

**Facultad de Ingeniería
Centro de Estudios CAD/CAM**

**Tesis en opción al
Título de Ingeniero Mecánico**

Evaluación a fractura de probetas de acero CT3 sometidas a torsión cíclica

Autor: Leandro Rafael Crespo Ricardo

Tutor: M.Sc. Ing. Pavel Michel Almaguer Zaldivar, P. Aux.

Holguín, 2017

DEDICATORIA

A mi mamá por ser una madre excelente y por apoyarnos en todo momento.

A mi papá por todo su sacrificio y preocupación para que pudiera estudiar.

A mi hermano por ser el mejor de todos los hermanos en el mundo.

A mi mujer Yailen por estar en los momentos malos y buenos en mi vida.

A mis tíos por poder contar con ellos en todos momentos.

A mis suegros Margarita y Reinerio por haber sido otros padres para mí.

A mis amigos de cuarto que hemos compartido durante cinco años.

En fin gracias a todos los que me han ayudado durante mi carrera.

AGRADECIMIENTO

Le agradezco mi tutor y amigo Pavel por tener tanta dedicación y ser mi guía en estos últimos meses, por su preocupación ya que sin él no hubiera sido posible la realización de este trabajo

A mi mamá por estar siempre pendiente de mi futuro y por su apoyo.

A mi papá por estar siempre ahí cuando más lo necesitamos.

A mi hermano por ser un ejemplo a seguir durante toda mi vida porque creo que sin él no hubiera llegado hasta aquí.

A mi mujer Yailen por ser la mujer de mi vida.

A mis tíos por poder contar con ellos en todos momentos.

A mis suegros Margarita y Reinerio por haber sido otros padres para mí.

A mis amigos de cuarto que hemos compartido durante cinco años.

En fin gracias a todos los que me han ayudado durante mi carrera.

RESUMEN

Algunos componentes metálicos como estructuras de máquinas, pines de sujeción, ejes de transmisión de potencia, entre otros, se encuentran sometidos a cargas de fatigas durante su servicio, y con el pasar del tiempo tienden a fracturarse debido a la presencia de agrietamientos generados en los concentradores de esfuerzos.

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 esfuerzo, 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, mediante ensayos de fatiga torsional se registraron 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 y 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 realizados en los cuales a partir de ellos se realizó la simulación en el análisis por elementos finitos para determinar la ecuación de ajuste que se corresponde con la función de forma para el factor de intensidad de tensiones en las probetas estudiadas.

SUMMARY

Some metallic components like machines structures, support pines, power transmission centers, etc., are subjected under cycle loads during the service and with time they can be fractured by the presence of flaws, which are stress concentrators. 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 a torsional fatigue test were realized to measure 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 and 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 that analysis by endings elements to determinate the adjust equation that is corresponding with the shape function for the stress intensity factor in studied specimens.

Índice

INTRODUCCIÓN.....	1
Capítulo I. Fundamentación teórica sobre la fatiga y la fractura mecánica	5
1.1 Introducción al capítulo.....	5
1.2 Generalidades sobre la fatiga y la fractura mecánica.....	5
1.2.1 Definición.....	7
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.....	10
1.2.5 Según el tipo de fractura	11
1.2.6 Mecanismos de fractura	13
1.3 Factor de intensidad de tensiones.....	14
1.4 Ensayos a fatiga y fractura	17
1.5 El método de elementos finitos (FEM) y el cálculo por fatiga.....	18
1.6 Ensayos de líquidos penetrante	22
Capítulo 2. Evaluación del crecimiento de grietas ante la acción de cargas cíclicas.....	24
2.1 Introducción al capítulo.....	24
2.2 Característica de la máquina de ensayos construida en la Universidad de Holguín “Sede Oscar Lucero Moya”.....	24
2.2.1 Principio de funcionamiento.	24
2.3 Caracterización de material.....	25
2.4 Probetas utilizadas para los ensayos en la máquina torsional construida en la Universidad de Holguín “Sede Oscar Lucero Moya”.	26
2.5 Resultados del ensayo de crecimientos de grietas.....	30
2.6 Evaluación de Factor de intensidad de tensiones mediante el MEF	36
2.6.1 Modelo geométrico.....	36
2.6.2 Simulación numérica.....	37
2.6.3 Representación de las restricciones y fuerzas aplicadas en el estudio de la probeta uno.	38
2.6.4 Valores de tensiones y desplazamientos en la probeta uno.....	39

2.6.5 Representación de las restricciones y fuerzas aplicadas en el estudio de la probeta tres.	42
2.6.6 Función de forma para las probetas estudiadas.	45
Conclusiones	48
Recomendaciones	49
Bibliografía	50
Anexos	53

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. August Whöler introdujo las curvas S-N (tensión-número de ciclos) que llevan su nombre para describir la relación entre la amplitud de las tensiones cíclicas y el número de ciclos para su rotura. 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. Tradicionalmente se somete el material a tensiones cíclicas máximas relativamente altas y se registra el número de ciclos hasta su rotura, posteriormente se reduce la amplitud de las tensiones máximas y se repite el experimento. Es importante mencionar que el número de ciclos va asociado directamente a la vida del material, es decir se puede garantizar un determinado tiempo de vida útil de una estructura si las tensiones se mantienen en un valor determinado. 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 3048 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]

Desde hace mucho tiempo se ha constatado que los materiales rompen más fácilmente bajo la acción de cargas variables que bajo la acción de cargas constantes, es bien conocido que la aplicación de una fuerza repetidas veces conduce a la rotura del componente con más facilidad que con una única carga estática (a igualdad de valores). Un ejemplo de ello se tiene en un alambre: flexionándolo repetidamente se rompe con facilidad, pero la fuerza que hay que hacer para romperlo en una sola flexión es muy grande. 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 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.

Se establece entonces como **problema de investigación:** el crecimiento de grietas 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 elementos de acero CT3 solicitados 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 de acero CT3 solicitadas por cargas variables de torsión simétrica.

Tareas de Investigación

1. Caracterizar el material.
2. Definir el tipo de probetas.
3. Realizar ensayos a torsión cíclica simétrica para evaluar el crecimiento de grietas en la máquina construida en la Universidad de Holguín.
4. Simular el comportamiento de la probeta para obtener el Factor de Intensidad de Tensiones (SIF, por las siglas en inglés de *Stress Intensity Factor*).
5. Obtener la ecuación de la función de forma que relacione el diámetro de la probeta y el tamaño de la grieta.
6. Redacción del informe final.

• Métodos de Investigación empleados

Método empírico:

-Entrevista: a profesionales que se desempeñan en laboratorios de ensayos a materiales para conocer sus experiencias en el tema.

Los métodos teóricos empleados fueron:

- **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.

- **Consulta a expertos:** para la selección de los materiales con lo que se construirán las probetas y los procedimientos para realizar los ensayos.

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 I. 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 los diferentes modos de fallos, además se explican los tipos de ensayos a fatiga y fractura. También se indica como determinar el factor de intensidad de tensiones para las diferentes modos de apertura de la grieta y centrándonos más en este trabajo en el modo de fallo tres, donde para la realización de estos ensayos se hizo uso de la máquina torsional a fatiga construida en la Universidad de Holguín y de líquidos penetrantes, en cual nos apoyamos en el método de elementos finitos FEM para modelar y realizar los diferentes análisis para determinar el factor de intensidad de tensiones.

1.2 Generalidades sobre la fatiga y la fractura mecánica

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 sollicitaciones, y que en la práctica totalidad de los casos su efecto es más perjudicial que el de las sollicitaciones 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. A mediados de la década de 1800, A. Wöhler propuso un método por el cual, las fallas de los

componentes sometidos a cargas repetidas pudieron ser mitigadas, y eliminadas en algunos casos. Wöhler introdujo la curva S-N (tensión- número de ciclos, llamada curvas de Wöhler), lo cual representa una de las características básicas de fatiga (ver Figura 1.1). Estas curvas dan la relación entre la amplitud de las tensiones cíclicas y un número de ciclos para su rotura. [4]

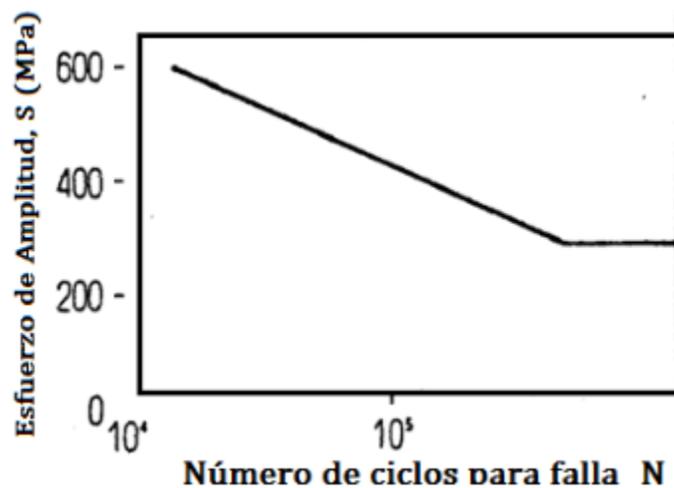


Figura 1.1 Ejemplo de curvas de S-N para un acero. **Fuente:** [4]

Sin lugar a dudas, las fallas anteriores ocasionadas por cargas cíclicas estimuló 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 análoga 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 subsuperficial, 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 1.2).

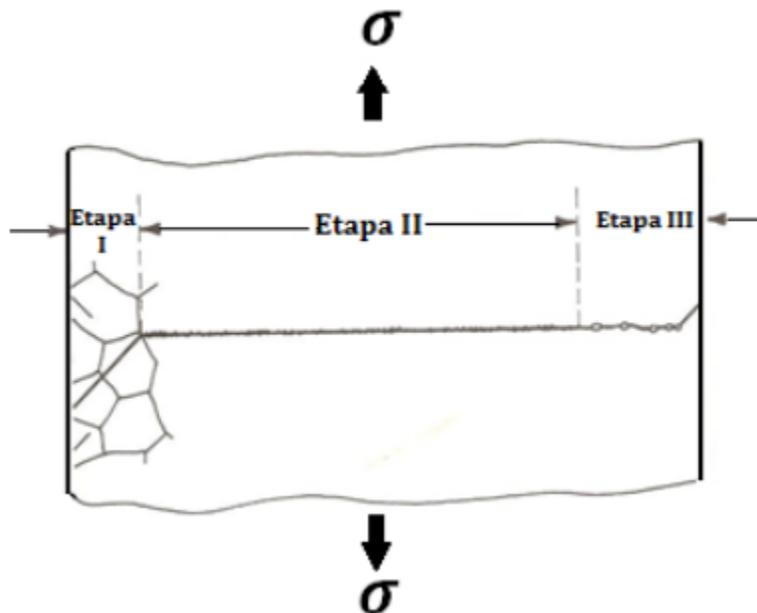


Figura 1.2 Las tres etapas de la propagación de grietas. **Fuente:** [3]

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 1.2). 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 1.3.

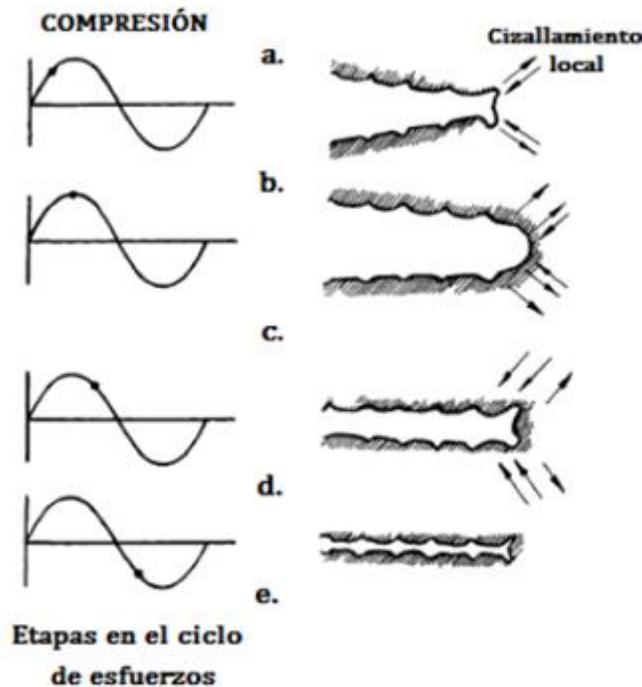


Figura 1.3 Ilustración esquemática de los mecanismos de propagación de las fisuras (Etapa II). **Fuente:** [3]

- a. Carga cero.
- b. Carga de tracción pequeña.
- c. Carga de tracción máxima.
- d. Carga compresiva pequeña.
- e. 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 1.4.

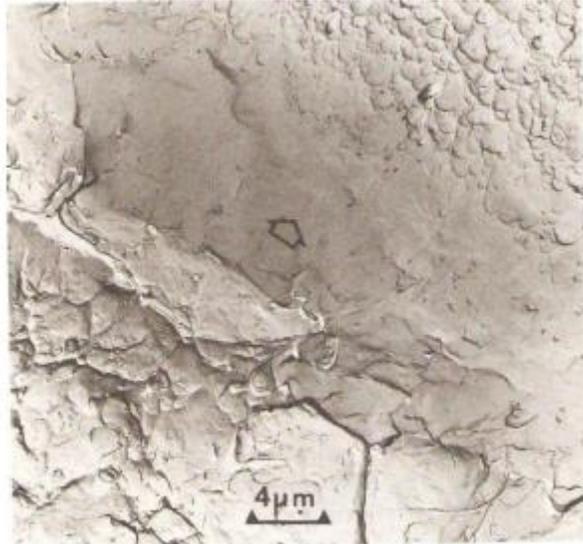


Figura 1.4 Zona extendida justo antes de la fractura final en acero de alta resistencia fatigado. **Fuente:** [3]

1.2.4 Fractura mecánica

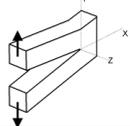
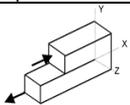
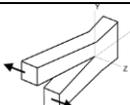
Los conceptos de Mecánica de Fractura, establecidos antes de la década de 1960, son solamente aplicables a materiales que cumplen la Ley de Hooke. A pesar de las correcciones introducidas a principios de 1948, incluyendo la plasticidad a pequeña escala, estos análisis están restringidos a estructuras en las que el comportamiento es elástico lineal. [4]

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. [5]

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, siglás 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.

1.2.5 Según el tipo de fractura

Otra posible clasificación corresponde al tipo de fractura, que puede presentar tres órdenes de magnitud diferentes: nivel atómico, nivel microscópico y nivel macroscópico.

[2]

1. A nivel atómico, el comportamiento del material se puede analizar mediante la teoría de dislocaciones para todos aquellos fenómenos de deformación. Desde el punto de vista del análisis de los fallos que se producen en servicio, apenas aporta algo a efectos prácticos, aunque es necesario conocer la existencia de los planos de deslizamiento y el papel que juegan en el desarrollo de la deformación plástica, como consecuencia del deslizamiento de una parte del cristal sobre otra antes de alcanzar la fractura. Los planos de deslizamiento son los de mayor densidad atómica, existiendo direcciones preferenciales de deslizamiento., que son las más compactas del plano. Si la fractura se produce a través de las fronteras de grano, la influencia que ejercen los distintos tipos de partículas precipitadas sobre ellas tiene una gran trascendencia en el proceso de fractura.

2. A nivel microscópico, las fracturas se pueden clasificar en dos grandes grupos: transcrystalinas e intercrystalinas. La fractura intercrystalina consiste básicamente en la descohesión entre granos a través de sus bordes; previamente a la fractura, además, los granos pueden experimentar microdeformación plástica en sus superficies. Las fracturas transcrystalinas, por su parte, se pueden dividir en una serie de grupos que dependen de los distintos mecanismos de fractura o del aspecto morfológico que presenta la propia superficie de rotura que, a su vez, también depende del tipo de esfuerzos experimentados o de las características intrínsecas del material.

3. Finalmente, a nivel macroscópico se pueden distinguir los siguientes grupos de fracturas

Dúctil por carga estática: este tipo de fractura implica deformación plástica por deslizamiento, produciéndose gran absorción de energía y elevado alargamiento. En función del tipo de carga puede ser de tracción, de flexión, de cizalladura o de torsión.

Frágil por carga estática: se produce por el crecimiento de grietas en planos normales a la dirección de la carga, caracterizándose por presentar escasa deformación plástica.

Frágil por carga estática mantenida: se distingue entre corrosión-tensión, fragilización por hidrógeno, fragilización por metal líquido y fragilización por irradiación neutrónica.

Fatiga: se dividen: en alto y bajo número de ciclos cuando sólo se tiene en cuenta el efecto mecánico; y en fatiga-corrosión y fatiga-temperatura, cuando se combinan los esfuerzos mecánicos que tienen lugar por fatiga con la corrosión o temperatura.

1.2.6 Mecanismos de fractura

En los materiales ingenieriles se estudian básicamente dos tipos de fractura: frágil y dúctil. Esta clasificación está basada en la capacidad del material para experimentar deformación plástica, como se puede apreciar en la Fig.1.5

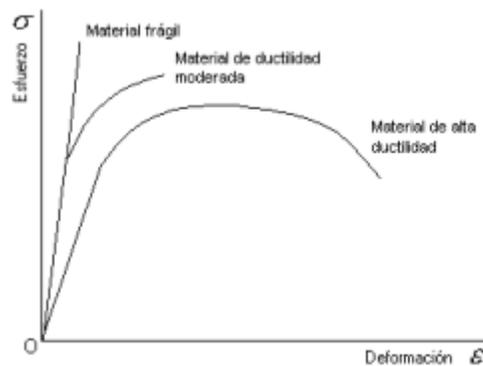


Figura 1.5 Diagrama Esfuerzo- Deformación Para materiales dúctiles y frágiles.

Fuente: [2]

Fractura frágil: la fractura frágil ocurre sin apreciable deformación plástica, y por propagación rápida de una grieta o fisura. La dirección del movimiento de la grieta es casi perpendicular a la dirección de la tensión aplicada y produce una superficie de fractura relativamente plana. [4]

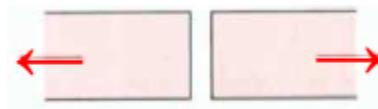


Figura 1.6 Esquema de fractura frágiles sin ninguna deformación plástica.

Fuente: [2]

Fractura dúctil: las superficies de fracturas dúctiles tienen sus propios rasgos tanto a nivel macroscópico como microscópico. La Fig. 1.7 muestra esquemáticamente dos perfiles macroscópicos característicos de esta fractura. [4]

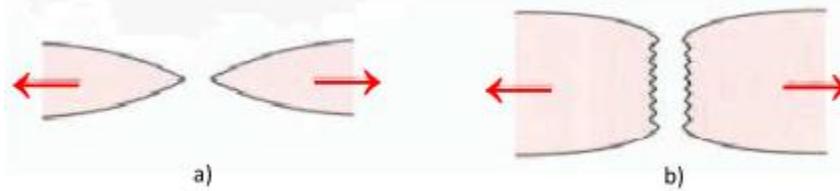


Figura 1.7 Esquema de una fractura muy dúctil a) y una moderadamente muy dúctil después de una estricción b). **Fuente:** [2]

La configuración mostrada en la Fig.1.7a se encuentra en metales muy blandos, tales como oro y plomo a temperatura ambiente, y en otros metales, polímeros y vidrios inorgánicos a temperaturas elevadas. Estos materiales son muy dúctiles y se rompen cuando la estricción se reduce prácticamente a un punto, presentando un reducción de área virtualmente igual al 100%.

Sin embargo, el tipo más común de perfil de fractura a tracción en los materiales dúctiles es el representado en la Fig.1.7b, en la cual la fractura es precedida por sólo una cantidad moderada de estricción.

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 sollicitaciones exteriores y de la geometría de la grieta [5]. El subíndice se refiere al modo de apertura de la grieta. Una expresión comúnmente utilizada para determinar el SIF es la ecuación 1.1:

$$K_{III} = Y\tau\sqrt{\pi a} \quad 1.1$$

Donde:

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

τ : es la tensión nominal debida a las cargas externas.

a: es la longitud de la grieta.

Otra manera de determinar el SIF es el método del CTOD (siglas en inglés de *Crack Tip Opening Displacement*) utilizando la técnica del desplazamiento de cuatro puntos [5]. La expresión de cálculo es 1.2:

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

Donde:

E: es el Módulo Young.

L: es la longitud de los elementos singulares (1-3 o 1-5 en la Figura 1.8).

μ : es el cociente de Poisson.

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

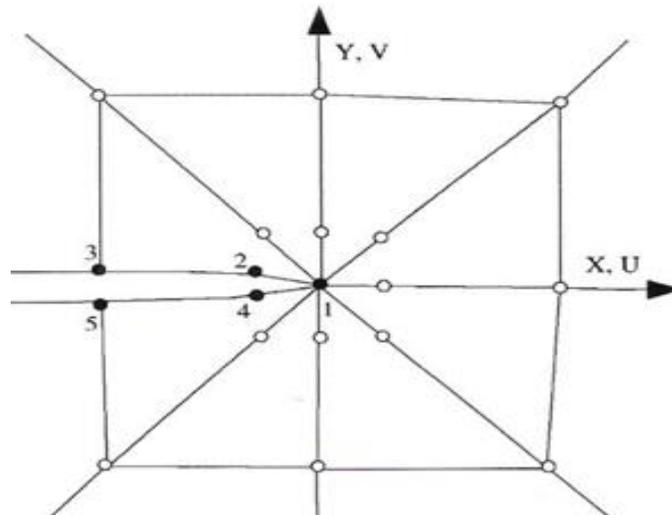


Figura 1.8 Elementos de cuatro puntos para desarrollar los cálculos del factor de intensidad de tensiones. **Fuente:** [4]

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

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad 1.3$$

Donde 'C' y 'm' son constantes a determinar experimentalmente para cada material y condiciones de carga. ΔK 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. [5]

La evolución típica de la velocidad de crecimiento frente a la variación del SIF tiene la forma mostrada en la figura 1.9. 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 cuasilíneo.

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.

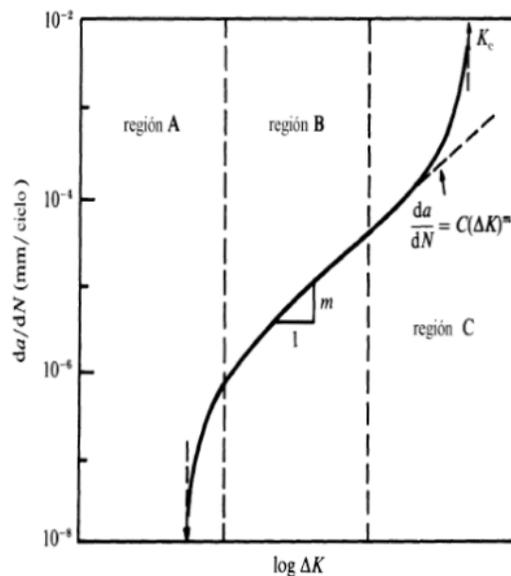


Figura 1.9 Ley de crecimiento. Fuente: [5]

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. [8]. 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. [11].

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.

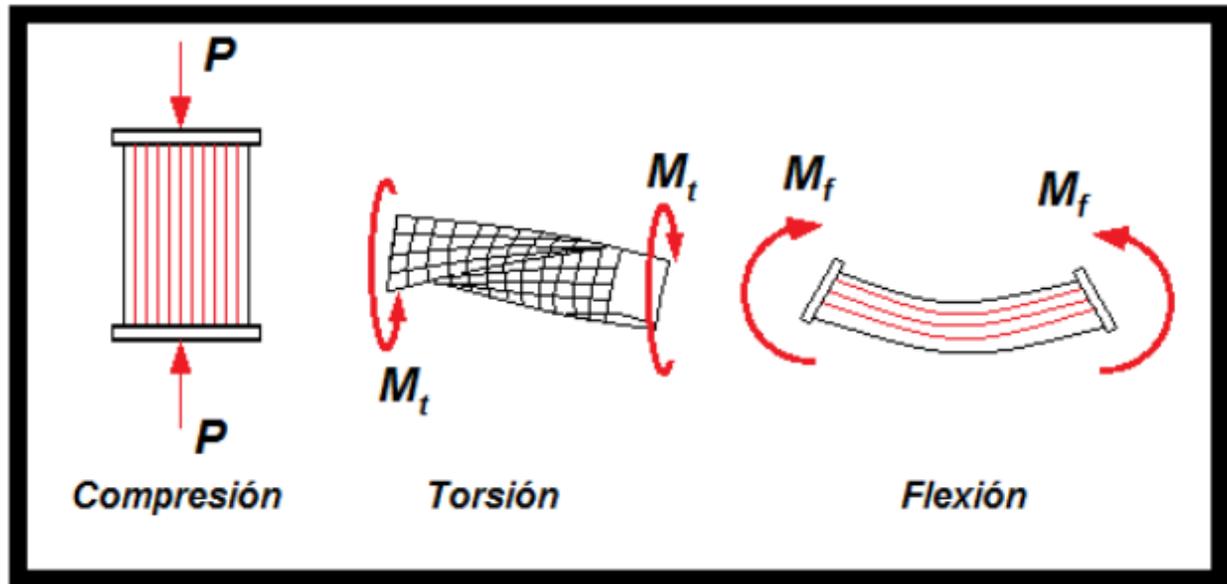


Figura 1.10 Tipos de esfuerzo a compresión, torsión y flexión. **Fuente:** [8]

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. [6]

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

El método de los elementos finitos (MEF o FEM, siglas en inglés de *Finite Elements Method*) es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy utilizado en diversos problemas de ingeniería y física. [20]

El MEF está pensado para ser usado en computadoras y permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema físico sobre geometrías complicadas. El MEF 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. [20]

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”. [20]

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. [9]

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 de 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). [20]

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. [9]

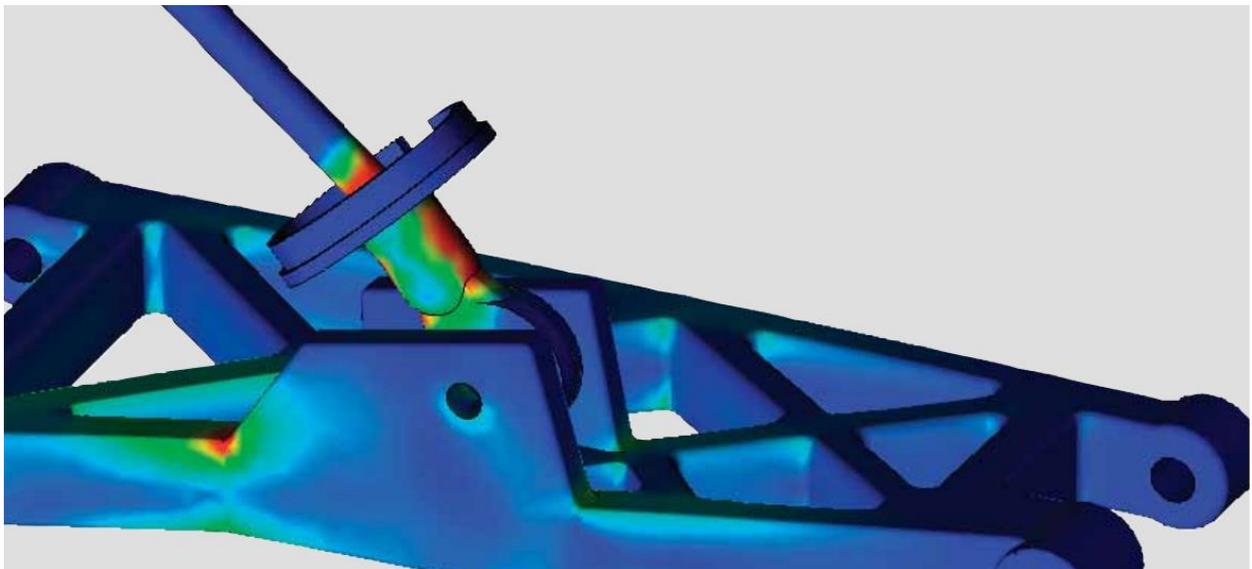


Figura 1.11. Ejemplos de análisis por el método de elementos finitos. **Fuente:** [9]

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. [20]

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. [9]

1.6 Ensayos de líquidos penetrantes

La inspección por líquidos penetrantes es un procedimiento de inspección no destructivo de tipo físico - químico, diseñado para detectar y exponer discontinuidades en la superficie de los materiales. Mediante los líquidos penetrantes se pueden localizar discontinuidades superficiales, incluso en piezas de geometría complicada. Aunque con este ensayo sólo se detectan discontinuidades superficiales; es un método efectivo, confiable y fácil de realizar; que puede efectuarse a varios materiales y de costo relativamente bajo. Consiste en aplicar un líquido penetrante de un color determinado sobre la superficie de la pieza a inspeccionar. Después de un tiempo apropiado, que el líquido emplea para introducirse en las discontinuidades, se limpia la superficie para eliminar el exceso de líquido, procediendo luego a aplicar una sustancia reveladora, que absorbe el líquido penetrante que se introdujo en las discontinuidades, extrayéndolo hasta la superficie, mostrando una indicación de la discontinuidad. [10]

La superficie a ensayar debe encontrarse seca y libre de cualquier elemento que pueda considerarse contaminante, o sea, que no pueden haber grasas, óxidos, polvos, pinturas, ya que esto puede dificultar la entrada del líquido en la discontinuidad o alterar el resultado.

Aplicación del penetrante

Con la superficie de las probetas listas para la aplicación del penetrante TURCO DY – CHECK, se procede entonces a atomizar el mismo sobre la superficie.

Remoción del exceso de penetrante

El penetrante excedente se retira después de cumplido el tiempo de aplicación. Para ello, se utiliza un fieltro, humedecido con nafta.

Aplicación del revelador

La apariencia de las probetas después de aplicado el revelador, para lo que se utilizó polvo de tiza, que fue rociado sobre las superficies donde había sido aplicada la sustancia penetrante.

Inspección

Este tiempo se escoge de forma empírica, observando cada 5 minutos la apariencia de las probetas. En este trabajo se realizó la inspección mediante un líquido penetrante, fue necesario sustituir el limpiador y el revelador pues no se contaba con estas sustancias. La sustitución realizada con nafta y polvo de tiza respectivamente fue posible, debido a que los resultados obtenidos concuerdan con los que plantean la bibliografía.

Capítulo 2. Evaluación del crecimiento de grietas ante la acción de cargas cíclicas

2.1 Introducción al capítulo

En este capítulo se describe las características de la máquina torsional a fatiga construida en la Universidad de Holguín Cede Oscar Lucero moya, además se hace una caracterización del material de las probetas utilizadas en los ensayos de crecimientos de grietas 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.

2.2 Características 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 arboles 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 $n = 1725$ rpm el cual transmite su torque a una transmisión flexible por correa y polea con una relación de transmisión de 2,33:1, de la polea 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 transmite 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. [11]

El conteo de ciclos lo realiza un micro-interruptor de contacto ubicado en la máquina que conectado a un circuito electrónico se puede visualizar en el indicador de siete segmentos cada momento torsor que realiza la máquina.

Este procedimiento permite observar los datos de cuantas veces la máquina realiza torsiones de ensayo a fatiga (Ver anexo 1). [12]

2.3 Caracterización de material

El material que presentan 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 por ciento 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. [21]

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



Figura 2.3 Probeta de ensayo 1.



Figura 2.4 Probeta de ensayo 2.



Figura 2.3 Probeta de ensayo 3.



Figura 2.4 Probetas de acero CT3 para los ensayos.

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 2.5 se describen las dimensiones de las probetas para los ensayos.

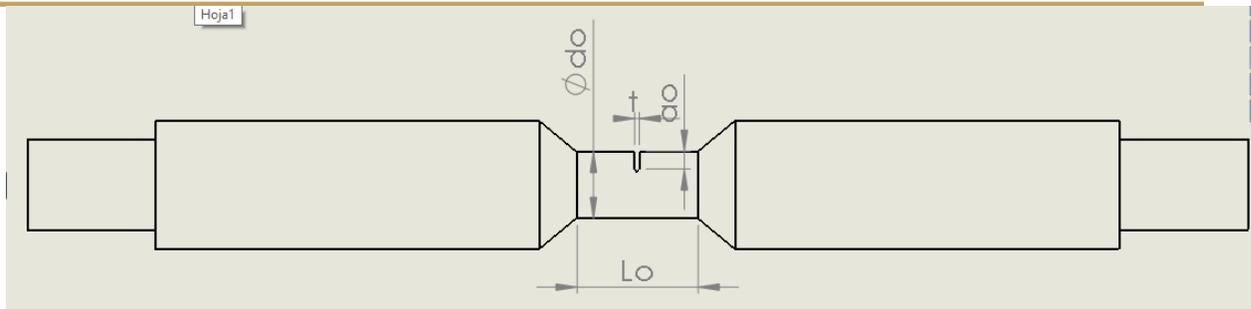


Figura 2.5 Dimensiones de la probeta para el ensayo.

Donde:

d_0 : diámetro inicial de la superficie de ensayo.

L_0 : longitud de la superficie de ensayo.

a_0 : profundidad de la grieta.

t_0 : ancho de la grieta.

2.5 Resultados del ensayo de crecimientos de grietas

Los ensayos se realizaron en una máquina torsional a fatiga la cual fue diseñada y construida en la Universidad de Holguín “Sede Oscar Lucero Moya”, para que esto fuera posible se siguieron los siguientes pasos:

- 1- Verificar que las probetas estuvieran bien fabricadas, para que no dificultaran o alteraran los resultados.
- 2- Tomar las dimensiones de cada probeta.
Proceder a un control y revisión de la máquina de ensayos a fatiga.
- 3- Hacer uso del manual de la máquina para facilitar su manejo.
- 4- Colocar la probeta en los cubos de sujeción de la máquina y ajustar cada extremo lo mejor posible.
- 5- Se procede al desarrollo del ensayo y cada 150 ciclos se detiene la máquina para una inspección de la grieta en la probeta.
- 6- En la inspección se hace uso del métodos de líquidos penetrantes para revelar el crecimiento de la grieta, para ello se utiliza el polvo de tiza como revelador y la gasolina como disolvente y limpiador. [10]

7- Una vez que se realiza el procedimientos se continua con el ensayo, así sucesivamente hasta que se fractura por completa la probeta.

Tabla 2.1 Dimensiones de la probeta 1

Probeta 1	Dimensiones (mm)
Do	10,43
Lo	28,6
Ao	3,1
To	0,74

Tabla 2.2 Resultado del ensayo con la probeta 1

Medición	N	a (mm)
1	150	4,42
2	300	4,45
3	430	7,2
4	460	10,3

Gráfico a vs N

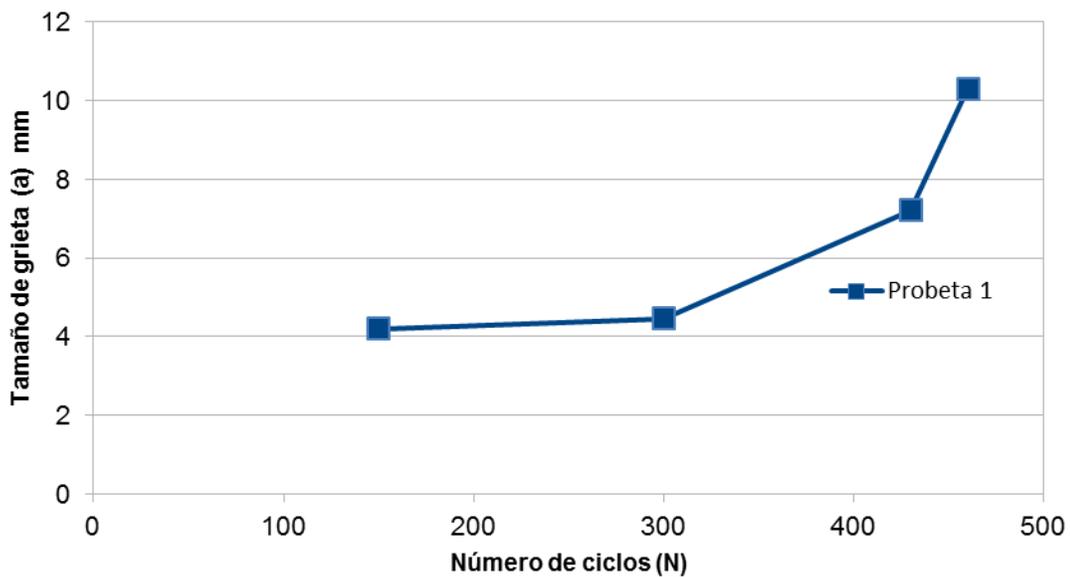


Figura 2.6 Gráfico a vs N de la probeta 1.

Tabla 2.3 Dimensiones de la probeta 2.

Probeta 2	Dimensiones
Do	10,23
Lo	23,81
Ao	1,92
To	0,82

Durante el ensayo a torsión cíclica de la probeta dos no se pudieron realizar ninguna medición para el crecimiento de grieta ya que esta fracturó a muy bajos ciclos.

Tabla 2.4 Dimensiones de la probeta 3.

Probeta 3	Dimensiones
Do	10,46
Lo	24,39
Ao	2,3
To	0,64

Tabla 2.5 Resultado del ensayo 3

Med	N	A
1	150	3,1
2	300	4,7
3	450	7,1
4	490	10,3

Gráfico a vs N

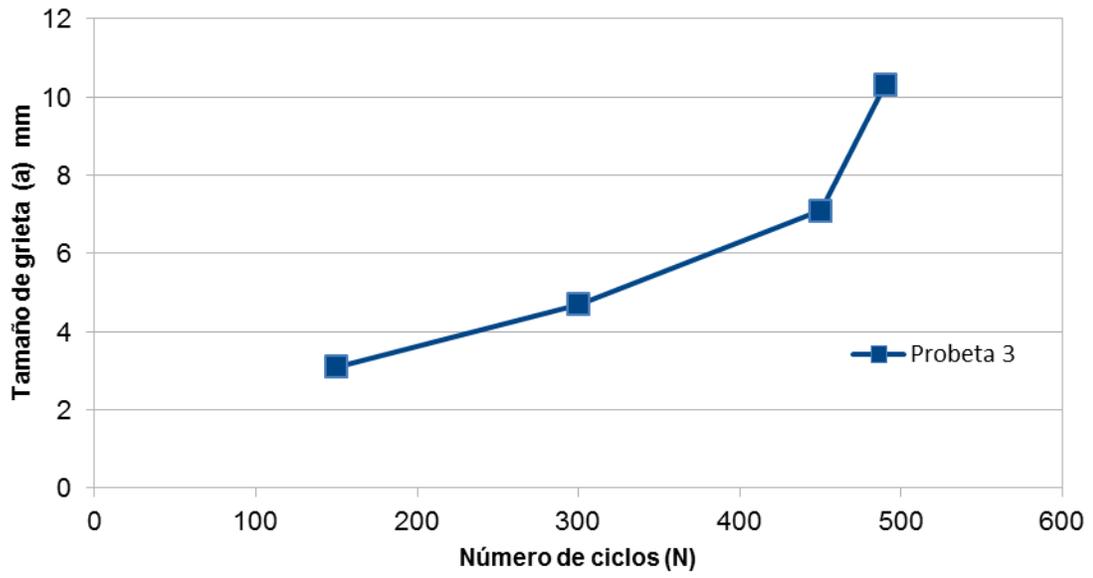


Figura 2.7 Gráfico a vs N de la probeta 3.



Figura 2.8 Sección transversal de la rotura de la probeta 1.



Figura 2.9 Sección transversal de la rotura de la probeta 2.

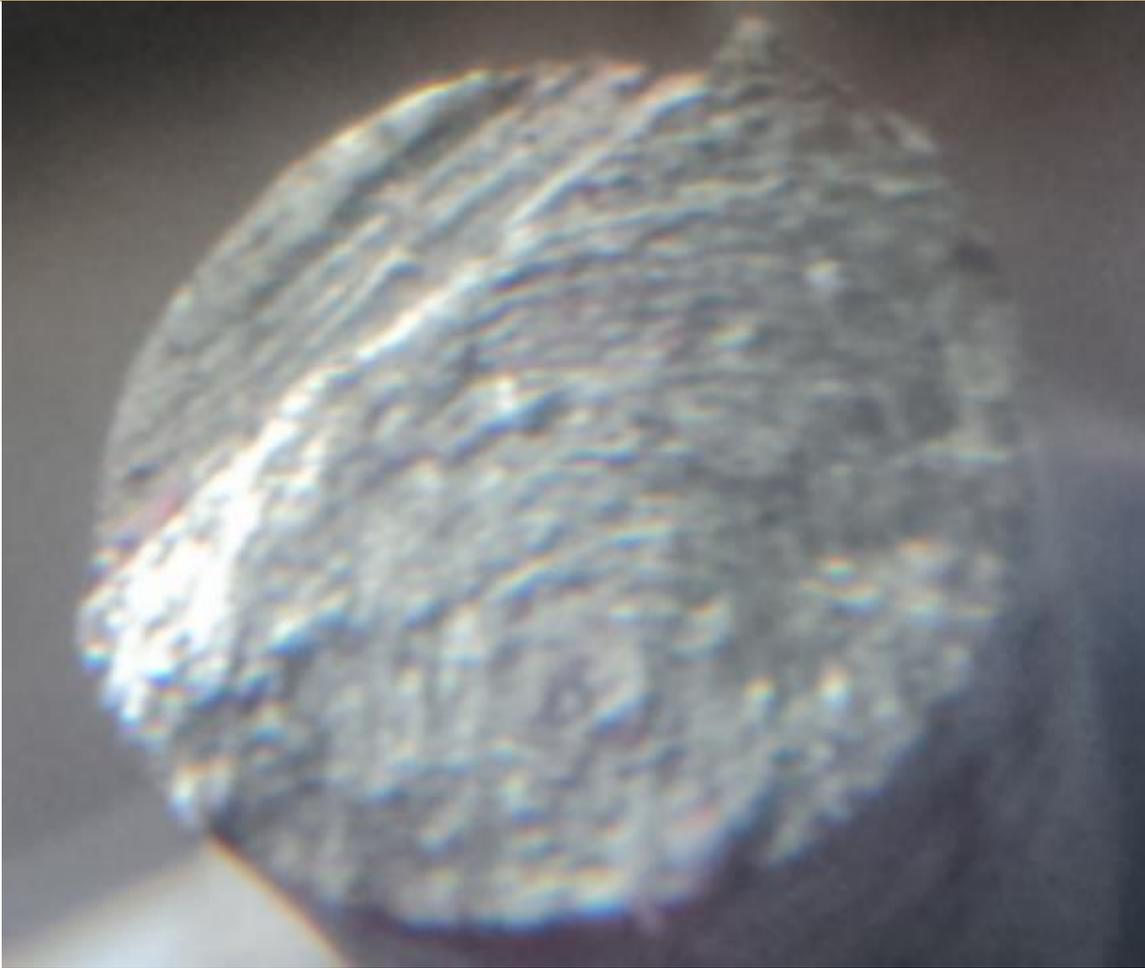


Figura 2.10 Sección transversal de la rotura de la probeta 3.

2.6 Evaluación de Factor de intensidad de tensiones mediante el MEF

Para determinar el SIF se utilizó la simulación numérica. El software utilizado fue el complemento Simulation del SolidWorks 2013.

2.6.1 Modelo geométrico

Atendiendo a que las dimensiones de cada probeta ensayada son diferentes, se elaboró un modelo geométrico para cada una por separado, con las dimensiones expuestas en las tablas 2.1, 2.3 y 2.5. Los modelos así obtenidos se muestran en la figura 2.11.

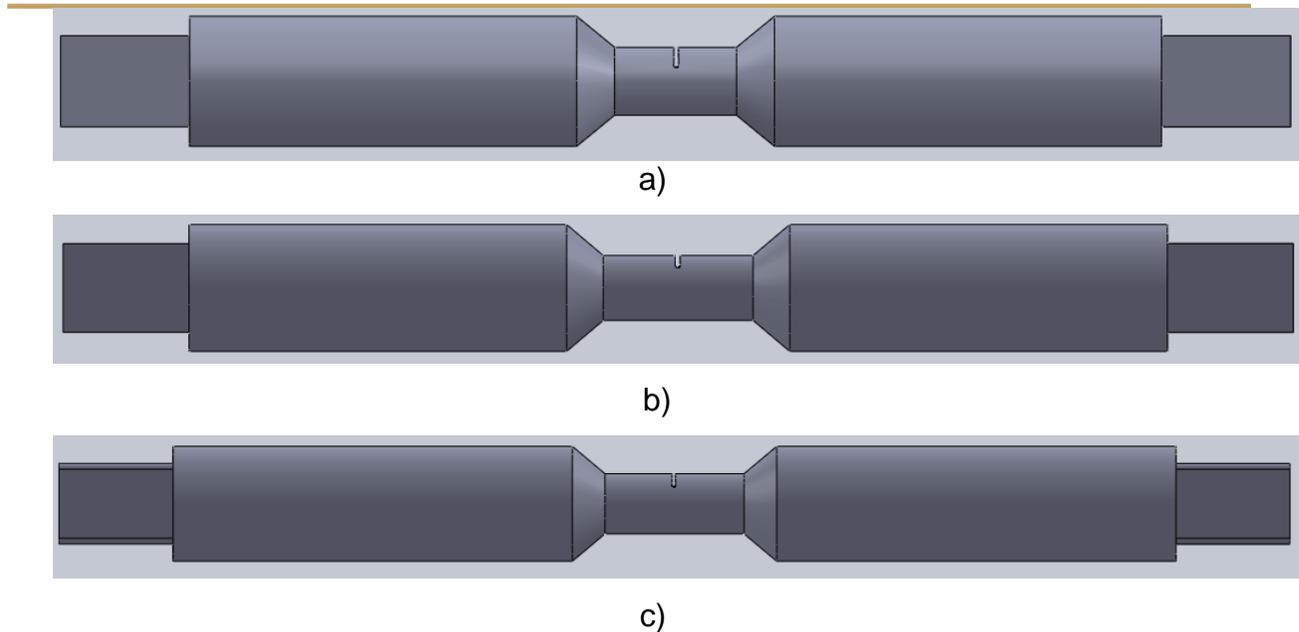


Figura 2.11 Modelo geométrico de las probetas ensayadas, a) probeta uno, b) probeta dos, c) probeta 3.

2.6.2 Simulación numérica

El método a utilizar 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 del material estudiado necesarias para resolver esa ecuación son: el Módulo de Young E y el coeficiente de Poisson con valores de 200 GPa y 0,29, respectivamente. Los desplazamientos V1 a V5 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 transversales y de tensión nominal en las probetas se realizó el cálculo de estos parámetros mediante el método de los elementos finitos. En las figuras 2.14, 2.15, 2.16, 2.17, se muestran los resultados para la probeta uno y en las figuras 2.20, 2.21, 2.22, 2.23 para la probeta tres.

Consecuentemente, para la obtención de los valores relacionados con el factor de intensidad de tensiones se desarrollaron cuatro estudios a cada probeta que se

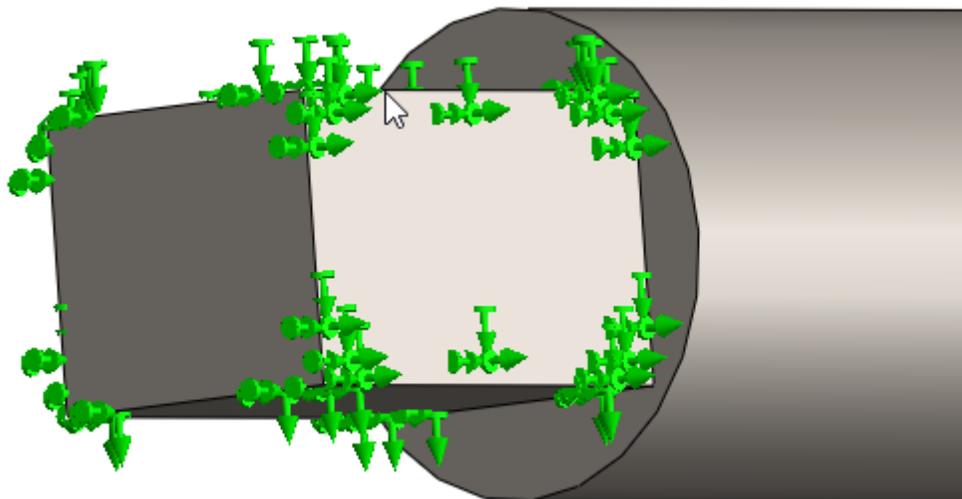
corresponden con el tamaño de la grieta a determinados números de ciclos. Se utilizó el paquete de análisis *SolidWorks Simulation* versión 2013, los desplazamientos que se han de introducir en la técnica del desplazamiento de cuatro puntos.

Por consiguiente se decidió mostrar solamente en este informe dos estudios de cada probeta estudiada, con las amplitudes de grieta mínima y máxima.

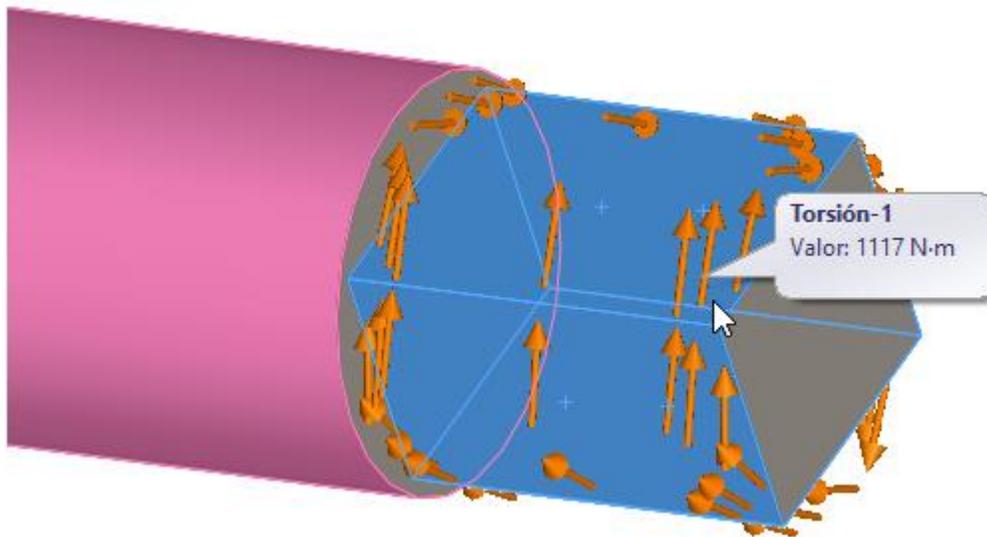
Los tamaños de grieta para las probetas uno y tres, a los números de ciclos a los que se midieron fueron expuestos en las tablas 2.2 y 2.5.

2.6.3 Representación de las restricciones y fuerzas aplicadas en el estudio de la probeta uno

La sujeción de la probeta está dada por la importación en las caras que presenta en uno de los extremos la probeta con el tipo de geometría fija (figura 2.12 a) y con un momento torsional aplicado al otro extremo de la probeta con un valor de 1117 Nm (figura 2.12 b), en dirección al plano YZ. En la figura 2.12 se muestran las restricciones y el momento aplicados a la probeta.



a)



b)

Figura 2.12 Representación de la sujeción y momento torsor aplicada a la probeta 1, a) sujeción fija, b) momento torsor.

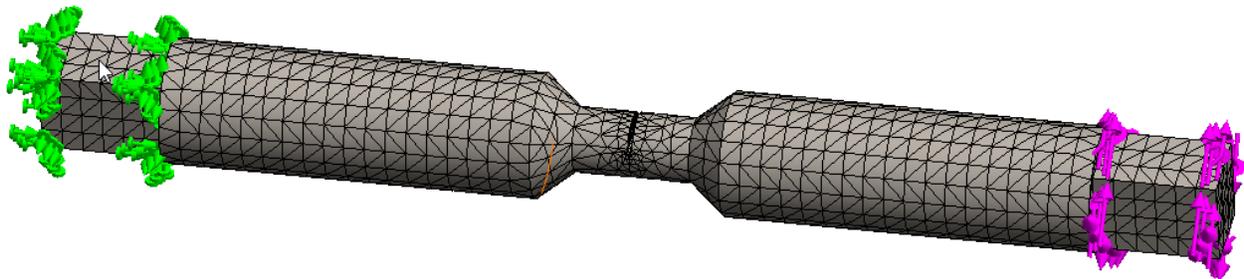


Figura 2.13 Representación de las sujeciones y momento torsor en el modelo de la probeta 1.

El primer y segundo estudio seleccionado se realizó con un tamaño de grieta de 3,1 mm y 7,2 mm respectivamente en la región delimitada que se va a analizar y 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 tamaño de la grieta y correspondientemente el otro con el mayor tamaño de grieta

2.6.4 Valores de tensiones y desplazamientos en la probeta uno

En las figuras 2.14, 2.15 , 2.16, 2.17 se muestran los valores de desplazamientos y tensiones nominales respectivamente obtenidos por el paquete de análisis *SolidWorks Simulation* versión 2013 para la longitud de grieta 3,1mm y 7,2 mm respectivamente.

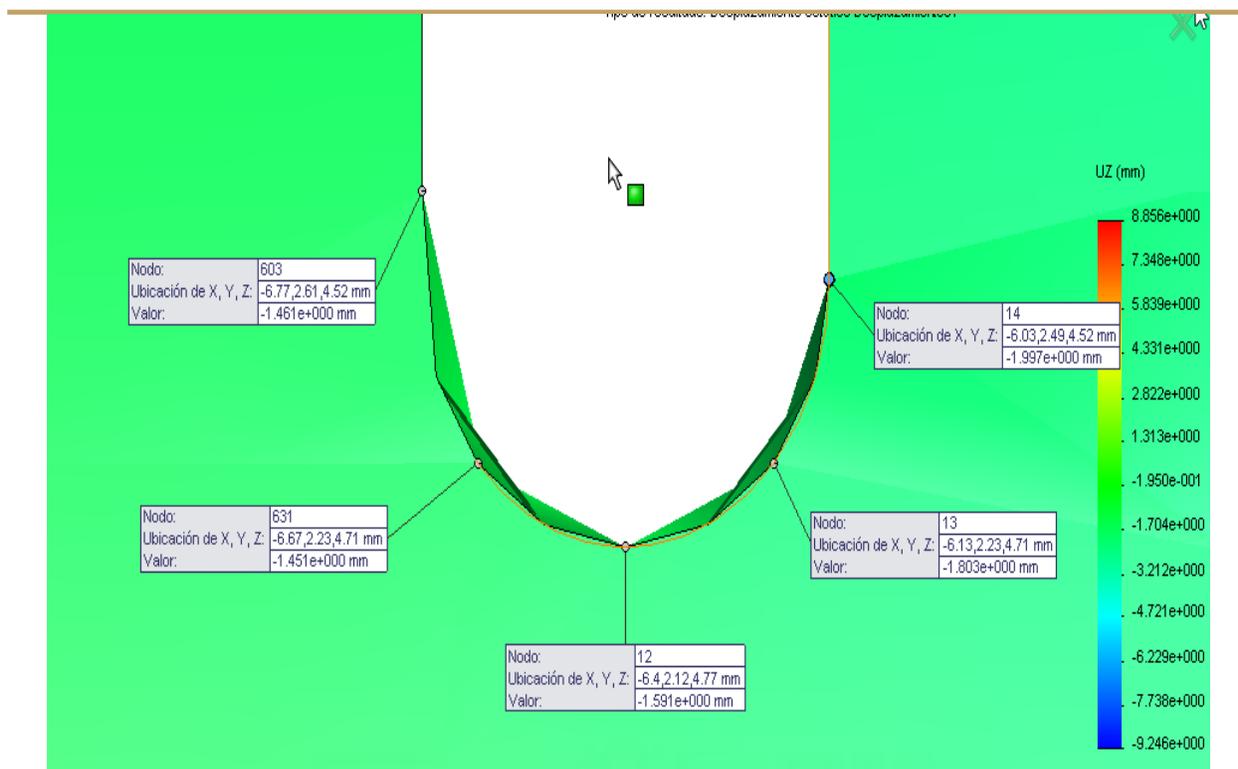


Figura 2.14 Valores de desplazamiento para la longitud de grieta de 3,1 mm.

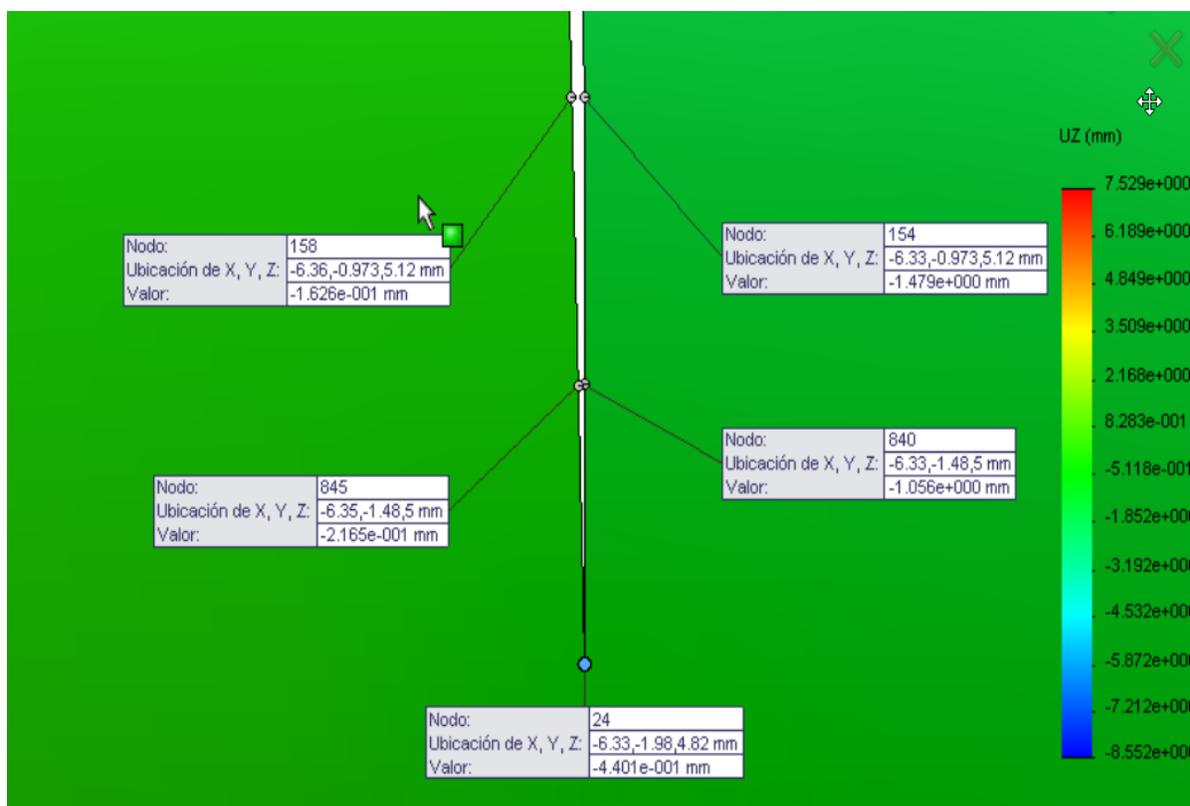


Figura 2.15 Valores de desplazamiento para la longitud de grieta 7,2 mm.

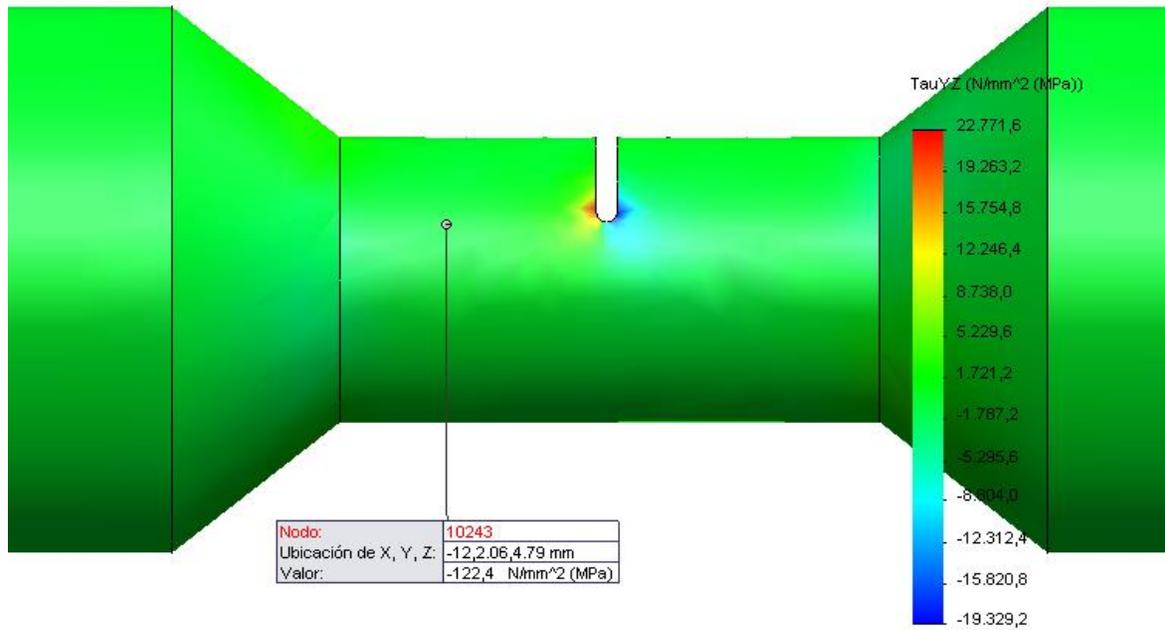


Figura 2.16 Valor de tensión nominal para la grieta 3,1 mm.

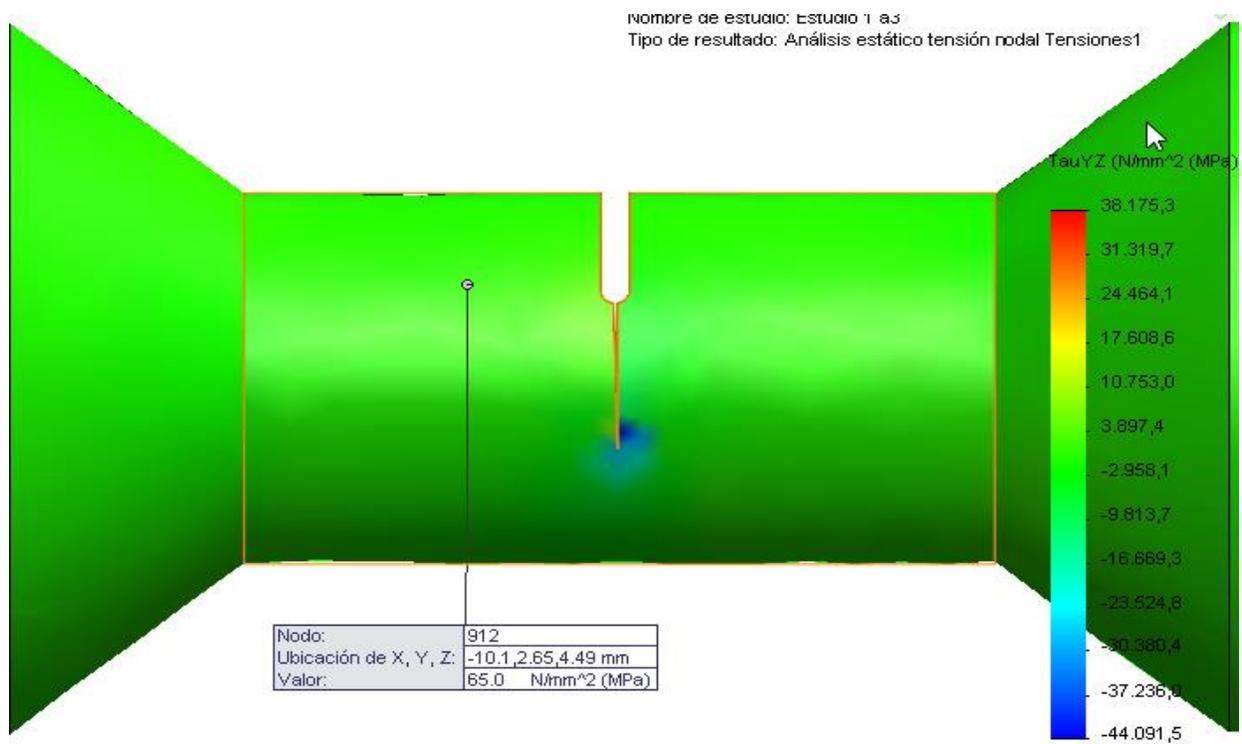
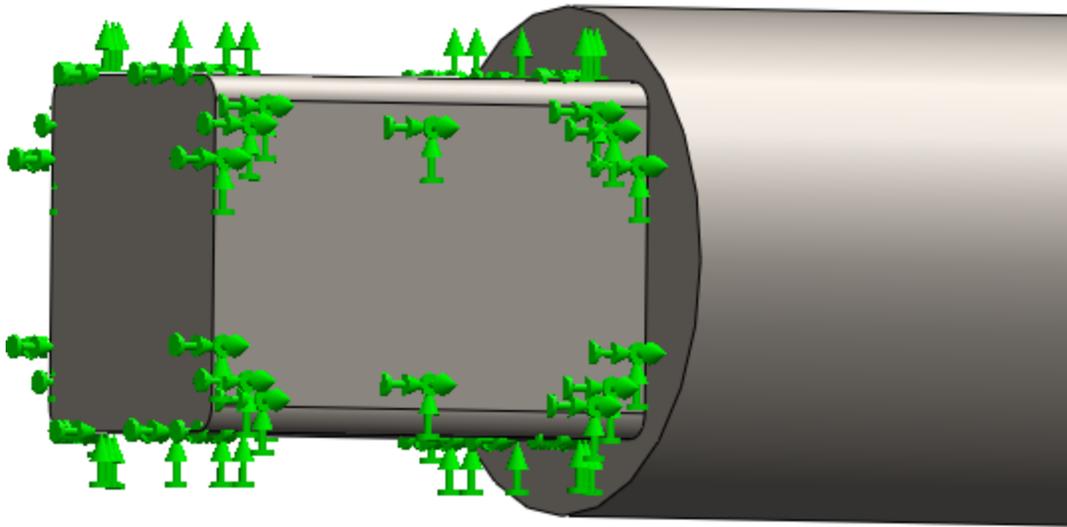


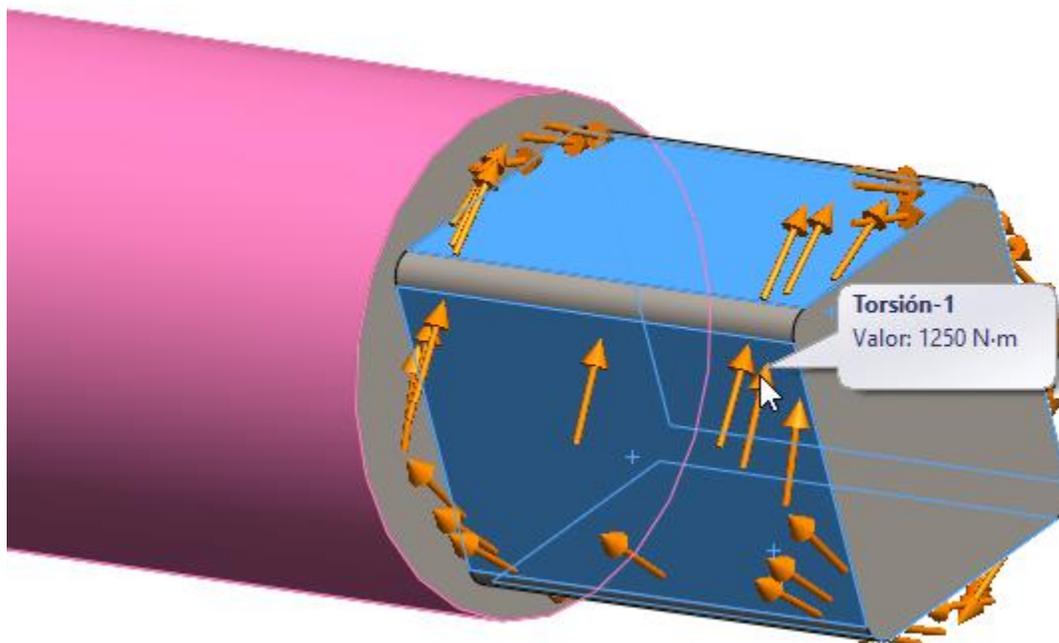
Figura 2.17 Valor de la tensión nominal para la longitud grieta de 7,2 mm.

2.6.5 Representación de las restricciones y fuerzas aplicadas en el estudio de la probeta tres

La sujeción de la probeta tres es la misma que la planteada en la probeta uno, figura 2.18 a), con un momento torsional aplicado al otro extremo de la probeta con un valor de 1250 Nm figura 2.18 b), en dirección al plano YZ. En la figura 2.19 se muestran las restricciones y el momento aplicados a la probeta.



a)



b)

Figura 2.18 Representación de la sujeción y momento torsor aplicada a la probeta 3, a) sujeción, b) momento torsor.

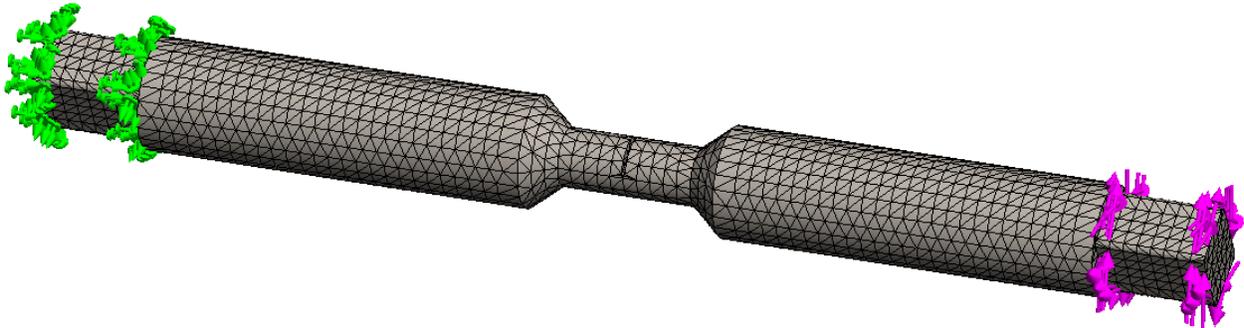


Figura 2.19 Representación de las sujeciones y momento torsor en el modelo de la probeta 3.

En las figuras 2.20, 2.21 2.22, 2.23 se muestran los valores de desplazamiento y tensiones nominales obtenidos por el paquete de análisis *SolidWorks Simulation* versión 2013 para la longitud de grieta 2,3 mm y 7,1 mm respectivamente.

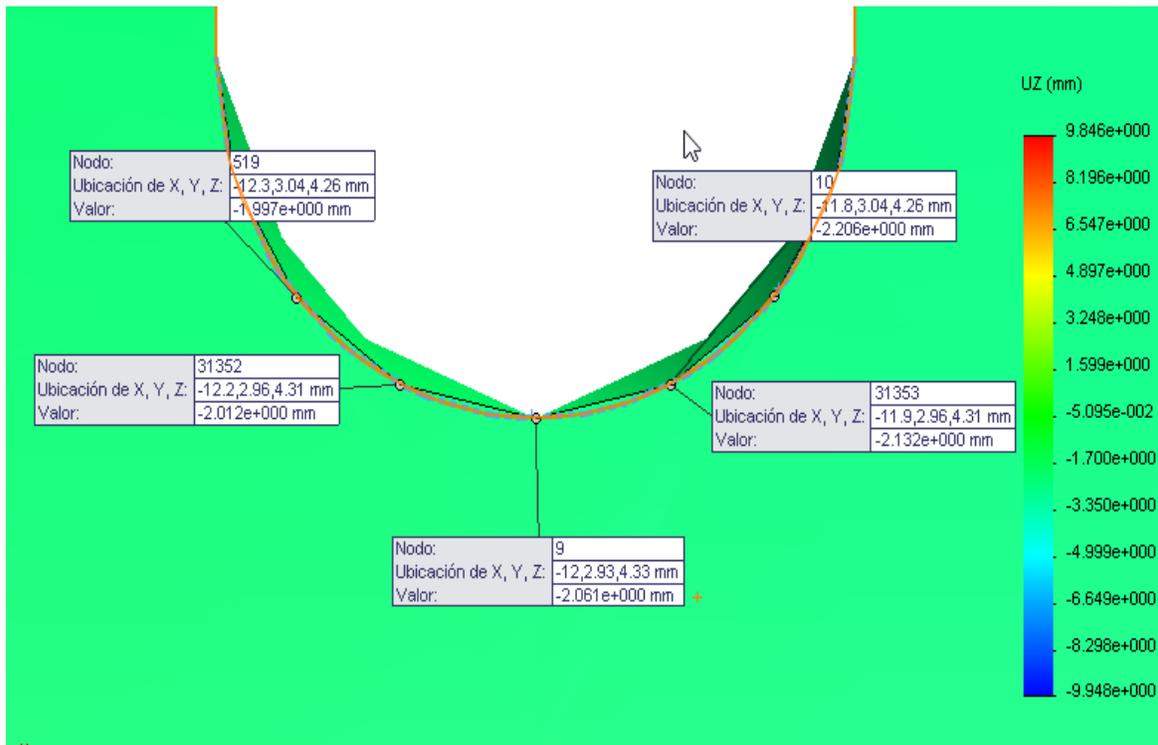


Figura 2.20 valores de desplazamiento para la longitud de grieta 2,3 mm. Autor.

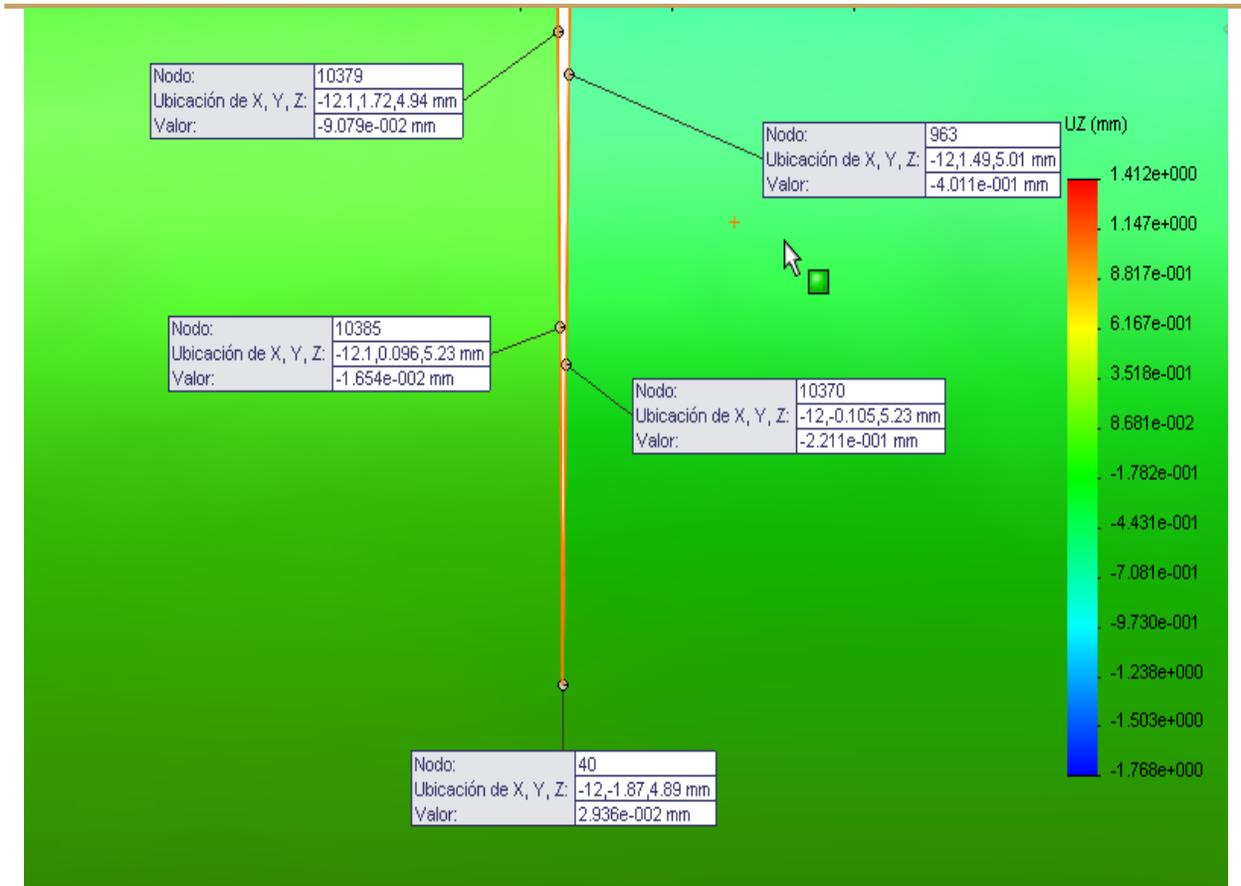


Figura 2.21 Valor de desplazamiento para la longitud de grieta 7,1 mm.

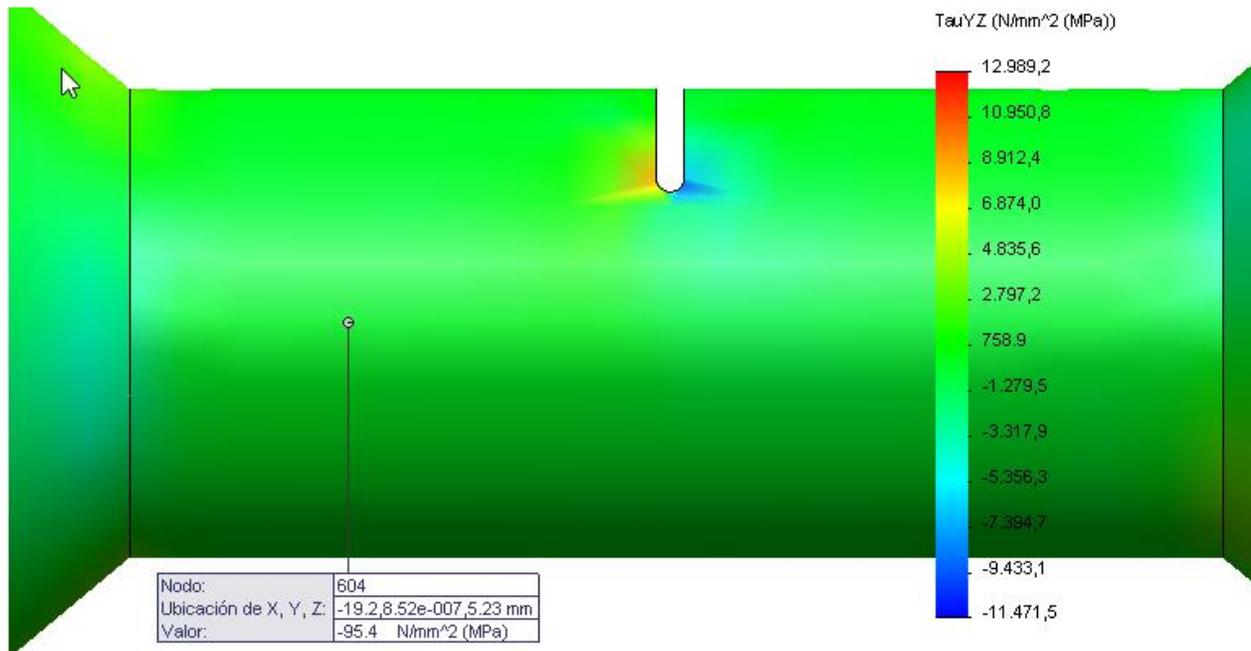


Figura 2.22 Valor de la tensión nominal para la grieta de longitud 2,3 mm.

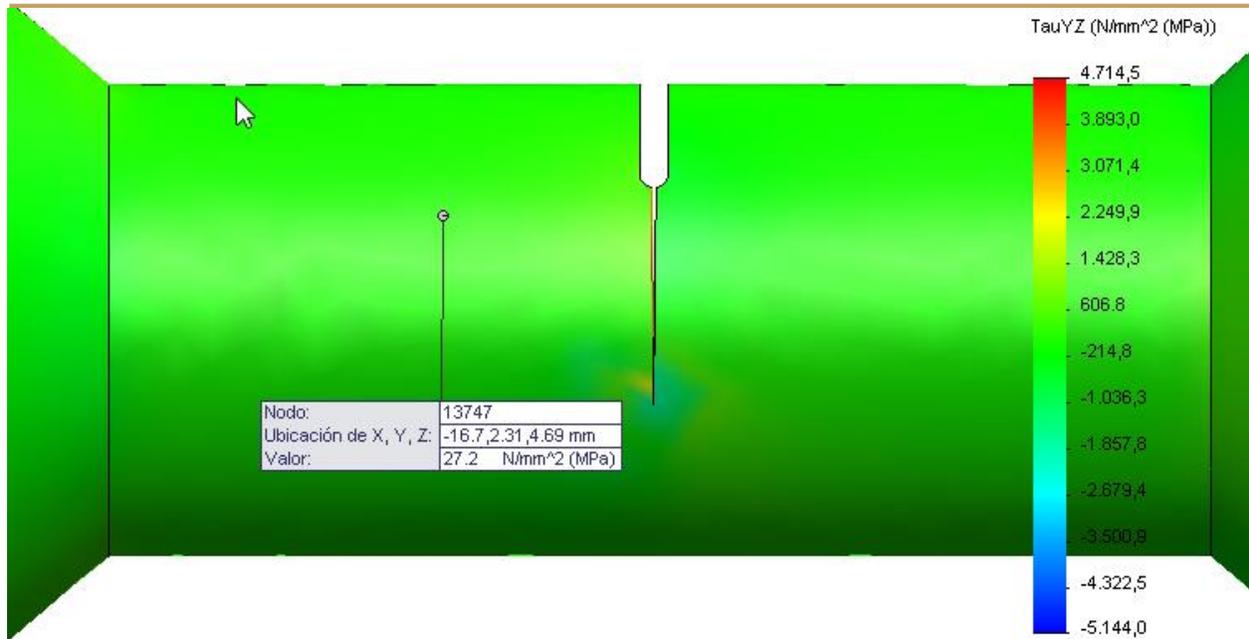


Figura 2.23 Valor de la tensión nominal para la grieta de longitud 7,1 mm.

2.6.6 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 2.7 y 2.9, se exponen los cálculos realizados. Con estos resultados se obtuvieron los gráficos mostrados en las figuras 2.24 y 2.25. En estos gráficos se ploteó 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 2.6 Valores de desplazamientos en la probeta 1.

D	a/d	V1	V2	V3	V4	V5
0,01043	0,297	0,001591	0,001803	0,001997	0,001451	0,001461
0,01043	0,403	0,001234	0,001547	0,001756	0,001227	0,001194
0,01043	0,427	0,001177	0,001811	0,002016	0,001113	0,001192
0,01043	0,690	0,0004401	0,001056	0,001479	0,0002165	0,0001626

Tabla 2.7 Valor del SIF (K_{III}) para la probeta 1.

Dist 1-3 (m)	τ nominal (Pa)	K_{III} ($\text{Pa}\sqrt{\text{m}}$)	$\tau\sqrt{\pi a}$ ($\text{Pa}\sqrt{\text{m}}$)	$K/\tau\sqrt{\pi a}$
0,00049	122400000	2694574630	12076110,8	223,132652
0,00056	63900000	2075401863	7338213,23	282,821144
0,001022	81900000	4210865965	9681189,73	434,953356
0,001007	65000000	4400760089	9773371,99	450,280629

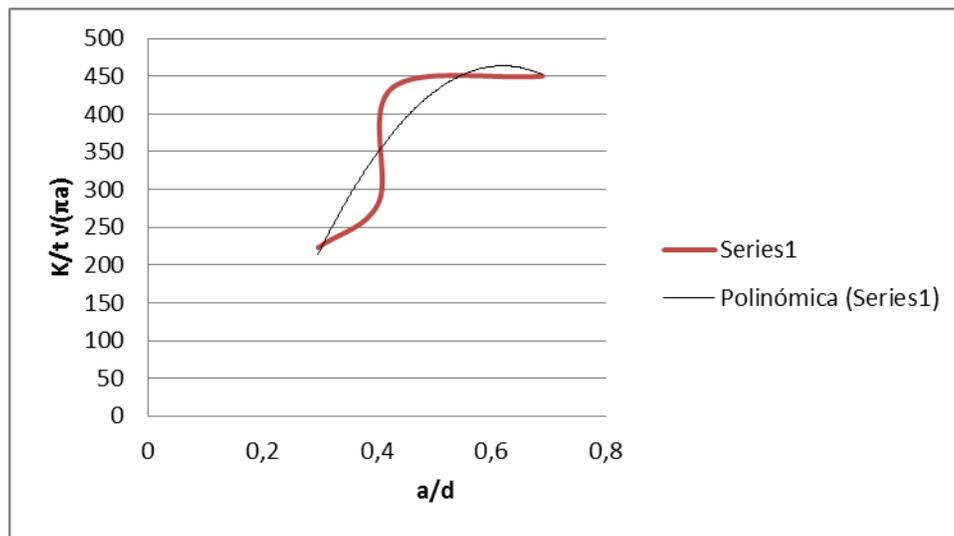


Figura 2.24 Gráfico de la Función de forma para la probeta 1.

Tabla 2.8 Valores del desplazamiento en la probeta 3.

a (mm)	d	a/d	V1	V2	V3	V4	V5
0,0023	0,01046	0,220	0,002061	0,002132	0,002206	0,002012	0,001997
0,0031	0,01046	0,296	0,00177	0,001958	0,002097	0,001764	0,001793
0,0047	0,01046	0,449	0,001095	0,002064	0,002	0,001221	0,001391
0,0071	0,01046	0,679	0,00002936	0,0002211	0,0004011	0,00001654	0,00009079

Tabla 2.9 Valor del SIF para la probeta 3.

Dist 1-3 (m)	τ nominal (Pa)	K_{III} ($\text{Pa}\sqrt{\text{m}}$)	$\tau\sqrt{\pi a}$ ($\text{Pa}\sqrt{\text{m}}$)	$K/\tau\sqrt{\pi a}$
0,00011	95500000	1767440164	8115814,53	217,777299
0,00041	66600000	1594490154	6570824,99	242,662094
0,001846	75500000	3777927866	9171929,43	411,901105
0,00038	27200000	1782312437	4061279,72	438,854883

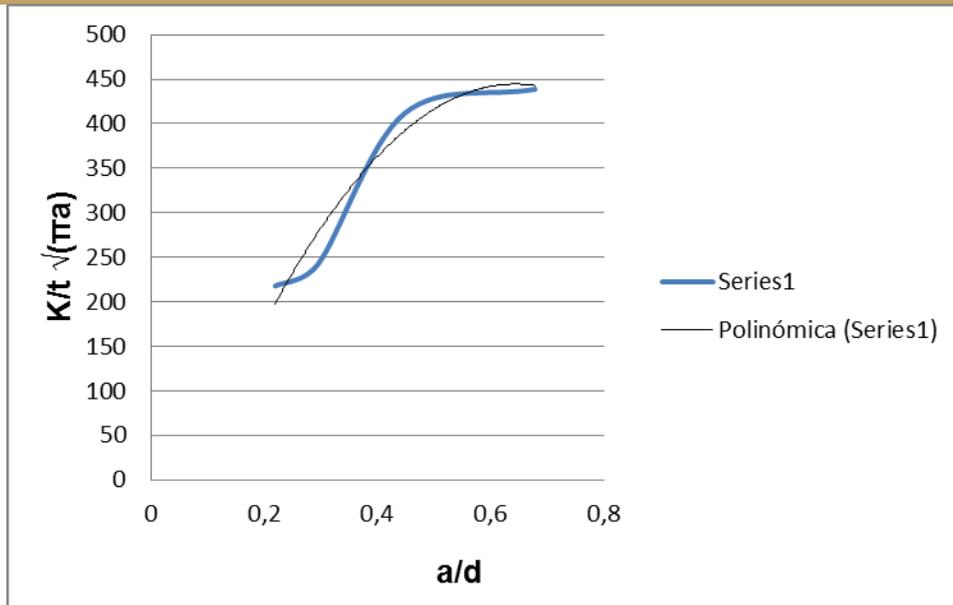


Figura 2.25 Gráfico de la Función de forma para la probeta 3.

La ecuación de ajuste de los gráficos mostrados en las figuras 2.24 y 2.25 se corresponde 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 .

$$y = -2390,2(a/d)^2 + 2964,7(a/d) - 455,73 \quad (2.1)$$

$$R^2 = 0,7786$$

$$y = -1369,4(a/d)^2 + 1764,6(a/d) - 124,02 \quad (2.2)$$

$$R^2 = 0,9466$$

El coeficiente R^2 para la ecuación 2.1 tiene un valor que podría ser mejorado mediante la realización de un mayor número de experimentos. En la ecuación 2.2, el valor de 0,9466 puede considerarse bueno, aunque también sería necesario realizar más corridas experimentales para mejorar el ajuste.

Conclusiones

- 1- La combinación entre métodos experimentales y numéricos es una buena opción para la caracterización numérica de materiales.
- 2- Se obtuvieron gráficos y ecuaciones para describir la función de forma en probetas agrietadas solicitadas a torsión cíclica.

Recomendaciones

- 1- Realizar el estudio no lineal del estado tensional que se produce en la probeta solicitada a torsión cíclica.
- 2- Rediseñar y calcular el sistema de transmisión de fuerza para variar el valor de los momentos torsores.

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: 8 de Febrero de 2017.
- [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+par+a+el+analisis+a+fatiga. Fecha de consulta: 6 de Febrero de 2017.
- [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, 204p. Disponible: <http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v77n162/a14v77n162.pdf> Fecha de consulta: 19 de Marzo de 2017.
- [4] Blashcke-Collado, B. C. (2006). Evaluación del crecimiento de grietas en uniones. Tesis presentada para obtener el grado de magistra en Ingeniería Mecánica. Departamento de Ingeniería Mecánica. Universidad del Norte. Barranquilla. Colombia. 91 p. Disponible en
- [5] 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
- [6] Mecánica de fractura. Disponible en: <http://www.ibertest.es/producto/ensayo-defractura/?gclid=CNKKgqyWoNICFZKCswodKNANhA>. Fecha de consulta: 10 de Febrero de 2017.
- [7] Consideraciones sobre el crecimiento de grietas por fatiga en materiales de ingeniería. Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos82/crecimiento-grieta-fatiga-materiales-ingenieria/crecimiento-grieta-fatiga-materiales-ingenieria2.shtml>. Fecha de consulta: 15 de Abril de 2017.

[8] 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.

[9] Diseño para evitar la fatiga http://www.solidworks.es/sw/docs/WP_SIM_Fatigue_ESP.pdf. Fecha de consulta: 14 de Febrero de 2017.

[10] Almaguer, P. (2015). Sustitución de las sustancias limpiadora y reveladora para realizar la inspección con líquidos penetrantes / Replacing the cleaning and revealing substances in inspections with penetrating liquids. Universidad de Holguín “Oscar Lucero Moya”. Guardalavaca. Cuba. 2015. ISSN: 978-959-16-2472-7.

[11] 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.

[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] J.M Alegre, F. Gutiérrez-Solana, A. Aragón. “A finite element simulation methodology of the fatigue behavior of punched and drilled plate components”; Engineering Failure Analysis; 2004.

[15] Silovsky, K. “Resistencia de Materiales”. Ciudad de La Habana; Instituto Cubano del Libro.

[16] José Luis Aranga, Javier Jesús González. Mecánica de la Fractura; Servicio Editorial Universidad del país Vasco; 2011.

[17] Rafael Gallego Sevilla, Esther Puertas García. Apuntes de Mecánica de la Fractura; 2012.

[18] Avilés, Rafael. (2005) Análisis de fatiga en Máquinas. <http://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=20090>. Fecha de Consulta: 25 de marzo 2017.

[19] Resistencia Mecánica a Fatiga. www.solidworks.es/sw/docs/WP-SIM-fatigue/pdf.

Fecha de consulta: 1 de Diciembre de 2016.

[20] 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.

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

Anexos

Anexo 1 dispositivo contador de ciclos consta de las partes siguientes:

- Interruptor de Encendido. [1]
- Indicador diodo LED (rojo). [2]
- Botón (Resetear contador). [3]
- Botón (Activar Contador). [4]
- Botón (Iniciar conteo). [5]
- Botón (Encendido del Motor). [6]
- Indicador diodo LED (verde). [7]
- Botón (Apagado de Emergencia). [8]
- Dispositivo de Contacto [9]. Este dispositivo no está visible en el contador, se encuentra unido a la maquina torsional.
- Panel visualizador. [10]
- Mueble para cableado telefónico. [11]
- Cableado al visualizador (27 conexiones). [12]
- Circuito fuente de Alimentación. [13]
- Cable conector al sensor de contacto. [14]
- Cable de Alimentación. [15]
- Mueble PC-POST. [16]

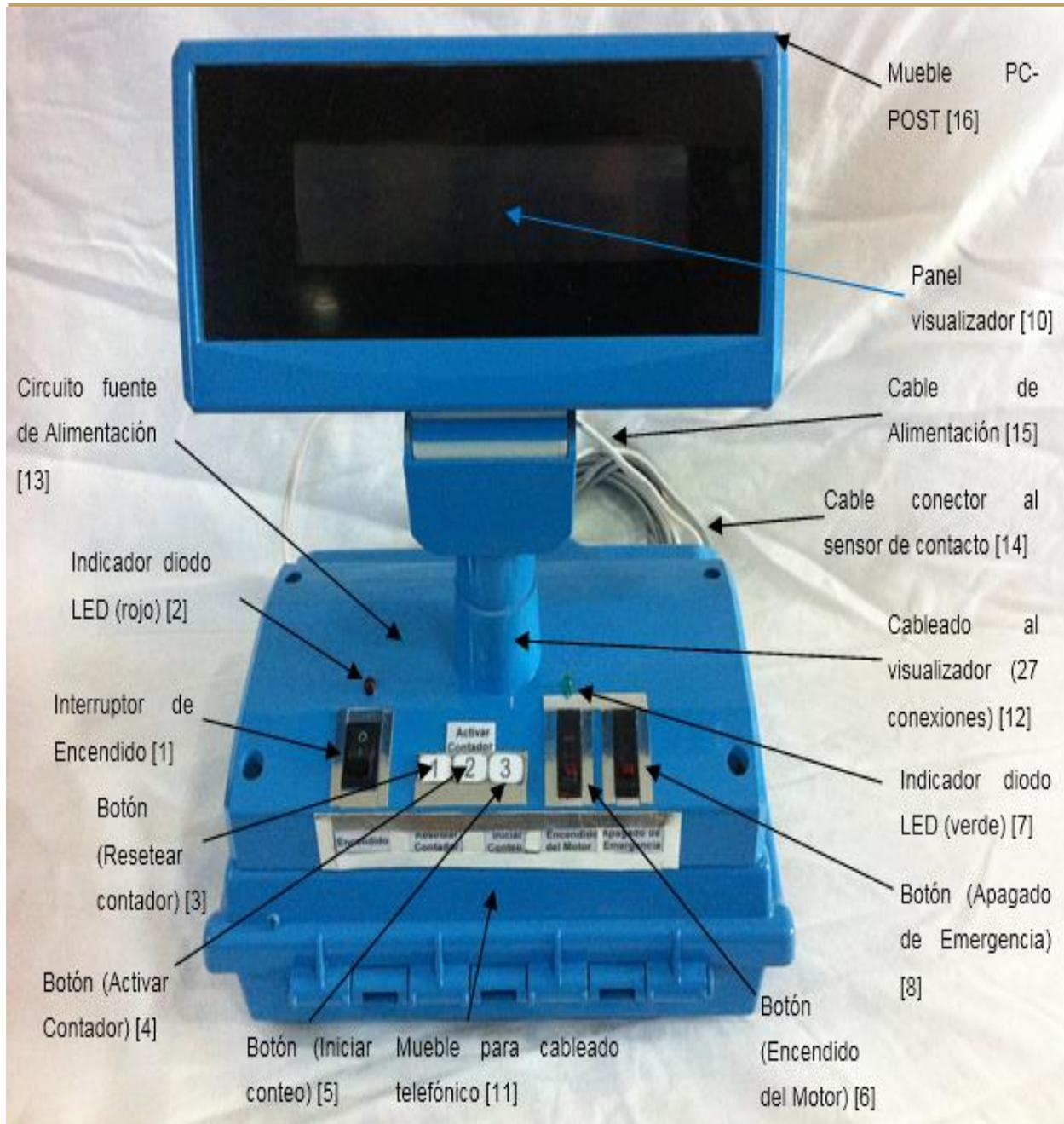


Figura A1 Dispositivo contador de ciclos.

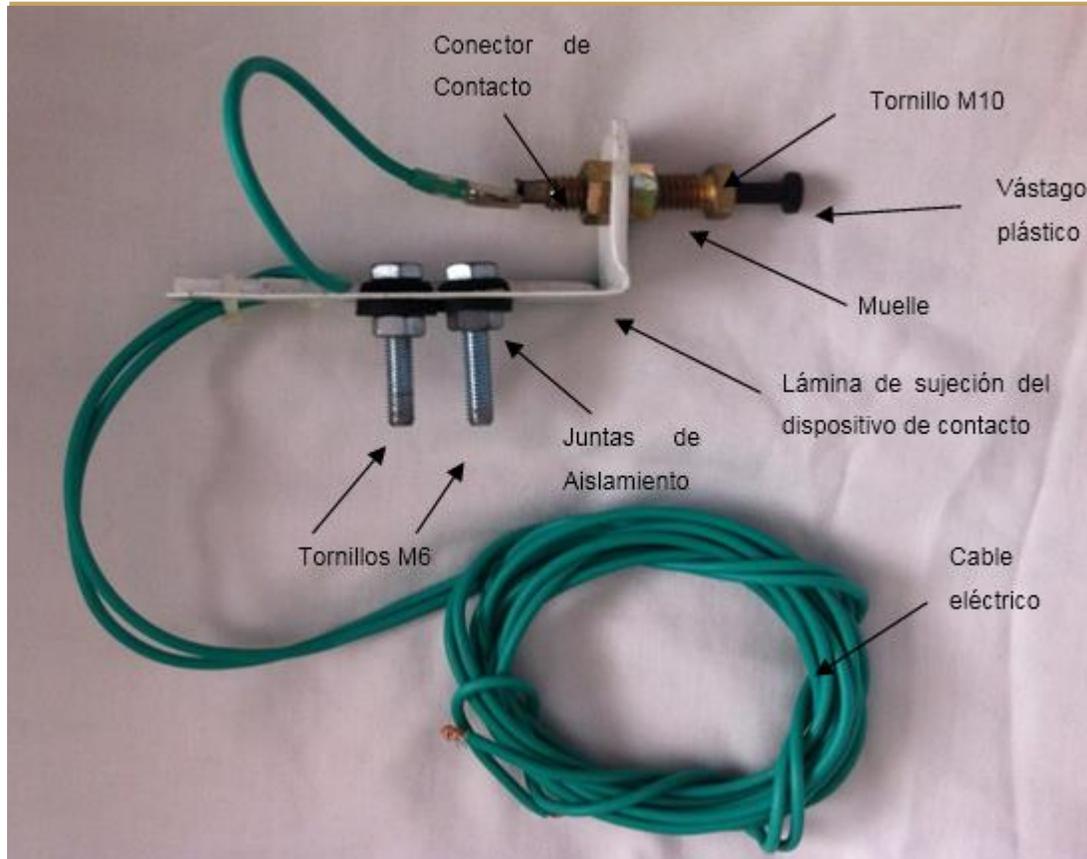


Figura A.2 Dispositivo de contacto.

Este dispositivo de contacto es de vital importancia ya que es el encargado de generar el conteo de cada ciclo para que sea registrado en el dispositivo contador, dando a conocer en el visualizador del mismo las torsiones que la máquina ha aplicado a la probeta ensayada.

Materiales utilizados para la fabricación del dispositivo

1. Vástago plástico.
2. Lámina de sujeción del dispositivo de contacto.
3. Tornillo M10.
4. Tornillos M6. (dos)
5. Cable eléctrico. (16)
6. Conector de Contacto.
7. Muelle.
8. Juntas de Goma para aislar el dispositivo. (dos))

Descripción del funcionamiento del dispositivo contador de ciclos

Este dispositivo consta con un transformador de 110 Vca a 4 Vca / 12 Vca / 26 Vca 200 mA, el cual alimenta el circuito contador del dispositivo.

Al activar el botón de encendido en el gabinete comienza el funcionamiento del dispositivo y a su vez enciende un LED indicando que el dispositivo está energizado.

Al estar el dispositivo listo para el conteo de ciclos debe dirigirse al teclado del control que cuenta con tres botones para activar su funcionamiento:

- ✓ Resetear contador numérico. **Botón número 1.**
- ✓ Activar contador numérico. **Botón número 2.**
- ✓ Inicio del conteo. **Botón número 3.**

Al estar el dispositivo listo para comenzar el conteo de ciclos, se acciona el botón de arranque del motor, y a su vez se encenderá un LED (verde) [7] indicando que el motor principal se encuentra en funcionamiento. A partir de aquí comienza la máquina a realizar torsiones y el contador a registrar cada ciclo que realiza el mandril.

Si se desea comenzar un nuevo conteo, este dispositivo cuenta con un botón Resetear [3] que al ser accionado empezará a marcar un nuevo ciclo numérico.

Si se desea detener el contador numérico el panel refleja un botón [8] que permite detener el funcionamiento del motor de la máquina torsional sin afectar la lectura del contador de ciclos.