

FACULTAD DE INGENIERÍA
CENTROS DE ESTUDIOS CAD/CAM

CÁLCULO DEL FACTOR DE INTENSIDAD DE TENSIONES EN UNIONES SOLDADAS POR EL MÉTODO DE LOS ELEMENTOS FINITOS

AUTOR: LEANDRO VERDECIA MOYA.

TUTOR:

Ing. PAVEL MICHEL ALMAGUER ZALDÍVAR, Prof. Auxiliar

TIPO DE CURSO: CRD

MARZO, 2014

DEDICATORIA

Este trabajo va dedicado a mi madre Maritza Moya Antunez porque gracias a ella he logrado llegar hasta aquí; por su amor inculcado día a día y por su preocupación.

AGRADECIMIENTOS

Quiero darles mis agradecimientos a:

Mi familia en general, pues todos se han comportado de una manera excelente conmigo y realmente es mi razón de ser.

Mis compañeros de estudios por estar siempre conmigo.

Profesor auxiliar Pavel por su atención y su decisiva ayuda, pues sin su disposición la realización de este trabajo hubiese sido imposible.

RESUMEN

La determinación del factor de intensidad de tensiones es un problema complejo. En este trabajo de diploma se realiza el cálculo de este parámetro haciendo uso del desplazamiento de apertura del frente de una grieta, determinado mediante el método de los elementos finitos. Para modelar la geometría de la probeta se utiliza el programa *SolidWork*, mientras que los cálculos se realizan con el paquete *Simulation*. Se proponen ecuaciones para evaluar el factor geométrico que depende de la forma geométrica de la grieta con y sin la presencia del sobrecordón.

Abstract

The stress intensity factor calculus is a complex problem. In this thesis the calculation of this parameter is realized by using the crack tip open displacement, determined by means of the finite elements method. In order to model the specimen geometry the SolidWork program is used, whereas the calculations are realized with the Simulation package. Equations for evaluating the geometric factor that depends on the geometric shape of the crack with and without the presence of the bead are proposed.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
DESARROLLO	5
CÁPITULO 1.	5
1.1 Introducción al capítulo.....	5
1.2 Nociones de la fatiga de materiales.....	5
1.3 Mecánica de la fractura.....	7
1.3.1 Mecánica de Fractura Elástica-Lineal.	9
1.3.1.2 Ecuación de Griffith.	16
1.3.2 El factor de intensidad de tensiones.....	18
1.3.3 Factor geométrico dependiente de la geometría de la grieta.	20
1.3.4 Mecánica de Fractura Elástica Plástica.....	23
1.4 Fatiga de Materiales. Aplicación de la Mecánica de Fractura.....	27
1.4.1 Propagación de grietas por fatiga en régimen elástico, Ley de Paris....	29
1.5 Método de los elementos finitos.	32
1.5.1 Programa SolidWorks.	35
CÁPITULO 2.	37
2.1 Introducción al capítulo.....	37
2.2 Comportamiento experimental.....	38
2.3 Parámetros del mallado.	40
2.3.1 Mallado de la probeta con y sin el sobrecordón.	41
2.4 Técnicas numéricas.....	44
2.5 Representación de las restricciones y fuerzas aplicadas en el estudio.	48
2.6 Valores de desplazamientos y de tensiones (máximas y mínimas).....	49

2.6.1	Valores de la probeta sin el sobrecordón.	49
1.6.2	Valores de la probeta con el sobrecordón.	54
2.7	Cálculo de los valores de intensidad de tensiones para ambos casos.	58
2.7.1	Factor de intensidad de tensiones para el caso con el sobrecordón.	59
2.7.2	Factor de intensidad de tensiones para el caso sin el sobrecordón.	59
2.8	Obtención del factor geométrico dependiente de la geometría de la grieta.	59
2.8.1	Factor geométrico dependiente de la geometría de la grieta en el caso de la presencia del sobrecordón.	60
2.8.2	Factor geométrico dependiente de la geometría de la grieta en el caso de la no presencia del sobrecordón.	63
CONCLUSIONES.....		67
RECOMENDACIONES		68
BIBLIOGRAFÍA		69
ANEXO.....		71

INTRODUCCIÓN

Los conceptos de la Mecánica de la Fractura, establecidos con anterioridad en los años 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.

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.

En ingeniería y en especial en ciencia de los materiales, la fatiga de materiales se refiere a un fenómeno por el cual la rotura de los materiales cuando es sometido a bajas cargas dinámicas cíclicas se produce más fácilmente que con cargas estáticas. Aunque es un fenómeno que sin definición formal, era reconocido desde la antigüedad, este comportamiento no fue gran interés real hasta la Revolución Industrial, cuando a mediados del siglo XIX comenzaron a producir las fuerzas necesarias para provocar la rotura con cargas dinámicas en todos los sentidos por lo tanto en sí son muy inferiores a las necesarias en el caso estático; y a desarrollar un métodos de cálculo para el diseño de piezas confiables era lo que en verdad se requería. Pero este no es el caso de los materiales de aparición reciente, para los que es necesaria la fabricación y el ensayo de prototipos para evitar la aparición de fracturas de ningún tipo.

La fatiga ocurre cuando se somete un material a un constante proceso de carga y descarga. Si la carga se encuentran sobre un cierto umbral comienzan por ende a formarse grietas microscópicas donde se concentra la tensión como por ejemplo, en la superficie en bandas persistentes (PSB por sus siglas en inglés), y en

interfaces presentes por la textura. Eventualmente estas grietas alcanzan un tamaño crítico, llegando a propagarse por toda la estructura fracturada. La forma de la estructura influye significativamente por la permanencia de la fatiga; algunas grietas pueden iniciarse debido a hoyos cuadrados o esquinas muy marcadas, mientras que los hoyos redondos y las transiciones lisas aumentan la fuerza de fatiga en la estructura.

Existe un método para predecir la duración de la fatiga en los materiales, y esta es la Ley de materiales uniformes (UML por sus siglas en inglés). Esta ley llegó a desarrollarse por la predicción de duración de la fatiga en la aleación de aluminio y titanio para finales del siglo XX y se extendió hasta alcanzar aceros de gran fuerza.

Para algunos materiales, existe un valor teórico de amplitud de la tensión bajo el cual el material no presentará fallos para cualquier número de ciclos, lo cual recibe el nombre de límite de fatiga y/o límite de soporte o fuerza de fatiga.

Dentro de las ramas de la mecánica, la mecánica de la fractura está teniendo un enorme auge en la actualidad dado que al estudiar los procesos catastróficos de rotura en estructuras: aviones, puentes, etc...

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

Utiliza métodos analíticos derivados de otras ramas de la mecánica y la ciencia de materiales para estudiar los mecanismos que formación y propagación de defectos, y métodos experimentales relativos a la mecánica de sólidos para determinar las resistencias relativas del material a la fractura.

Se ha impulsado desde los materiales metálicos, tradicionales de ingeniería, que siendo magníficos para la construcción de componentes de máquinas y como

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380. www.uho.edu.cu
elementos estructurales, han dado a lo largo de su historia importantes roturas frágiles, que han obligado al estudio y modelización de su comportamiento. En la nueva Titulación de Ingeniería de Materiales también se incluyen los materiales naturales como la madera, la piedra y la arcilla, como los pétreo-artificiales y cerámicos: hormigones, ladrillos, refractarios y los poliméricos y compuestos que también son objeto de estudio.

Problema de investigación:

El cálculo del factor de intensidad de tensiones es un problema difícil de resolver. En el caso de las uniones soldadas no ha sido suficientemente estudiada la influencia del sobrecordón.

Objeto de estudio:

Comportamiento de la unión soldada.

Campo de acción:

El comportamiento del crecimiento de grietas en uniones soldadas.

Hipótesis:

Con el estudio del estado de deformación al alrededor de la punta de la grieta, se puede determinar una relación entre el factor de intensidad de tensiones sin y con la presencia del sobrecordón en uniones soldadas.

Objetivo general:

Determinar una relación entre la función de forma en el caso de que exista o no el refuerzo de soldadura.

Tareas de investigación:

- ✓ Compilar información en cuanto al tema.
- ✓ Aplicar el paquete CAD SolidWorks 2013 en el modelado geométrico y así utilizar específicamente el paquete de análisis por elementos finitos Simulation.

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380. www.uho.edu.cu

- ✓ Simular los campos de deformacionales alrededor de la punta de grieta sin la presencia del sobrecordón.
- ✓ Simular los campos de deformacionales alrededor de la punta de grieta con la presencia del sobrecordón.
- ✓ Redactar el informe del trabajo de diploma.

Métodos de investigación:

Empíricos:

- ✓ **Observación:** A través de lo cual se pudo determinar la magnitud del problema supuesto en cuanto a la aplicación de la ley de Paris, lo que conllevó al estudio profundo de la misma para así poderla aplicar y solucionar la situación problemática ante la cuestión planteada.
- ✓ **Criterio de Expertos:** Mediante lo cual se recopilaron consejos, orientaciones y conclusiones aportados que arrojaron datos, cifras y esclarecimientos desde el punto de vista de la incuestionable e imponente experiencia de profesores y profesionales que contribuyeron cuantiosamente a dilucidar la solución al problema a resolver.

Teóricos:

- ✓ **Histórico – lógico:** Por medio de lo cual se descubrió el antecedente de la situación problemática dado por el desconocimiento de la ley de Paris y por ende la exención de su aplicación en cuanto a estos temas.
- ✓ **Análisis y Síntesis:** para el desarrollo del capítulo 1. Para el procesamiento de la información y obtención de las expresiones matemáticas.

Resultados esperados

Al culminar este trabajo de diploma se debe obtener una relación entre el factor de intensidad de tensiones considerando la presencia o no del sobrecordón. Además se espera proponer una ecuación de forma para este caso.

DESARROLLO

CÁPITULO 1.

1.1 Introducción al capítulo.

La fractura frágil de materiales normalmente dúctiles ha puesto de manifiesto la necesidad de un mejor conocimiento de la mecánica de la fractura. Las extensas investigaciones realizadas en las pasadas décadas han conducido a la evolución del campo de 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. Los ingenieros están ahora mejor equipados para anticipar y, por tanto, prevenir las roturas de las estructuras y piezas. La presente discusión se centra en algunos de los principios fundamentales de la mecánica de la fractura. [10]

1.2 Nociones de la fatiga de materiales.

Un componente se ve sometido a fatiga cuando soporta cargas alternadas: la rueda de un ferrocarril, la biela de un motor de explosión, pese a diseñarse estas piezas por debajo de su límite elástico, con un número suficiente de ciclos, las piezas se rompen. El 90% de las piezas que se rompen en servicio fallan debido a la fatiga. Esto lo descubrió Wöhler hacia el año 1920 y propuso unos límites a las tensiones de diseño en función del número de ciclos que se requieran para una pieza. Se conocen como curvas de Wöhler o curvas S-N (tensión frente a número de ciclos).

La rotura por fatiga tiene aspecto frágil aun en metales dúctiles, puesto que no hay apenas deformación plástica asociada a la rotura. El proceso consiste en un inicio, y posterior propagación de fisuras. La superficie de fractura es perpendicular a la dirección del esfuerzo. Aunque es conocido este comportamiento no fue de interés para los ingenieros hasta mediados del siglo XIX, momento en el cual comenzaron a producirse roturas en los ejes de las ruedas de los trenes en aquel entonces, por

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380. www.uho.edu.cu
imponerse como medio de locomoción al amparo de la incipiente revolución industrial. [3]

En la rotura por fatiga aparece una microgrieta, que crece a medida que se realizan ciclos de carga hasta alcanzar un tamaño tal que la sección residual es incapaz de soportar la carga máxima en el ciclo y finalmente el ligamento restante rompe de forma frágil o dúctil.

Se distinguen dos zonas en las caras de rotura:

- ✓ Una zona suave con líneas asociadas a diferentes frentes de grieta.
- ✓ Una zona rugosa asociada a la rotura final.

Características de la Fatiga

- ✓ En las aleaciones de metal, cuando no existen discontinuidades macroscópicas o microscópicas, el proceso comienza por movimientos de desplazamiento, lo que eventualmente forma persistente bandas que se convierten en el núcleo de grietas pequeñas.
- ✓ Las discontinuidades macroscópicas o microscópicas y las características del diseño de los componentes que causan concentración de tensión (orificios, cambios de dirección pronunciados) son zonas comunes donde comienzan comúnmente los procesos de fatiga.
- ✓ La fatiga es un proceso que tiene un grado de aleatoriedad (estocástico), mostrando a menudo una dispersión considerable incluso en ambientes muy bien controlados.
- ✓ La fatiga está asociada frecuentemente a las tensiones pero se han reportado grietas de fatiga causadas por cargas de compresión.
- ✓ Mientras más amplio es el rango de tensión aplicada, más corta la vida.
- ✓ El daño es acumulativo, puesto que los materiales no se recuperan luego de estar en descanso.
- ✓ La duración de la fatiga está influenciada por varios factores, como la temperatura, el terminado de la superficie, la microestructura metalúrgica, la

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380. www.uho.edu.cu
presencia de químicos oxidantes o inertes, tensiones residuales, el contacto constante, etc.

- ✓ Algunos materiales (aleaciones de acero y titanio, por ejemplo) muestran un límite teórico de fatiga bajo los cuales los cargamentos continuos no conllevan al fallo por fatiga.

1.3 Mecánica de la fractura.

El nacimiento de la Mecánica de Fractura se debe a un grupo de investigadores del Laboratorio de Investigación Naval de Washington D.C. que estudiaron el problema de la fractura en detalle. En los años 50, el Dr. G.R. Irwin lideró este grupo de investigación, que después de estudiar los trabajos previos de Griffith, Inglis y otros, desarrolló un importante trabajo para extender los postulados de Griffith a los metales, incluyendo la disipación de energía local por flujo plástico local. [10]

Independientemente de Irwin, el investigador E. Orowan propuso una modificación similar a la teoría de Griffith y en el mismo periodo N. F. Mott extendió la teoría de Griffith a la propagación rápida de grietas. [10]

En el año 1956, Irwin desarrolla su concepto de la tasa de liberación de energía, que se relaciona con la teoría de Griffith, pero de forma más útil para resolver problemas de ingeniería. Varios colegas de Irwin llamaron su atención sobre un trabajo de H. M. Westergaard, publicado bastantes años antes, en 1938, que desarrollaba una técnica semiinversa para analizar las tensiones y desplazamientos por delante de una grieta aguda. Irwin utiliza la aproximación de Westergaard para mostrar que las tensiones y desplazamientos cerca del frente de grieta pueden presentarse mediante una simple constante que está relacionada con la tasa de liberación de energía. Este interesantísimo parámetro que caracterizaba el frente de grieta resultó ser el que más tarde hemos conocido como el factor de intensidad de tensiones. [10]

Inmediatamente se produjeron varios éxitos en la aplicación de esta nueva ciencia en el análisis de varias roturas catastróficas, particularmente en el año 1956 Wells

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380. www.uho.edu.cu
utilizó la Mecánica de Fractura para explicar los fallos del fuselaje de los aviones Comet, citados anteriormente, como resultado de grietas de fatiga que alcanzaban un tamaño crítico. La segunda aplicación notable de la Mecánica de Fractura tuvo lugar en General Electric en el año 1957; Winne y Wundt aplicaron la tasa de liberación de energía de Irwin para explicar el fallo de los rotores de grandes turbinas de gas, llegando incluso a prevenir la fractura en los rotores existentes. [10]

Como todas las grandes ideas, la Mecánica de Fractura no fue una excepción y se produjo un cierto escepticismo y reticencias a la aceptación de sus postulados por parte de ciertos sectores, países y algunos centros de enseñanza.

En 1960, P. C. Paris y sus colaboradores encontraron una gran oposición al establecer una base para la aplicación de los principios de la Mecánica de Fractura al análisis y estudio de la fatiga de los materiales, ya que los ingenieros de diseño no estaban convencidos a abandonar las típicas curvas S-N para el diseño de los componentes a fatiga. La oposición fue tan intensa que Paris y sus colegas no consiguieron encontrar una revista técnica cualificada que les permitiera publicar su manuscrito, optando finalmente por su publicación en una revista 21 periódica de la Universidad de Washington titulada The Trend in Engineering. [3]

La Figura 1.1 muestra una rotura por fatiga, que se nuclea y crece en el interior de un cilindro de laminación, a partir de una inclusión no metálica.

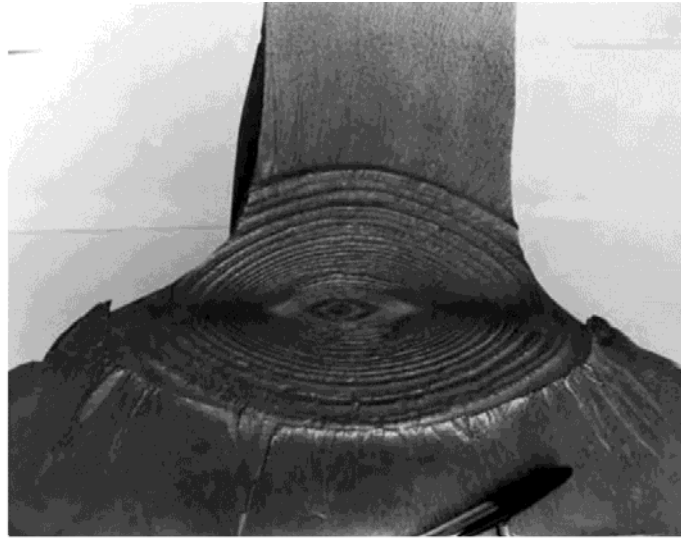


Figura 1.1: Rotura por fatiga, que se nuclea en el interior de un cilindro de laminación, a partir de una inclusión no metálica. [10]

1.3.1 Mecánica de Fractura Elástica-Lineal.

Los conceptos de Mecánica de Fractura, establecidos con anterioridad a 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.

Desde 1960, las teorías de mecánica de fractura se han desarrollado teniendo en cuenta varios tipos de comportamiento no-lineal (i.e. plasticidad, visco-plasticidad 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.

La MFEL y también conocida por LEFM según sus siglas en inglés, se basa sobre el análisis de tensiones elásticas en materiales relativamente frágiles, conteniendo fisuras infinitamente agudas.

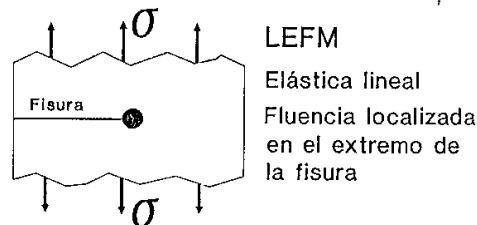


Figura 1.2. Influencia en el extremo de la grieta. [5]

La MFEL se aplica a situaciones de fractura frágil, donde la respuesta carga-deflexión de un cuerpo fisurado muestra esencialmente un comportamiento elástico-lineal hasta el punto donde ocurre una fractura inestable frágil. Existe una plasticidad (fluencia) altamente localizada en el extremo de la fisura, que precede a la fractura frágil, pero su zona de influencia es muy pequeña y no afecta el comportamiento total carga-deflexión. Las tensiones corresponden a las de fluencia o por encima de ella debido al endurecimiento por deformación localizado.

Algunas de las condiciones que promueven la aparición de este tipo de fisuras son:

- ✓ Alta resistencia a la fluencia, materiales relativamente frágiles.
- ✓ Bajas temperaturas de operación.
- ✓ Espesores de pared o secciones muy gruesas.
- ✓ Constricciones mecánicas presentes en la estructura.
- ✓ Velocidades de carga muy altas (impacto).

Bajo estas condiciones el material puede fracturar de una manera frágil, sin ninguna deformación plástica perceptible.

La intensidad del campo tensión-deformación elástico y localizado en las proximidades del extremo de la fisura, está descrito por medio del "Factor de Intensidad de Tensiones =K"

Irwin demostró que la MFEL puede ser usada incluso en presencia de deformación plástica. Sin embargo es necesario imponer límites en la extensión de la deformación plástica para que la MFEL continúe siendo válida. Es necesario que el tamaño de la zona plástica que se desarrolla en un metal en la punta de la fisura sea pequeña con respecto a la longitud de la fisura. [10]

Para condiciones elásticas lineales, los campos de tensiones en los extremos de las fisuras pueden caracterizarse por un único valor singular “ K ”, que también constituye un valor particular del parámetro fuerza impulsora de fisura.

Es decir, la magnitud de la intensificación de las tensiones elásticas en la región del extremo de la fisura puede describirse por un término singular único K , que depende de:

- ✓ La carga aplicada externamente, “ σ ”
- ✓ La longitud de la fisura, “ a ”
- ✓ La geometría del cuerpo fisurado y método de aplicación de carga, \mathcal{F}

$$K = f(\sigma\sqrt{a}\mathcal{F}) \quad (1.16)$$

La iniciación de fisura ocurre si:

$$K > K_{Ic}$$

Factor de intensidad de tensiones aplicado > Tenacidad del material

El parámetro K_{Ic} es una medida de la resistencia del material a la fractura frágil, en deformación plana, y se lo conoce usualmente como la tenacidad a la fractura en deformación plana. Se predice que ocurre extensión rápida de la fisura cuando K alcanza K_{Ic} , siendo K_{Ic} una propiedad singular del material para una dada condición del material, temperatura y velocidad de carga.

Las expresiones de K se determinaron para un gran número de diferentes geometrías de cuerpos fisurados, configuraciones de fisura, y situaciones de carga. Cada expresión de K contiene todos los términos que se requieren para suministrar

las relaciones necesarias entre la tensión aplicada nominal, tamaño de fisura y condiciones de geometría. K También puede relacionarse con las propiedades de los materiales.

En esencia, estas expresiones de K solo son formas más elaboradas de la ecuación: Resistencia del Material > Fuerza Impulsora de Fisura, que facilitan la evaluación del balance entre las condiciones aplicadas en el extremo de la fisura (o fuerza impulsora de fisura), y la resistencia del material al crecimiento de fisura y fractura.

Para determinar K_{IC} , es necesario adoptar algún criterio que nos permita identificar con precisión satisfactoria el evento correspondiente a la iniciación de la propagación inestable de la fisura, a fin de obtener K_{IC} simplemente como el valor de K_I correspondiente a dicho evento.

Hay varios métodos para establecer el valor de K apropiado para una situación específica:

- ✓ Programas de computación de elementos finitos.
- ✓ Calibraciones experimentales,
- ✓ Técnicas foto elásticas.

En la práctica, se puede hallar la expresión apropiada en un manual de mecánica de fractura, que equipare adecuadamente la geometría del cuerpo fisurado, el tipo de fisura, y las condiciones particulares de carga.

Por ejemplo, para una fisura semi-elíptica, orientada normalmente a la tensión aplicada:

Fisura superficial:

$$K^2 = 1.21\pi\sigma^2 \left(\frac{a}{Q}\right) \quad (1.17)$$

Fisura Interna:

$$K^2 = \pi\sigma^2 \left(\frac{a}{Q}\right) \quad (1.18)$$

Donde σ es la tensión de tracción nominal; a es la profundidad de la fisura, y α/Q es un parámetro de forma de la fisura.

La esencia de la MFEL es permitir relacionar el K aplicado (fuerza impulsora de fisura) al crecimiento de la fisura, y las características de resistencia a la fractura para un material dado (que puede expresarse en términos de niveles críticos de K).

Cuando se considera fractura frágil bajo condiciones de carga elástica lineal (deformación plana), un material dado puede tolerar solo un nivel determinado de K aplicado (intensidad de tensiones) antes de que fracture.

Si vemos la figura, para un tamaño de fisura (a) y geometría fijas, el K aplicado en la región del extremo de la fisura continuará incrementándose a medida que se incremente la carga (tensión σ). Cuando la tensión alcance un valor crítico (equivalente a la resistencia a la fractura específica del material, la fisura se hará inestable y frágil y ocurrirá una fractura rápida. Este valor crítico de K se denomina K_{IC} (tenacidad a la fractura en deformación plana), y puede ser considerada como una constante del material para unas dadas condiciones metalúrgicas, de temperatura y velocidad de carga. Por lo tanto, para un material dado, la fractura ocurrirá cuando el K aplicado alcance K_{IC} , sin tener en cuenta la geometría, el tamaño de la fisura y la forma de carga del cuerpo fisurado. [10]

K_{IC} : Puede ser medido en laboratorio con una geometría de probeta simple, y este valor puede ser usado para evaluar el potencia de fractura frágil de otras geometrías y estructuras fisuradas del mismo material.

K_{IC} = resistencia a la fractura frágil del material.

Mientras que la vida de un componente puede determinarse cuando el factor de intensidad de tensiones aplicado alcanza un valor crítico (K_{IC}), la vida útil del mismo depende la velocidad de crecimiento de fallas, desde un tamaño sus crítico hasta el tamaño crítico (cuando K llegue a K_{IC}). Para ello, debemos caracterizar la

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380. www.uho.edu.cu
resistencia del material al crecimiento de fisura en términos de K , bajo condiciones de carga cíclica (fatiga) y/o estática (corrosión bajo tensión, etc.).

Las principales áreas de estudio de la mecánica de fractura relacionan las propiedades de los materiales, los defectos presentes y las tensiones actuantes. Factores como la tenacidad del material, las condiciones operativas, las condiciones de carga y la geometría del componente gobiernan la selección del análisis de la mecánica de fractura apropiado.

Se han desarrollado diferentes parámetros que caracterizan las condiciones en el extremo de la fisura, para cada una de las tres categorías en que se divide la mecánica de fractura:

- ✓ Mecánica de Fractura Elástica Lineal (MFEL)
- ✓ Mecánica de Fractura Elasto-Plástica (EPFM)
- ✓ Mecánica de Fractura dependiente del tiempo, a alta temperatura (HTTDFM)

Cualquier movimiento relativo de las superficies de una fisura puede obtenerse como una combinación de tres movimientos básicos o modos de apertura, o sea, existen tres diferentes modos de carga en un cuerpo fisurado:

Modo I: apertura; el cuerpo fisurado se carga con tensiones normales.

Modo II: deslizamiento o corte plano; el desplazamiento de la superficie de la fisura se halla en el plano de fisura y es perpendicular al borde principal de la fisura.

Modo III: rasgado, causado por corte fuera de plano; el desplazamiento de las superficies de la fisura se halla en el plano de fisura y es paralelo al borde principal de la fisura.

Desde el punto de vista técnico, el **Modo I** es el modo de carga más importante, y estudiaremos solo este modo de falla.

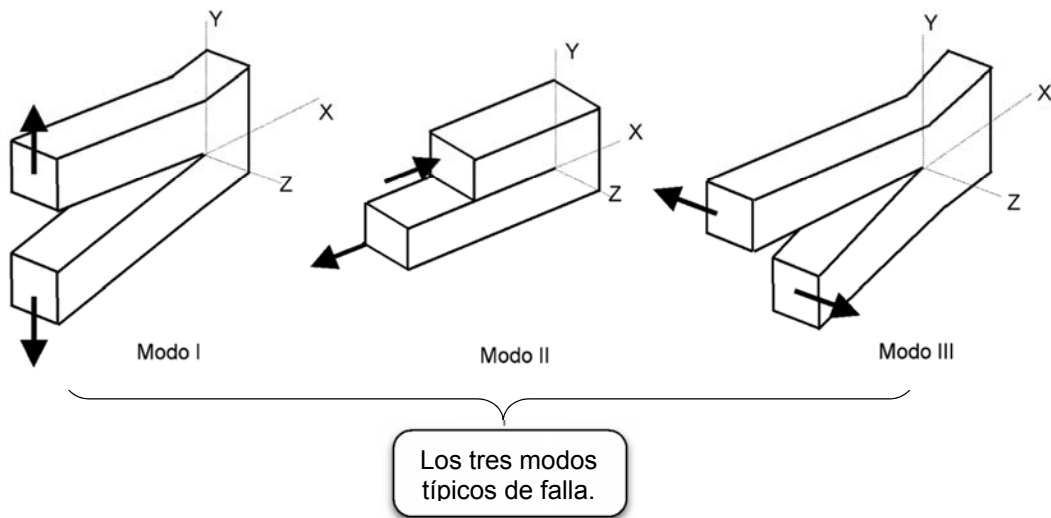


Figura 1.3. Modo de deformación de la grieta. [10]

1.3.1.1 El balance de energía de Griffith.

De acuerdo con el Primer Principio de Termodinámica, cuando un sistema pasa de un estado de no-equilibrio a un estado de equilibrio, se produce una disminución de la energía del sistema. A partir de este principio, Griffith estudió las condiciones de fractura de cuerpos sólidos frágiles con grietas y estableció en el año 1923 la teoría inicial en la que se sustenta la Mecánica de la Fractura.

Se puede formar una grieta (o una grieta existente puede crecer) solamente si el proceso origina una disminución de la energía total o esta permanece constante.

El análisis de Griffith se basa en la primera ley de la termodinámica, que establece que en un sistema cerrado la energía se conserva. Dos tipos de energía son consideradas, energía de deformación y energía de superficie. Consideramos dos probetas en forma de láminas, delgadas, sujetas a una tensión de tracción “s”. Una probeta tiene una fisura, que es muy pequeña en longitud respecto al ancho de la lámina; la otra no tiene fisura. Si cada una de estas probetas es cargada en tracción hasta obtener el mismo desplazamiento, habrá una pequeña diferencia en los gráficos carga-deformación, ya que se requerirá menos carga para extender la probeta fisurada que la no fisurada, una dada cantidad. La energía elástica

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380. www.uho.edu.cu
almacenada en cada probeta hasta una dada deformación “ Δ ”, está dada por el área bajo la curva correspondiente y es igual a “ $\frac{1}{2}.P.\Delta$ ”, donde “ P ” para la probeta fisurada es menor que para la probeta no fisurada. Griffith usó estadiferencia en la energía elástica almacenada para desarrollar una teoría para la rotura frágil. [10]

1.3.1.2 Ecuación de Griffith.

La ecuación de Griffith es una condición necesaria, pero no suficiente para el fallo del material, dado que además la grieta existente en el sólido debe ser lo suficientemente aguda en sus extremos como para crear la concentración de tensiones en su entorno, suficiente para sobrepasar la resistencia cohesiva del material (fuerzas de enlace interatómicas), de forma que la ecuación de Griffith es válida solamente para sólidos frágiles, Griffith obtuvo un buen compromiso entre la resistencia a fractura experimental y los cálculos de su ecuación para el caso de vidrios, cerámicas, pero su ecuación no puede interpretar el comportamiento de los metales, en los que la energía necesaria para su fractura resultó ser varios órdenes de magnitud mayor que sus energías superficiales respectivas. Ello se debe a que en estos casos la concentración de tensión, existente en los frentes de grieta, crea una zona plástica de tamaño importante, de manera que la ecuación que expresa la tensión de rotura debe corregirse, introduciendo el término energético debido a la deformación plástica. [10]

En el año 1948, Irwin y Orowan independientemente, modificaron la expresión de Griffith para incluir el comportamiento plástico, la expresión revisada sería la siguiente:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2E(\gamma_s + \gamma_p)}{\pi a}} \quad (1.1)$$

Donde: γ_p es el trabajo plástico por unidad de área, que normalmente es mayor que γ_s .

En un sólido frágil ideal, una grieta puede formarse y explicarse simplemente por la rotura de enlaces atómicos y precisamente γ_s refleja la energía total de los enlaces

rotos por unidad de área. Sin embargo, cuando una grieta se propaga a través de un metal, se produce un movimiento de dislocaciones en la proximidad de la punta de grieta, originando una disipación adicional de energía.

Aunque Irwin y Orowan plantean la ecuación (1.1) solamente para los metales, es posible generalizar el modelo de Griffith teniendo en cuenta todo tipo de disipación de energía:

$$\sigma_f = \sqrt{\frac{2EW_f}{\pi a}} \quad (1.2)$$

Donde: W_f es la energía de fractura, que puede incluir los efectos plásticos, viscoelásticos o viscoplásticos, dependiendo del material. La energía de fractura puede también estar influenciada por el serpenteo o por las ramificaciones que aumentan la superficie. La Figura 1.4 se muestra un tipo de comportamiento de materiales con la correspondiente energía de fractura.

Cuando aplicamos la ecuación (1.2) y obtenemos la tensión de rotura para materiales que presentan deformación no-lineal es preciso tomar precauciones. El modelo de Griffith, particularmente la 1ra ecuación, que solo incluye γ_s , se aplica solamente al comportamiento elástico lineal. Cualquier efecto no-lineal, como la plasticidad, debe quedar limitado a una pequeña región cerca del borde de la grieta. Adicionalmente la ecuación modificada asume que W_f es constante; sin embargo, en muchos materiales dúctiles, la energía de fractura aumenta con el crecimiento de grieta, como se verá más adelante.

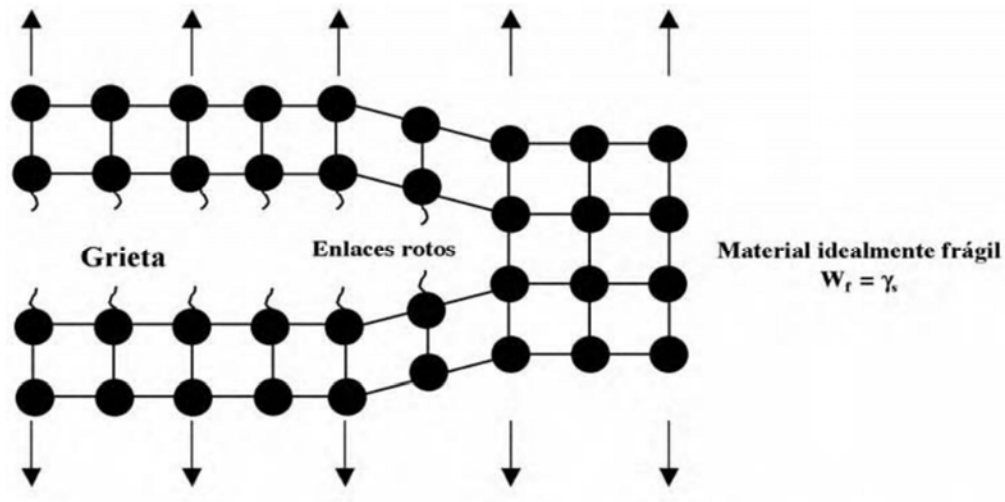


Figura 1.4: Propagación de la grieta en materiales, con la correspondiente energía de fractura.

1.3.2 El factor de intensidad de tensiones.

“ K ”, en general es conocido como factor de intensidad de tensiones y depende de la geometría del componente, su nivel de tensión y la longitud de la fisura. Para la geometría de Griffith,

$$K = \sigma_c (\pi * a)^{1/2} \quad (1.3)$$

El subíndice c es usado para indicar que el valor de K es el valor crítico para fractura; esto es,

$$K_c = (2 * E * \gamma_s)^{1/2} \quad (1.4)$$

“ K_c ” es conocido como “tenacidad a la fractura”. K_c es el valor crítico del factor de intensidad de tensiones que provoca la inestabilidad de la fisura.

En el rango lineal elástico, la tensión en el frente de una fisura bajo tensión es gobernada por el factor de intensidad de tensiones, que se expresa como:

$$\sigma_{yy} (\pi * a)^{1/2} = \frac{K}{(2\pi r)^{1/2}} \quad (1.5)$$

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380. www.uho.edu.cu
 Donde “r” es la distancia medida desde la punta de la fisura.

Entonces, para que se produzca una fractura, se debe exceder un valor característico de cada material. Este parámetro es de gran importancia pues cuanto mayor sea su valor, tanto mayor será la tenacidad o sea, la “resistencia” que un material presenta a la fractura.

Hasta ahora el único tipo de geometría analizada es una lámina ancha conteniendo una pequeña fisura. Cuando la longitud de la fisura es apreciable con respecto al ancho, entonces debe realizarse una corrección en el factor de intensidad de tensiones debido al ancho finito. Teniendo en cuenta el factor de corrección para una placa con una fisura centrada, el factor de intensidad de tensiones es:

$$K = \sigma(\pi * a)^{1/2} * \left(\sec\left(\frac{\pi * a}{W}\right)\right)^{1/2} \quad (1.6)$$

En el caso de una fisura semicircular superficial, el factor de intensidad de tensiones en la superficie es:

$$K = 1.12 \left(\frac{2}{\pi}\right) \sigma(\pi * a)^{1/2} \quad (1.7)$$

Donde a la profundidad máxima “a”, el factor de intensidad de tensiones es un poco menor.

$$K = \left(\frac{2}{\pi}\right) \sigma(\pi * a)^{1/2} \quad (1.8)$$

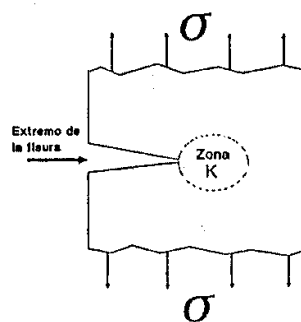


Figura 1.5: Ejemplo de la Zona K.

La mecánica de fractura define a K como un parámetro siendo denominándolo factor de intensidad de tensiones, que como se explicó anteriormente, depende entre otras cosas del tipo de carga y la geometría de la fisura presente (σ y a).

El valor crítico de K con respecto al inicio de la fractura K_c , es por lo tanto el parámetro que caracteriza la resistencia a la fractura del material y se lo denomina Tenacidad a la Fractura, y permiten evaluar el potencial de falla y la vida útil remanente de una estructura o componente conteniendo un defecto.

La idea básica es describir ambos lados de esta ecuación con términos comunes, que representen tanto las condiciones de crecimiento de fisura (G_c), como el comportamiento del material, o su respuesta a esas condiciones.

La expresión del Factor de Intensidad de Tensiones de la forma:

$$K = \Delta\sigma\sqrt{\pi a} \quad (1.9)$$

Esta expresión sólo es válida para el caso de la grieta finita de longitud $2a$ en un medio infinito sometido a tensiones uniformes. Para otros casos el valor del SIF cambia en función de la geometría del problema.

Sin embargo, la influencia de todos estos factores puede recogerse en un único factor adimensional Y el cual es una función que depende de la geometría del cuerpo fisurado, de modo que el SIF, para un problema cualquiera podrá escribirse de la forma:

$$K = Y * \Delta\sigma\sqrt{\pi a} \quad (1.10)$$

Existen un gran número de técnicas para la determinación del SIF para casos de geometría y condiciones de contorno complejas.

1.3.3 Factor geométrico dependiente de la geometría de la grieta.

Es una función que depende exclusivamente de la geométrica del cuerpo fisurado incluyendo por supuesto la forma de la propia grieta.

✚ **Probeta a tracción con una grieta superficial:**

La figura 1.6 muestra la geometría y cargas del problema.

Una fórmula polinómica que implica un error del 0,5 % para valores $a/b \geq 0,3$ para el factor de corrección es:

$$Y = 1,112 - 0,231 \frac{a}{W} + 10,550 \left(\frac{a}{W}\right)^2 - 27,710 \left(\frac{a}{W}\right)^3 + 30,382 \left(\frac{a}{W}\right)^4 \quad (1.11)$$

Otra, más compleja pero que proporciona mayor precisión para todo el rango de a/W viene dada por:

$$Y = \frac{0,752 + 2,02 \frac{a}{W} + 0,370 \left(1 - \operatorname{sen} \frac{\pi a}{2W}\right)^3}{\cos \frac{\pi a}{2W}} \sqrt{\frac{2W}{\pi a} \tan \frac{\pi a}{2W}} \quad (1.12)$$

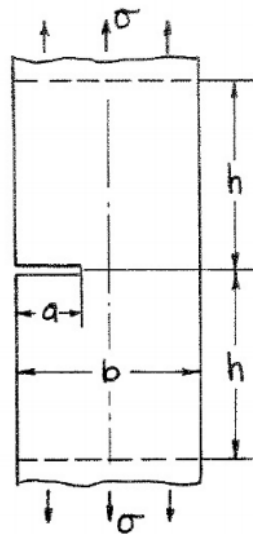


Figura 1.6: Probeta a tracción con grieta superficial.

✚ **Probeta a flexión con una grieta superficial.**

La figura 1.7 muestra la geometría y cargas del problema. Esta configuración es de gran interés pues varios test normalizados para la obtención de la tenacidad están basados en este tipo de ensayo.

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380. www.uho.edu.cu

En este caso $\sigma_0 = \frac{P}{WB}$ siendo B el espesor de la probeta. Este valor no es una tensión realmente aplicada, pero caracteriza el nivel de tensiones que actúa en la probeta. a es la longitud de la grieta. Para este caso se encuentran en la literatura diferentes expresiones, aunque todas dan valores muy similares. Las dos más comunes son:

$$Y = \frac{\frac{3S}{2W}}{\left(1 + 2\frac{a}{W}\right)\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{\frac{3}{2}}} \left[1,12 - \frac{a}{W}\left(1 - \frac{a}{W}\right) \left\{ 1,21 - 2,21\frac{a}{W} + 1,52\left(\frac{a}{W}\right)^2 \right\} \right] \quad (1.13)$$

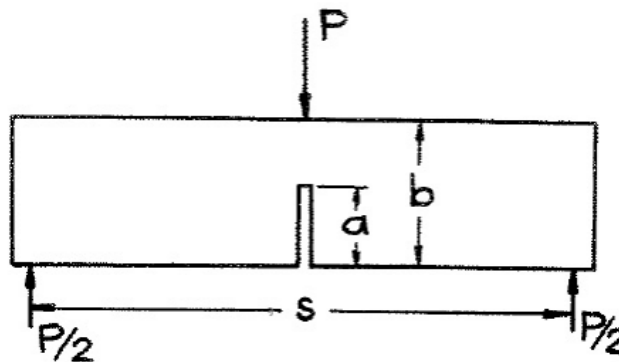


Figura 1.7: Probeta a flexión con grieta superficial.

Y

$$Y = \frac{S}{W} \left[163 - 2,60\frac{a}{W} + 12,30\left(\frac{a}{W}\right)^2 - 2,21\left(\frac{a}{W}\right)^3 + 21,83\left(\frac{a}{W}\right)^4 \right] \quad (1.14)$$

En esta probeta, si no hubiera grieta, las tensiones serían lineales a lo largo del espesor, dentro de la aproximación de la Resistencia de Materiales. El valor máximo de las tensiones de tracción se produciría en la superficie siendo $\sigma_{m\acute{a}x} = \frac{3}{2} \frac{PS}{WB^2}$. En el límite, para una grieta muy pequeña, el factor de intensidad de tensiones tendrá que ser el de una grieta superficial sometida a tensiones remotas de este valor. Por tanto el Factor de Intensidad de Tensiones para $\frac{a}{W} \rightarrow 0$ ha de valer, el factor de intensidad de tensiones:

$$K_I = 1,12 \frac{3}{2} \frac{PS}{BW^2} \sqrt{\pi a} \quad (1.15)$$

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380. www.uho.edu.cu
o lo que es lo mismo,

$$K_I = 1,68 \frac{P}{BW} \frac{S}{W} \sqrt{\pi a} \quad (1.16)$$

Sólo la segunda fórmula, que es más precisa, tiende a este valor. La primera es un buen ajuste pero para valores usuales del ratio $\frac{a}{W}$ en estas probetas, que es del orden de $0,20 \leq \frac{a}{W} \leq 0,60$.

1.3.4 Mecánica de Fractura Elástica Plástica.

La mecánica de fractura elástica lineal (MFEL) es válida únicamente si la deformación no-lineal está limitada a una pequeña región alrededor del frente de grieta. Es muy difícil caracterizar algunos materiales, mediante la MFEL y en este caso se aplica la mecánica de fractura elasto-plástica (MFEP), que admite deformaciones grandes antes de la fractura (fundamentalmente en el frente de grieta) que sean en general no-lineales, plásticas en el caso de los aceros, visco-plásticas como en el caso de los polímeros termoplásticos. En este caso, el parámetro se denomina J .

J es simplemente un parámetro que define la intensidad de la tensión y deformación plástica en la región que rodea el extremo de la fisura. J es una función de la tensión, deformación, tamaño de fisura, y geometría de la fisura y cuerpo. Es análogo a K utilizado en MFEL. La mayor diferencia es que J representa la intensidad del campo elasto-plástico que rodea al extremo de la fisura, mientras que K es la intensidad del campo elástico circundante.

Este método se usa cuando la cantidad de plasticidad (fluencia) en el extremo de la fisura que precede a la fractura, o se halla asociada al evento de fractura, es considerable. En otras palabras, no se pueden despreciar los efectos de la plasticidad.

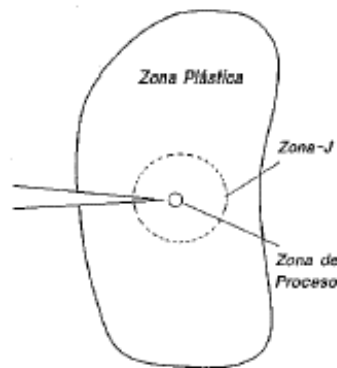


Figura 1.8. Zona Plástica.

La EPFM se aplica a un intervalo de temperaturas más amplio que la MFEL, donde la fractura es del tipo dúctil; en materiales más tenaces, y en secciones delgadas.

- ✓ La sección no es lo suficientemente gruesa como para satisfacer los requerimientos de tamaño de la MFEL
- ✓ El rango de temperaturas es lo suficientemente alto, como para dar lugar a niveles de tenacidad mucho más altos que aquellos de más bajas temperaturas.
- ✓ El modo de fractura de los aceros estructurales cambia del tipo frágil al tipo dúctil con el incremento de la temperatura.
- ✓ Los aceros inoxidable austeníticos son muy tenaces como para poder aplicarles la MFEL.

Busca una relación entre la tensión aplicada, tamaño de grieta y tenacidad del material, que sea independiente de la geometría del componente, en casos en que la fractura ocurre después de una deformación plástica significativa.

El proceso de fractura dúctil ocurre por la iniciación y crecimiento estable de una grieta:

- ✓ La fisura aguda va adquiriendo una forma roma con las primeras cargas.
- ✓ De la punta roma de la grieta se desarrolla una nueva fisura aguda.
- ✓ Esta fisura crece en forma estable.
- ✓ La grieta crece en forma inestable.

En materiales dúctiles, particularmente bajo condiciones de tensiones planas, el inicio de la extensión de la fisura, bajo condiciones de carga crecientes ocurre a niveles de carga por debajo de la carga máxima. Hay un rango de cargas dentro del cual una fisura se propaga de manera estable, es decir, la resistencia a la propagación de la fisura inestable se incrementa con la extensión de la fisura en el rango estable de crecimiento. Aún bajo condiciones de deformación plana de carga, hay un pequeño incremento de crecimiento estable de fisura antes que ocurra el crecimiento inestable. Este incremento en la resistencia está relacionado con el incremento de la zona plástica en la punta de la fisura, y también con el redondeo del extremo de la fisura a medida que avanza. Este tipo de comportamiento depende del espesor de la probeta, la temperatura y la tasa de deformación. Esto puede ser representado por una curva de resistencia al crecimiento de fisura, curva R , que grafica tenacidad vs crecimiento dúctil de grieta.

La curva R es independiente de la longitud inicial de fisura a_0 y de la configuración de la probeta en la cual se desarrolla. Para un dado material, espesor de probeta y temperatura de ensayo, la curva R es función solo de la extensión de la fisura Δa .

En un ensayo de tenacidad elasto-plástica, se carga una probeta hasta que ocurre crecimiento estable de fisura. Se miden dos parámetros: carga y algún desplazamiento; y se determinan la tenacidad (J) y el crecimiento de fisura (Δa).

Según sea la tenacidad del material, la fractura inestable puede ocurrir en cualquier punto de la curva, pudiendo superar ampliamente la carga máxima con un mecanismo de crecimiento dúctil.

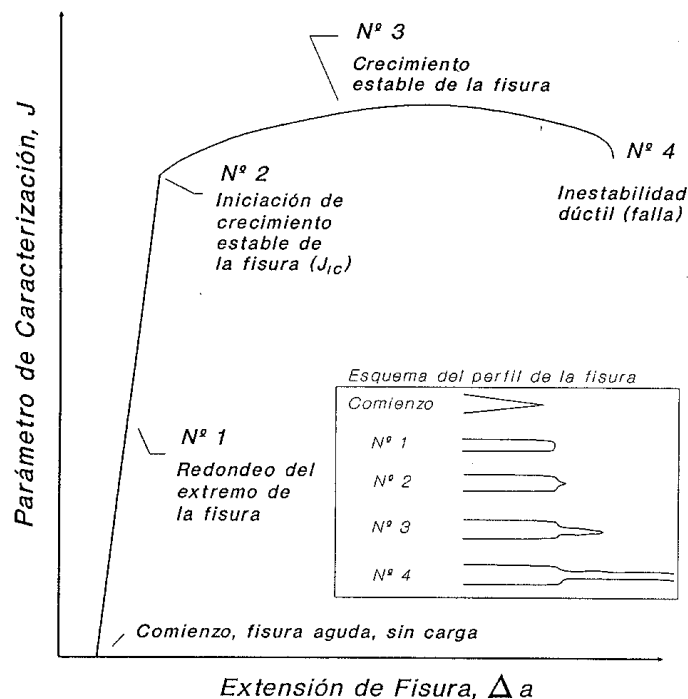


Figura 1.9. Comportamiento de la fisura.

Si la fractura ocurre en el punto 1, se puede aplicar el criterio de mecánica de fractura lineal elástica (vale K_{IC}). Si ocurre en el punto 2, ya no es aplicable el criterio de K_{IC} pues hay deformación plástica, aunque aún no haya un crecimiento estable de la fisura. A partir del punto 3 podemos considerar crecimiento estable antes de la fractura. Más allá del punto 4 la fisura no se estabiliza por desgarramiento dúctil.

Consideraremos diferentes diseños para evaluar la tenacidad de materiales con comportamiento elasto-plástico:

1. Valores críticos, J_c : corresponde a fractura frágil después una deformación plástica suficiente como para invalidar K_{IC} . No tiene en cuenta si hubo o no crecimiento estable de la fisura antes de la fractura.
2. Valores de iniciación, J_{IC} : corresponde a la iniciación del crecimiento estable. Es independiente de la geometría y características del material, aunque es

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380. www.uho.edu.cu
muy conservativo, pues las estructuras reales admiten un cierto crecimiento estable de fisura.

3. En particular:

$$K_{IC} = \sqrt{J_{IC} E} \quad (1.17)$$

A saber, J_{IC} define el nivel de J aplicado para el comienzo de la extensión estable de una fisura dúctil durante una cierta carga sobre una probeta pre-fisurada, a una temperatura dentro del régimen de comportamiento dúctil. Es una propiedad básica del material que representa una medida del límite inferior de la tenacidad de fractura dúctil en presencia de una fisura inicial aguda.

En la zona superior será necesario un mayor endurecimiento por deformación, o sea, mayor deformación plástica (acompañada o no por crecimiento estable de fisura) J_{IC} .

En el sector inferior, se utiliza K_{IC} , que caracteriza a la tenacidad debajo de la temperatura de transición y en el comienzo de la región de transición.

1.4 Fatiga de Materiales. Aplicación de la Mecánica de Fractura.

Existen procesos capaces de producir el fallo catastrófico retardado de componentes o estructuras, que han soportado satisfactoriamente un cierto tiempo de servicio, sin que en ningún momento se hubiera rebasado la carga límite prevista para el fallo estático instantáneo. De entre estos procesos, el más conocido y estudiado es la fatiga, que se trata en el presente tema y en segundo lugar la corrosión bajo tensión que será objeto de estudio en un capítulo posterior.

Entendemos por fatiga las situaciones en las que los componentes de las estructuras y mecanismos están cargados cíclicamente entre niveles de carga inferiores a la resistencia máxima de la pieza, situación que conduce, en general, a su fallo final. Desde el punto de vista de las deformaciones locales, es la forma de fallo provocada por la acción repetida de deformaciones inelásticas alternadas

altamente localizadas, que provocan la creación en cada ciclo de una extensión superficial irreversible conducente a la creación de una grieta en una cierta zona del elemento estructural o la propagación de alguna grieta ya existente en el mismo.

La mayor parte de los materiales metálicos muestran una propagación apreciable de grietas previa a la rotura en condiciones de carga cíclica. En la Figura 1.10 se puede apreciar una típica rotura de fatiga de un componente trabajando en régimen dinámico. La velocidad de propagación de las grietas para diferentes combinaciones de tensión aplicada, tamaño de grieta, geometría, así como los mecanismos que la producen bajo diferentes condiciones de sollicitación, frecuencia y presencia de ambientes agresivos, son temas de gran interés científico y teórico.



Figura 1.10. Rotura de un eje sometido a flexión con baja tensión nominal.

La propagación de grietas en estructuras en régimen elástico será el aspecto de la fatiga del que vamos a ocuparnos en este tema. La aplicación de los conceptos de la Mecánica de la Fractura a este proceso ha constituido sin duda el mayor desarrollo reciente en el campo de los estudios de fatiga. El objetivo de esta lección es conocer la metodología de caracterización de los procesos de propagación de

grietas, su aplicación al diseño, así como los diferentes mecanismos y micro mecanismos de propagación estable de grietas en materiales con comportamiento elasto-plástico (aleaciones metálicas) sometidos a cargas cíclicas de amplitud constante. Este tema incluye el tratamiento de grieta desde la óptica de la Mecánica de Fractura, a partir de las investigaciones de Paris, Erdogan y otros, que culminaron en los años 60 en el establecimiento de las ecuaciones de crecimiento de grieta. Se hace especial mención a las condiciones que permiten aplicar la Mecánica de la Fractura Elástica Lineal en los procesos de caracterización.

1.4.1 Propagación de grietas por fatiga en régimen elástico, Ley de Paris.

Uno de los objetivos en diseño de fatiga consiste en desarrollar un método útil de caracterización de la propagación de grietas en términos de un parámetro de consistencia adecuado, que establezca una cuantificación de la resistencia específica de los materiales en fatiga para diferentes condiciones tensionales y geométricas. Hasta los años 60 se realizaron numerosos intentos de caracterizar la propagación de grietas en función del rango de tensiones aplicado $\Delta\sigma$, y de la longitud de grieta a , con expresiones del tipo:

$$\frac{da}{dN} \propto \Delta\sigma^p a^q \quad (1.18)$$

Siendo p y q constantes experimentales. Con el desarrollo de la Mecánica de Fractura aparecieron métodos más apropiados. Cuando las tensiones existentes en un proceso de fatiga son suficientemente pequeñas, la zona plástica provocada en el fondo de una grieta puede considerarse como una singularidad en el campo del comportamiento elástico global, pudiendo aplicarse la mecánica de fractura elástica lineal. En 1961 Paris y otros colaboradores sugirieron que para una variación cíclica de tensiones; la variación del factor de intensidad de tensiones caracteriza el crecimiento de grietas. Esta variación se expresa por:

$$\Delta K = K_{m\acute{a}x} - K_{m\acute{i}n} \quad (1.19)$$

Siendo $K_{m\acute{a}x}$ y $K_{m\acute{i}n}$ los valores máximo y mínimo del factor de intensidad de tensiones durante un ciclo de tensión en fatiga. Por tanto:

$$K_{m\acute{a}x} = Y * \sigma_{m\acute{a}x} \sqrt{\pi a} ; K_{m\acute{i}n} = Y * \sigma_{m\acute{i}n} \sqrt{\pi a} \quad (1.20)$$

$$\Delta K = Y * \Delta \sigma \sqrt{\pi a} ; \Delta \sigma = \sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n} \quad (1.21)$$

Siendo Y el factor geométrico dependiente de la geometría de la grieta y el elemento que la contiene $\sigma_{m\acute{a}x}$ y $\sigma_{m\acute{i}n}$ son respectivamente, los valores de la tensión máxima y mínima en cada ciclo.

En el año 1961 Paris, Gómez y Anderson propusieron una ley empírica que, utilizando conceptos de la mecánica lineal de la fractura, unificaba todos los datos experimentales de crecimiento de grietas por fatiga, descritos solo parcialmente por las leyes de crecimientos anteriores. Esta ley, conocida universalmente como «ecuación de Paris», se expresa por:

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m \quad (1.22)$$

Donde $\frac{da}{dN}$ es el incremento de longitud de la grieta por cada ciclo de fatiga y ΔK el intervalo cíclico del factor de intensidad de tensiones, definido anteriormente.

C y m son constantes que dependen del material y se determinan experimentalmente. El exponente m está situado entre dos y cuatro para aleaciones dúctiles. Estas constantes dependen de valores propios del material, como es la microestructura, y de las condiciones ambientales, como el propio ambiente y su temperatura, y C puede depender de la relación de cargas R , definida como:

$$R = \frac{\sigma_{m\acute{i}n}}{\sigma_{m\acute{a}x}} = \frac{K_{m\acute{i}n}}{K_{m\acute{a}x}} \quad (1.23)$$

Y tomada habitualmente con el valor $R = 0,1$. Las posibles dependencias de C y m con la frecuencia de la carga o la forma de la onda poseen una importancia secundaria.

Si el ciclo de cargas penetra en la zona de compresión, se toma $K_{\min} = 0$ convencionalmente, ya que el crecimiento de grieta tiene lugar en la parte de tracción del ciclo. Para fatiga por tracción, ΔK se refiere al factor de intensidad de tensiones en Modo I. Igualmente un incremento de factor de intensidad de tensiones K_{II} y K_{III} pueden emplearse para caracterizar la propagación de grietas en Modo II y III, respectivamente.

Aunque las relaciones anteriores fueron discutidas durante los primeros años de la década de 1960, los resultados presentados por Paris y Erdogan en 1963 sobre ensayos realizados en aluminio establecieron definitivamente su validez.

La ecuación de Paris, suele representarse en coordenadas doblemente logarítmicas, dando lugar a una recta de pendiente m como se presenta a continuación:

$$\frac{da}{dN} = C (\Delta K)^m \rightarrow \log \frac{da}{dN} = \log C + m \log \Delta K \quad (1.24)$$

En la Figura 1.11, se presentó la curva característica de una propagación de grieta en materiales dúctil.

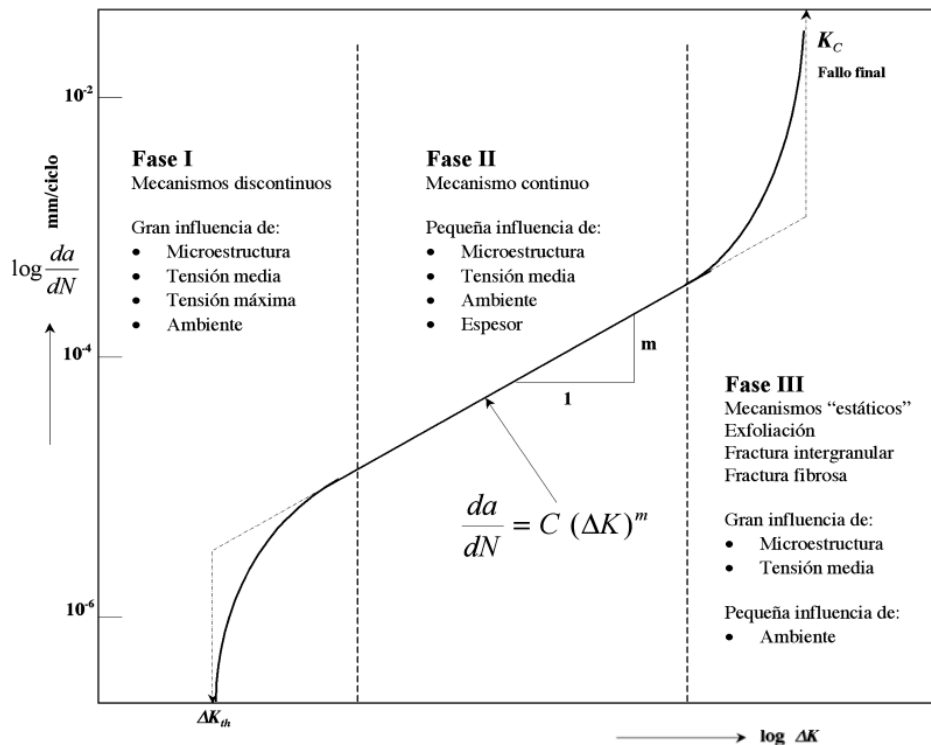


Figura 1.11. Curva característica de una propagación de grieta en material dúctil.

1.5 Método de los elementos finitos.

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 y física.

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.

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».

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.

Típicamente el análisis de los elementos finitos se programa computacionalmente para calcular el campo de desplazamientos y, posteriormente, a través de relaciones cinemáticas y constitutivas las deformaciones y tensiones respectivamente, cuando se trata de un problema de mecánica de sólidos deformables o más generalmente un problema de mecánica de medios continuos. 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.

Una importante propiedad del método es la convergencia; si se consideran particiones de elementos finitos sucesivamente más finas, la solución numérica

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380. www.uho.edu.cu
calculada converge rápidamente hacia la solución exacta del sistema de ecuaciones.

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).

Desde el punto de vista de la programación algorítmica modular las tareas necesarias para llevar a cabo un cálculo mediante un programa MEF se dividen en:

- ✓ Pre-proceso, que consiste en la definición de geometría, generación de la malla, las condiciones de contorno y asignación de propiedades a los materiales y otras propiedades. En ocasiones existen operaciones cosméticas de regularización de la malla y pre-condicionamiento para garantizar una mejor aproximación o una mejor convergencia del cálculo.
- ✓ Cálculo, el resultado del pre-proceso, en un problema simple no-dependiente del tiempo, permite generar un conjunto de N ecuaciones y N incógnitas, que puede ser resuelto con cualquier algoritmo para la resolución de sistemas de ecuaciones lineales. Cuando el problema a tratar es un problema no-lineal o un problema dependiente del tiempo a veces el cálculo consiste en una sucesión finita de sistemas de N ecuaciones y N incógnitas que deben resolverse uno a continuación de otro, y cuya entrada depende del resultado del paso anterior.
- ✓ Post-proceso, el cálculo proporciona valores de cierto conjunto de funciones en los nodos de la malla que define la desratización, en el post-proceso se

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380. www.uho.edu.cu
calculan magnitudes derivadas de los valores obtenidos para los nodos, y en ocasiones se aplican operaciones de suavizado, interpolación e incluso determinación de errores de aproximación.

1.5.1 Programa SolidWorks.

SolidWorks es un programa de diseño asistido por computadora para modelado mecánico desarrollado en la actualidad por SolidWorks 2013 Corp., una subsidiaria de Dassault Systèmes (Suresnes, Francia), para el sistema operativo Microsoft Windows. Es un modelador de sólidos paramétrico. Fue introducido en el mercado en 1995 para competir con otros programas CAD como Pro/ENGINEER, NX, Solid Edge, CATIA, y Autodesk Mechanical Desktop.

El programa permite modelar piezas y conjuntos y extraer de ellos tanto planos como otro tipo de información necesaria para la producción. Es un programa que funciona con base en las nuevas técnicas de modelado con sistemas CAD. El proceso consiste en trasvasar la idea mental del diseñador al sistema CAD, "construyendo virtualmente" la pieza o conjunto. Posteriormente todas las extracciones (planos y ficheros de intercambio) se realizan de manera bastante automatizada.

La empresa SolidWorks Corp. fue fundada en 1993 por Jon Hirschtick con su sede en Concord, Massachusetts y lanzó su primer producto, SolidWorks 95, en 1995. En 1997 Dassault Systèmes, mejor conocida por su software CAD CATIA, adquirió la compañía. Actualmente posee el 100% de sus acciones y es liderada por Jeff Ray.

En el mercado *DS SolidWorks Corp.* ha vendido sobre 1.5 millones de licencias de SolidWorks worldwide, que éste incluye una proporción grande de licencias educativas. Su base de usuario se extiende de individuos en corporaciones grandes, y cubren una sección representativa muy amplia de los segmentos de mercado de la fabricación. Las ventas comerciales se hacen a través de un canal indirecto, que

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380. www.uho.edu.cu incluye a distribuidores y a socios a través del mundo. En los Estados Unidos, el primer revendedor de SolidWorks, en 1995, era la tecnología automatizada, inc., establecida la jefatura en Chicago. Los productos competitivos de SolidWorks incluyendo directamente Creo Elements/Pro, Solid Edge, e Autodesk Inventor. También SolidWorks y sus socios agregan funcionalidad en su usos del mercado tiene lugar el desarrollo de análisis por elemento finito, como uno de los más relevante, entre otros. SolidWorks también ha licenciado su 3D que modelaba las capacidades a otros vendedores del software CAD, notablemente ANVIL.

Herramientas CAD de productividad:

- ✓ SolidWorks Toolbox: es una biblioteca de piezas que sus principales aplicaciones son para la selección automática de los sujetadores entre otras para así poder montarlos en la secuencia deseada.
- ✓ SolidWorks Utilities: es el software que deja a los diseñadores encontrar diferencias entre dos versiones de la misma parte, o localizar, modificar, y suprimir características dentro de un modelo.
- ✓ FeatureWorks: es el software de reconocimiento que deja a los diseñadores realizar cambios a los datos geométricos estáticos, aumentando el valor de archivos traducidos. Con Feature Works, los diseñadores pueden preservar o introducir nuevo intento de cálculo al traer los modelos 3D creados en el otro software en un ambiente o esquema parecido al del SolidWorks.
- ✓ SolidWorks Simulation: es una herramienta de la validación del diseño que demuestra a ingenieros cómo sus diseños se comportarán como objetos físicos.

CÁPITULO 2.

2.1 Introducción al capítulo.

Para realizar una simulación en cuanto a elementos finitos del comportamiento de la fatiga en componentes formados por placas perforadas y taladradas es necesario conocer los factores de la intensidad de la tensión (SIF) de los diversos frentes de la grieta que pueden llegar a aumentar gradualmente durante el crecimiento de la grieta. Es también necesario implementar procedimientos que simulan la evolución de la grieta después de los ciclos de la fatiga. [10]

En las últimas dos décadas se han desarrollado un número de estudios para lograr obtener los SIF para las grietas de las placas agujereadas sometidas a diversas condiciones de carga en 3D. Los métodos más usados para obtener los SIF son principalmente los analíticos o numéricos por el método de análisis de los elementos finitos, pero algunos son también experimentales, como por ejemplo, los métodos de foto-elasticidad.

Recientemente, la mayoría de los trabajos proporcionan los SIF para toda la línea de puntos que están presentes en la zona de la grieta, y no solamente para los del borde. [10]

Por estas razones anteriormente expuestas, es necesario subsecuentemente realizar una simulación teniendo en cuenta los elementos finitos en aras de obtener los SIF para cualquier forma de la grieta. El primer objetivo de este trabajo es establecer una metodología para el 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. [10]

Cuando se conocen los SIF para todos puntos de la grieta, es posible obtener, de acuerdo con la ley de París de los materiales, la nueva forma de la grieta después de un número de ciclos. Para lograr esto debe implementarse un procedimiento de los elementos finitos para simular gradualmente el proceso de la fatiga del tamaño

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380. www.uho.edu.cu

inicial de la grieta hasta llegar al final, sin hacer asunciones acerca de la forma de la grieta durante el crecimiento por fatiga de la misma. Los SIF para cada paso es el parámetro que define el siguiente lugar para cada punto de línea de la grieta. La vida de la fatiga para cualquier modelo puede ser simulada agregando el número de los ciclos para cada paso dependiendo solamente del tamaño y de la forma de la grieta inicial. [10]

2.2 Comportamiento experimental.

Para la caracterización del comportamiento del frente de la grieta, el modelo y/o probeta a estudiar para este caso es de 25 mm de grosor y de 60 mm de ancho y con agujeros de 9.4 mm de diámetros respectivamente, tanto perforado como taladrado; las mismas se muestra en la figura 2.1 (a). El modelo de la probeta sin sobrecordón cuenta con una geometría similar a la del modelo de la probeta con sobrecordón pero la diferencia que existe entre ambas está dada por el sobrecordón con un forma geométrica de 8 mm de ancho y 1 mm de alto como se muestra en la figura 2.1 (b). El material usado para este estudio fue un acero AISI 1015 (acero estirado en frío), con una composición química:

Aleación: 0.15 – 0.23 % de C, 0.1 - 0.2 % Si y 0.30 - 0.60 % Mn.

Con una tensión de:

$$\sigma_y = 385 \text{ Mpa}$$

Un Módulo Young de:

$$E = 205000 \text{ MPa}$$

Un coeficiente de Poisson de:

$$\nu = 0.29$$

Densidad de masa de:

$$\rho = 7870 \text{ kg/m}^3$$

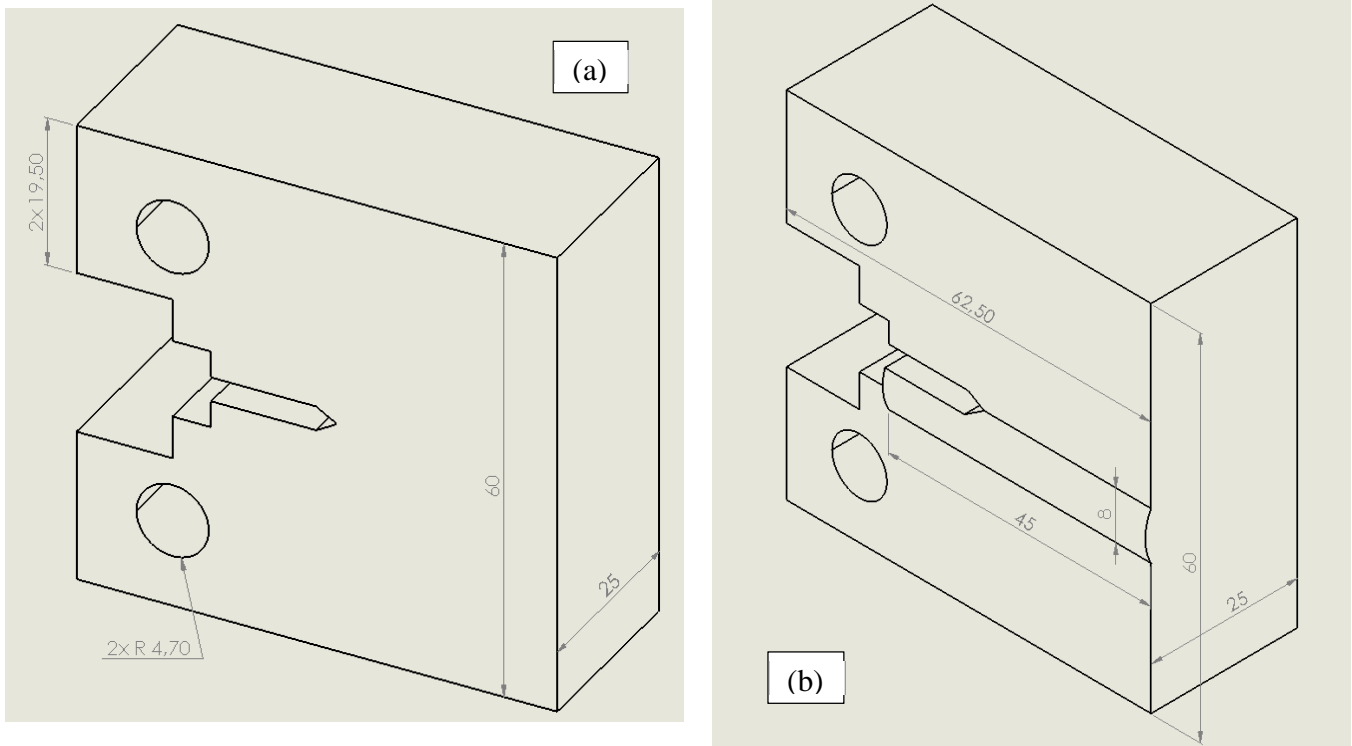


Figura 2.1: Dimensiones de la probeta usada con la presencia del sobrecordón y sin él (mm).

El comportamiento del crecimiento de la grieta se obtiene a partir de la ley de París:

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K_I^m \quad (2.1)$$

donde da/dN la tarifa de crecimiento de grieta expresada en $m/ciclos$ y ΔK_I está en $MPa\sqrt{m}$.

Las observaciones experimentales demostradas sugieren que en una simulación del comportamiento del frente de la grieta en la que se usan soluciones referentes al SIF (factor de intensidad de tensiones) con soluciones cuarto-elípticas de la grieta no son adecuadas para predecir el comportamiento de la fatiga. Por lo tanto, es necesario realizar un análisis por el método de los elementos finitos para así poder determinar los SIF del frente real de la grieta durante el avance de la misma como un primer paso a seguir en la modelación de la vida de la fatiga de estos componentes.

2.3 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 de diseño. El mallado automático del software genera una malla 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.

El software estima un tamaño de elemento global para el modelo tomando 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 suficientes, 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.

2.3.1 Mallado de la probeta con y sin sobrecordón.

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 elemento de mallado de pequeño tamaño y respectivamente ir incrementando el tamaño mientras 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 2.2 el control del mallado.

La línea de partición que se crea con el fin de poder realizar el control de mallado en el modelo, por lo cual se define mediante un croquis realizado coincidentemente a ambas caras laterales con un radio de curvatura de 4 mm y con ubicación detallada en sí como se muestra en la figura 2.2, logrando así obtener en esa área los elementos de menor tamaño cerca de la grieta a analizar.

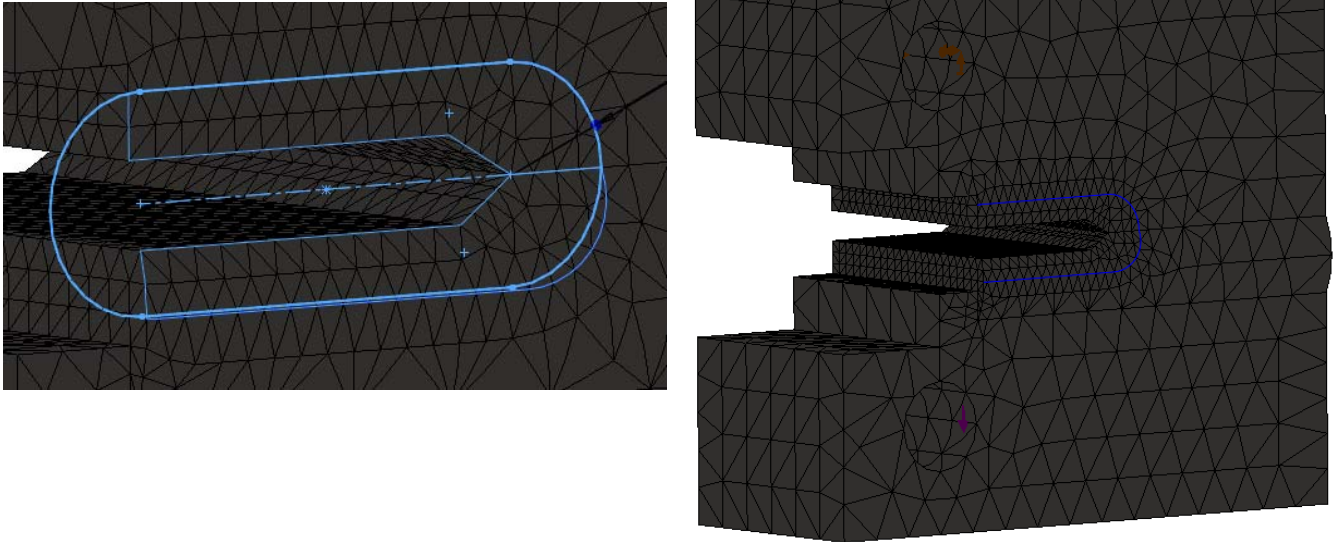


Figura 2.2: Mallado de la probeta sin el sobrecordón.

En las tablas que se muestra a continuación podemos observar los detalles de uno de los mallados que se realizaron a la probeta sin el sobrecordón. Tablas 2.1 y 2.2.

Tabla 2.1: Control de malla detalles

Nombre del estudio	Estudio 1 (-Predeterminado-)
Tipo de malla	Malla sólida
Entidades	13 Caras seleccionadas
Unidades	mm
Tamaño	1,2
Coeficiente	1,5

Tabla 2.2: Malla detalles:

Tipo de Malla	Malla sólida
Mallador utilizado	Malla estándar
Transición automática	Desactivado
Incluir bucles automáticos de malla	Desactivado
Puntos jacobianos	4 punto
Control de malla	Definida
Tamaño máximo de elemento	4.33665 mm
Tolerancia	0,15 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden

Número total de nodos	31680
Número total de elementos	20739
Cociente de aspecto máximo	9,8083
Porcentaje de elementos con cocientes de aspecto < 3	99,7
Porcentaje de elementos con cocientes de aspecto > 10	0
% de elementos distorsionados (jacobianos)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss)	00:00:05

Para el mallado de la probeta con el sobrecordón se partió de los mismos conceptos que se emplearon en la otra probeta y así desarrollarla, lo que condujo a una dificultad al realizar la línea de partición sobre el área de estudio pues para la geometría sobre el cordón de soldadura tuvo que proyectarse una curva sobre la superficie de la probeta y así poder lograr la separación que se desea obtener para la realización del control de mallado.

Para la obtención del tamaño óptimo del mallado, los estudios realizados anteriormente sirvieron de base, en los cuales las tensiones variaron con respecto a los tamaños de malla; por lo tanto, se procedió a calcular el por ciento de error %E para determinar el tamaño óptimo del mallado, resultado que debió ser menor que el 5% y se obtuvo mediante ecuación 2.2, cuyos resultados se recogieron en la tabla 2.3.

$$\% E = \frac{\sigma_{mayor} - \sigma_{menor}}{\sigma_{mayor}} * 100 \quad (2.1)$$

Se partió de un tamaño de mallado de 1.4 mm para así obtener el valor de tensión máxima y respectivamente ir variando el tamaño del mallado.

Tabla 2.3: Determinación del tamaño del mallado:

Tamaño de mallado (mm)	$\sigma_{m\acute{a}x}$	%E
1,4	376,8	
1,2	361,0	4,19
1,0	337,7	6,45

Por lo que se puede apreciar en la tabla 2.3, el mallado de 1.2 mm es el de tamaño óptimo ideal, dado que la convergencia obtenida es de 4,2%, lo que conlleva a calcular los estudios con este tamaño de malla.

2.4 Técnicas numéricas.

Para modelar numéricamente la propagación de la grieta es necesario realizar un cálculo exacto de los SIF, que alternadamente depende de la determinación correcta de la tensión local y de los campos de desplazamiento delante de la grieta.

Para este elemento en singular, los nodos de medio lado a lo largo de la línea nodal que nacen desde la punta de la grieta son movidos a posiciones de un cuarto lado, para poder simular la singularidad de las raíces cuadradas de las tensiones y precisiones de los valores cerca de la grieta. Este elemento recibe el nombre de elemento del cuarto lado.

Actualmente existen dos métodos para la obtención del factor de intensidad de tensión como son:

1. La técnica de correlación del desplazamiento (DCT).
2. La técnica de desplazamiento del cuarto lado (QPDT).

La técnica de DCT utiliza los desplazamientos diferenciados de los nodos adyacentes a través de la grieta para calcular los factores de intensidad de tensión. Siendo la expresión K_I ;

$$K_I = \frac{E}{8(1-\nu^2)} \sqrt{\frac{2\pi}{L}} [4(V_2 - V_4) - (V_3 - V_5)] \quad (2.2)$$

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380. www.uho.edu.cu

Donde E es el Módulo Young, L es la longitud de los elementos singulares (1-3 o 1-5 en la figura 2.2), ν es el cociente de Poisson, y el V_i son los desplazamientos normales en la superficie de la grieta.

En contraste, el QPDT utiliza solamente los dos nodos adyacentes en la grieta para calcular los factores de intensidad de tensión, según se muestra en la figura 2.4.

La expresión para calcular los factores de intensidad de tensión que se usan por el

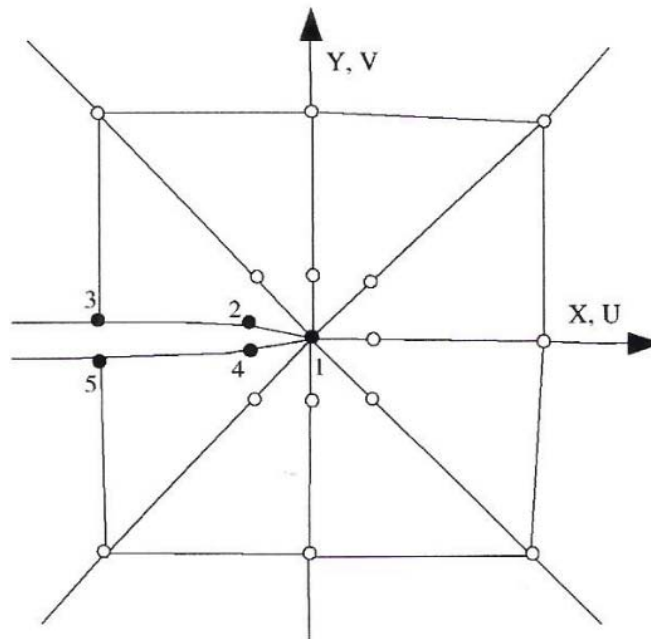


Figura 2.4: Elementos de cuatro puntos para desarrollar los cálculos del factor de intensidad de tensión.

método QPDT es similar al método DCT. (2.3)

$$K_I = \frac{E}{4(1 - \nu^2)} \sqrt{\frac{2\pi}{L_{1/4}}} (V_2 - V_4)$$

Está dado por donde $L_{1/4}$ es la longitud desde el 4^{to} nodo hasta el nodo del borde de la grieta, asociado con 1-2 o 1-4 que se muestra en la figura 2.4.

Hay otros métodos indirectos para calcular el SIF o su equivalente para una determinada grieta, que se basan según un cierto índice de liberación de la energía

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380. www.uho.edu.cu
por la unidad de la superficie de la grieta G , o el integral de contorno J de Rice-Cherepanov. Para los materiales elásticos y la relación que existe entre J -integral, G , siendo el factor de intensidad de tensión K_I , podemos decir que la expresión es:

$$J = G = \frac{(1 - \nu^2)}{E} K_I^2$$

La integral J se puede calcular usando la extensión virtual de la grieta (VCE por sus siglas en inglés), o por la integral del volumen que se realiza sobre una capa de los elementos que rodea la extremidad de la grieta. La integral J es la apropiada para el análisis elástico-plástico para así definir varias trayectorias.

El método a utilizar para el cálculo de los factores de intensidad de tensiones para ambos casos es el método de la técnica de correlación del desplazamiento (DCT), según lo anteriormente expuesto, con la utilización de la ecuación 2.2.

Siendo: El Módulo Young $E = 205000 \text{ MPa}$, el coeficiente de Poisson $\nu = 0,29$, y siendo los valores V (1-5) los resultados a obtener en la simulación por el método de los elementos finitos.

Siendo L la longitud de la grieta, representado en la figura 2.5, con valor de 16,38 mm:

Y para ya obtener los valores de desplazamientos normales y de tensión (máxima y mínima) de las probetas se desplegó el cálculo de los mismos mediante el método de los elementos finitos y por lo que se demostraron los resultados en las figuras que se mostrarán en el epígrafe 2.7.

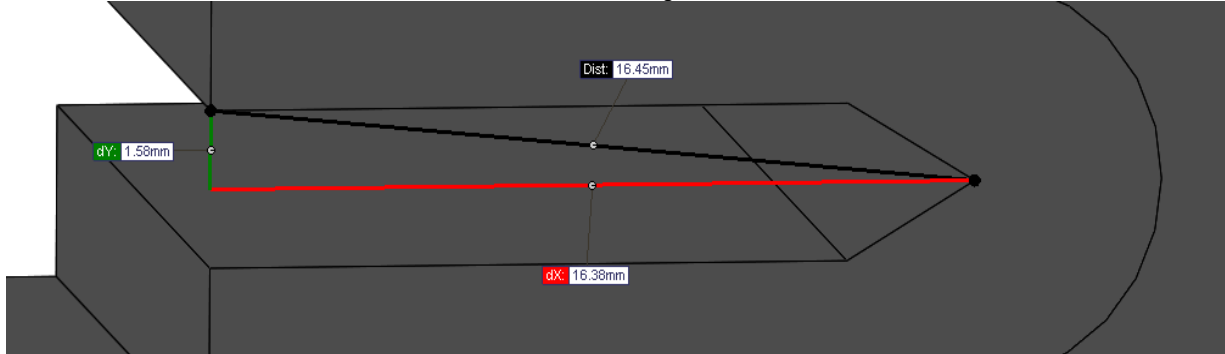


Figura 2.5: Representación de la longitud de la grieta.

Por lo antes expuesto en este epígrafe, se determinó que el método a utilizarse en este trabajo es: *La técnica de correlación del desplazamiento (DCT)*, dado que es el método que utiliza un mayor número de nodos a analizar en su estudio, y por lo tanto, puede arrojar un resultado más acertado y adecuado a la realidad.

Consecuentemente, para la obtención de los valores relacionados con el factor de intensidad de tensiones se desarrollaron 10 estudios por el paquete de análisis SolidWorks Simulation de la versión 2013, los desplazamientos que se han de introducir en la técnica de correlación de desplazamiento.

Estos 10 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 2.4 a continuación.

Tabla 2.4: Tamaños de grietas:

No.	Tamaño de grieta (mm)
1	0,5
2	0,75
3	1
4	1,2
5	1,4
6	1,6
7	1,8
8	2
9	2,2
10	2,4

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380. www.uho.edu.cu
2.5 Representación de las restricciones y fuerzas aplicadas en el estudio.

La sujeción de la probeta está dada por la importación en una de las caras que presenta la probeta con el tipo de geometría fija (figura 2.6 a) y con una fuerza aplicada en la otra cara con respecto a ella con un valor de 10 kN (figura 2.6 b), en dirección contraria, por lo que podemos apreciar explícitamente en la figura 2.7.

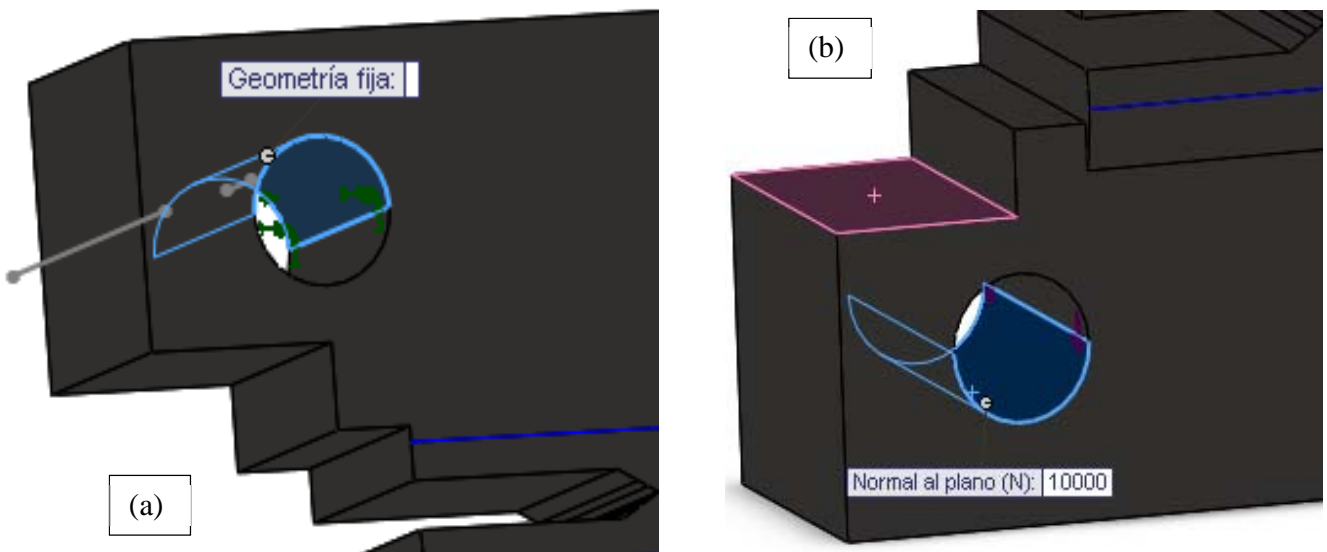


Figura 2.6: Representación de la sujeción y fuerza aplicada a las probetas.

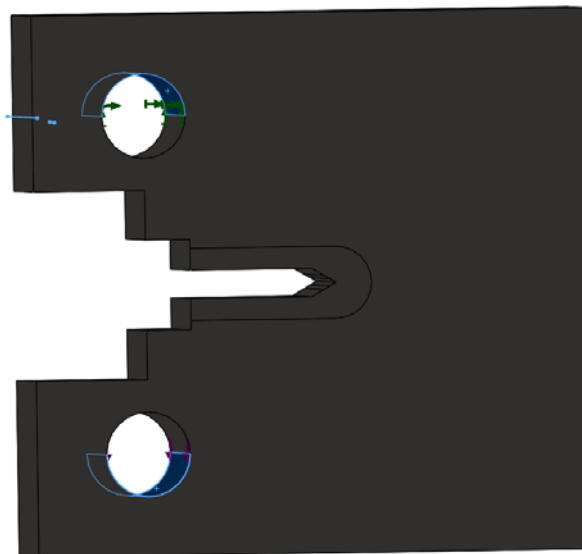


Figura 2.7: Representación explícitamente de la sujeción y fuerza aplicada a las

2.6 Valores de desplazamientos y de tensiones (máximas y mínimas).

Las figuras que se muestran en los sub-epígrafe 2.6.1 y 2.6.2 son ejemplos de la simulación obtenida donde en ella se muestran los resultados para ambos estudios que serían, con la presencia del sobrecordón y sin la presencia del sobre cordón, por lo que en general como se expuso anterior se realizaron 10 estudios que nos brinda los valores de desplazamiento y tensiones para las distintas variaciones de grietas estudiadas, y por consiguiente se acordó mostrar solamente en este informe nada más que dos estudios de los que se desarrollaron con sus resultados.

El primer y segundo estudio seleccionado se realizó con un tamaño de grieta de 0,5 mm y 2,4 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.

2.6.1 Valores de la probeta sin el sobrecordón.

En las figuras que se muestran a continuación se pueden apreciar los valores de desplazamiento y tensiones en general para este caso.

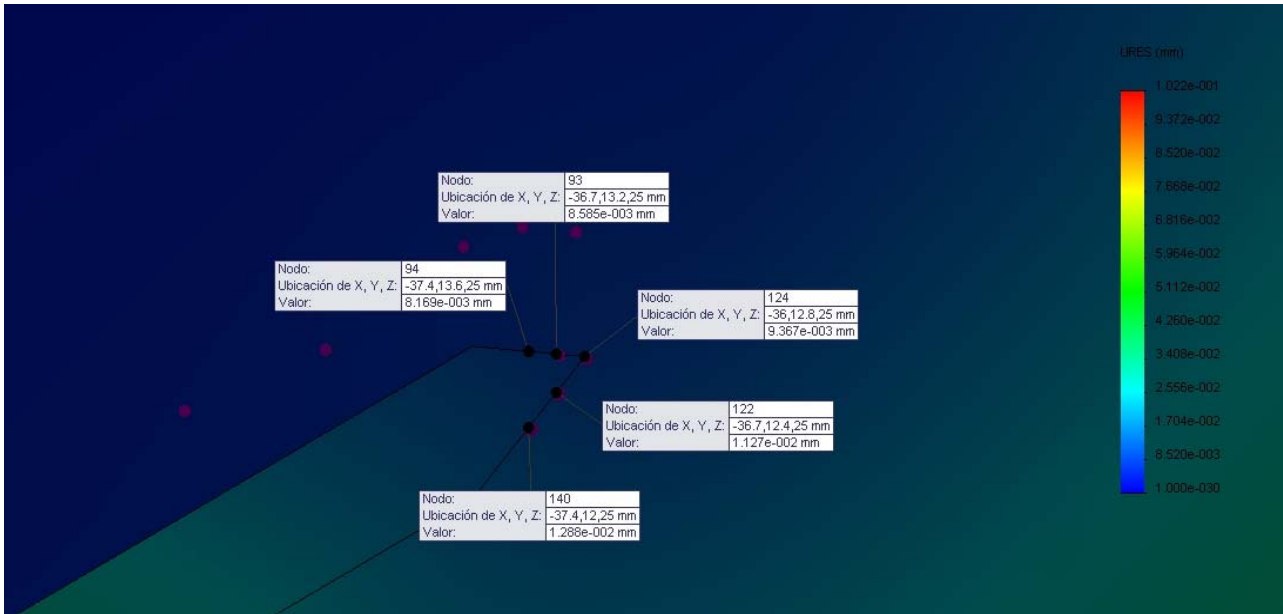


Figura 2.7: Valores de desplazamiento para la grieta de 0.5 mm.

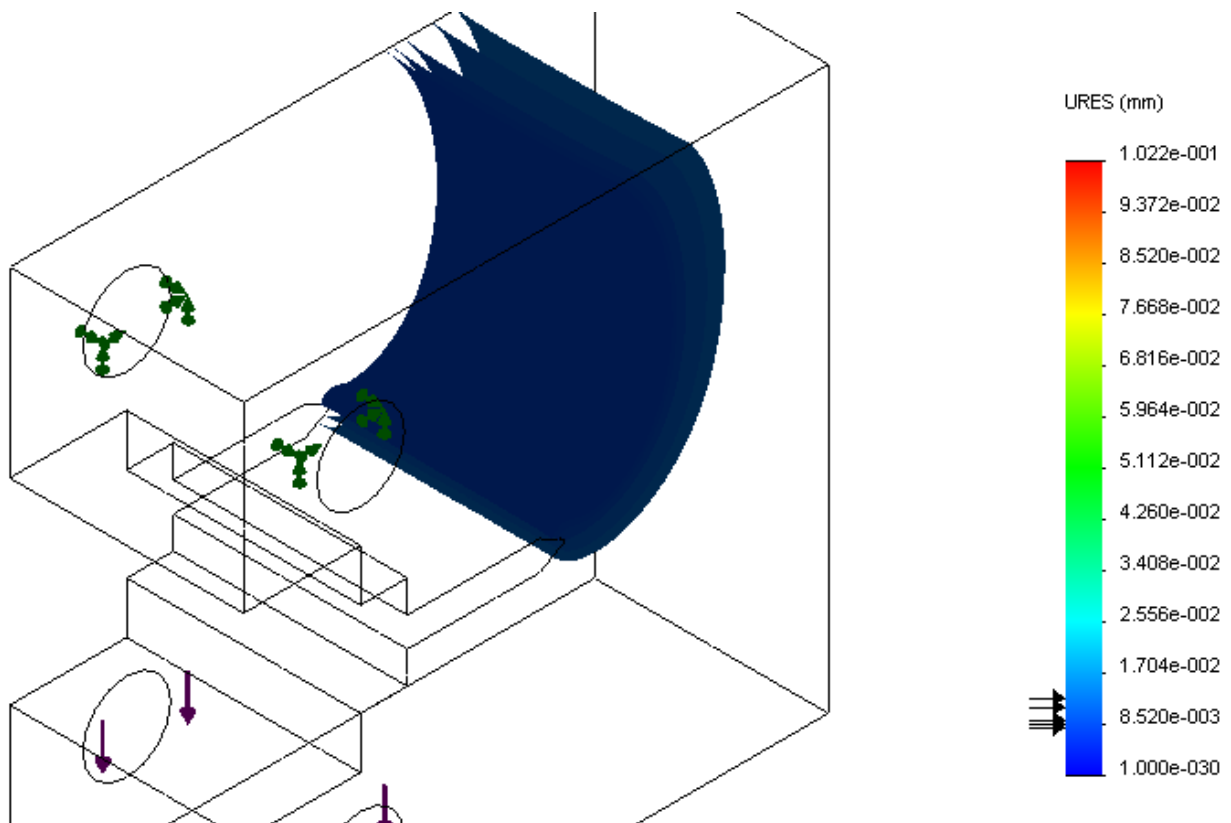


Figura 2.8: Vista de selección del trazado iso con los puntos de desplazamientos para la grieta de 0.5 mm.

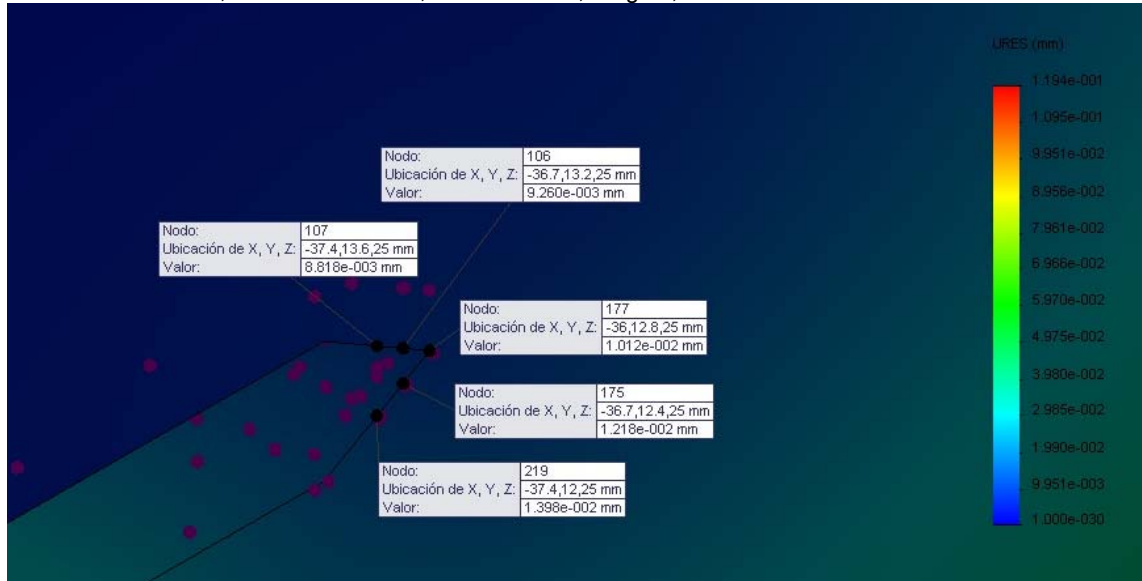


Figura 2.9: Valores de desplazamiento para la grieta de 2.4 mm.

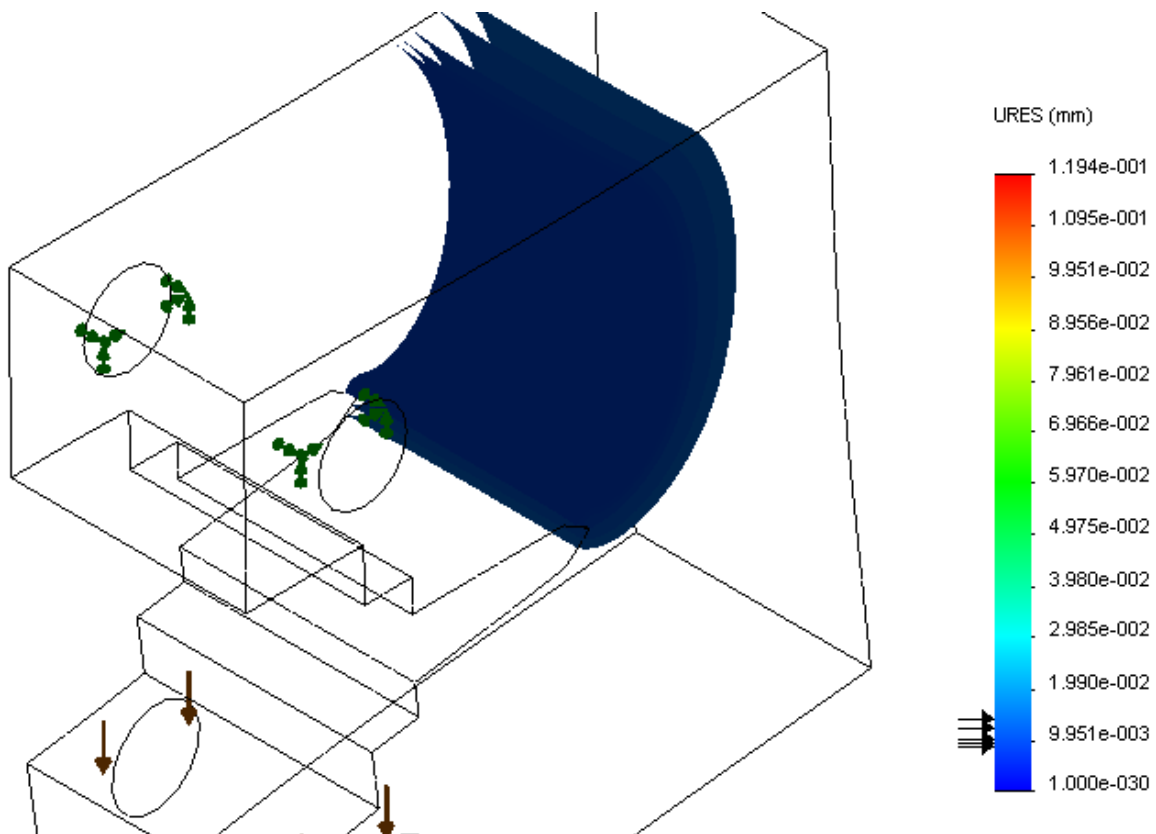


Figura 2.10: Vista de selección del trazado iso con los puntos de desplazamientos para la grieta de 2.4 mm.

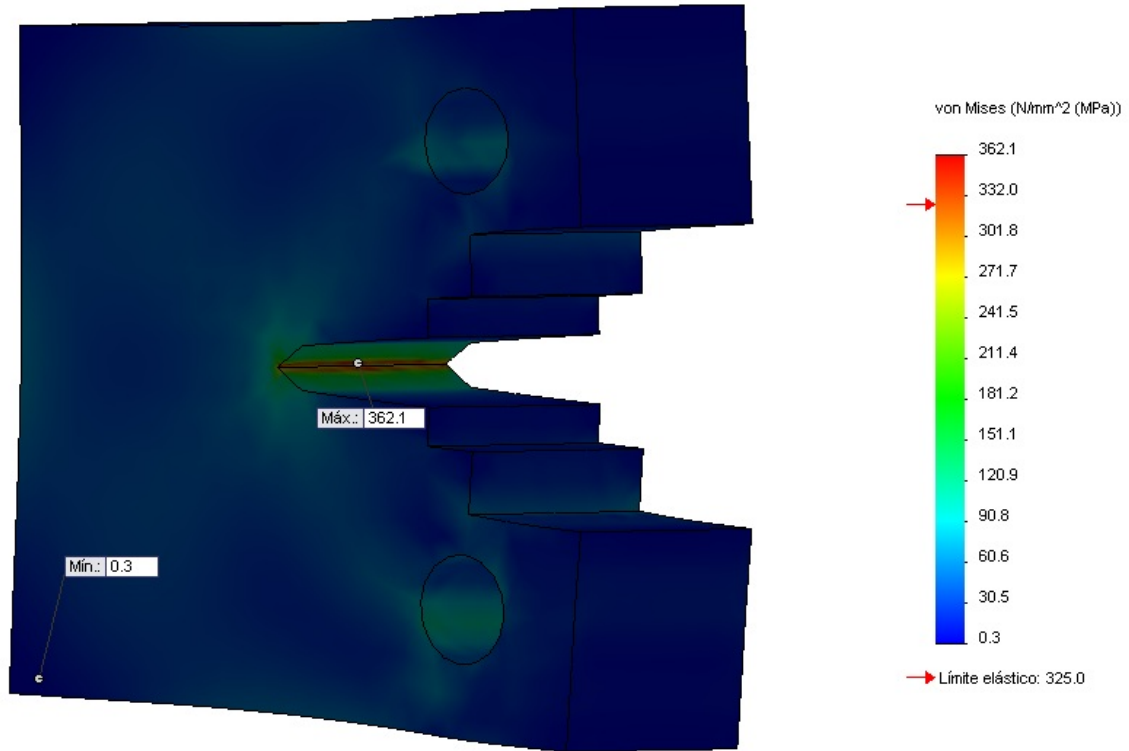


Figura 2.11: Valores de tensión (máxima y mínima) para la grieta de 0.5 mm.

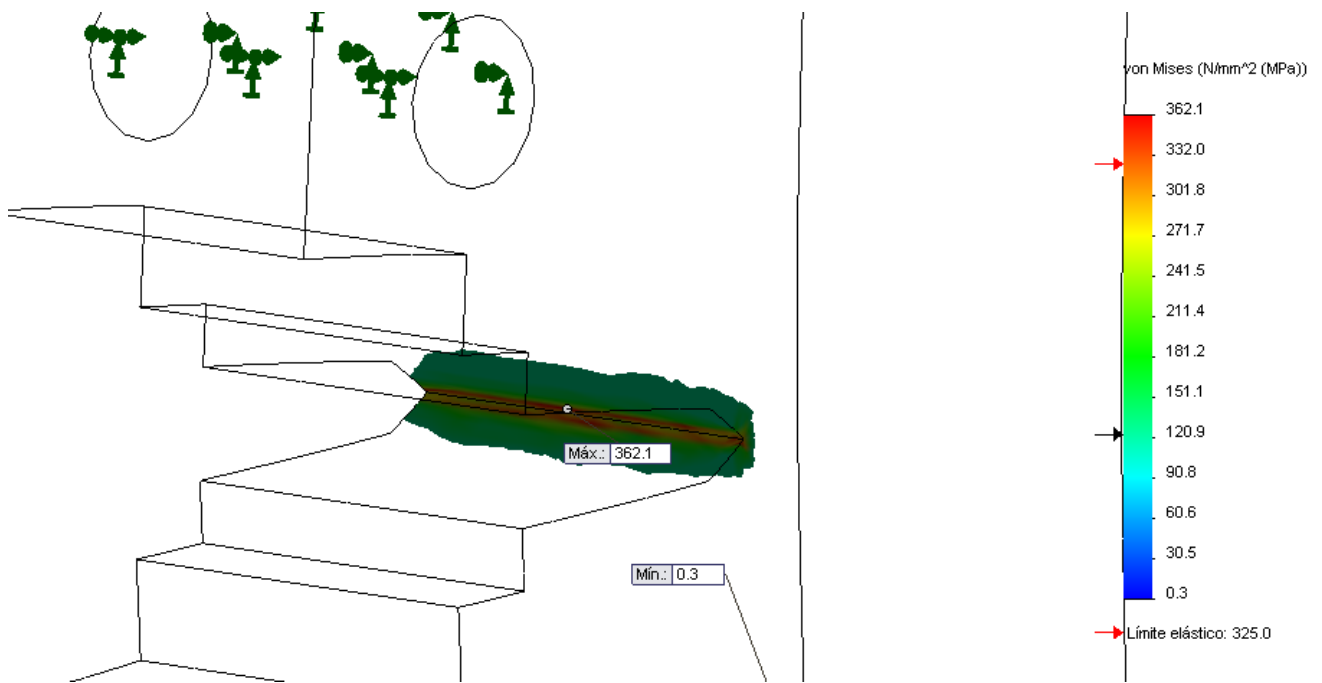


Figura 2.12: Vista de selección del trazado iso con los valores de tensión máximos para la grieta de 0.5 mm.

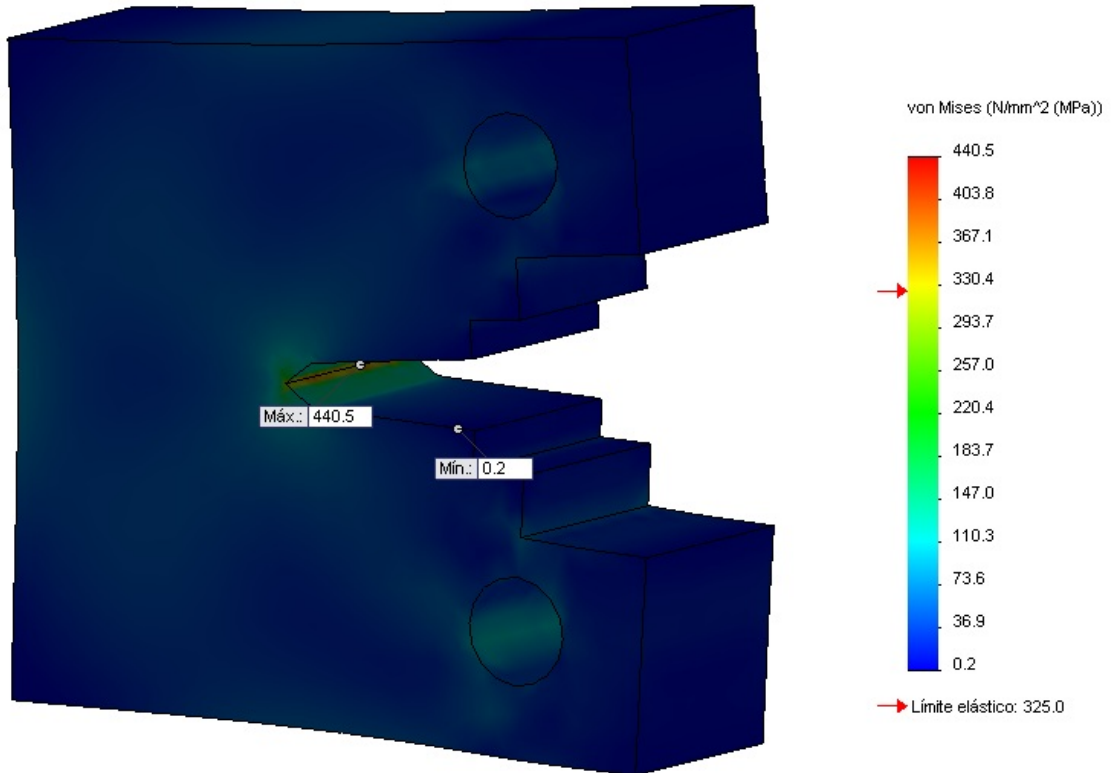


Figura 2.13: Valores de tensión (máxima y mínima) para la grieta de 2.4 mm.

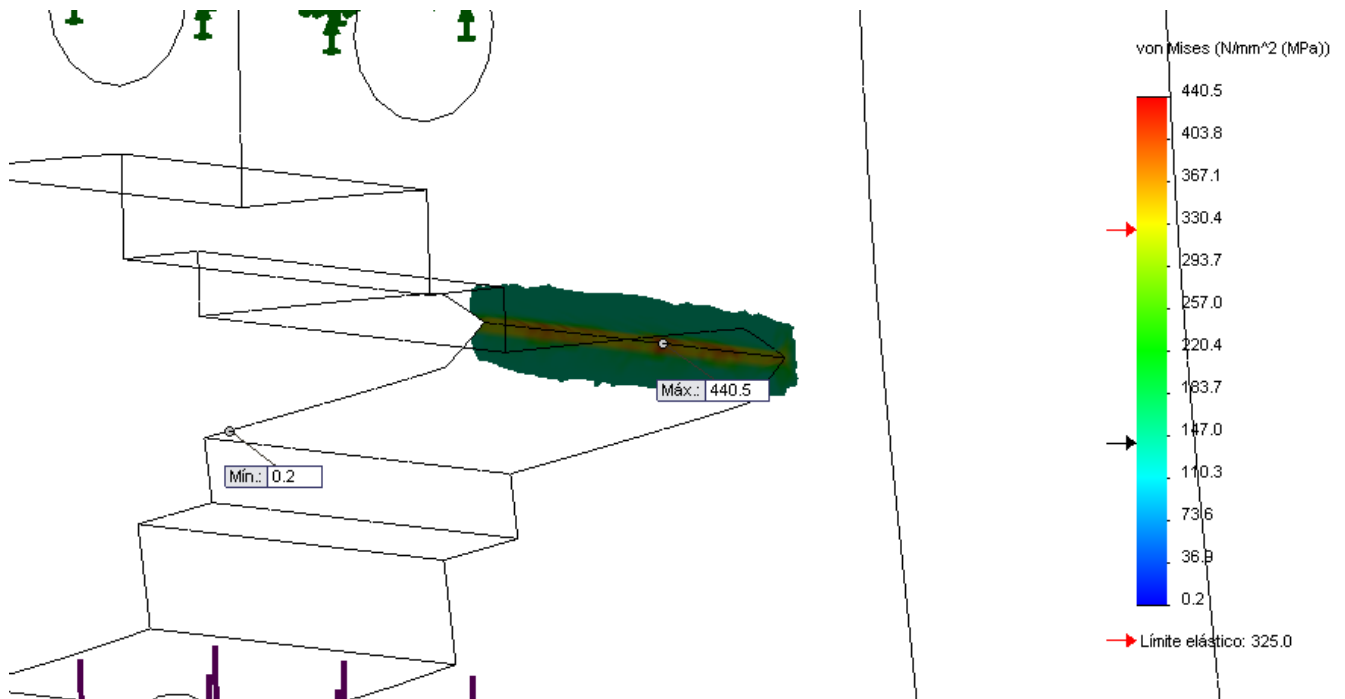


Figura 2.14: Vista de selección del trazado iso con los valores de tensión máximos para la grieta de 2.4 mm.

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380. www.uho.edu.cu
1.6.2 Valores de la probeta con el sobrecordón.

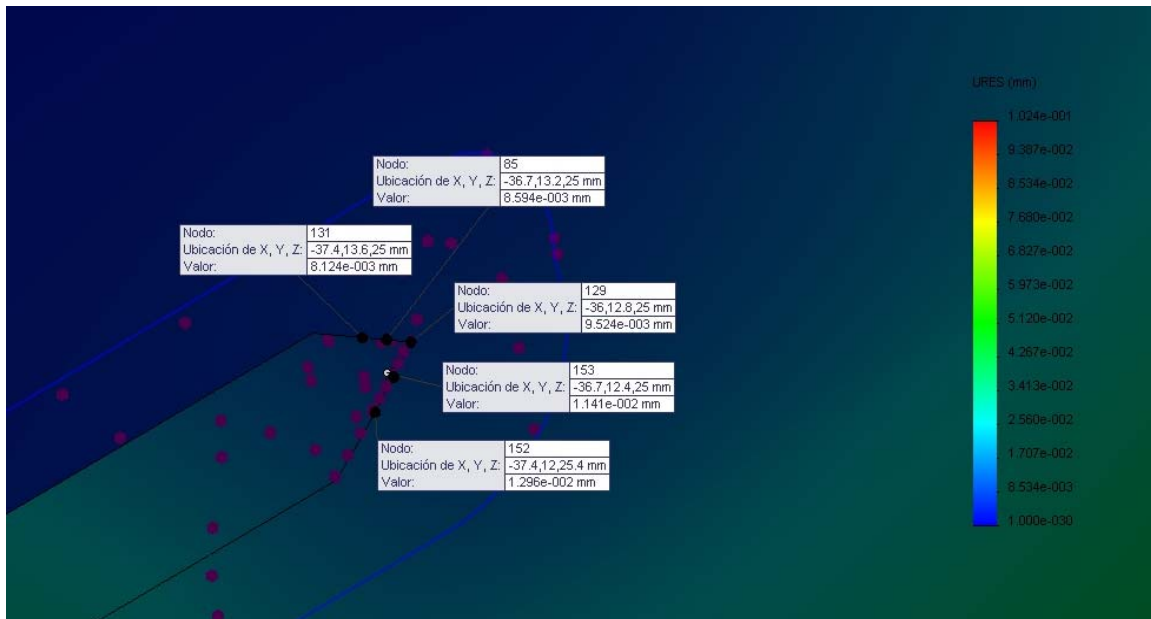


Figura 2.15: Valores de desplazamiento para la grieta de 0.5 mm.

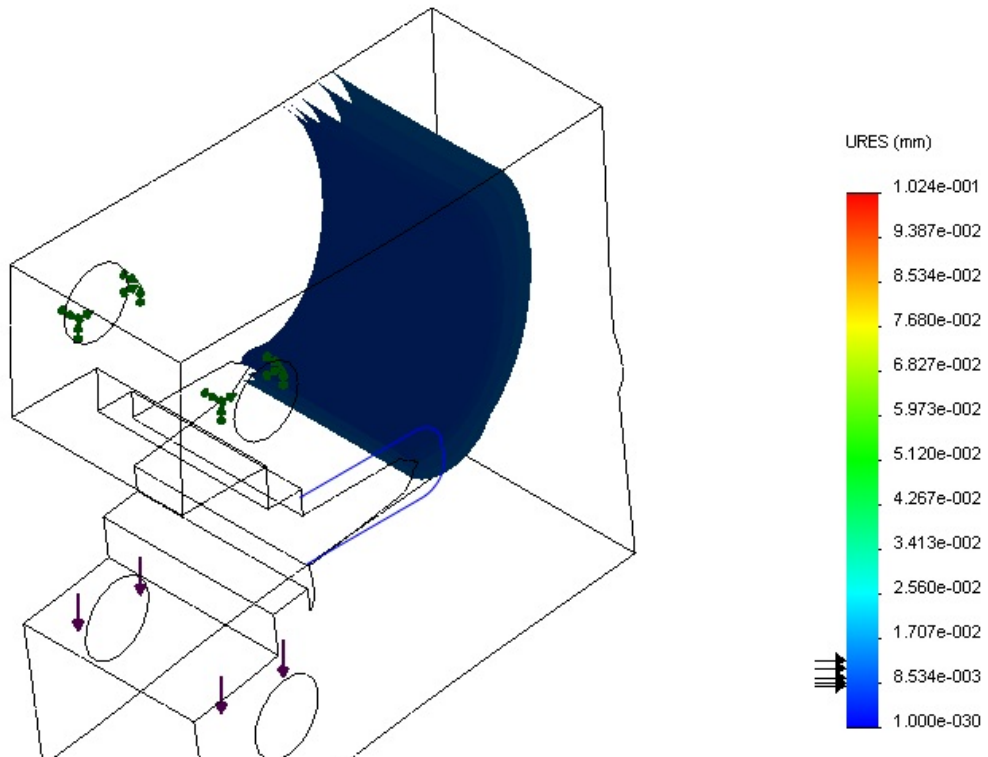


Figura 2.16: Vista de selección del trazado iso con los puntos de desplazamientos para la grieta de 0.5 mm.

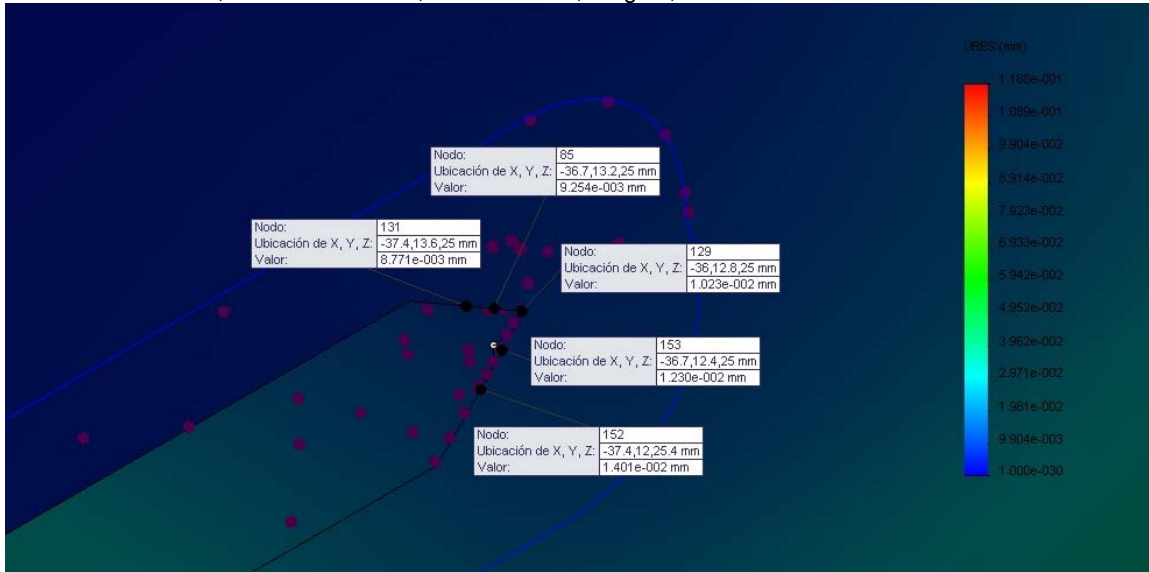


Figura 2.17: Valores de desplazamiento para la grieta de 2.4 mm.

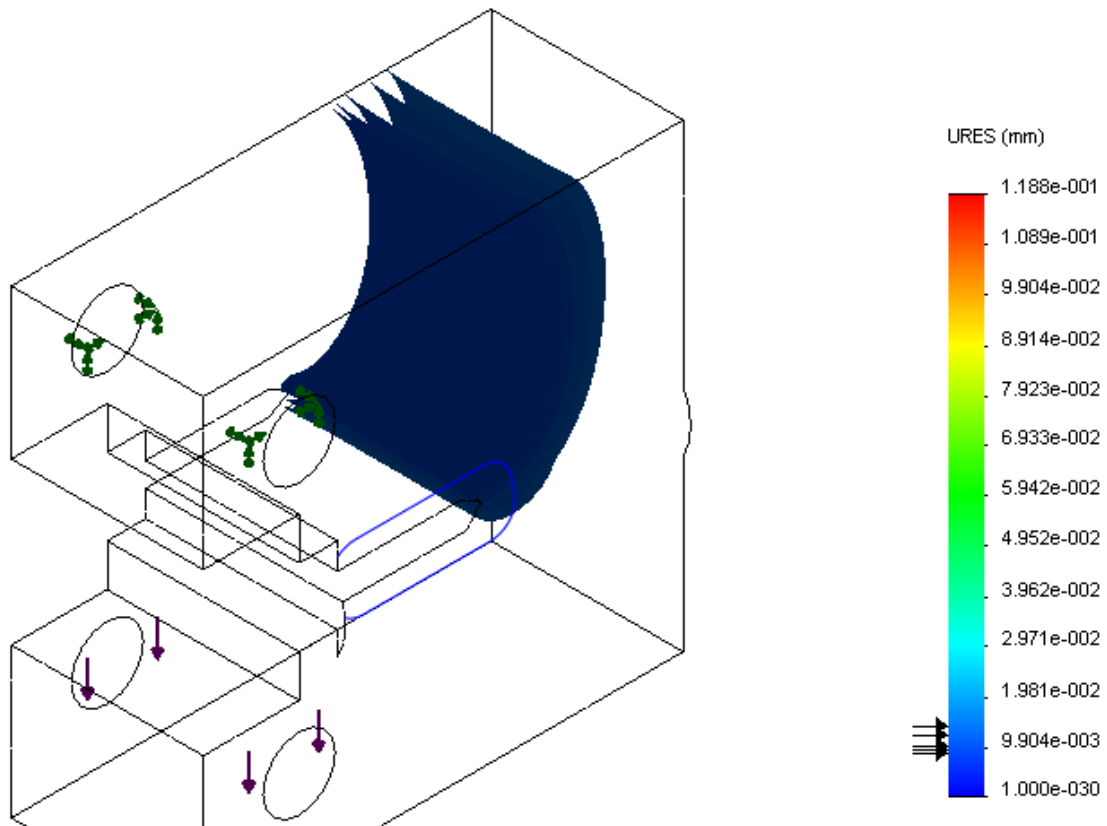


Figura 2.18: Vista de selección del trazado iso con los puntos de desplazamientos para la grieta de 2.4 mm.

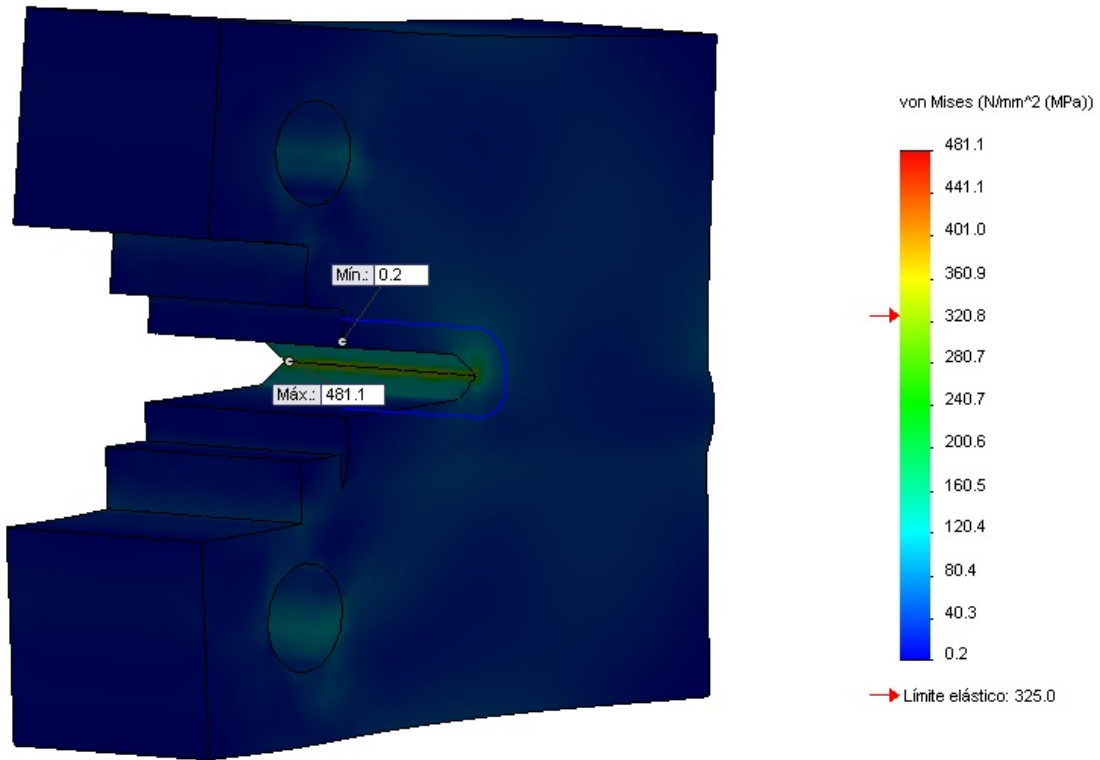


Figura 2.19: Valores de tensión (máxima y mínima) para la grieta de 0.5 mm.

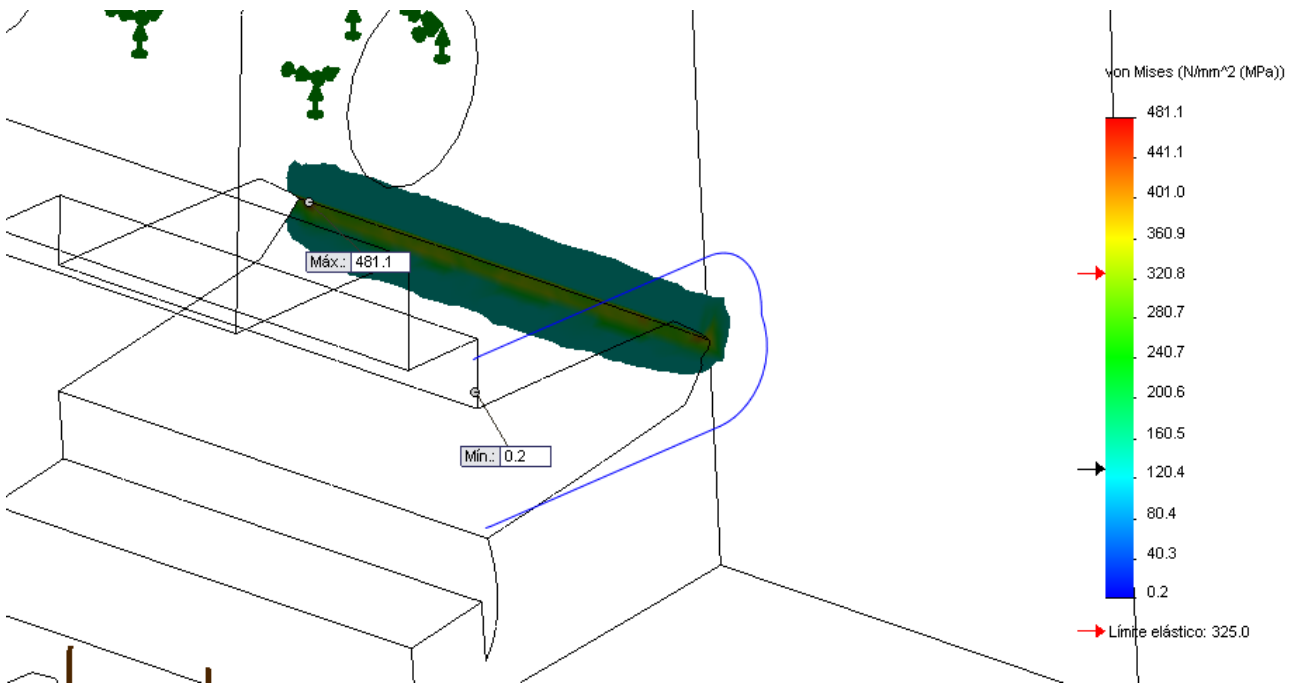


Figura 2.20: Vista de selección del trazado iso con los valores de tensión máximos para la grieta de 0.5 mm.

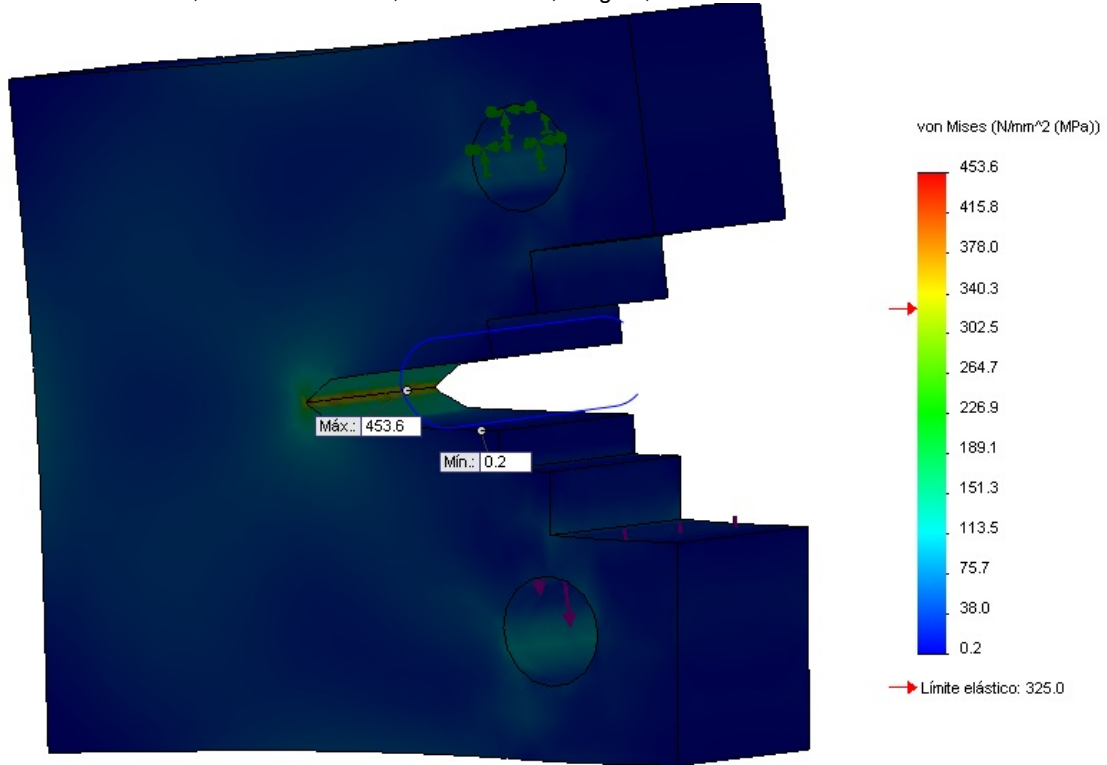


Figura 2.21: Valores de tensión (máxima y mínima) para la grieta de 2.4 mm.

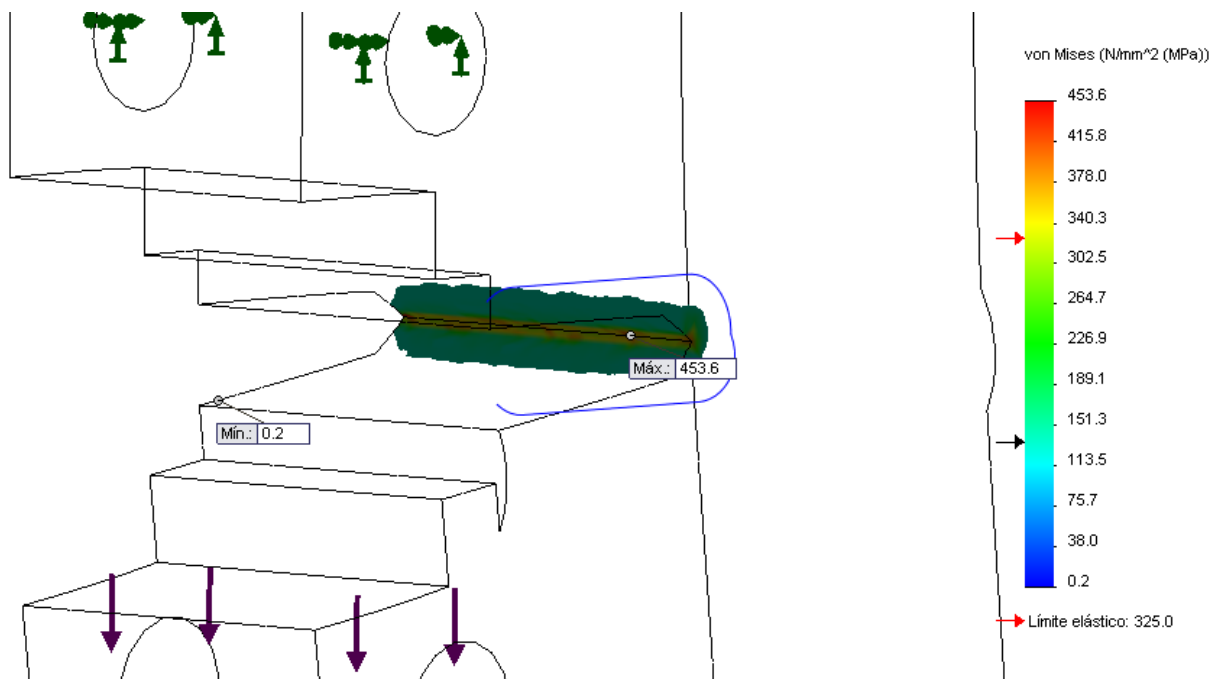


Figura 2.22: Vista de selección del trazado iso con los valores de tensión máximos para la grieta de 2.4 mm.

2.7 Cálculo de los valores de intensidad de tensiones para ambos casos.

El cálculo de los desplazamientos normales de las probetas con y sin sobrecordón conlleva a poder concretar la obtención de los valores de intensidad de tensiones K .

Siendo:

- ✓ Módulo de Young, (MPa): $E = 20500$
- ✓ Coeficiente de Poisson: $\nu = 0,29$
- ✓ Longitud, (mm): $L = 16,38$

Pasamos a:

$$K_I = \frac{E}{8(1-\nu^2)} \sqrt{\frac{2\pi}{L}} [4(V_2 - V_4) - (V_3 - V_5)] \quad (2.2)$$

Entonces:

$$K = \frac{205000}{8(1-0,29^2)} \sqrt{\frac{2\pi}{16,8}} [4(V_2 - V_4) - (V_3 - V_5)] \quad (2.5)$$

Los resultados obtenidos sobre los desplazamientos normales desde la simulación de las probetas con y sin sobrecordón, nos llevan a la inclusión de dichos valores dentro de la ecuación (2.5) para así obtener definitivamente la cuantía del factor de intensidad de tensiones. Siendo los valores que se muestran en las tablas 2.3 y 2.4 resultados que contienen valores de desplazamiento normales, y respectivamente, el resultado que se obtuvo por la ecuación 2.5 el valor de (K).

De esa forma, en los sub epígrafes se muestran a continuación algunas tablas con estos valores, y dentro de la misma también se introdujo el tamaño mínimo de los elementos del mallado en la zona específica que se detalló anteriormente en el epígrafe que 2.5 sobre los parámetros de mallado que se realizaron, y es importante destacar que con ambos casos se empleó la misma metodología. Por lo que los

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380. www.uho.edu.cu
 valores de intensidad de tensiones se dan en MPa y los desplazamientos están en mm.

2.7.1 Factor de intensidad de tensiones para el caso con el sobrecordón.

Tabla 2.3: Valores de desplazamientos e intensidad de tensiones.

	No.	Tamaño de grieta (mm)	V1	V2	V3	V4	V5	K
Con Sobrecordón	1	0,5	0,009524	0,008594	0,008124	0,01141	0,01296	139,974862
	2	0,75	0,009596	0,008675	0,008212	0,01153	0,01309	140,182746
	3	1	0,009671	0,00873	0,008262	0,01164	0,01322	141,915108
	4	1,2	0,009682	0,008785	0,008319	0,01172	0,01332	143,162409
	5	1,4	0,00977	0,008864	0,008388	0,01182	0,01343	144,548298
	6	1,6	0,009861	0,008942	0,00846	0,01189	0,01353	147,0429
	7	1,8	0,009897	0,008962	0,008472	0,01195	0,01362	149,67609
	8	2	0,01007	0,009111	0,008632	0,01208	0,01376	149,606796
	9	2,2	0,01009	0,009101	0,008615	0,01214	0,01384	151,477747
	10	2,4	0,01023	0,009254	0,008771	0,0123	0,01401	151,962808

2.7.2 Factor de intensidad de tensiones para el caso sin el sobrecordón.

Tabla 2.4: Valores de desplazamientos e intensidad de tensiones.

	No.	Tamaño de grieta (mm)	V1	V2	V3	V4	V5	K
Sin Sobrecordón	1	0,5	0,009367	0,008585	0,008169	0,01127	0,01288	140,390629
	2	0,75	0,009435	0,008639	0,008213	0,01139	0,01304	143,855354
	3	1	0,009583	0,008742	0,00832	0,01151	0,01319	145,65701
	4	1,2	0,009633	0,0088	0,008379	0,01161	0,0133	146,280661
	5	1,4	0,009713	0,008874	0,008459	0,01169	0,01339	146,557839
	6	1,6	0,009772	0,008942	0,008516	0,01181	0,01353	148,705968
	7	1,8	0,009828	0,009045	0,008628	0,01191	0,01364	148,775262
	8	2	0,009894	0,009078	0,008653	0,01198	0,01374	151,408453
	9	2,2	0,01	0,009158	0,008742	0,01209	0,01386	151,477747
	10	2,4	0,01012	0,00926	0,008818	0,01218	0,01398	155,358238

2.8 Obtención del factor geométrico dependiente de la geometría de la grieta.

Luego de haber obtenido los valores de intensidad de tensiones en el epígrafe anterior pasamos a el procedimiento de cálculo para la determinación del factor geométrico dependiente de la geometría de la grieta (Y).

Por lo que la función geométrica de la grieta se obtiene mediante la ecuación (2.6) que se muestra a continuación:

$$K = Y * \Delta\sigma\sqrt{\pi a} \quad (2.6)$$

$$\Delta\sigma = \sigma_{m\acute{a}x} - \sigma_{m\acute{i}n} \quad (2.7)$$

Donde:

- ✓ Los valores de intensidad de tensiones se muestran en la tabla 2.1 (K).
- ✓ El factor geométrico dependiente de la geometría de la grieta (Y).
- ✓ Diferencia de tensión ($\Delta\sigma$), ecuación 2.7.
- ✓ La longitud de la grieta (a).

Por lo que el procedimiento para ello es graficar con los valores de intensidad de tensiones (ΔK) contra la diferencia de tensión que multiplica una raíz cuadrática de la longitud de la grieta por el número pi: ($\Delta\sigma\sqrt{\pi a}$). Para dividirlo la obtención del factor geométrico dependiente de la forma de la grieta se muestra en los sub-epígrafes 2.9.1 en el caso de la presencia del sobrecordón y el 2.9.2 con la presencia del sobrecordón.

2.8.1 Factor geométrico dependiente de la geometría de la grieta en el caso de la presencia del sobrecordón.

Inicialmente para poder obtener o saber cuáles son los valores reales de tensión máxima y mínima deben conseguirse en los estudios de la probeta que presenta el sobrecordón, siendo así estos los valores que se muestran en la tabla 2.5 que nos detalla cuales son los valores taxativamente sobre la diferencia de tensiones que está presente en cada mallado realizado a esta probeta, por lo que de manera

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380. www.uho.edu.cu
 independiente se encuentran particularmente en los mallados utilizados, por lo que

	No.	Tamaño de grieta (mm)	σ máx (MPa)	σ mín (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)
Con Sobrecordón	1	0,5	481,1	0,2	480,9
	2	0,75	470,2	0,3	469,9
	3	1	453,6	0,2	453,4
	4	1,2	445,5	0,3	445,2
	5	1,4	442,0	0,2	441,8
	6	1,6	434,5	0,2	434,3
	7	1,8	423,3	0,2	423,1
	8	2	418,5	0,2	418,3
	9	2,2	418,4	0,1	418,3
	10	2,4	412,4	0,2	412,2

se puede apreciar en la tabla de los valores.

Tabla 2.5: Valores de tensiones.

Luego de haber conocido los valores de tensiones y que de antemano se conocen, se comprendió que para poder obtener el factor geométrico dependiente de la forma de la grieta se debe multiplicar la diferencia que existe entre las tensiones que ya se mostró en la tabla 2.5 y así en conjunto a la raíz cuadrada del valor de longitud de la grieta con respecto a pi (π), en sí es ($\Delta\sigma\sqrt{\pi a}$), que pertenece a una fracción de la ecuación 2.6 anteriormente mostrada.

Por lo tanto en la tabla 2.6 se muestran los valores que se obtuvieron en el cálculo que se detalló en el párrafo anteriormente expuesto.

Tabla 2.6.

	No.	Tamaño de grieta (mm)	$\Delta\sigma \sqrt{(\pi a)}$
Con Sobrecordón	1	0,5	3448,867818
	2	0,75	3369,97918
	3	1	3251,646223
	4	1,2	3192,838329
	5	1,4	3168,454568
	6	1,6	3114,666861
	7	1,8	3034,343884
	8	2	2999,919751
	9	2,2	2999,919751
	10	2,4	2956,172415

Al ya saber cuáles son los valores alcanzados que se muestran en la tabla 2.5 y 2.6 que eran parte de la ecuación 2.6 que es en la que nos guiamos para poder obtener el factor geométrico dependiente de la forma geométrica de la grieta.

Por lo tanto, se desea saber cuál es la ecuación geométrica que se informa mediante la función sobre el factor geométrico dependiente de la forma geométrica de la grieta por el trazado gráfico con el factor de intensidad de tensiones en el eje de coordenada Y, contra la multiplicación ($\Delta\sigma\sqrt{\pi a}$) que se sitúa en el otro eje coordenada que es decir X, por lo tanto sería en sí los valores que se muestran en la tabla 2.7

Tabla 2.7: Valores a introducir en el gráfico.

	No.	Tamaño de grieta (mm)	$\Delta\sigma\sqrt{\pi a}$	K
Con Sobrecordón	1	0,5	3448,867818	139,974862
	2	0,75	3369,97918	140,182746
	3	1	3251,646223	141,915108
	4	1,2	3192,838329	143,162409
	5	1,4	3168,454568	144,548298
	6	1,6	3114,666861	147,0429
	7	1,8	3034,343884	149,67609
	8	2	2999,919751	149,606796
	9	2,2	2999,919751	151,477747
	10	2,4	2956,172415	151,962808

Como desarrollo de lo que anterior se viene explicando, pasamos a mostrar el resultado obtenido por el graficado de los valores que se expuso abreviadamente en la tabla 2.7 siendo así de gran importancia para poder obtener el factor geométrico dependiente de la grieta, por lo que nos podemos fijar el resultado en la figura 2.23.

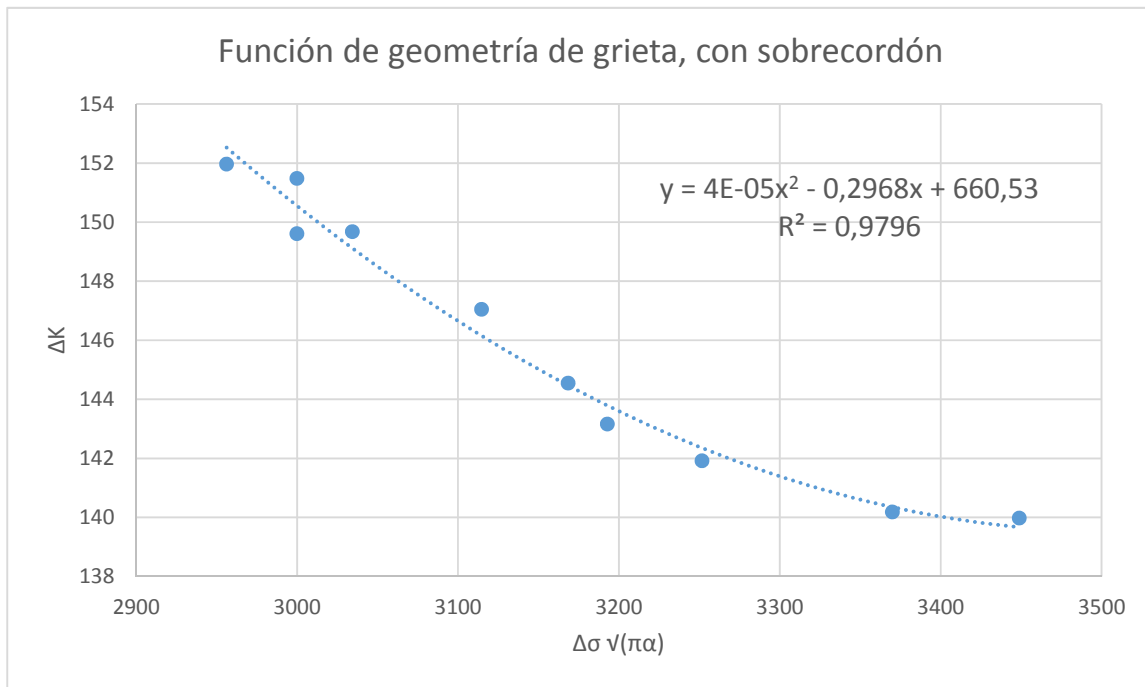


Figura 2.23: Gráfico de obtención del factor geométrico de la grieta para el caso de la presencia del sobrecordón.

Por lo que podemos apreciar que la función dada en la gráfica, es para nuestro caso la que establece el factor geométrico dependiente de la forma geométrica de la grieta para la presencia del sobrecordón por lo que se obtuvo mediante la importación de un formato de línea de tendencia con los puntos obtenidos previamente por lo que en la gráfica se utiliza una línea polinómica de orden 2, para que el valor de R cuadrado tienda a 1 y por lo tanto fue la que mayor proximidad presento al valor que sería 0.9796.

Ecuación obtenida en la gráfica para el caso de la obtención del valor geométrico dependiente de la geometría de la grieta:

$$y = 4 * 10^{-5}x^2 - 0,2968x + 660,53 \quad (2.8)$$

2.8.2 Factor geométrico dependiente de la geometría de la grieta en el caso de la no presencia del sobrecordón.

Inicialmente se aspira a poder obtener o saber cuáles son los valores reales de tensión máxima y mínima que se consiguen en los estudios de la probeta que no presenta el sobrecordón, siendo así los valores que se muestran en la tabla 2.8 los cuales detallan los valores taxativamente sobre la diferencia de tensiones que está presente en cada mallado realizado a esta probeta, pudiendo apreciarse particularmente los mallados utilizados, mostrados en la tabla siguiente.

Tabla 2.8: Valores de tensiones.

	No.	Tamaño de grieta (mm)	σ máx (MPa)	σ mín (MPa)	$\Delta\sigma$ (MPa)
Sin Sobrecordón	1	0,5	450,8	0,1	450,7
	2	0,75	445,7	0,2	445,5
	3	1	440,5	0,2	440,3
	4	1,2	439,7	0,3	439,4
	5	1,4	435,7	0,3	435,4
	6	1,6	405,9	0,2	405,7
	7	1,8	397,1	0,4	396,7
	8	2	366,8	0,2	366,6
	9	2,2	366,4	0,2	366,2
	10	2,4	362,1	0,3	361,8

Luego de haber conocido los valores de tensiones y que de antemano se conoce que para poder obtener el factor geométrico dependiente de la forma de la grieta tenemos que multiplicar la diferencia que existe entre las tensiones que ya se mostró en la tabla 2.9 y así en conjunto a la raíz cuadrada del valor de longitud de la grieta con respecto a π (π), en sí es $(\Delta\sigma\sqrt{\pi a})$, que pertenece a una fracción de la ecuación 2.6 anteriormente mostrada.

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380. www.uho.edu.cu
 Tabla 2.9.

	No.	Tamaño de grieta (mm)	$\Delta\sigma \sqrt{\pi a}$
Sin Sobrecordón	1	0,5	3232,282648
	2	0,75	3194,989838
	3	1	3157,697027
	4	1,2	3151,242502
	5	1,4	3122,555725
	6	1,6	2909,556402
	7	1,8	2845,011153
	8	2	2629,143153
	9	2,2	2626,274475
	10	2,4	2594,71902

Al ya saber cuáles fueron los valores alcanzados mostrados en la tabla 2.8 y 2.9, formando parte de la ecuación 2.6, pues sirve esta última para guiar y poder obtener el factor geométrico.

Por lo tanto para lograr saber cuál es la ecuación geométrica que se informa mediante la función sobre el factor geométrico dependiente de la forma geométrica de la grieta por el trazado gráfico con el factor de intensidad de tensiones en el eje de coordenada Y, contra la multiplicación ($\Delta\sigma\sqrt{\pi a}$) que se sitúa en el otro eje coordenada que es decir X, por lo tanto sería en sí los valores que se muestran en la tabla 2.10

Tabla 2.10: Valores a introducir en el gráfico.

	No.	Tamaño de grieta (mm)	$\Delta\sigma \sqrt{\pi a}$	K
Con Sobrecordón	1	0,5	3232,282648	142,469464
	2	0,75	3194,989838	143,855354
	3	1	3157,697027	145,65701
	4	1,2	3151,242502	146,280661
	5	1,4	3122,555725	146,557839
	6	1,6	2909,556402	148,705968
	7	1,8	2845,011153	148,775262
	8	2	2629,143153	151,408453
	9	2,2	2626,274475	151,477747
	10	2,4	2594,71902	152,586459

Como desarrollo de lo que anteriormente se viene explicando, se procede a mostrar el resultado obtenido en el graficado de los valores que se expusieron concretamente en la tabla 2.10, por lo que se puede observar el resultado en la

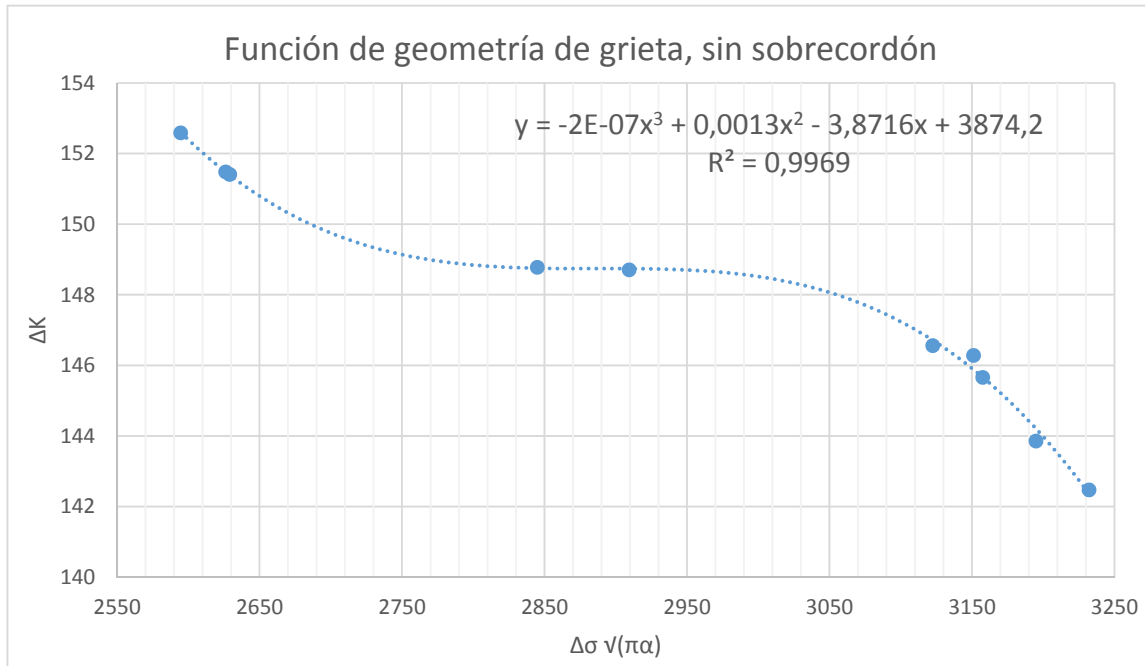


Figura 2.24: Gráfico de obtención del factor geométrico de la grieta para el caso de la no presencia del sobrecordón. figura 2.24.

Por lo que podemos apreciar de la función dada en la gráfica, es para nuestro caso la que establece el factor geométrico dependiente de la forma geométrica de la grieta para la no presencia del sobrecordón por lo que se obtuvo mediante la importación de un formato de línea de tendencia con los puntos obtenidos previamente por lo que en la gráfica se utiliza una línea polinómica de orden 3, para que el valor de R cuadrado tienda a 1 y por lo tanto sea la que mayor proximidad presente hasta el valor que sería 0.9969.

Ecuación obtenida:

$$y = -2 * 10^{-7}x^3 + 0,0013x^2 - 3,8716x + 3874,2 \quad (2.8)$$

CONCLUSIONES

- ✓ Se obtuvieron ecuaciones que describen a la función que depende de la geometría del cuerpo fisurado para el caso de la no presencia del sobre cordón y con la presencia del sobre cordón.

RECOMENDACIONES

- ✓ Comparar estos procesos con otros códigos de simulación.

- ✓ Utilizar en las simulaciones la diferencia de propuestas en la unión.

BIBLIOGRAFÍA

1. Apuntes para una breve introducción a la Resistencia de Materiales y temas relacionados. Universidad de Valladolid; Área de Mecánica de Medios Continuos y Teoría de estructuras; Escuelas de Ingenierías Industriales; julio 2011.
2. Arthur J. McEvily. Metal Failures: "Mechanisms, Analisis, Prevention"; Jonhn Wiley & Son, Inc; 2002.
3. ASTM International. Designation: E 1820-01. "Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness"; 2001.
4. Barsoum RS. Int J "Fract"; 1974.
5. David Broek. "The Practical Use of Fracture Mechanics"; Kluwer Academic Publishers; 1994.
6. David Roylance. Introduction to Fracture Mechanics; Department of Materials Science and Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA 02139; junio 2001.
7. Fernández Levy, Gilda. "Resistencia de Materiales". Ciudad de La Habana; Editorial Pueblo y Educación; 1981. [2 tomos].
8. Hansell RD, Shaw HG. Int J "Numer Methods Eng"; 1975.
9. <http://en.wikipedia.org/wiki/>
10. <http://es.wikipedia.org/wiki/>
11. <http://www.acerosindustriales.com>
12. <http://www.ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn20.html>
13. <http://www.ferrumaceros.com/aceros.htm#responsabilidad>

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. José Luis Aranga, Javier Jesús González. Mecánica de la Fractura; Servicio Editorial Universidad del país Vasco; 2011.
16. Shigley's, "Mechanical Engineering Design", Budynas-Nisbett; 2006.
17. Silovsky, K. "Resistencia de Materiales". Ciudad de La Habana; Instituto Cubano del Libro.
18. Stiopin, P. A. Resistencia de Materiales. /P. A. Stiopin. 6ta ed. Moscú; Editorial Mir, 1976.
19. Rafael Gallego Sevilla, Esther Puertas García. Apuntes de Mecánica de la Fractura; 2012.

Avenida XX Aniversario, Vía Guardalavaca, Piedra Blanca, Holguín, Cuba. Telf. 48 2501- 48 2380. www.uho.edu.cu
ANEXO

