamientos en las probetas**

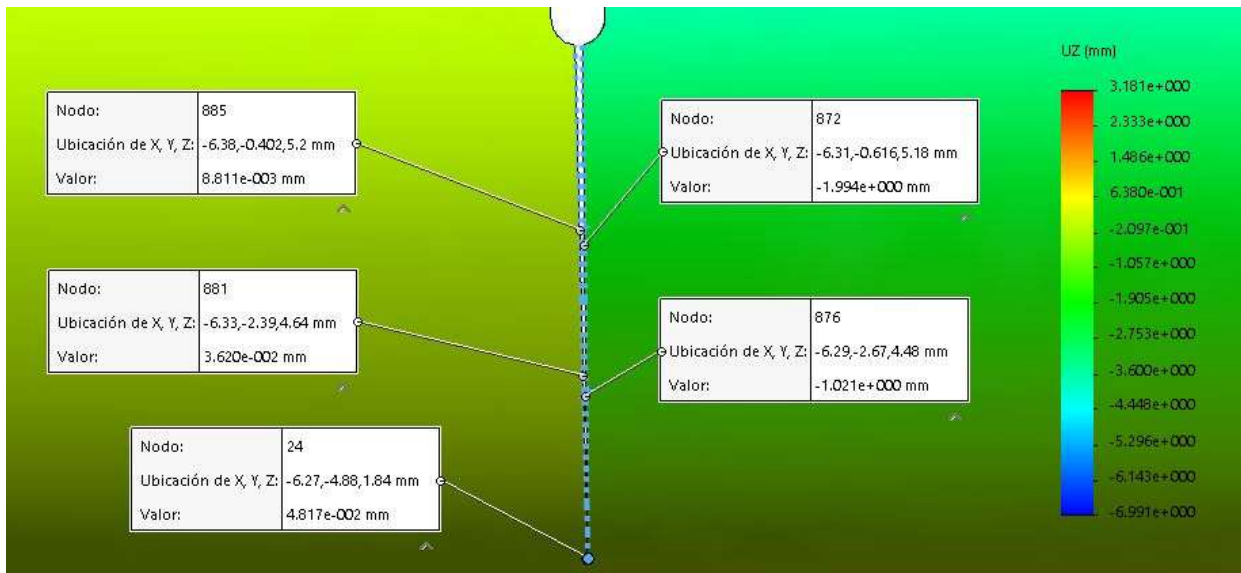
En las figuras 2.7, 2.8, 2.9, 2.10, 2.11 y 2.12 se muestran los valores de desplazamientos y tensiones nominales respectivamente obtenidos de los estudios realizados a la probeta uno por el paquete de análisis *SolidWorks Simulation* versión 2016 para la longitud de grieta 3,1 mm, 7,1 mm y 10,1 mm respectivamente.



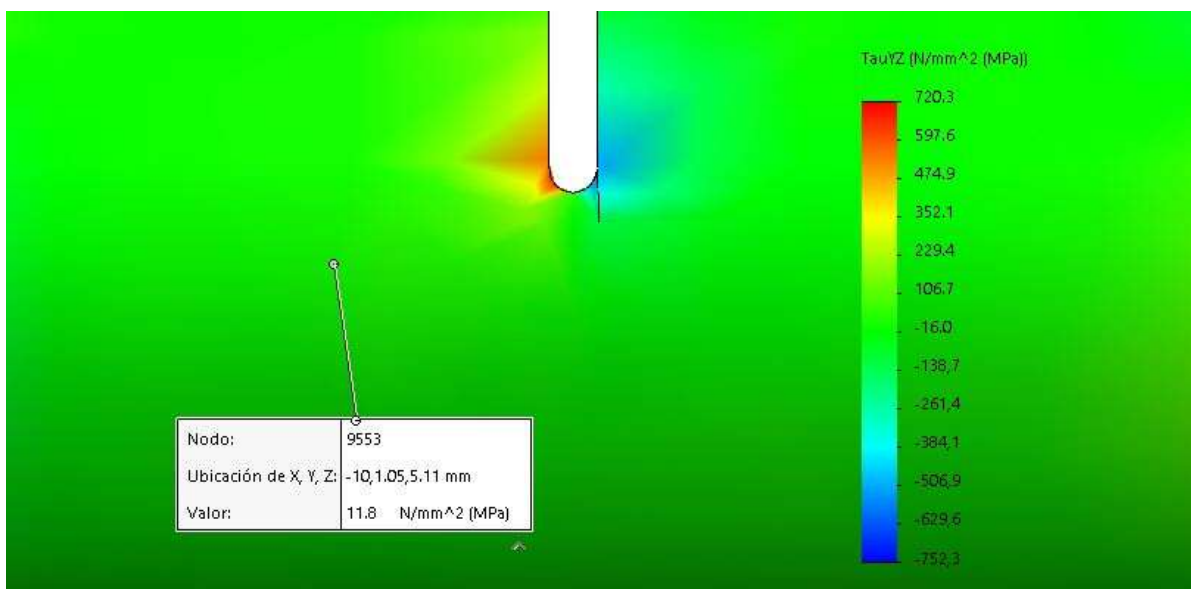
**Figura 2.7** Valores de desplazamiento para la longitud de grieta de 3,1 mm.



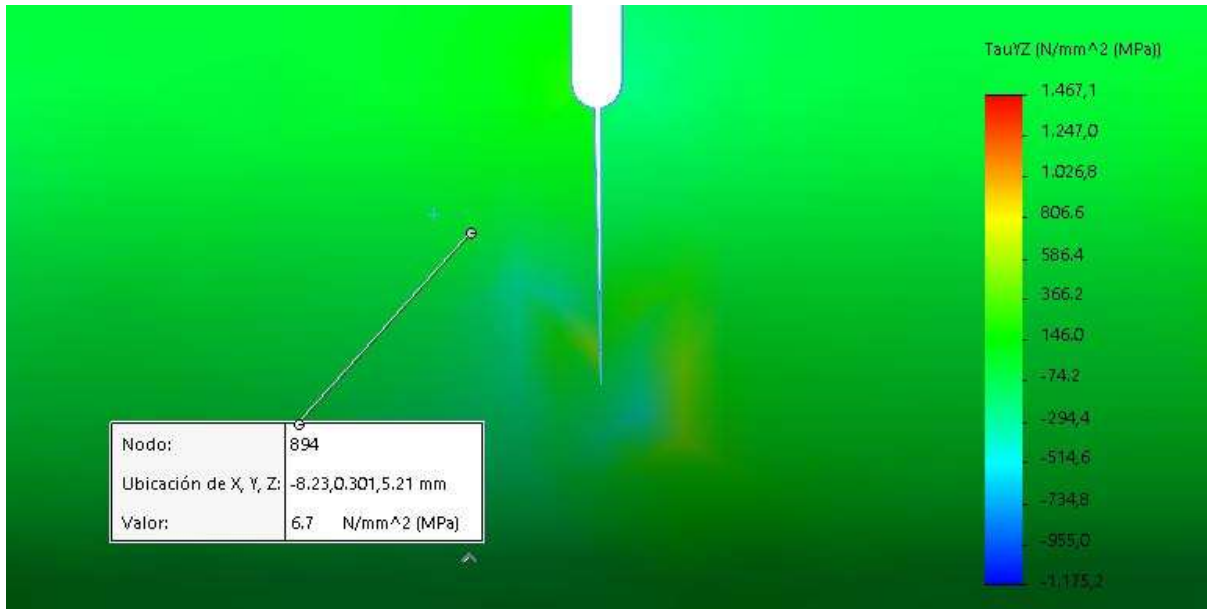
**Figura 2.8** Valores de desplazamiento para la longitud de grieta de 7,1 mm.



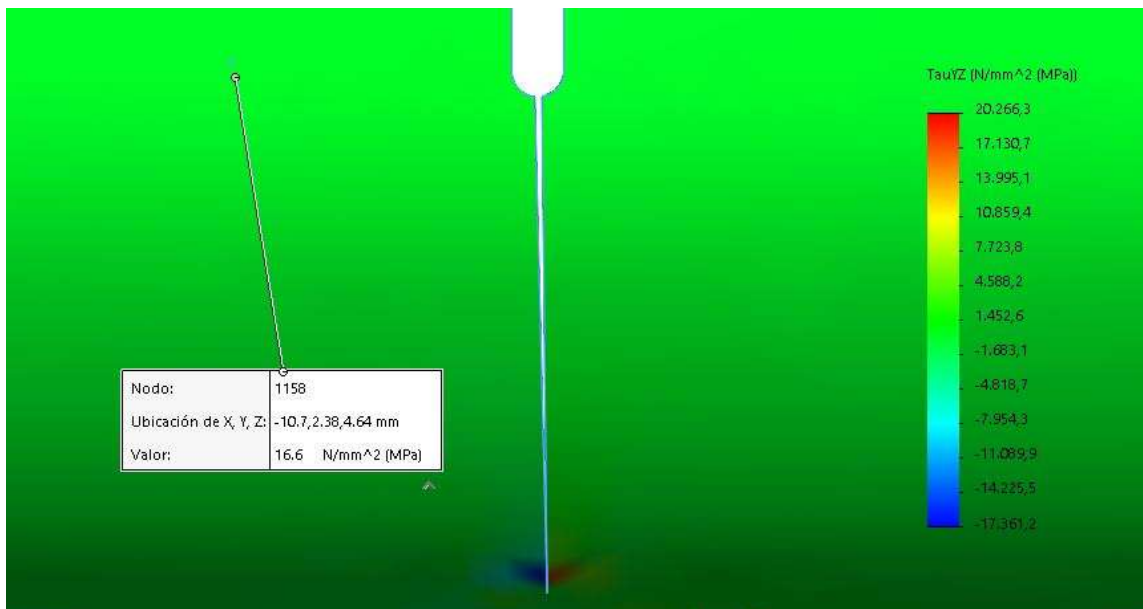
**Figura 2.9** Valores de desplazamiento para la longitud de grieta de 10,1 mm.



**Figura 2.10** Valor de tensión nominal para la longitud de grieta de 3,1 mm.

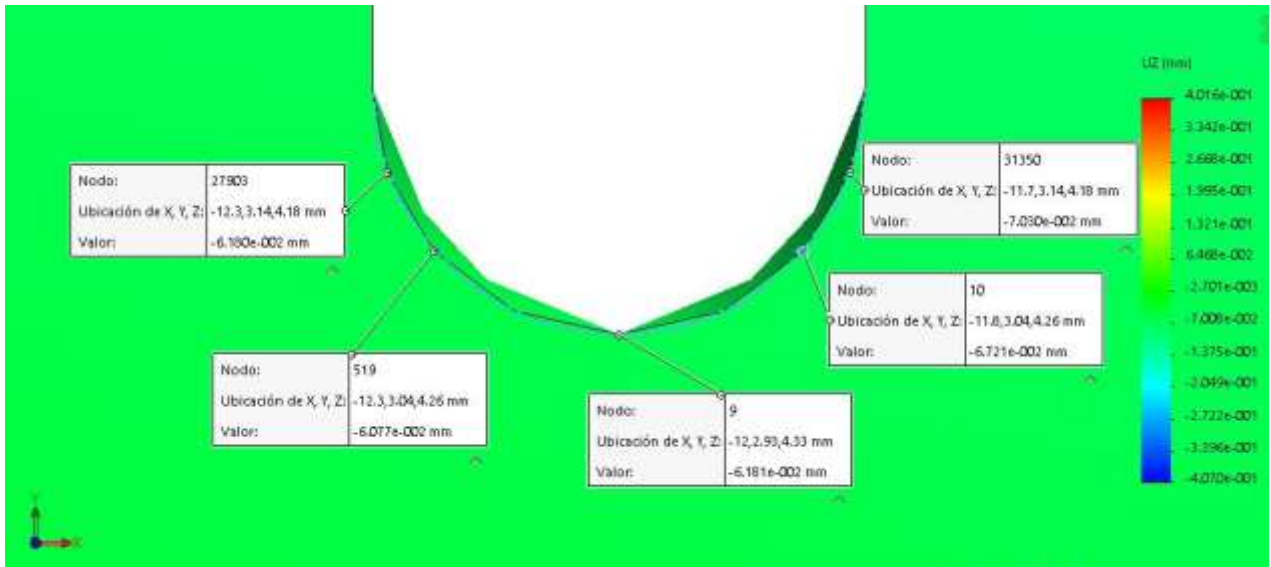


**Figura 2.11** Valor de tensión nominal para la longitud de grieta de 7,1 mm.

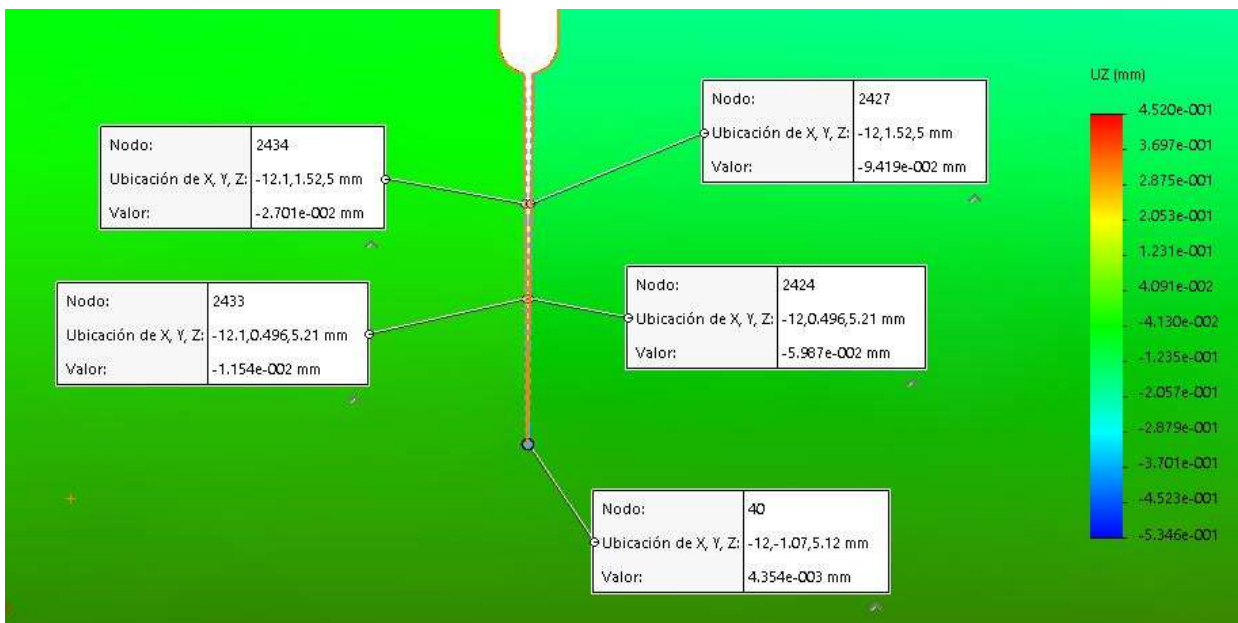


**Figura 2.12** Valor de tensión nominal para la longitud de grieta de 10,1 mm.

En las figuras 2.13, 2.14, 2.15, 2.16, 2.17 y 2.18 se muestran los valores de desplazamientos y tensiones nominales respectivamente obtenidos de los estudios realizados a la probeta tres por el paquete de análisis *SolidWorks Simulation* versión 2016 para la longitud de grieta 2,3 mm, 6,3 mm y 10,3 mm respectivamente.

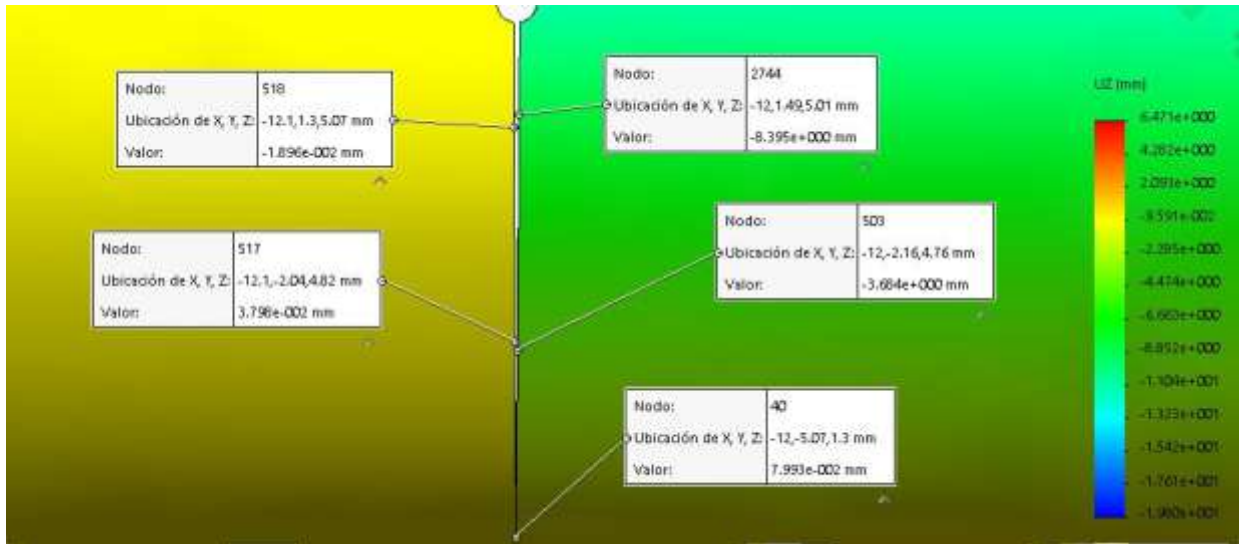


**Figura 2.13** Valores de desplazamiento para la longitud de grieta de 2,3 mm.

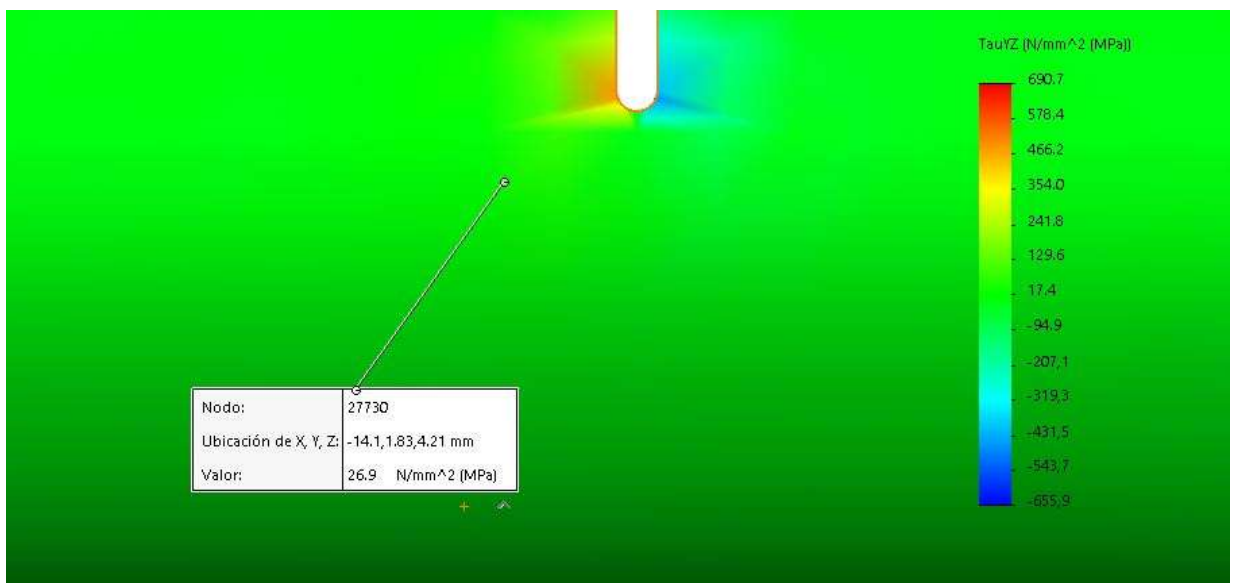


**Figura 2.14** Valores de desplazamiento para la longitud de grieta de 6,3 mm.



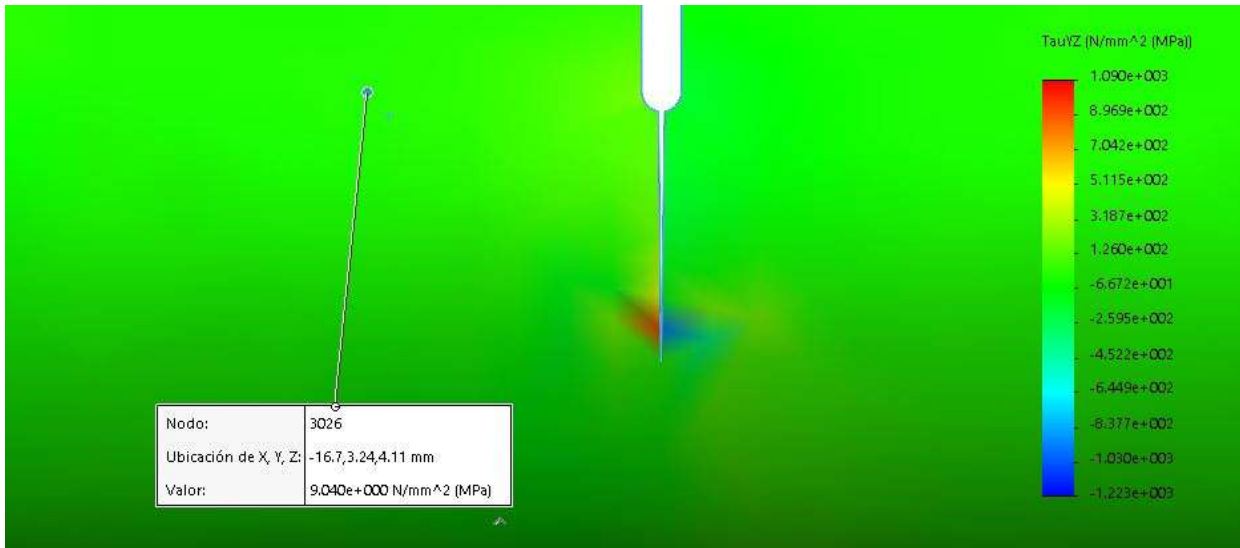


**Figura 2.15** Valores de desplazamiento para la longitud de grieta de 10,3 mm.

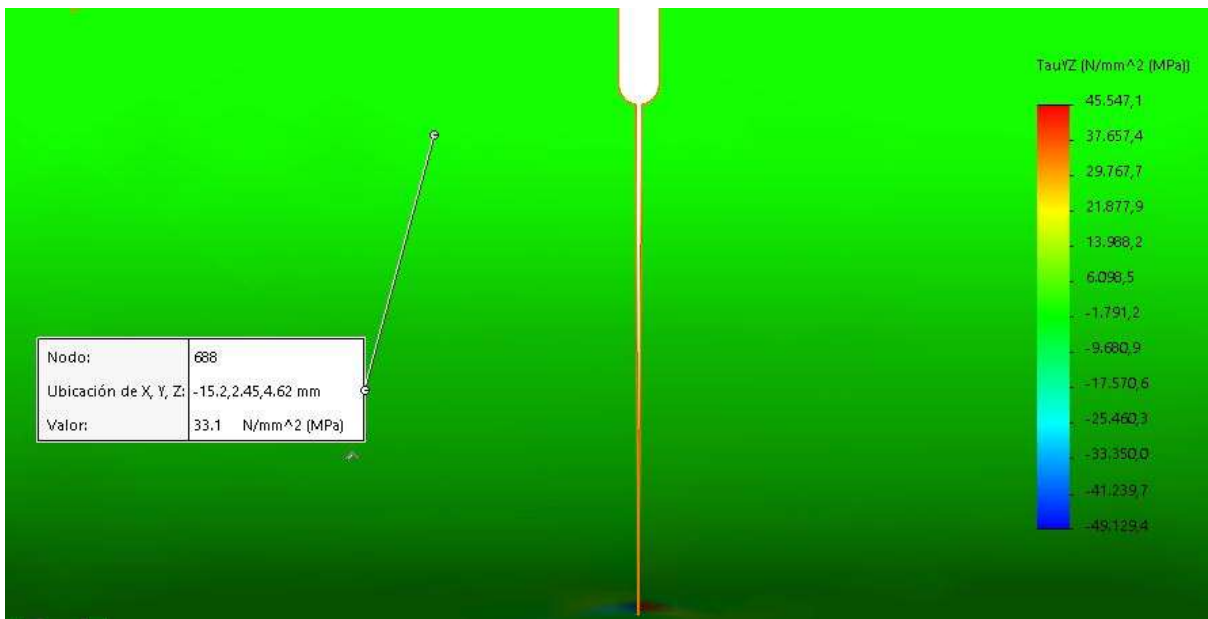


**Figura 2.16** Valor de tensión nominal para la longitud de grieta de 2,3 mm.





**Figura 2.17** Valor de tensión nominal para la longitud de grieta de 7,3 mm.



**Figura 2.18** Valor de tensión nominal para la longitud de grieta de 10,3 mm.

### 2.5.6 Función de forma para las probetas estudiadas

Con los valores de las tensiones nominales y los desplazamientos transversales se determinó el SIF. En las tablas 2.9 y 2.11, se exponen los cálculos realizados. Con estos resultados se obtuvieron los gráficos mostrados en las figuras 2.19 y 2.20. En estos gráficos se planteó por el eje de las abscisas la relación entre el tamaño de grieta y el diámetro  $a/d$ , mientras que en el eje de las ordenadas se

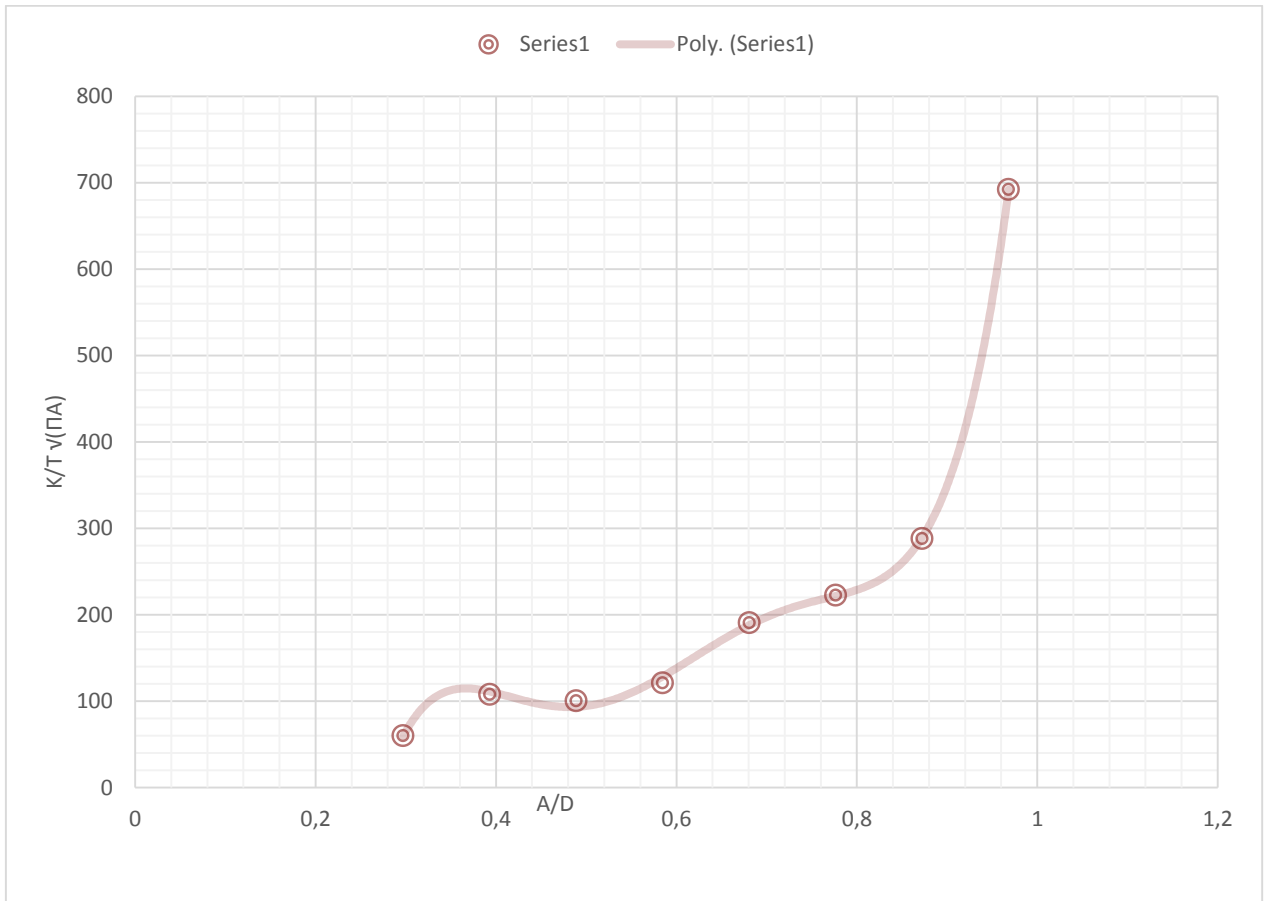
ubicó el cociente entre los valores del SIF determinados a través de las ecuaciones 1.2 y 1.1.

**Tabla 2.9** Valores de desplazamientos en la probeta 1.

a (m)	d	a/d	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>5</sub>
0,0031	0,01043	0,297	0,00004141	0,00004793	0,0000587	0,00003924	0,00003948
0,0041	0,01043	0,393	0,00002639	0,00004206	0,00005464	0,00002995	0,00003509
0,0051	0,01043	0,489	0,00001464	0,00003203	0,00004723	0,0000157	0,00002003
0,0061	0,01043	0,585	0,000003133	0,00005795	0,0000802	0,00001177	0,000021
0,0071	0,01043	0,681	0,000008004	0,00005939	0,00009754	0,000002394	0,00000971
0,0081	0,01043	0,777	0,00001681	0,0001069	0,0001725	0,000007773	0,00000915
0,0091	0,01043	0,872	0,00003145	0,0002503	0,0004264	0,00001531	0,000006448
0,0101	0,01043	0,968	0,00004817	0,001021	0,001994	0,0000362	0,000008811

**Tabla 2.10** Valores del SIF (K<sub>III</sub>) para la probeta 1.

Dist 1-3 (m)	t nominal (Pa)	K <sub>III</sub> (Pa√m)	t √(πa) (Pa√m)	K/t √(πa)
0,00023	1180000,000	70090453,18	1164200,223	60,20480994
0,001	5100000,000	62491264,61	578664,6179	107,9921991
0,001022	6400000,000	81564131,39	809897,1787	100,7092425
0,002282	10700000,000	179732610,4	1480858,352	121,370562
0,002521	6700000,000	190937330,2	1000388,754	190,8631313
0,003222	7900000,000	280969594,6	1259895,21	223,0102888
0,004355	11050000,000	538998699	1867874,952	288,5625178
0,004264	16600000,000	2046869609	2956198,545	692,399234



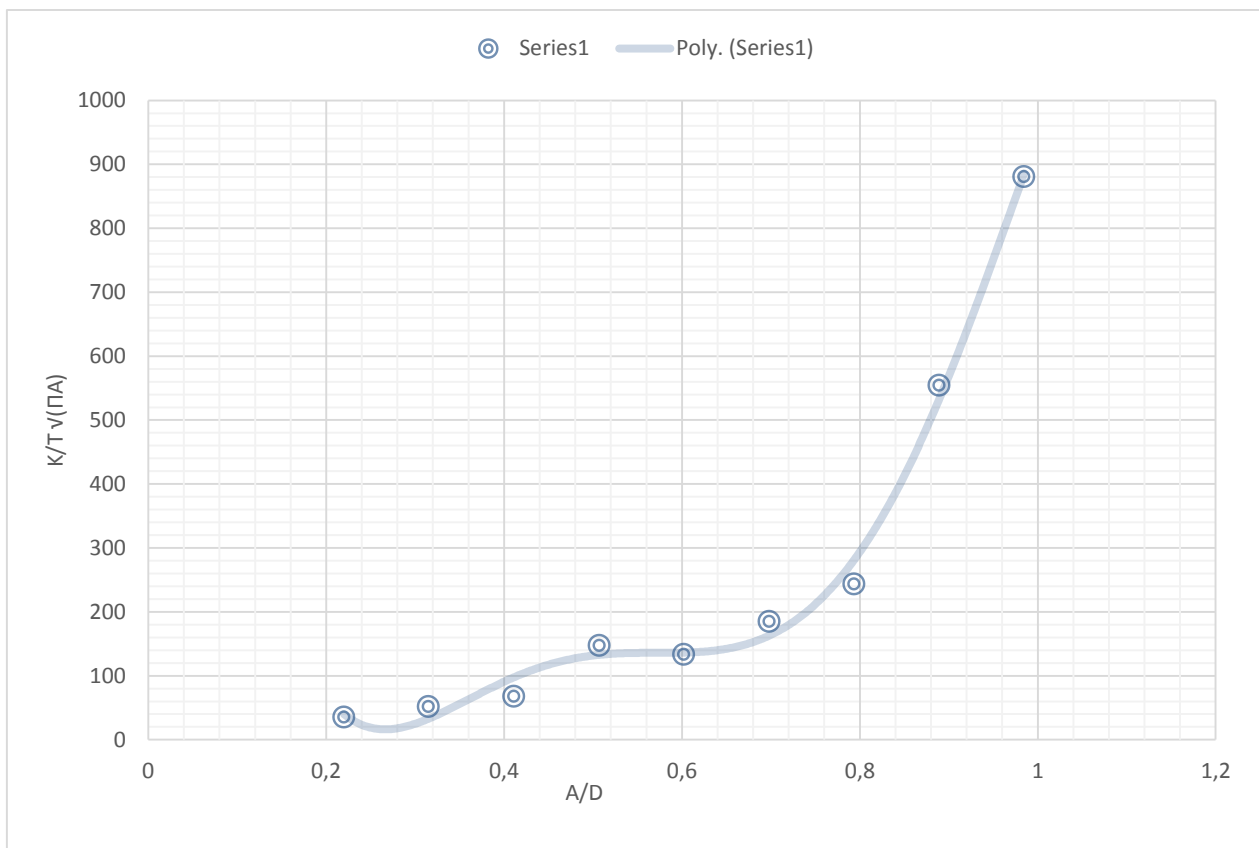
**Figura 2.19** Gráfico de la función de forma para la probeta 1.

**Tabla 2.11** Valores de desplazamientos en la probeta 3.

a (m)	d	a/d	V <sub>1</sub>	V <sub>2</sub>	V <sub>3</sub>	V <sub>4</sub>	V <sub>5</sub>
0,0023	0,01046	0,220	0,00006181	0,00006721	0,0000703	0,00006077	0,0000618
0,0033	0,01046	0,315	0,00004338	0,0000566	0,00006334	0,00004601	0,00004949
0,0043	0,01046	0,411	0,00002743	0,00004555	0,00006103	0,00003191	0,00003856
0,0053	0,01046	0,507	0,00001157	0,00005475	0,00007732	0,00002056	0,0000363
0,0063	0,01046	0,602	0,000004354	0,00005987	0,00009419	0,00001154	0,00002701
0,0073	0,01046	0,698	0,00001748	0,00007912	0,000128	9,117E-07	0,00001836
0,0083	0,01046	0,793	0,00002619	0,0001136	0,0002123	0,00001733	0,000008024
0,0093	0,01046	0,889	0,00004419	0,0003184	0,0005628	0,00002746	0,000007302
0,0103	0,01046	0,985	0,00007993	0,003684	0,008395	0,00003798	0,00001896

**Tabla 2.12** Valores del SIF ( $K_{III}$ ) para la probeta 3.

Dist 1-3 (m)	t nominal (Pa)	$K_{III}$ (Pa $\sqrt{m}$ )	t $\sqrt{(\pi a)}$ (Pa $\sqrt{m}$ )	$K/t \sqrt{(\pi a)}$
0,00021	26900000,000	81470975,34	2286025,245	35,63870326
0,00064	14500000,000	77086619,67	1476011,687	52,22629357
0,001046	8600000,000	67869655,75	999303,7176	67,91694512
0,0019461	7800000,000	148450826	1006230,232	147,5316694
0,00259	9040000,000	169540990,5	1271462,422	133,3432963
0,003041	9000000,000	252041892,2	1362601,189	184,9711377
0,003512	5300000,000	208690438,8	855617,6599	243,9061845
0,004561	6500000,000	616073347,8	1110758,525	554,6420164
0,00656	33100000,000	5242933610	5952664,834	880,7708407



**Figura 2.20** Gráfico de la función de forma para la probeta 3.

La ecuación de ajuste de los gráficos mostrados en las figuras 2.19 y 2.20 se corresponden con la función de forma para el Factor de Intensidad de Tensiones en las probetas estudiadas. De esta manera se obtuvieron las ecuaciones 2.1 y 2.2.

Ecuaciones y el valor de  $R^2$ :

$$Y = 134260\left(\frac{a}{d}\right)^5 - 402917\left(\frac{a}{d}\right)^4 + 469741\left(\frac{a}{d}\right)^3 - 264454\left(\frac{a}{d}\right)^2 + 71784\left(\frac{a}{d}\right) - 7415,2 \quad \dots\dots (2.1)$$
$$R^2 = 0,9996$$

$$Y = -44236\left(\frac{a}{d}\right)^5 + 140346\left(\frac{a}{d}\right)^4 - 163858\left(\frac{a}{d}\right)^3 + 88443\left(\frac{a}{d}\right)^2 - 21729\left(\frac{a}{d}\right) + 1978,7 \quad \dots (2.2)$$
$$R^2 = 0,9939$$

El coeficiente  $R^2$  para las ecuaciones 2.1 y 2.2 tiene un valor de 0,9996 y 0,9939 los cuales son considerados muy buenos.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se han obtenido las conclusiones siguientes:

1. La combinación entre métodos experimentales y numéricos es una buena opción para la caracterización numérica de materiales.
2. Se determinaron los estados tensionales y deformacionales en las probetas preagrietadas solicitadas a torsión cíclica.
3. Se obtuvieron ecuaciones para describir la función de forma considerando la relación entre el tamaño de grieta y el diámetro nominal en las probetas preagrietadas de acero CT3 solicitadas a torsión cíclica.

## RECOMENDACIONES

1. Utilizar las ecuaciones propuestas para la función de forma en el cálculo de probetas solicitadas a torsión cíclica simétrica.
2. Realizar estudios considerando otros regímenes de carga para conocer los factores de corrección de las ecuaciones propuestas.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Toasa C, Paul D. (26 de mayo de 2009) Curvas de Wöhler y análisis estadístico de pruebas de fractura por fatiga. Disponible:<http://fisica.laguia2000.com/complementos-matematicos/fatiga-de-materiales-curva-de-wohler-s-n> Fecha de consulta: 4 de enero de 2018.
- [2] Marco Esteban, E. (2010). METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS A FATIGA MEDIANTE EL CÓDIGO PRO ENGINEER: APLICACIÓN A UN EJE FERROVIARIO. DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA Universidad Carlos III de Madrid. 132 p. Disponible:[https://?gws\\_rd=cr,ssl&ei=AamrWLz7IIKEmQH42rSABQ#q=metologia+para+el+analisis+a+fatiga](https://?gws_rd=cr,ssl&ei=AamrWLz7IIKEmQH42rSABQ#q=metologia+para+el+analisis+a+fatiga). Fecha de consulta: 6 de febrero de 2018.
- [3] Paguay Alvarado, R. I (2011). Análisis del Comportamiento a Fatiga en Flexión Rotativa de un Acero AISI SAE 1018 en Ambientes Corrosivos. Tesis de pregrado para obtener el título de ingeniero mecánico. Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción. ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL. GUAYAQUIL – ECUADOR, 204 p. Disponible: <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v77n162/a14v77n162.pdf> Fecha de consulta: 19 de abril de 2018.
- [4] Crespo Ricardo, L. (2017). Evaluación a fractura de probetas de acero CT3 sometidas a torsión cíclica. Tesis de pregrado para obtener el título de ingeniero mecánico. Facultad de Ingeniería en Mecánica Universidad de Holguín “Sede Oscar Lucero Moya” 56 p.
- [5] Blashcke - Collado, B. C. (2006). Evaluación del crecimiento de grietas en uniones. Tesis presentada para obtener el grado de magistral en Ingeniería Mecánica. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad del Norte. Barranquilla. Colombia. 91 p.
- [6] Almaguer, P. (2015). Evaluación numérica de la función para grietas en uniones soldadas. VII Conferencia Científica de la Universidad de Holguín. Guardalavaca. Cuba. 2015. ISSN: 978-959-16-2472-7
- [7] Herrera Max D (2015). Diseño y construcción de la estructura portante de una máquina para ensayos de fatiga por torsión. Tesis de pregrado para obtener el título de ingeniero mecánico. Facultad de Ingeniería en Mecánica Universidad de Holguín “Sede Oscar Lucero Moya” 109 p.
- [8] Sánchez Ochoa, R. (2014). Diseño de una máquina torsional de ensayos a fatiga. Tesis de pregrado para obtener el título de ingeniero mecánico. Facultad de Ingeniería en Mecánica Universidad de Holguín “Sede Oscar Lucero Moya” 84 p.



[9] Mecánica de fractura. Disponible en: <http://www.ibertest.es/producto/ensayo-defractura/?gclid=CNKKggyWoNICFZKCswodKNANhA>. Fecha de consulta: 12 de febrero de 2018.

[10] Verdecia Moya, L. (2014). Cálculo del factor de intensidad de tensiones en uniones soldadas por el método de los elementos finitos. Tesis de pregrado para obtener el título de ingeniero mecánico. Facultad de Ingeniería en Mecánica Universidad de Holguín “Sede Oscar Lucero Moya” 80 p.

[11] Diseño para evitar la fatiga [http://www.solidworks.es/sw/docs/WP\\_SIM\\_Fatigue\\_ESP.pdf](http://www.solidworks.es/sw/docs/WP_SIM_Fatigue_ESP.pdf). Fecha de consulta: 14 de mayo de 2018.

[12] Marrero, J. (2016). Diseño y fabricación de dispositivos para máquina torsional de ensayos a fatiga. Tesis de pregrado para obtener el título de ingeniero mecánico. Facultad de Ingeniería en Mecánica Universidad de Holguín “Sede Oscar Lucero Moya” 75 p.

[13] Stiopin, P. A. (1976). Resistencia de Materiales. Editorial Mir 6ta Edición. Moscú.

[14] GULIAEV A, P. Metalografía. Tomo I. Moscú, Editorial Mir, 1979.

[15] Mulet Ochoa, R. (2015). Simulación del ensayo a tracción de una unión soldada a tope de acero AISI 1015 y electrodo E6013. Tesis de pregrado para obtener el título de ingeniero mecánico. Facultad de Ingeniería en Mecánica Universidad de Holguín “Sede Oscar Lucero Moya” 26 p.

ANEXOS

**Anexo 1:** Probeta de ensayo 1.



**Anexo 2:** Probeta de ensayo 2.



**Anexo 3:** Probeta de ensayo 3.



**Anexo 4:** Probeta de acero CT3 para los ensayos.

