

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PACHUCA

MEDICIÓN EXPERIMENTAL DE FACTOR DE INTENSIDAD
DE ESFUERZO EN PLACAS AGRIETADAS UTILIZANDO LA
CORRELACIÓN DE IMÁGENES DIGITALES

TESIS QUE PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRO EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA

ING. JOSÉ EMILIANO RESENDIZ HERNÁNDEZ

DIRECTOR:

DR. LUIS MANUEL PALACIOS PINEDA

CO-DIRECTOR:

DR. ROQUE JULIO HERNÁNDEZ DONADO

SINODALES:

DRA. ERIKA OSIRIS ÁVILA DÁVILA

DR. IGNACIO RAMÍREZ VARGAS

Pachuca de Soto, Hidalgo Junio de 2018



Carretera México-Pachuca Km. 87.5, Col. Venta Prieta, Pachuca, Hidalgo, C.P. 42080.

A. P. 276, Tels. : 7113073, 7113596, 7113140, 7115119

7115538 Fax (01771)7113399

www.itpachuca.edu.mx

CONTENIDO

Resumen	1
Abstract.....	2
Introducción.....	3
Planteamiento del Problema	5
Hipótesis de Investigación	6
Objetivo General.....	7
Objetivos Específicos	7
Justificación	8
Capítulo I Marco Teórico y Estado del arte	10
1.1 Método experimental	11
1.1.1 Técnicas experimentales	11
1.1.2 Parámetros del DIC	17
1.1.3 Procesamiento de correlación de imágenes digitales	19
1.2 Mecánica de la fractura lineal	21
1.2.1 Modos de carga	22
1.2.2 Esfuerzos en la cercanía de la punta de la grieta.	23
1.3 Método Numérico.....	27
1.3.1 Diferentes métodos numéricos.....	27
1.3.2 Características del método de elemento finito	34
2 Capítulo II Análisis experimental	38
2.1 Metodología experimental	39
2.2 Parámetros de dimensión.....	40
2.2.1 Justificación del material utilizado.....	40
2.2.2 Obtención de las propiedades elásticas del material.....	41
2.2.3 Parámetros del intensificador de esfuerzos	42
2.3 Geometría.....	42
2.4 Preparación de las probetas	42
2.5 Montaje experimental para la técnica DIC	45
2.6 Correlación de imágenes Digitales.....	46
2.7 Dimensión de la zona a analizar.....	47
2.8 Tamaño de faceta y distancia entre	49
2.9 Distancia entre puntos.....	50

2.10	Calculo del Factor de Intensidad de Esfuerzo (KI).....	52
2.10.1	Evaluación experimental del Factor de Intensidad de Esfuerzos basado en el campo de deformaciones	53
2.10.2	Evaluación experimental del Factor de Intensidad de Esfuerzos basado en el campo de desplazamientos	55
2.10.3	Consideraciones para la ubicación de coordenadas polares para la estimación del factor de intensidad de esfuerzo.....	56
3	Capítulo III Análisis Numérico.....	58
3.1	Factor de Intensidad de Esfuerzo.....	59
3.1.1	Evaluación numérica de los parámetros de mecánica de la fractura..	60
3.2	Consideraciones del elemento finito	61
3.2.1	Geometría	61
3.2.2	Selección de elementos.....	62
3.3	Cálculo del factor de intensidad de esfuerzo con extrapolación (KCALC).	63
3.3.1	Seleccionar y asignar el tipo de elemento	64
3.3.2	Definir las propiedades del material para el modelo virtual	64
3.3.3	Crear la geometría para el modelo de elemento finito.....	65
3.3.4	Realizar la discretización del modelo computacional	68
3.3.5	Aplicar las condiciones de frontera	70
3.3.6	Cálculo del factor de intensidad de esfuerzo	73
4	Capítulo IV Resultados	77
4.1	Aplicación de la carga	78
4.2	Resultados obtenidos por la técnica DIC	81
4.2.1	Deformación unitaria en la dirección X.....	81
4.2.2	Deformaciones unitarias en la dirección Y	83
4.2.3	Desplazamiento en la dirección X.....	85
4.2.4	Desplazamiento en la dirección Y.....	86
4.3	Calculo del factor de intensidad de esfuerzo experimental.....	86
4.4	Calculo del factor de intensidad de esfuerzo del método numérico	88
	Conclusiones.....	92
	Anexos	93
	Referencias	102

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Modelo de fotoelasticidad [21].....	13
Figura 1.2 Modelo de galga extensiométrica [25].....	14
Figura 1.3 Resultados obtenidos por DIC [28].....	17
Figura 1.4 Tamaños de facetas y distancia entre facetas [29].	18
Figura 1.5 Tipos de moteados con su desviación estándar. Utilizando aerógrafo(A, B), utilizando aerosol (C, D) [30]	19
Figura 1. 6 Matriz de referencia (Principio del DIC) [32].....	20
Figura 1. 7 Matriz deformada [32]	20
Figura 1.8 Modos de Fractura [2]. a) Modo I. b) Modo II, c) Modo III	23
Figura 1.9 Placa infinita agrietada cargada en el modo I [35].....	23
Figura 1.10 Definición del eje de coordenadas antes de una punta de grieta [2]..	24
Figura 1.11 Modelo de Elementos sin malla [37].....	28
Figura 1.12 Modelo de análisis sin malla [39].....	29
Figura 1.13 Método de los elementos de frontera [40]	30
Figura 1.14 Ejemplo de la modelación de elementos de frontera usado por Aliabadi [43]	31
Figura 1.15 Modelo de elemento finito cerca del frente de grieta [44].....	33
Figura 1.16 Método de elemento finito (ABAQUS) [39].....	34
Figura 1.17 Refinamiento de mallado [47].....	35
Figura 2.1 Diagrama de la Metodología experimental.....	39
Figura 2.2 Probeta Estandarizada.....	41
Figura 2. 3 Geometría de la fisura.....	42
Figura 2.4 Geometría para la experimentación	43
Figura 2.5 A) Probeta sin pintar. B) Probeta con capa de pintura negra	44
Figura 2.6 C) Probeta con moteado	45
Figura 2.7 Modelo experimental de correlación de imágenes digitales	46
Figura 2.8 Superficie Generada sobre la probeta.....	48
Figura 2.9 2 Secuencia para modificar parámetros.....	48
Figura 2.10 Modificar parámetros de escala	49

Figura 2.11 Definir escala.....	50
Figura 2.12 Tamaño de faceta y distancia entre puntos óptimos	51
Figura 2.13 Coordenadas polares en punta de grieta [51]	53
Figura 2.14 Variación del Factor de Intensidad de Esfuerzos con respecto al ángulo de inclinación [10].....	56
Figura 2.15 Comportamiento de la distancia (r) con respecto al deformación unitaria [13]	57
Figura 3.1 Justificación de usar KCALC	61
Figura 3.2 Modelo para el análisis numérico	62
Figura 3.3 Geometría del Plane 183	63
Figura 3.4 Modelo para elemento finito	65
Figura 3.5 Modelo en ANSYS APDL	66
Figura 3.6 Área de la probeta en el análisis bidimensional	67
Figura 3. 7 Condición de simetría.....	68
Figura 3.8 Elemento singular con nodos intermedios a $\frac{1}{4}$ de distancia.....	69
Figura 3.9 Configuración del intensificador de esfuerzos	70
Figura 3.10 Mallado de la geometría	70
Figura 3.11 Condición de frontera de restricción de desplazamiento en la dirección Y	71
Figura 3.12 Condición de frontera de restricción de desplazamiento en la dirección x	72
Figura 3.13 Esfuerzo sometido por la carga.....	72
Figura 3.14 Ubicación del sistema de coordenadas.....	74
Figura 3.15 Sistema de coordenadas por nodos.....	75
Figura 3.16 Resultado del Factor de Intensidad de Esfuerzo.....	76
Figura 4.1 Selección de punto para extracción de datos.....	81
Figura 4.2 Comparación de Numérico y Experimental	82
Figura 4.3 Comparación en la deformación unitaria en Y	85
Figura 4.4 Factor de intensidad Crítico (Numérico)	89

LISTA DE GRAFICAS

Grafica 4. 1 Aplicación de carga a probetas a tensión 78

Grafica 4. 2 Diagrama esfuerzo-deformación..... 79

Grafica 4. 3 Aplicación de Carga en Probetas con muesca 80

Grafica 4.4 Deformación unitaria en X 82

Grafica 4. 5 Deformación unitaria en Y 83

Grafica 4. 6 Deformación unitaria en la dirección Y 84

Grafica 4.7 Desplazamiento en X..... 86

Grafica 4.8 Desplazamiento en Y 87

Grafica 4.9 Factor de intensidad de Esfuerzo (Desplazamiento) 88

Grafica 4.10 Factor de intensidad de Esfuerzo (Deformación unitaria) 89

Grafica 4. 11 Factor de intensidad critico 91

Resumen

En este trabajo se determinan los factores de intensidad de esfuerzo de manera experimental utilizando correlación de imágenes digitales (DIC), el estudio se realiza en una placa de aluminio 6063 T5 que presenta una grieta transversal ubicada en un borde y centrada a lo largo de la probeta.

Se pretende con este estudio mostrar un procedimiento aplicable y utilizable para la industria, donde la integridad de los equipos juega un papel importante para el sector. Un punto importante en esta investigación, es que se obtiene el valor del factor de intensidad crítico se compara con un método de elemento finito, donde la determinación de este parámetro permite la predicción del comportamiento de la grieta antes de que empiece a propagarse.

Sobre la base de los resultados, es posible manifestar que se logró aplicar la técnica DIC exitosamente con altos niveles de precisión al replicar el procedimiento para obtener el factor de intensidad de esfuerzo crítico cuyo valor es de $33 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. Este procedimiento experimental es una herramienta para evaluar la integridad estructural de un elemento o sistema.

Abstract

In this work, stress intensity factors are determined experimentally using digital image correlation (DIC), The study is performed on an aluminum plate 6063 T5 having a transverse crack located at an edge and centered along the specimen.

It is intended with this study to show a proceeding applicable and usable for the industry, where the integrity of the equipment plays an important role for the sector. An important point in this investigation that obtains the value of the critical intensity factor is compared with a finite element method, where the determination of this parameter allows the prediction of the behavior of the crack before it begins to propagate

Based on the results, it is possible to state that the DIC technique was successfully applied with high levels of precision when replicating the procedure to obtain the critical stress intensity factor whose value is $33 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$. This experimental procedure is a tool to evaluate the structural integrity of an element or system.

Introducción

El diseño óptimo de elementos mecánicos es en una gran necesidad para la industria, donde cada vez son mayores los requerimientos de seguridad, no solamente para salvaguardar la infraestructura, sino para evitar la lamentable pérdida de vidas humanas.

Sin duda la exigencia fundamental de cualquier sistema de ingeniería es que no fallen en servicio. El problema de resistencia y fractura de materiales es conocido como uno de los más importantes durante el progreso de la ciencia y la tecnología. No es una idea nueva el diseñar estructuras para evitar la fractura [1].

En ingeniería las teorías de diseño se han desarrollado a menudo como un resultado de aprender de fallas catastróficas. Una falla catastrófica en ingeniería es algo que falla de manera inesperada y dramática. Un ejemplo de ello, se observó por primera vez en los años 1800, cuando empezaron a fallar ejes de los carros de ferrocarril después de poco tiempo de servicio. Estaban fabricados de acero dúctil, pero mostraban falla súbita de tipo frágil [2].

Aunque, no se cuenta con estadísticas de eventos catastróficos, es obvio, que en la actualidad el problema de fractura es más drástico que en siglos anteriores. Los avances y cambios tecnológicos continuamente introducen nuevos desafíos en la ingeniería de diseño, demandando un uso más eficiente de materiales y diseños avanzados. J. E. Gordon [3] dijo:

“El peor pecado en un material de ingeniería no es la falta de resistencia o la falta de rigidez, sino la falta de tenacidad, es decir, la falta de resistencia a la propagación de grietas”.

Por tal motivo existe la necesidad de analizar estos sistemas de ingeniería buscando con el objetivo de predecir de la evolución de las grietas en las partes mecánicas, con el fin de maximizar la vida y/o desempeño del componente y de prever el momento oportuno para realizar la sustitución del mismo antes de ocasionar serios

problemas. Estudios numéricos y experimentación han sido utilizados a menudo con resultados exitosos que ayuden a comprender este problema en los elementos mecánicos.

El capítulo I de este contenido presenta el estado del arte donde se exponen las contribuciones más importantes de grandes investigadores, así mismo en esta sección se muestra el marco teórico donde se exhiben los fundamentos, leyes y teorías relacionadas con la solución de este tipo de problemas.

En el capítulo II, se muestra el trabajo experimental desarrollado, describiendo en forma detallada el equipo y los materiales empleados. También se presenta la metodología seguida. En resumen, el trabajo experimental se hizo utilizando la técnica de correlación de imágenes para el análisis de una placa con grieta en uno de sus bordes, bajo la aplicación de una carga a tensión.

En el capítulo III se presenta el procedimiento y los métodos que se utilizan mediante MEF para conocer y calcular el valor del factor de intensidad de esfuerzos en las grietas que se encuentran en los componentes mecánicos. Se realiza un análisis de una placa con grieta en el borde con el objetivo de evaluar este parámetro. La finalidad es comparar la solución experimental con la solución mediante MEF de esta investigación y así aprobar el procedimiento experimental.

El Capítulo IV está enfocado a explicar el trabajo numérico desarrollado. Dado que se ha logrado tener en el Departamento de Ingeniería Mecánica, una gran experiencia en la utilización del Método del Elemento Finito, se decidió emplearlo para esta tesis.

Finalmente, el Capítulo V se analizarán los resultados obtenidos en el estudio experimental del capítulo II para saber su comportamiento real, así como la comparación de resultados entre el estudio numérico y experimental.

Planteamiento del Problema

El parámetro que caracteriza los esfuerzos en la zona que rodea el frente de una grieta se denomina factor de intensidad de esfuerzos (K) y depende de la geometría de la pieza y del caso de carga al que está sometida [4].

Por lo tanto, un gran número de investigaciones de problemas de fractura en diferentes geometrías se han llevado a cabo. Este problema de diseño es importante cuando uno de los componentes se vuelve vulnerable debido a la presencia de discontinuidades o grietas. En consecuencia la discontinuidad o una grieta es un problema de fractura, donde principalmente se puede obtener los factores de intensidad de esfuerzo que han sido en gran medida un parámetro de inspección. Sin embargo, hay pocos estudios publicados sobre el efecto del factor de intensidad de esfuerzo a la fractura en la vida útil de un elemento mecánico [5-6].

Todos estos factores y efectos han conducido a realizar análisis para evaluar el comportamiento de crecimiento de la grieta y decidir la condición de la integridad estructural de un elemento mecánico con el fin de evitar una falla y que podría ser muy cara y peligrosa.

Para calcular el factor de intensidad de esfuerzo a partir de las mediciones de correlación de imágenes hay un procedimiento, pero puede llevar a conclusiones inadecuadas, mientras no se realice un diseño experimental en la medición del factor de intensidad de esfuerzo para verificar el mínimo error causado por los efectos de vibraciones en las probetas que estén afectando el comportamiento de la grieta. Este punto no es nuevo pero a veces ha sido descuidado en la literatura de los trabajos de los investigadores [7-11].

Otro punto importante es la aplicación con la técnica 3D DIC, no hay un método propuesto que se pueda aplicar a varios problemas de fractura donde sea posible evaluar la información de campo de deformación, y obtener el valor del factor de intensidad de esfuerzo con precisión de las soluciones elásticas mencionadas en las últimas dos décadas [12].

Los métodos numéricos empleados en diversos trabajos muestran un error del 5-8% ya que no controlan un discretizado (mallado) confiable en el frente de grieta. Por lo cual es indispensable poder mejorar los métodos numéricos y minimizar el error [13-14].

Bajo las condiciones previamente expuestas surgen los siguientes interrogantes de investigación:

- ¿Qué metodología debe seguirse para calcular el factor de intensidad de esfuerzos en probeta planas?
- ¿Cuál es el valor del factor de intensidad de esfuerzo durante una prueba hasta alcanzar un crecimiento inestable?
- ¿Cómo puede evidenciar que los resultados son correctos en la experimentación y no hay un efecto significativo por vibraciones o un error causado por la máquina universal a utilizar?
- ¿Cómo desarrollar un método numérico capaz de controlar el tamaño de malla alrededor del frente de grieta?

Hipótesis de Investigación

Proponer una metodología aplicada a la industria para la medición del factor de intensidad esfuerzo mediante técnicas especializadas (DIC) y con herramientas con tecnología de punta que contribuyen a disminuir el riesgo de presenciar graves pérdidas económicas en elementos mecánicos influyendo en la integridad estructural para determinar el momento oportuno para retirar la parte del servicio.

Se pretende el análisis de una probeta a tensión con muesca en un borde con diferentes tamaños de grieta que permite saber el factor de intensidad y así poder tomar decisiones técnicas sobre la integridad estructural.

Aplicar un método numérico para el análisis de mecánica de la fractura permite conocer el comportamiento de la grieta y a través de la interpretación de los resultados poder evidenciar el potencial de la técnica experimental.

Objetivo General

Medir experimentalmente el factor de intensidad de esfuerzo en probetas planas de aluminio 6063 T6 utilizando correlación de imágenes digitales.

Objetivos Específicos

- Obtener las propiedades mecánicas del material aluminio 6063 T5. Analizar el comportamiento esfuerzo-deformación de muestras de material en una prueba a tensión aplicando la técnica de correlación de imágenes digitales.
- Obtener y comparar el campo de deformaciones unitarias mediante el método de correlación de imágenes y elemento finito considerando una probeta a tensión con muesca de un solo borde (SENT).
- Medición y comparación del Factor Intensidad de Esfuerzo mediante la técnica experimental, norma ASTM, y elemento finito considerando una probeta a tensión con muesca de un solo borde (SENT) en diferentes tamaños de fisura.
- Presentar una metodología para la solución de la evolución de una grieta que pueda ser reproducida en la industria utilizando la técnicas de correlación de imágenes digitales para contribuir en el desarrollo de la ciencia y la tecnología hacia problemas reales en los cuales la solución representa enormes impactos económicos, sociales y tecnológicos.

Justificación

Se pretende explicar por qué un material, aparentemente en excelentes condiciones, presenta falla prematura en condiciones de carga inferiores a los límites de fluencia y rotura, reconociendo que todos los materiales tienen pequeñas imperfecciones que actúan como grietas, modificando la distribución de los esfuerzos [5].

Es así que aparece un nuevo criterio de falla que considera los defectos mecánicos, presentes en los materiales de ingeniería. La mecánica de fractura muestra que los parámetros tenacidad a la fractura del material, tamaño de grieta y nivel de esfuerzo pueden ser relacionados para predecir la posibilidad de una fractura frágil [3].

Analizar el comportamiento de una grieta en los materiales es esencial para el diseño de estructuras críticas, especialmente cuando comienza a propagarse y toma un comportamiento inestable. La mecánica de la fractura es la disciplina que se encarga del estudio y la evaluación de los componentes agrietados con la finalidad de determinar si los componentes pueden seguir operando satisfactoriamente [2]. Esto, con el fin de tomar la decisión entre reparar, reemplazar o continuar en servicio un sistema hasta el siguiente paro programado. Un conocimiento exacto del factor de intensidad del esfuerzo es importante para prevenir la generación de fracturas provenientes de grietas.

Por otro lado, a partir del año 2010 se están desarrollando técnicas de medida sin contacto basadas en correlación digital de imágenes, debido a su implementación relativamente sencilla es empleada en el análisis de diversas investigaciones en el área de la mecánica experimental, en la industria aeronáutica, del automóvil, en el campo de la medicina [15].

La correlación digital de imágenes, es una técnica experimental a utilizar, la cual permite a partir de imágenes obtenidas durante un ensayo, medir desplazamientos y deformaciones. La técnica consiste en obtener imágenes digitales durante el

ensayo desde un estado inicial, el cual es considerado como referencia (imagen sin deformación), hasta un estado final (imagen con deformación).

En el comportamiento de estructuras y elementos de máquinas se desea que siempre se garantice el adecuado funcionamiento de todas las piezas. Es por esto que se desarrollan metodologías de diseño con las cuales se pueda evaluar la integridad estructural, lo cual sería medir el factor de intensidad de esfuerzo y que se pueda comparar con un valor crítico (definido por el material), asegurando que el diseño realizado no falle de manera inesperada.

Capítulo I Marco Teórico y Estado del arte

En esta sección se mencionaran los fundamentos teóricos, la revisión bibliográfica y las herramientas que se han utilizado en esta investigación. Para esta finalidad, se pretende cubrir los aspectos más destacados, se encuentran divididos por: el método experimental el cual tratara de elementos importantes para la realización de la investigación y un apartado dedicado a describir al método numérico a utilizar.

1.1 Método experimental

En el presente trabajo, se utiliza la técnica de correlación de imágenes digitales para el análisis experimental del factor de intensidad de esfuerzo, para lo cual se mencionará la relevancia de esta técnica a comparación de otras técnicas como lo son la fotoelasticidad y las galgas extensiométricas. Esta última poco utilizada en el campo de la mecánica de la fractura. A continuación se detallan las características más relevantes de cada una de éstas.

1.1.1 Técnicas experimentales

Las técnicas experimentales mencionadas a continuación son las que se han utilizado para calcular el factor de intensidad de esfuerzo desde los años 90 hasta la actualidad. Se mencionarán aspectos importantes sobre cada técnica.

1.1.1.1 Fotoelasticidad

La técnica fotoelasticidad básica requiere un material birrefringente como modelo del componente o como un recubrimiento en el componente, un polariscopio, una fuente de luz y un dispositivo de grabación óptica [16].

La fotoelasticidad tiene varias ventajas sobre otros métodos ya que es una técnica sencilla de implementar, se pueden utilizar en estructuras de gran tamaño, además ayuda a establecer criterios de diseño ya que se puede modificar el modelo para producir un diseño óptimo [17].

La fotoelasticidad en reflexión se utiliza para materiales opacos. El cual utiliza un fino recubrimiento doble refracción es pegado en el prototipo con un adhesivo reflectante. En esta técnica de fotoelasticidad en reflexión el plástico birrefringente no es cargado directamente, pero las deformaciones desarrolladas sobre la superficie del modelo son transmitidas a través del adhesivo al recubrimiento [18].

Concretamente con las ventajas fotoelasticidad son las siguientes: Optimizar la distribución de esfuerzos en elementos además en estructuras para mínimo peso y

máxima fiabilidad. Ensayar repetidamente bajo combinaciones de carga alternante sin repetir el revestimiento del elemento. Es posible realizar las mediciones de esfuerzo en el laboratorio o a cielo abierto, sin verse afectadas por condiciones climatológicas. Los revestimientos, en fotoelasticidad en reflexión, se pueden aplicar a la superficie de cualquier elemento de ensayo sin tener en cuenta su forma, tamaño, o composición del material.

Las desventajas de esta técnica son su complejidad para la entrega de resultados ya que tiene tres métodos de aproximación, necesidad de polariscopio, y del recubrimiento reflejante o aplicable a modelos transparentes [19].

Autores como Irvin [20] llevó a cabo experimentos usando esta técnica para determinar los parámetros de intensidad de esfuerzo de modo mixto. Él demostró que el método produce resultados de alta calidad en los modelos con una grieta en el borde, pero tiene la limitación inherente de la visión óptica por el polariscopio. En la Figura 1.1 se muestra un modelo por fotoelasticidad utilizado por Yaregari [21] donde obtuvo valor en comparación con DIC de un 3 % a diferentes tamaños de grieta. París [22] y Williams [6] proporcionaron una metodología para procesar datos foto elásticos para determinar valores precisos de K_I y K_{II} . Las dificultades asociadas con la obtención de una convergencia confiable de esquemas iterativos se abordan con un método de mínimos cuadrados Newton-Raphson excesivamente determinista.

1.1.1.2 Galgas extensiométricas

La medición de la deformación utilizando galgas extensiométricas asume que la deformación en la probeta bajo investigación se transfiere sin pérdida a la galga extensiométrica. Esto requiere una estrecha relación entre el medidor de deformación y la probeta que es provista por un adhesivo la cual es su principal desventaja para el análisis en la mecánica de la fractura [23].

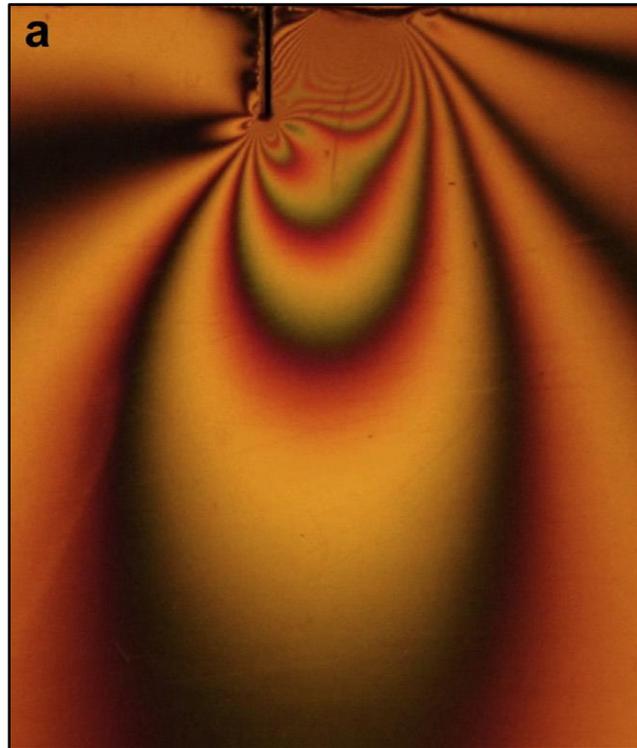


Figura 1.1 Modelo de fotoelasticidad [21]

A pesar de su diseño a menudo ingenioso además con su construcción precisa, poseían desventajas que restringen severamente su rango de aplicación y reducían su importancia en la mecánica de la fractura, las cuales son:

Que solo se pueden observar en procesos estáticos. Se requieren fuerzas de sujeción para evitar que los dispositivos se deslicen bajo la vibración. La muestra de prueba debe ser fijada con respecto al observador. El tamaño de los dispositivos impone restricciones a su uso para pequeñas muestras de prueba y en algunos casos tales medidas son imposibles.

Parnas [5], Wei [24] y Chakraborty [25] utilizaron la técnica del galgas extensiométricas para medir los factores de intensidad del esfuerzo de las grietas de propagación. Se requieren galgas pequeñas en regiones donde hay deformación rápidamente variable (frente de grieta). Parnas y Wei abordaron este problema donde demostraron que los pequeños medidores ubicados apropiadamente cerca de la punta de una grieta tendrán un error insignificante. Como una extensión del problema estático, Chakraborty generalizó la solución para localizar también en la punta de la grieta, el factor de intensidad de esfuerzo en modo mixto de fractura.

Donde se concluyó que el método de medición en deformación sufre un límite en los datos disponibles, ya que cada instrumento cubre una parte del área cerca de la punta de la grieta y el método está restringido desde la zona plástica cerca de la punta de la grieta, todos los autores realizan su procedimiento en relación a la ubicación de las galgas extensiométricas como se muestra en la Figura 1.2 donde r y θ son la ubicación de la galga en el material a realizarle una prueba.

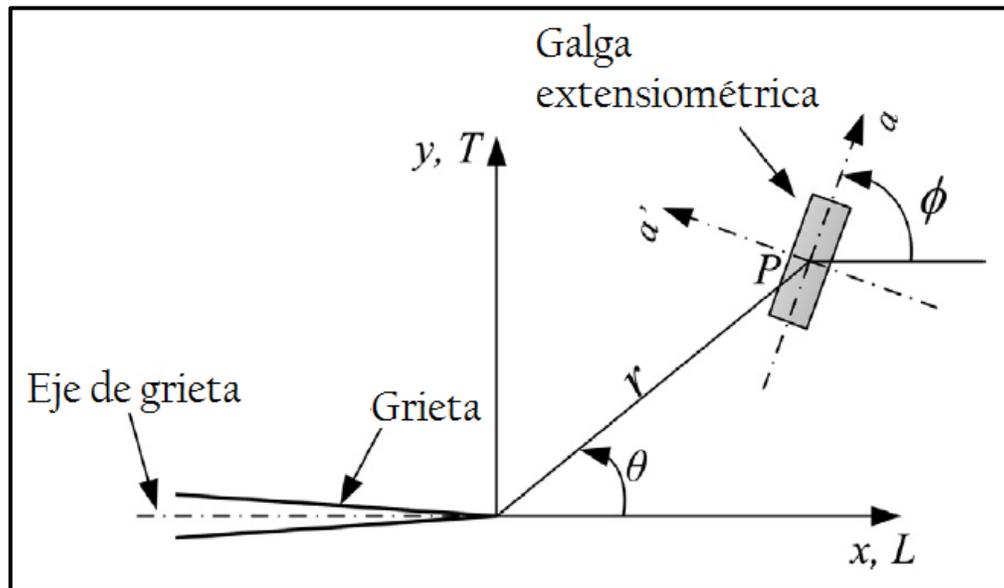


Figura 1.2 Modelo de galga extensiométrica [25]

1.1.1.3 Correlación de imágenes digitales

La correlación digital de imágenes (DIC), es una técnica sin contacto, la cual permite, a partir de una grabación de una prueba mecánica a una probeta, procesar el video en imágenes digitales obtenidas durante el ensayo para medir los campos de desplazamientos y los campos de deformación unitaria producidos en una probeta o elemento mecánico.

Las ventajas de la técnica son las siguientes: El montaje del ensayo es sencillo, pues se necesita una cámara digital, la cual debe estar aislada del ensayo y sujeta apropiadamente de manera que garantice no sufrir vibración o movimiento alguno. Es versátil debido a que puede aplicarse a varios estudios tales como:

piezas mecánicas o estructuras. No genera discontinuidades y se puede identificar claramente la zona a ser analizada. Los algoritmos que emplea no necesitan altos requerimientos computacionales, ya que incluso se puede adaptar el ensayo para realizar el análisis en tiempo real.

De igual manera esta técnica presenta desventajas, como la elevada dependencia de la calidad de imágenes tomadas durante el ensayo, la capacidad de la cámara para grabar varios cuadros por segundo, evitándose de esta manera la pérdida de información sobre todo al momento de la fractura o falla, dado que los píxeles captados al borde del punto de medición pueden llevar a distorsionar los resultados.

Diversos autores han realizado trabajos en la cuestión de la mecánica de la fractura, los más relevantes son los siguientes: Feipeng Zhu [26] mencionó que la correlación tridimensional de imágenes digitales se ha utilizado ampliamente en muchos campos debido a sus ventajas de mediciones de campo completo y sin contacto. Los experimentos realizados por este autor fueron la medición 3D-DIC, donde realizó dos pruebas de tensión con carga axial para una probeta de acero al carbono. Por lo tanto, se adquirió la esencia de la sección transversal específica y las curvas de esfuerzo-deformación son aceptables en un análisis en el plano (2D-DIC), esto se considerará cuando en esta investigación porque se presentarán las gráficas de esfuerzo-deformación unitaria del material a utilizar.

J.R. Yates [27] explicó que las técnicas experimentales como termoelasticidad y fotoelasticidad se han utilizado con éxito para caracterizar los campos de esfuerzo elástica alrededor de las grietas, pero no tienen en cuenta ni la plasticidad ni la anisotropía. La capacidad de capturar desplazamientos extensos no lineales de la punta de la grieta ha abierto la posibilidad de usar el ángulo de apertura de la punta de la grieta como un parámetro realista de diseño y evaluación para el desgarro dúctil estable. Los datos exactos y extensos que DIC puede producir ahora permiten que se determinen diferencias sutiles en el comportamiento del material. DIC ha demostrado ser una técnica muy útil para ayudar a caracterizar las propiedades que influyen en las rutas de la grieta.

Kotousov [27] centró su trabajo en la aplicación de la técnica de correlación de imágenes digitales para la investigación de los campos de desplazamiento y deformación unitaria dentro de una muesca aguda. Su primer conjunto de experimentos se centró en identificar el grado de singularidad de esfuerzo para diferentes ángulos de apertura de muesca y modos de carga (modo I o II). Los resultados de este estudio experimental demostraron que la diferencia con los valores teóricos predichos es inferior al 5%. El segundo grupo de pruebas intentó por primera vez investigar el campo de deformación a través del espesor cerca de la parte frontal de una muesca aguda en una placa elástica sometida a carga en modo I pero no pudo obtener valores aceptables.

Chernyatin [28] utilizó el método de correlación de imágenes digitales (DIC), en su investigación explica que tiene una amplia aplicación para determinar los componentes singulares (factor de intensidad de esfuerzo) además del campo de esfuerzos en la proximidad de la punta de la grieta. Comenta que la técnica DIC tiene una implementación simple y proporciona grandes conjuntos de datos experimentales. Su trabajo se presenta el método para el procesamiento matemático de los campos de desplazamiento experimental obtenidos por medio de DIC. Mencionó que el método proporciona una solución precisa para el problema de la determinación simultánea del desplazamiento del cuerpo y la posición de la orientación de la punta de la grieta en el plano de fractura, así como los términos apropiados de la expansión de la serie de Williams. En la Figura 1.3 se observa el resultado obtenido por la técnica de DIC, la cual muestra los desplazamientos en la dirección (Y) también comenta que este procedimiento permite una mejor precisión en la estimación de los parámetros de la mecánica de fractura.

El utilizar esta técnica para esta investigación tiene la importante ventaja, permitir evaluar y controlar la zona del campo de deformaciones de la probeta que se desea analizar. A comparación de las dos técnicas mencionadas anteriormente que tiene las desventajas de ser costosas y el tiempo perdido en la preparación del espécimen

es alto además, de no ser posible obtener todo el campo de deformaciones unitarias.

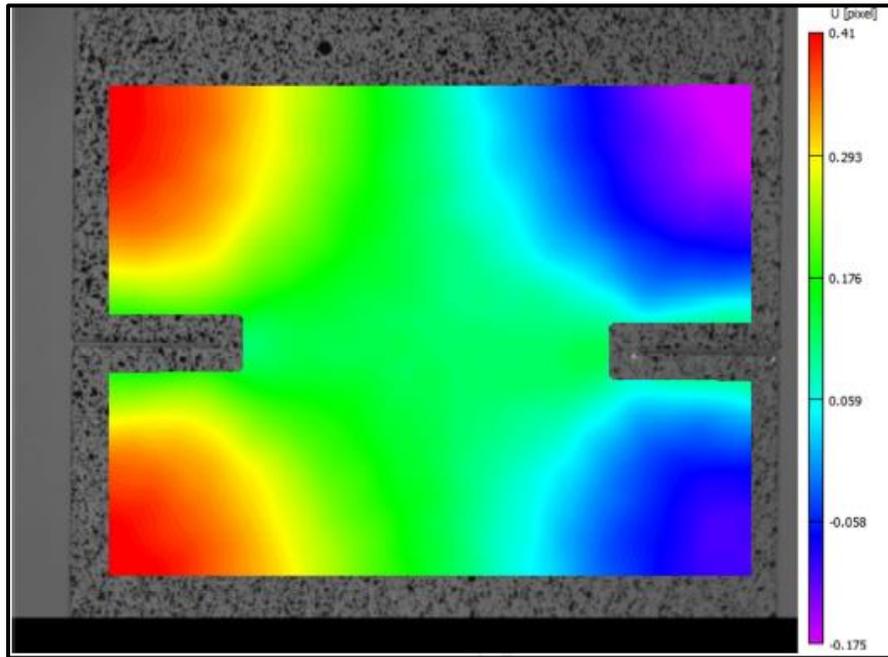


Figura 1.3 Resultados obtenidos por DIC [28]

1.1.2 Parámetros del DIC

Dado que la investigación realizada está basada en ensayos de laboratorio, es importante analizar ensayos previamente publicados, ya que estos proporcionan una guía para el estudio, suministran mayor información sobre la técnica y dan sugerencias para evitar errores en la obtención de datos. Dos puntos muy importantes al realizar la técnica DIC son:

Definir tamaños de facetas y distancia entre puntos: Iman Eshraghi [29] investigó los efectos de dos parámetros ajustables de análisis de correlación de imágenes digitales, los cuales son el tamaño de facetas y espaciado entre puntos, donde investigó la tendencia de diferentes tamaños de facetas. Los resultados demostraron que facetas pequeñas pueden no converger adecuadamente a resultados precisos, independientemente del valor del espaciado de las facetas. Los tamaños moderados de 41 píxeles de facetas generalmente mostraron resultados

aceptables, mientras que los tamaños grandes de faceta y el espaciamiento de subconjuntos pueden no incluir datos suficientes para reproducir el valor deseable del factor de intensidad de esfuerzo. También mostró que menos tres o más términos junto con un radio suficientemente grande de región de extracción de datos se deben considerar en el ajuste por mínimos cuadrados para adquirir una razonable estimación del factor de intensidad de esfuerzo en muestras agrietadas como se muestra en la Figura 1.4.

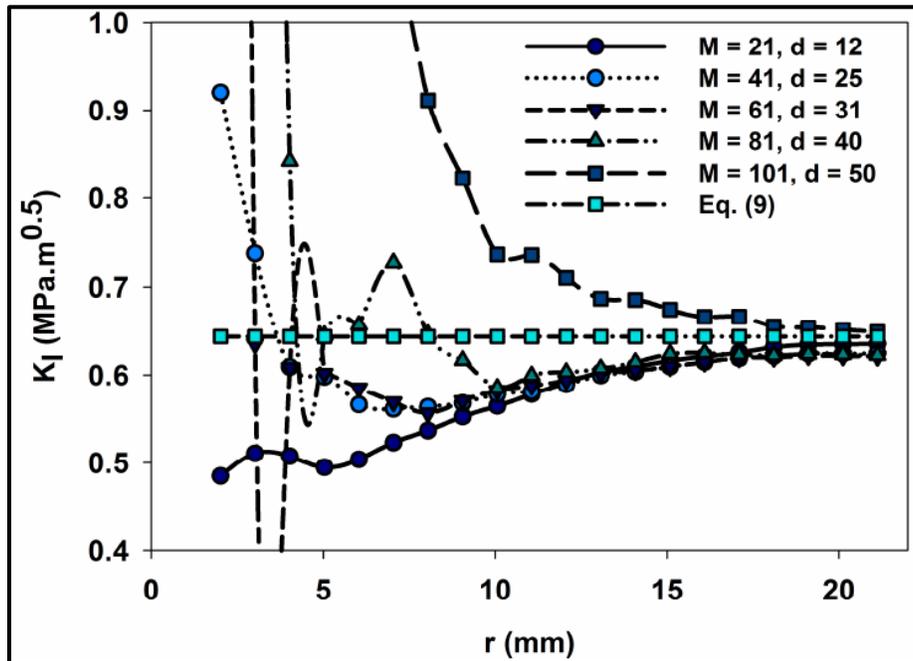


Figura 1.4 Tamaños de facetas y distancia entre facetas [29].

Calidad del moteado (Speckle): Crammond [30] en su trabajo presentó la relación entre el tamaño y la densidad del moteado (speckles) dentro de un patrón, identificando que las propiedades físicas de un patrón tienen una gran influencia en la precisión de la medición que se puede obtener. Estas propiedades físicas a menudo son pasadas por alto por los criterios de evaluación de patrones que se centran en el contenido de información de imagen global. El autor diseñó una metodología morfológica robusta que utiliza la detección de bordes para evaluar las propiedades físicas de diferentes patrones de moteado con resoluciones de imagen de 23 a 705 píxeles. Donde muestra las tendencias predichas a partir del análisis de propiedades de patrones se evalúan frente a las deformaciones simuladas que identifican cómo pequeños cambios en el método de aplicación pueden dar como

resultado grandes cambios en la precisión de la medición como se muestra en la Figura 1.5 al utilizar dos diferentes tipos de proceso para aplicar la pintura (aerosol y aerógrafo). Con esta información es posible comparar el moteado a utilizar y poder decidir si es aceptable.

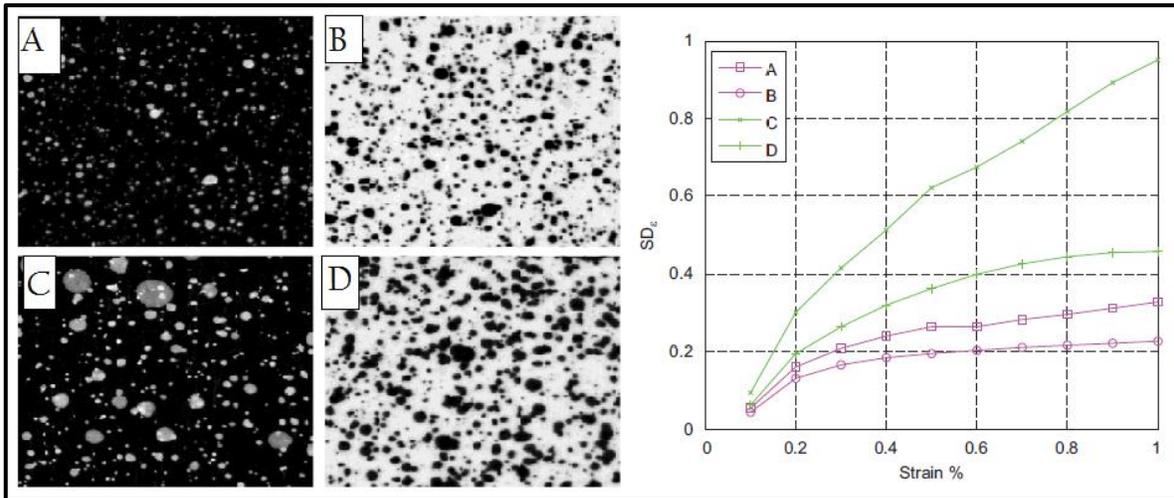


Figura 1.5 Tipos de moteados con su desviación estándar. Utilizando aerógrafo(A, B), utilizando aerosol (C, D) [30]

1.1.3 Procesamiento de correlación de imágenes digitales

La técnica de correlación de imágenes calcula el movimiento en cada uno de los puntos de las imágenes, comparando la imagen en estudio con la imagen de referencia. Para el cálculo del movimiento, la imagen es dividida de forma uniforme en distintos conjuntos, generalmente cuadrados, llamados pixeles. Cada pixel será procesado para calcular el valor medio de la escala de grises existente en cada uno de ellos de la Figura 1. 6 y se buscará la misma faceta en la imagen deformada como se muestra en la Figura 1. 7. Para el proceso de búsqueda en la imagen deformada se establece un área de análisis sobre la que se hará la correlación, esta área de búsqueda se especifica con el número de pixeles [31].

El proceso que realiza correlación de imágenes es primero realiza una cuadrícula con puntos de control, a través de estos puntos de control se ubica una sub-imagen en la imagen de referencia o no deformada, luego se debe analizar en la imagen deformada como la sub-imagen cambio de posición para finalmente ubicarla en

secuencia con la imagen no deformada y establecer los desplazamientos producidos en los ejes X y Y por medio de vectores de posición. Por medio de este proceso el algoritmo en la ecuación (1) nos da como resultado los desplazamientos en cada imagen analizada.

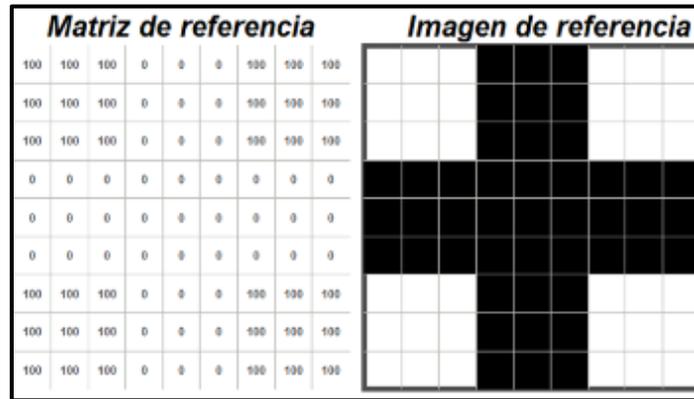


Figura 1. 6 Matriz de referencia (Principio del DIC) [32]

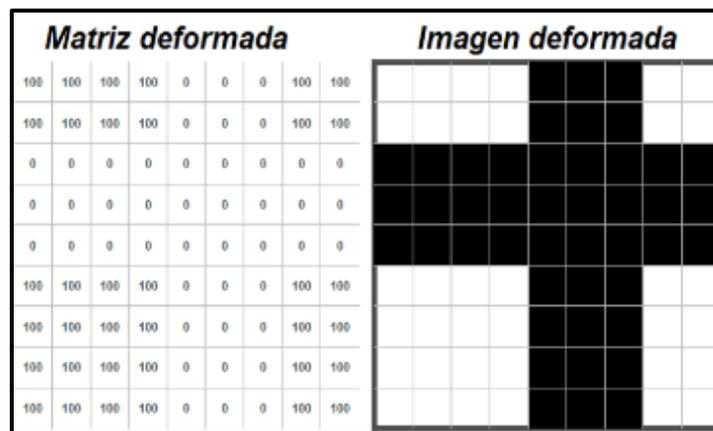


Figura 1. 7 Matriz deformada [32]

$$C(x, y, u, v) = \sum_{i,j=n/2}^{n/2} (I(x + i, y + j) - I^*(x + u + i, y + v + j))^2 \quad (1)$$

Donde x, y son las coordenadas del pixel de referencia, u, v son el desplazamiento en la dirección X y Y respectivamente, n es el tamaño de pasos o cantidad de imágenes procesadas, I es la imagen antes del movimiento y I^* la imagen después del movimiento. Las imágenes adquiridas en el proceso experimental, serán analizadas en el software GOM Correlate.

1.2 Mecánica de la fractura lineal

El uso de factores de concentración de esfuerzo elástico proporciona una indicación de la carga promedio que se requiere sobre una zona para que ocurra la deformación plástica, o la fluencia; estos factores también son útiles para analizar las cargas sobre una zona que podrían causar fractura por fatiga. Sin embargo, los factores de concentración de esfuerzo se limitan a estructuras de las cuales todas las dimensiones se conocen de manera precisa, particularmente el radio de curvatura en regiones de alta concentración de esfuerzo [33].

Cuando existe una grieta, imperfección, inclusión o defecto de un radio pequeño y desconocido en una parte, el factor de concentración de esfuerzo tiende al infinito cuando el radio de raíz tiende a cero, lo que hace que el enfoque del factor de concentración de esfuerzo sea inútil.

Los factores de concentración del esfuerzo ya no son válidos para esta situación, por lo que el análisis, desde el punto de vista de dichos factores, no genera criterios útiles para el diseño cuando existen grietas muy delgadas. Al combinar el análisis de los cambios elásticos grandes en una estructura o parte que ocurren a medida que una grieta delgada crece, con condiciones de energía que se requiere para producir nuevas superficies de fractura, es posible calcular el esfuerzo promedio (si no existieran grietas) que causaría el crecimiento de una grieta en una parte [34].

Por lo tanto es fundamental de la mecánica de fractura, puede definirse como la predicción de las condiciones con las cuales una grieta, en un cuerpo de configuración geométrica conocida y bajo la influencia de un determinado sistema de cargas, comienza a propagarse y se torna eventualmente inestable. La determinación de tales condiciones tiene como requisito el conocimiento de las propiedades fractura mecánicas del material en cuestión, a través de sus parámetros característicos como la tenacidad a la fractura (K_{IC}), la razón de Energía Liberada en la Deformación (G_{IC}) o la Integral-J (J_{IC}) [35].

1.2.1 Modos de carga

Los parámetros de fractura en los componentes agrietados también pueden determinarse por el análisis del campo de esfuerzos en la cercanía de la punta de la grieta, empleando los conceptos de la teoría de la elasticidad. Usando modificaciones del método analítico descrito por Westergaad [36]. Edwals [35] e Irwin [20] publicaron soluciones para los modos de carga mostrados en la figura 1.8, obsérvese que cada uno de estos involucra una diferente forma de carga a la grieta. Con estos se pueden representar los estados de cargas generales a los que está sometido el cuerpo agrietado, ya sea bidimensional y tridimensional.

- a) **Modo I. Modo de apertura o de tensión.** La carga es aplicada perpendicularmente al plano de la grieta y sus superficies se separan. Este es el modo de carga más común en los problemas de ingeniería, ya que se requiere una carga mínima para propagar la grieta. Por lo tanto, al que se le ha prestado más atención desde el punto de vista analítico, como experimental, esto lo muestra la Figura 1.8 a.

- b) **Modo II. Deslizamiento o modo cortante.** Las cargas se aplican perpendicularmente al borde de la grieta. Las superficies de fractura se deslizan una sobre la otra. Este modo es poco común y en la práctica se encuentra, en combinación con el modo I como se ilustra en la Figura 8 b.

- c) **Modo III. Desgarramiento.** Las cargas se aplican paralelamente al borde de la grieta y las superficies de fractura se mueven una sobre la otra y paralelas. Este caso puede ser un problema de cortante puro involucrando una muesca en una barra a torsión. De los tres modos, este se puede considerar como el menos severo (Figura 1.8c).

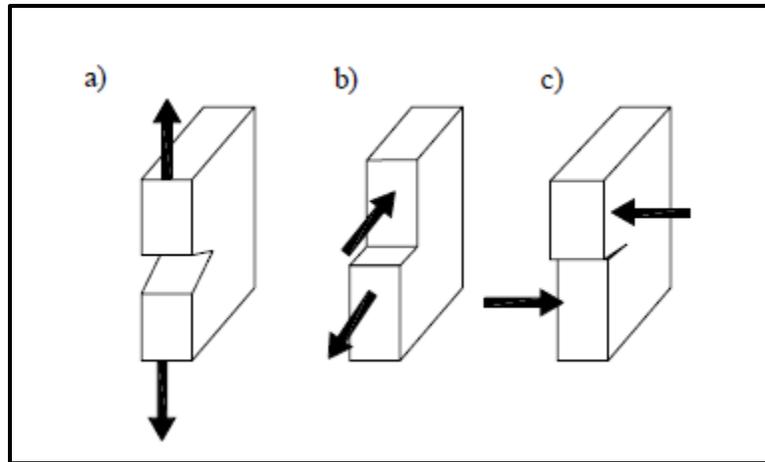


Figura 1.8 Modos de Fractura [2]. a) Modo I. b) Modo II, c) Modo III

1.2.2 Esfuerzos en la cercanía de la punta de la grieta.

Considérese una placa infinita con una grieta de longitud de $2a$ cargada en el modo I, como se muestra en la Figura 1.9.

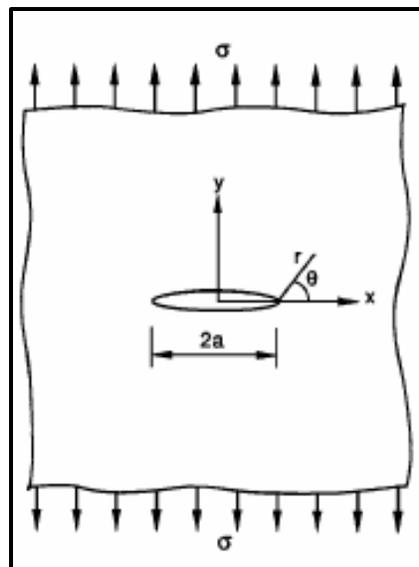


Figura 1.9 Placa infinita agrietada cargada en el modo I [35]

Para el caso de una grieta rectilínea pasante en el plano x - y , los campos de esfuerzos singulares, así como los desplazamientos asociados, están dados por las siguientes ecuaciones definidas por Dawes [9] en la cuales se muestran para los tres diferentes modos de fractura, correspondiente la nomenclatura de la Figura 1.10

y a su ubicación del estado principal de esfuerzos. Los sistemas de ecuaciones en los modos de factura estarán relacionados a la figura 1.10.

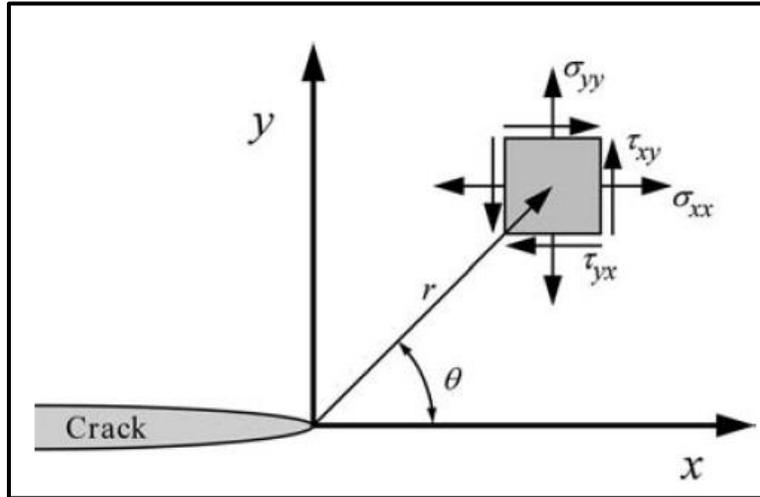


Figura 1.10 Definición del eje de coordenadas antes de una punta de grieta [2]

1.2.2.1 MODO I

El Modo I es técnicamente el más importante y las discusiones se centran generalmente en este Modo I de fractura. Irwin [20] obtuvo en 1951 las siguientes expresiones, para los distintos modos de fractura que se indican a continuación, referidas al Modo I de fractura en placa plana infinita con grieta:

$$\sigma_x = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \operatorname{sen} \frac{3\theta}{2}\right) \quad (2)$$

$$\sigma_y = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 + \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \operatorname{sen} \frac{3\theta}{2}\right) \quad (3)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi r}} \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \left(\cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}\right) \quad (4)$$

Donde K_I es el factor de intensidad de esfuerzos. Estado de esfuerzos principales son $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$. La ubicación del estado de esfuerzos son r, θ como se muestra en la figura 1.10. El factor de intensidad de esfuerzos K_I para el modo I de la grieta se puede definir como:

$$K_I = \lim_{r \rightarrow 0} \sqrt{2\pi r} \sigma_y (r, \theta = 0) \quad (5)$$

Para una placa infinita agrietada:

$$K_I = \sigma \sqrt{2\pi a} \quad (6)$$

Las componentes de los desplazamientos de la punta de la grieta para condiciones de **esfuerzo plano** se obtienen como:

$$\mu_x = 2(1 + \nu) \frac{K_I}{E} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - 2\nu + \sin^2 \frac{\theta}{2}\right) \quad (7)$$

$$v_y = 2(1 + \nu) \frac{K_I}{E} \sqrt{\frac{r}{2\pi}} \sin \frac{\theta}{2} \left(1 - 2\nu + \cos^2 \frac{\theta}{2}\right) \quad (8)$$

Donde μ_x y v_y son el valores del desplazamiento. Módulo de elasticidad (E). La ubicación del estado de desplazamientos r, θ . Relación de Poission (ν).

1.2.2.2 MODO II

El Modo II, menos frecuente, se produce cuando tenemos grietas sobre planos que forman ángulos de 90° o cuando los desplazamientos de la superficie de la grieta son perpendiculares al plano de la grieta y los esfuerzos cortantes son paralelos al plano de la grieta se denomina como el Modo II. A continuación se muestras el sistema de ecuaciones que rigen el segundo modo de fractura.

$$\sigma_x = -\frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left(2 + \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}\right) \quad (9)$$

$$\sigma_y = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \sin \frac{\theta}{2} \left(\cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{3\theta}{2}\right) \quad (10)$$

$$\tau_{xy} = \frac{K_{II}}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left(1 - \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{3\theta}{2}\right) \quad (11)$$

Donde el factor de intensidad de esfuerzos K_{II} para el modo II de la grieta está dado por:

$$K_{II} = \tau\sqrt{\pi a} \quad (12)$$

Es importante señalar que los valores de K_I y K_{II} , para la singularidad del campo de esfuerzos en la punta de la grieta, están en función de la carga, la geometría del espécimen, las condiciones de frontera y el tamaño de la grieta, puesto que el factor de intensidad de esfuerzos sirve como un criterio de fractura.

Consecuentemente, la propagación de la grieta tiene lugar cuando K_I (o K_{II}) sea igual o mayor a un valor crítico, es decir:

$$K_I = K_{IC} \quad (13)$$

$$K_{II} = K_{IIC} \quad (14)$$

Donde K_{IC} y K_{IIC} son los factores de intensidad de esfuerzos críticos para el modo I y el modo II de la grieta respectivamente.

1.2.2.3 MODO III

Cuando los esfuerzos cortantes son paralelos al plano de la grieta y los labios de esta se mueven en dirección paralela el modo de crecimiento de grieta es de desgarramiento y el Modo III aparece en barras con grietas que están sometidas a esfuerzos de torsión.

$$\tau_{xz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \operatorname{sen} \frac{\theta}{2} \quad (15)$$

$$\tau_{yz} = \frac{K_{III}}{\sqrt{2\pi r}} \operatorname{cos} \frac{\theta}{2} \quad (16)$$

$$K_{II} = \tau\sqrt{2\pi a} \quad (17)$$

Los parámetros K_I , K_{II} y K_{III} son los factores de intensidad de esfuerzos para los modos de carga I, II y III.

Es importante observar que las ecuaciones de esfuerzo presentan una singularidad del tipo $\frac{1}{r^{0.5}}$ en la punta de la grieta. Esto implica que los esfuerzos tienden al infinito. Bajo este contexto, no es posible determinar la severidad del campo de esfuerzos. En este caso, los factores de intensidad de esfuerzos toman en cuenta la magnitud del esfuerzo y la longitud de la grieta y con esto se establece la severidad del campo de esfuerzos resultante.

1.3 Método Numérico

En el caso de problemas reales de fractura (piezas no finitas) los sistemas de ecuaciones de la mecánica de la fractura se complican, debido al carácter del campo de deformaciones o desplazamientos, además, con piezas finitas, se genera la reflexión de ondas con las fronteras del dominio estudiado. En este sentido, no es posible analizar el problema analíticamente de ahí que se prefiera a los métodos numéricos.

1.3.1 Diferentes métodos numéricos

En los últimos 20 años, el desarrollo de la informática ha permitido resolver problemas de la ingeniería que antes eran difíciles o casi imposibles, lo que trajo un importante impacto en el diseño. En particular la mecánica de sólidos, y la mecánica de la fractura, se vieron beneficiados de estos avances. Para problemas sofisticados de diseño, como geometrías o estados de carga complejos, las soluciones analíticas son difíciles de obtener. A este respecto existen 3 alternativas: Método numérico de elementos sin malla, Método del Elemento Finito y Método del Elemento Frontera.

1.3.1.1 Método numérico de elementos sin malla

El método más investigado para la solución de sistemas de ecuaciones diferenciales parciales ha sido el de Elementos Finitos (MEF). Sin embargo éste presenta algunos problemas relativos a situaciones de grandes desplazamientos, esto debido a que

el enmallado requerido por el método, condiciona la convergencia del problema. A partir de la última década del siglo pasado se vienen desarrollando técnicas numéricas alternativas que superen estos problemas, estas han sido denominadas métodos libres de mallas. Estos métodos nacieron con el objetivo de eliminar la dependencia del empleo de mallas en las formulaciones variacionales, con la construcción de aproximaciones basadas en conjuntos de puntos conocidas como nubes de puntos como se muestra a continuación en la Figura 1.11 [37].

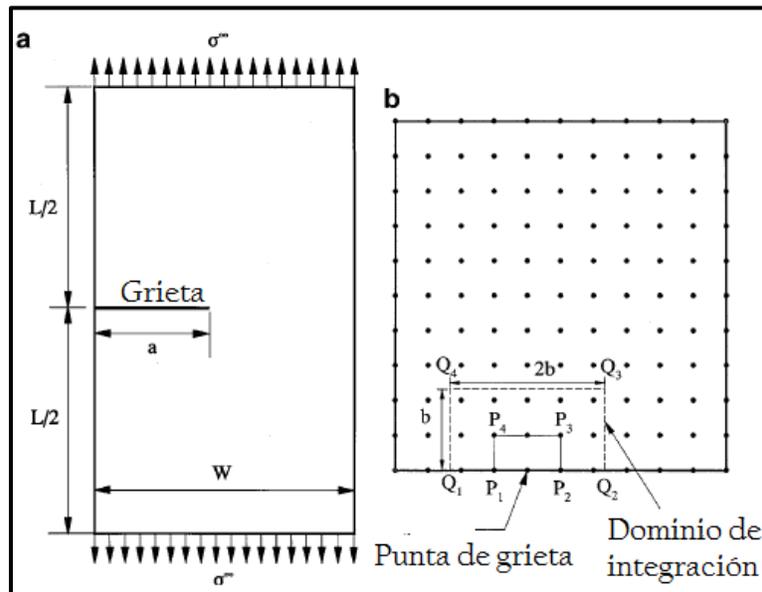


Figura 1.11 Modelo de Elementos sin malla [37]

Dado que el método es sin malla, no se requiere una malla estructurada; solo se necesita un conjunto disperso de puntos nodales en el dominio de interés. Dado que no se necesitan datos de conectividad de elementos, se evita un gasto computacional requerido por el método de elementos finitos. Al eludir el requisito de mallado, el análisis de propagación de grietas se puede simplificar dramáticamente. Los Métodos sin Malla requieren de una gran nube de puntos para tener buenos resultados, lo que demanda mucho esfuerzo computacional, por lo que se recomienda un mayor estudio de métodos con puntos enriquecidos.

Para realizar la simulación numérica, los métodos computacionales deben aplicarse para determinar la respuesta a la fractura y la fiabilidad de las estructuras fisuradas. Un método actual es el método de elementos finitos (MEF), que se ha utilizado ampliamente para el análisis de fracturas de grietas. Las estructuras subyacentes del método sin malla y métodos similares, que no dependen de una malla, son bastante engorrosos en el tratamiento de grietas que no coinciden con la geometría original. Esto crea dificultades numéricas, que a menudo conducen a la degradación de la precisión de la solución, la complejidad en la programación de la computadora y un entorno computacionalmente intensivo. En consecuencia, la única opción viable para tratar las grietas en movimiento usando el MEF es volver a aplicar la malla durante cada paso discreto de la evolución del modelo, de modo que las líneas de malla permanezcan coincidentes con las grietas a lo largo del análisis. [38].

Los problemas en la condición de modo I muestran que las trayectorias de grietas pronosticadas por el método sin malla propuesto están en excelente acuerdo con los resultados de los elementos finitos o los datos experimentales ya que no supera un error del 5% en el cálculo del factor de intensidad de esfuerzos a comparación de otras técnicas y en la Figura 1.12 se muestra su elemento que utilizo con diferentes tamaños de grieta como lo demostró Farahani [14,40].

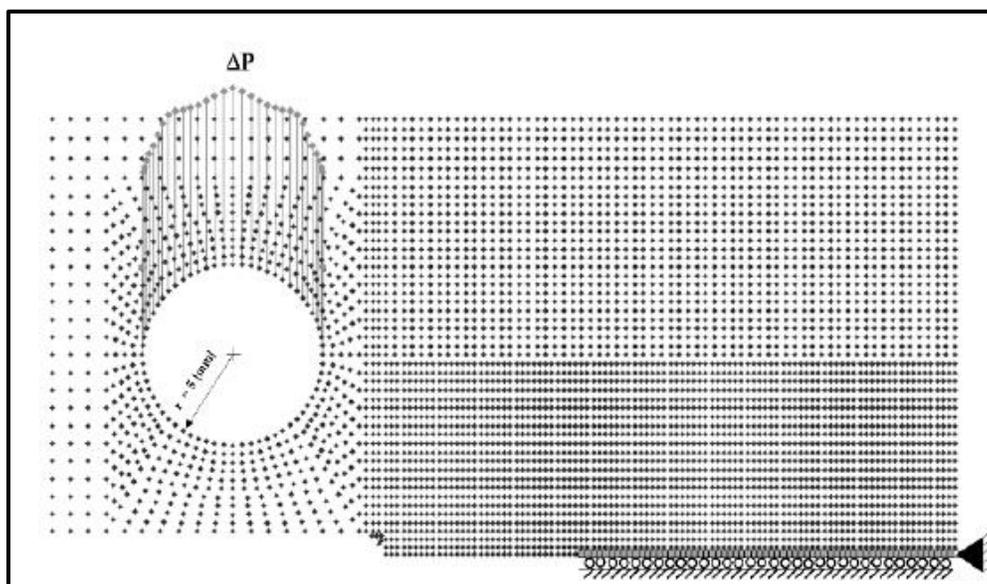


Figura 1.12 Modelo de análisis sin malla [39]

1.3.1.2 Método de elementos de frontera (MEB)

El método de los elementos de frontera, se originó al tratar de salvar las desventajas que presenta el método de los elementos finitos, ya que si recordamos, este método discretiza en elementos de malla de un determinado tamaño, estas partes son conocidas como elementos finitos; cada uno de estos reproduce de manera aproximada el comportamiento de una región del cuerpo, de tal manera que al ensamblarlas se puede encontrar la respuesta del cuerpo completo. Sin embargo se buscaba un método que en lugar de modelar el interior del dominio hiciera la discretización sobre la frontera (Figura 1.13 Método de los elementos de frontera) y resolviera los inconvenientes del método de los elementos finitos. Este es uno de los motivos por lo que el método de los elementos de frontera se ha desarrollado rápidamente y ahora se presenta como una alternativa para conseguir la solución numérica de un sinfín de problemas [40].

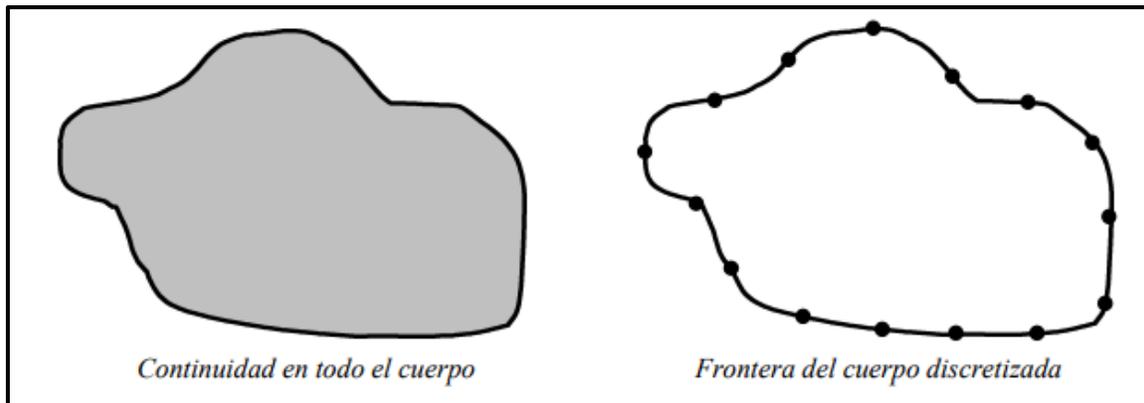


Figura 1.13 Método de los elementos de frontera [40]

La principal desventaja del MEF es que se requiere una discretización del dominio para realizar el análisis. El método de elementos de frontera implica la discretización solo del límite de la estructura y la ecuación diferencial gobernante se resuelve exactamente en el interior, lo que lleva a una mayor precisión. Sin embargo, elementos de frontera generalmente conduce a un sistema de ecuaciones no simétrico, completamente poblado, a diferencia del MEF que produce un sistema simétrico de ecuaciones [41].

El método de los elementos de frontera que estableció Brebbia y Domínguez [42], basándose en el teorema de reciprocidad, en donde se obtiene una sola ecuación integral, teniendo una aplicación exitosa en problemas de agrietamiento. Cuando se tienen problemas con grietas simétricas únicamente se necesita modelar una superficie de la grieta y puede ser usado un análisis del método de los elementos de frontera de una región simple. Sin embargo, en el análisis de una sola región la solución general de problemas de grietas no puede ser obtenida con la aplicación directa del método de los elementos de frontera, debido a las coincidencias de las superficies de la grieta resulta un sistema singular algebraico.

Aliabadi [43] mostró las principales desventajas las cuales son problemas grietas de modo mixto en general ya que no pueden obtenerse resueltos aceptables con el método de los elementos de frontera, dentro de una formulación de la región singular, donde la ecuación integral de frontera de desplazamiento es no aplicada en una de las superficies de la grieta y la ecuación integral de frontera de tensión se aplica sobre la otra superficie, en la Figura 1.14 muestra el modelo que utilizó para el análisis de un modo mixto.

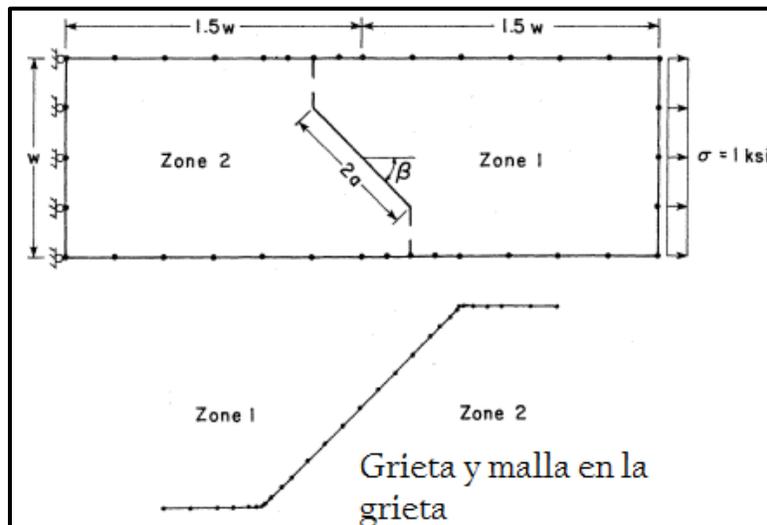


Figura 1.14 Ejemplo de la modelación de elementos de frontera usado por Aliabadi [43]

1.3.1.3 Método de elemento finito (MEF)

El Método del Elemento Finito soluciona de forma aproximada las ecuaciones diferenciales que representan a los problemas de la física e ingeniería, ha llegado a ser en la actualidad una herramienta muy importante obteniendo resultados satisfactorios. El método consiste en la discretización de un continuo en elementos interconectados por una serie de puntos llamados nodos, de tal manera que las ecuaciones que rigen el comportamiento del continuo rigen también el comportamiento de cada elemento.

La aplicación del método de los Elementos Finitos en la mecánica de la fractura es una herramienta bastante utilizada para el estudio del comportamiento de una fisura en el rango elástico para materiales [44].

El método de elementos finitos es la metodología más recurrente en la práctica tanto académica como industrial. Por otro lado, para obtener soluciones satisfactorias con el método de elementos finitos, el tema de la discretización del cuerpo geométrico es relevante como se muestra en la Figura 1.15. Las desventajas del método de elementos sin malla requieren de redes uniformes, lo que complica el problema y por esta razón no ha sido ampliamente utilizado.

El método de elementos de frontera presenta ventajas al emplearse un menor número de recursos, sin embargo, se está trabajando en mejorar los algoritmos de cálculo a nivel internacional y la principal ventaja es que se discretiza en la frontera, pero no siempre se obtienen una solución aproximada ya en algunos casos hay singularidades.

Aunque una cantidad significativa de investigaciones han utilizado el método de elemento finito pero tienen serias limitaciones para resolver problemas para el cálculo del factor de intensidad de esfuerzos por un cambio continuo en la geometría del dominio bajo análisis [10, 14, 21, 46].

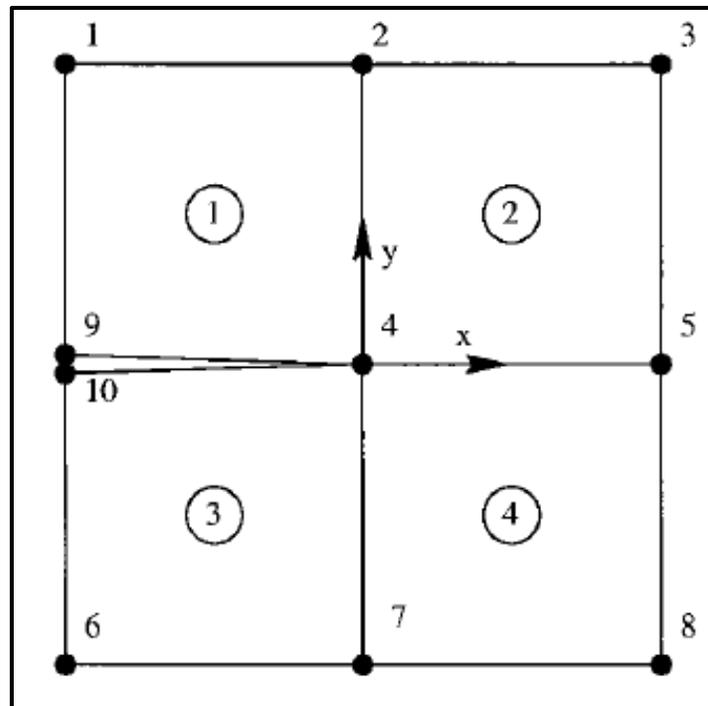


Figura 1.15 Modelo de elemento finito cerca del frente de grieta [44]

La propagación de grietas es un excelente ejemplo en el que el uso de MEF requiere una gran cantidad de repeticiones del modelo de elementos finitos para representar rutas arbitrarias y complejas. Y no toman en cuenta el la desventaja del método de elemento finito por lo cual es motivo para la metodologías de cálculo del factor de intensificación de esfuerzos presentadas en esta tesis utilizan la solución del campo de desplazamientos y deformaciones obtenidos con el método de elementos finitos. Sin embargo han tenido resultados aceptables con variación menor de 3% con respecto a un método experimental como lo demuestran Tavares [13], Farahani [14], Majid [46]; a continuación su muestra su modelo realizado por elemento finito en la Figura 1.16 por Farahani [39].

Puesto que el método del elemento finito es una técnica numérica que convierte el dominio de una estructura continua en valores discretos, los errores son inevitables. Estos errores son:

Errores computacionales: Éstos se deben a errores de redondeo provenientes de los cálculos de punto flotante de la computadora y de las formulaciones de los esquemas de integración numérica que se utilizan. La mayoría de los códigos

comerciales de elemento finito se concentran en reducir estos errores y, en consecuencia, el analista por lo regular se interesa en los factores relacionados con los valores discretos.

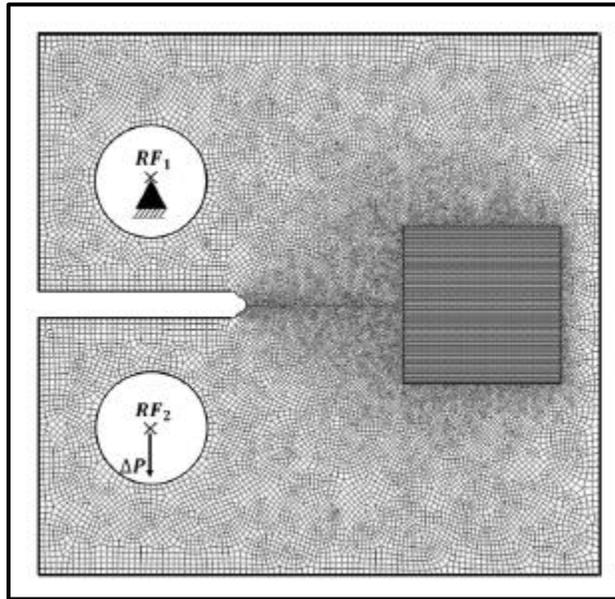


Figura 1.16 Método de elemento finito (ABAQUS) [39]

Errores de conversión discreta: La geometría y distribución del desplazamiento de una estructura real varían continuamente. El uso de un número finito de elementos para modelar la estructura introduce errores al igualar la geometría y distribución del desplazamiento debido a las limitaciones matemáticas inherentes a los elementos.

1.3.2 Características del método de elemento finito

1.3.2.1 Geometrías del elemento

Los elementos pueden ubicarse en las siguientes categorías: elementos de línea, elementos de superficie, elementos sólidos y elementos de propósito específico. La Tabla 1.1 proporciona algunos elementos disponibles para el análisis de elemento finito de problemas estructurales en 2D de los cuales se utilizan en este trabajo. No todos los elementos soportan todos los grados de libertad. Por ejemplo, el elemento en 3-D soporta únicamente tres grados de libertad en relación a la traslación en

cada nodo. Cuando se conectan elementos con grados de libertad diferentes, por lo general se requiere de alguna modificación manual [44].

1.3.2.2 Generación de malla

La red de elementos y nodos que “discretizan” una región se le conoce como malla. La densidad de malla se incrementa a medida que más elementos se colocan dentro de una región dada como se muestra en la Figura 1.17. El refinamiento de malla ocurre cuando la malla se modifica de un análisis de un modelo al siguiente análisis para producir resultados mejorados. Por lo general, los resultados mejorados cuando la densidad de la malla se incrementa en áreas de gradientes de esfuerzo alto y/o cuando las zonas de transición geométricas se enmallan de manera uniforme.

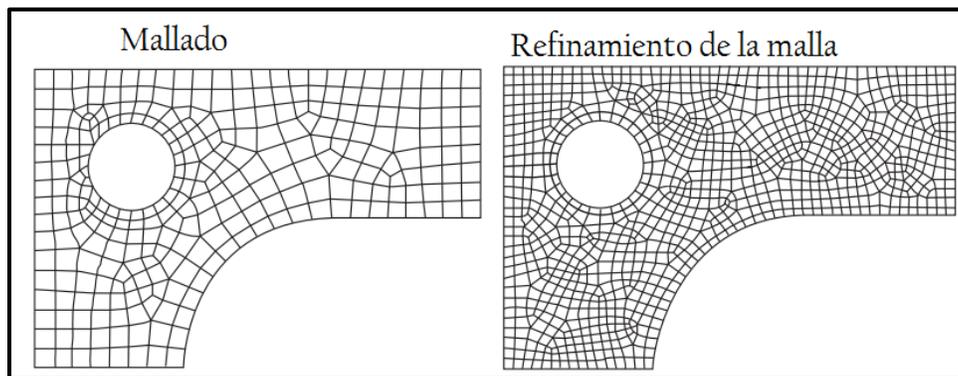
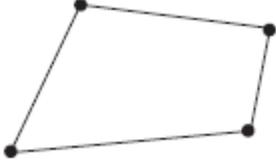
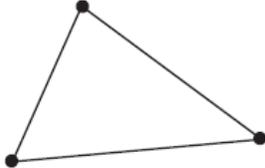
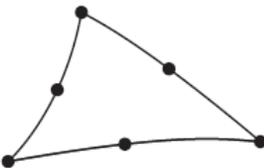


Figura 1.17 Refinamiento de mallado [47]

Por lo general, pero no siempre, los resultados del análisis de elemento finito convergen hacia resultados exactos a medida que el enmallado se refina continuamente. Para valorar la mejora, en las regiones donde aparecen gradientes de esfuerzo alto, la estructura puede volverse a mallarse con una densidad mayor. Si existe un mínimo cambio en el máximo valor de esfuerzo, es razonable presumir que la solución ha convergido [47].

Tabla 1.1 Geometrías de modelo superficie [44]

Tipo de elemento	Forma	Numero de nodos	Aplicación
Cuadrilátero de 4 nodos		4	Esfuerzo o deformación plana, simétrico con respecto a un eje, panel a cortante, placa plana delgada en flexión
Cuadrilátero de 8 nodos		8	Esfuerzo o deformación plana, placa plana o cascarón en flexión
Superficie Triangular de 3 nodos		3	Esfuerzo o deformación plana, simétrico con respecto a un eje, panel a cortante, placa plana delgada en flexión.
Triangular de 6 nodos		6	Esfuerzo o deformación plana, simétrico con respecto a un eje, placa plana o cascarón en flexión.

1.3.2.3 Aplicación de la carga

Existen dos formas básicas de especificar cargas en una estructura: nodal y por carga de elementos. No obstante, la carga de elementos finalmente se aplica a los nodos empleando cargas nodales equivalentes. Un aspecto de la aplicación de

cargas se relaciona por el principio de Saint-Venant. Si no se tiene interés acerca de los esfuerzos cercanos a los puntos de aplicación de carga, no es necesario distribuir la carga de manera muy precisa. La fuerza neta y/o momento puede aplicarse a un solo nodo, siempre que el elemento soporte los grados de libertad asociados con la fuerza y/o el momento en el nodo. Sin embargo, el analista no debe sorprenderse, o preocuparse, cuando revise los resultados y los esfuerzos en la vecindad del punto de aplicación de la carga y encuentre que son muy grandes. Los momentos concentrados pueden aplicarse a los nodos de vigas y la mayoría de los elementos de las placas. No obstante, los momentos concentrados no pueden aplicarse a elementos de puntales, planos, elásticos bidimensionales, axiales simétricos o de ladrillos, pues no soportan grados de libertad rotacionales [47].

1.3.2.4 Condiciones de frontera

La simulación de condiciones de frontera y otras formas de limitantes probablemente es la parte más difícil del modelado preciso de una estructura para un análisis de elementos finito. Con limitantes específicas, es relativamente sencillo cometer errores de omisión o distorsión. Para el analista puede ser necesario probar diferentes enfoques para modelar limitantes enigmáticas tales como uniones de pernos, soldaduras, etc., que no son tan simples como las uniones fijas o pernos idealizados. La prueba debería confinarse a problemas simples y no a una estructura grande y compleja. En ocasiones, cuando la naturaleza exacta de una condición limítrofe o de frontera es incierta, sólo pueden ser posibles los límites de comportamiento. Es decir, la solución pronosticaría esfuerzos y deflexiones mayores que las reales [44].

Las ecuaciones de restricción de punto múltiple se emplean con bastante frecuencia para modelar condiciones de frontera o conexiones rígidas entre miembros elásticos. Cuando se utiliza en esta última forma, las ecuaciones actúan como elementos y entonces se conocen como elementos rígidos. Los elementos rígidos pueden rotar o trasladarse únicamente de manera rígida [47].

Capítulo II Análisis experimental

En este capítulo, se presenta el procedimiento para alcanzar el objetivo del trabajo experimental, el cual es obtener resultados para los casos estudiados y poderlos comparar con la parte numérica y así validar los resultados obtenidos. La principal característica es que los eventos a calcular el factor de intensidad de esfuerzo crítico (K_{IC}). Por lo tanto, se requiere tener una carga sobre las probetas agrietadas súbitamente. También hacer la medición de los parámetros de interés con un sistema de adquisición de datos como lo son la relación de Poisson y el módulo de elasticidad.

2.1 Metodología experimental

En la Figura 2.1 se muestra el desarrollo de experimental inicia con la toma de decisiones para seleccionar el material, las medidas posibles de la probeta que sea comercial para facilitar su disposición en el mercado. La geometría que se considera bajo la norma ASTM 399 para obtener el factor de intensidad crítico.

La preparación es un punto importante en el proceso de la correlación de imágenes ya que influye en los resultados desde lo que es el montaje de la pieza y el enfoque de la cámara así como la luz para la obtención del video. Otro punto que influye en los resultados es el trabajo desarrollado en el software GOM Correlate los cuales son los tamaños de facetas y distancia entre puntos para crear la superficie en la cual se obtendrán deformaciones unitarias y desplazamientos. Por último se obtendrá el valor del factor intensidad de esfuerzo con ayuda de MATLAB.

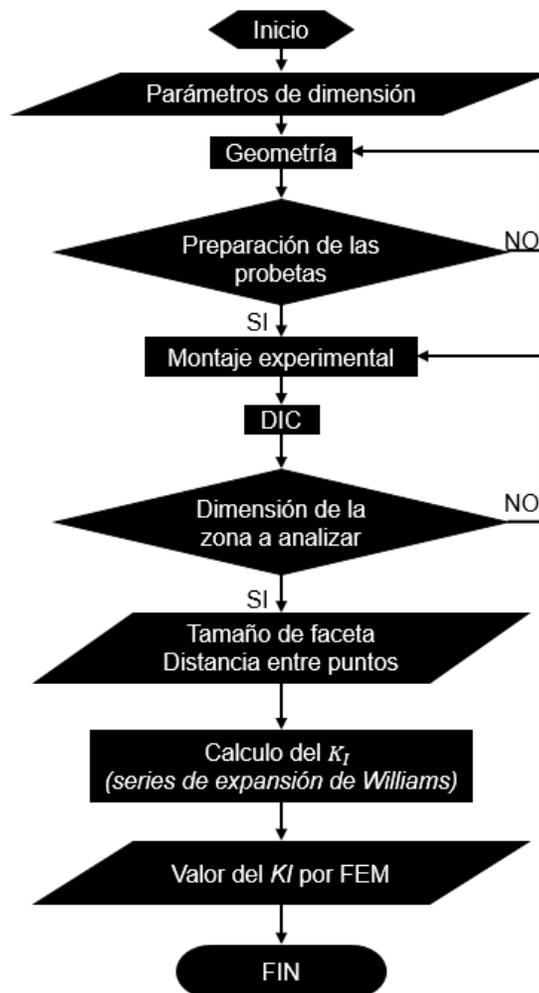


Figura 2.1 Diagrama de la Metodología experimental

2.2 Parámetros de dimensión

Primero se definirá el material a utilizar (material comercial), se obtendrán las propiedades mecánicas mediante la norma ASTM E-8. Después se conocerá el tipo de grieta que tendrá el material.

2.2.1 Justificación del material utilizado.

Para llevar a cabo la experimentación ha sido necesario disponer de Solera de Aluminio 6063 T5, es un material isotrópico con las siguientes propiedades mecánicas que muestra la siguiente Tabla 2.1, las propiedades mecánicas fueron obtenidas mediante pruebas normalizadas por la ASTM (American Society for Testing and Materials).

Tabla 2.1 Propiedades mecánicas del Aluminio 6063 T5

Propiedades Mecánicas	
Módulo de Elasticidad	69.500 GPa
Coefficiente de poisson	0.33
Esfuerzo ultimo a tensión	175 MPa
KIC	$29 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$

La composición química de este Al-6063 T5 se muestra en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Composición Química Al-6063 T5

Composición química(AlMg0.5Si)	
Elemento	Composición (%)
Silicio(Si)	0.2-0.6
Hierro(Fe)	0.35
Cobre(Cu)	0.10
Manganeso(Mn)	0.10
Magnesio(Mg)	0.45-0.90
Cromo(Cr)	0.10
Zinc(Zn)	0.10
Titanio(Ti)	0.10

2.2.2 Obtención de las propiedades elásticas del material

Las probetas son estandarizadas por la norma E-8 ASTM [48] de la Figura 2.2 y la Tabla 2.3 se muestra las medidas de la probeta. Se realizaron las probetas en aluminio 6063 T6 la cual se someterá una prueba de tensión en la máquina universal Galdabini.

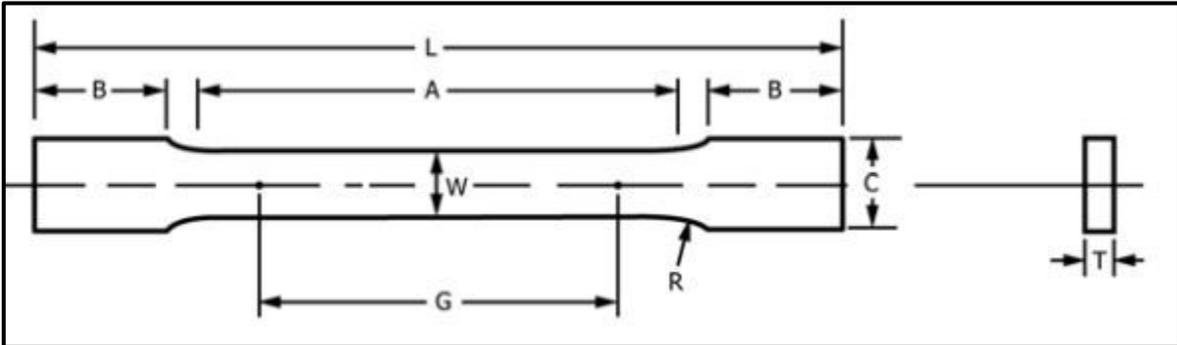


Figura 2.2 Probeta Estandarizada

Tabla 2.3 Medidas de la probeta estandarizada
Espécimen Estandarizado

Designación		Medida (mm)
A	Longitud de la sección de elongación	225
B	Longitud de la sección de sujeción	75
C	Ancho de la probeta sujeción	50
G	Longitud del gage	200
L	Longitud total	450
R	Radio del filete	25
T	Espesor de la probeta	Espesor del material (calibre 6)
W	Ancho de la sección de elongación	40

2.2.3 Parámetros del intensificador de esfuerzos

La geometría del intensificador de esfuerzos se obtiene considerando la norma E-399 ASTM [49] en la Figura 2. 3.

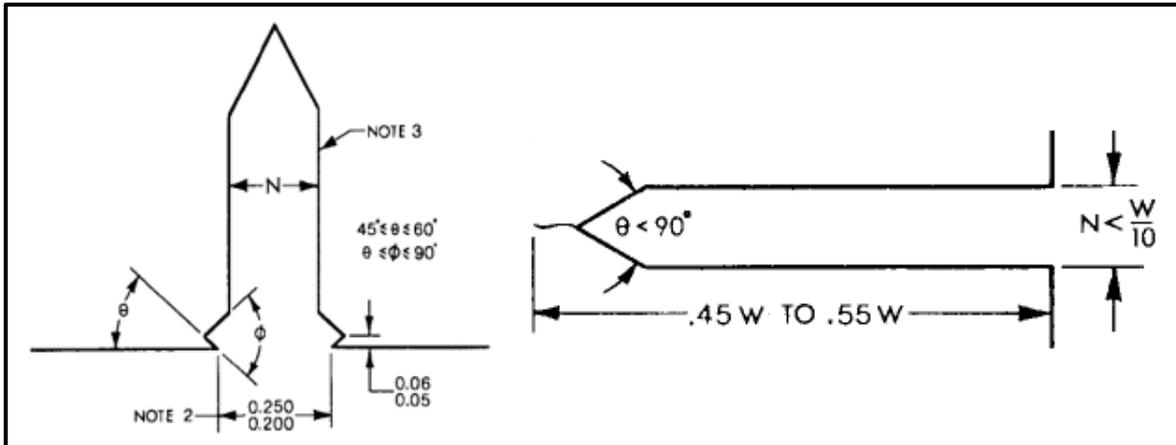


Figura 2. 3 Geometría de la fisura

Donde w corresponde el ancho del material a utilizar.

El proceso de manufactura de los especímenes fue realizado con corte por plasma. Este proceso de corte fue seleccionado para disminuir la formación de concentradores de esfuerzos. De esta manera, se puede evitar significativamente un cambio en las propiedades del material.

2.3 Geometría

Para demostrar la técnica propuesta se usará para medición de factores de intensidad de esfuerzos en su primer modo de fractura, utilizando espécimen con muesca fabricada a partir de aleación de aluminio 6063 T5 como la Figura 2.4. Con el fin de simular la grieta, la probeta de aleación de aluminio con fisura será sometida a carga de tensión.

2.4 Preparación de las probetas

La superficie de las probetas que son utilizadas en los ensayos DIC debe presentar una imagen con una distribución aleatoria de intensidad en la escala de grises, es

decir un patrón de puntos irregularmente distribuidos, conocido como patrón moteado.

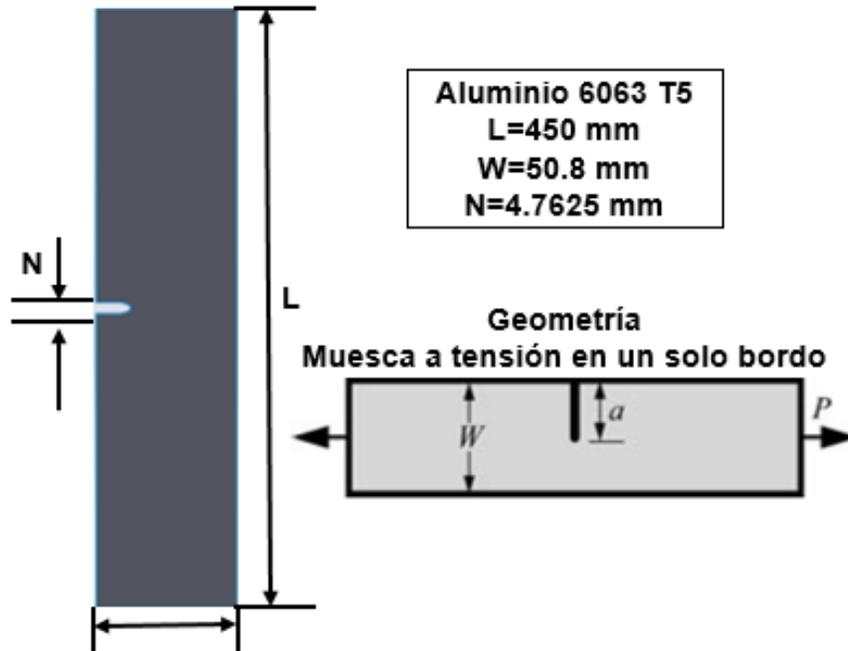


Figura 2.4 Geometría para la experimentación

Este patrón permite realizar un correcto rastreo del desplazamiento de píxeles en la imagen para su posterior análisis, el patrón indicado puede originarse directamente en la muestra si el color y la textura del material en función del acabado superficial así lo permiten, caso contrario será necesario aplicar una capa de pintura para lograr el patrón. Gracias al moteado, el software es capaz de identificar y calcular los desplazamientos de los píxeles con precisión, obteniendo resultados con bajos porcentajes de error y altos coeficientes de correlación.

Antes de realizar el moteado es necesario limpiar la superficie lateral de las probetas con desengrasante para eliminar la acumulación de grasa y suciedad. La limpieza de la probeta permite una mejor adherencia de la pintura a la superficie del metal, evitando el desprendimiento prematuro de la misma.

El procedimiento, para la elaboración de este patrón se explica a continuación:

1. Aplicar cuatro capas de pintura color negro mate sobre la superficie a analizar. La pintura se debe aplicar desde una distancia de 15 centímetros de la muestra. Al colocar las capas de pintura, se debe evitar la formación de burbujas y grumos de pintura sobre la superficie. Cada capa de pintura debe curar (endurecimiento o secado) por un período de 30 minutos, antes de la aplicación de la siguiente como se muestra en la Figura 2.5.

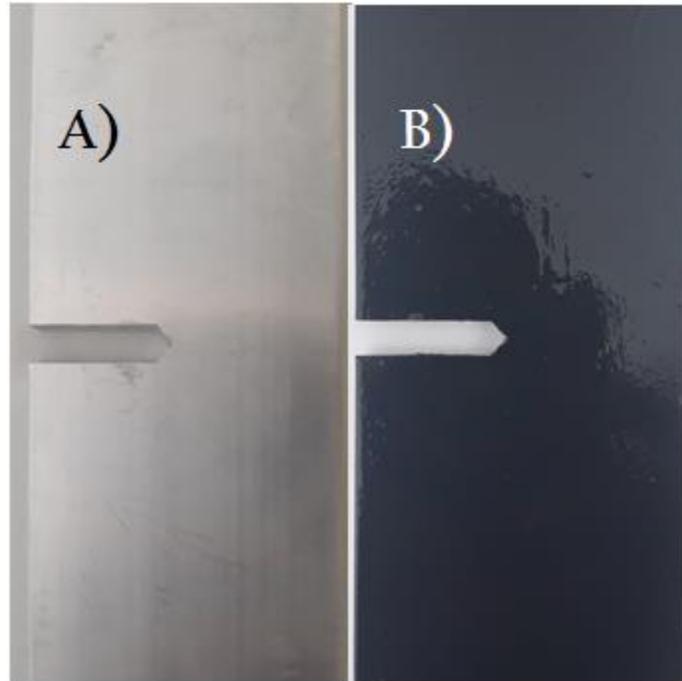


Figura 2.5 A) Probeta sin pintar. B) Probeta con capa de pintura negra

Para generar el moteado en la muestra, se debe aplicar capas de pintura color blanco mate sobre las capas de pintura negra, a una distancia de 30 centímetros y a un ángulo de 45 grados respecto a la superficie de la muestra. En la Figura 2.6, se puede observar el moteado utilizado para la correlación digital de imágenes de las muestras a estudiar.

El tamaño que tengan los puntos blancos sobre la superficie puede influir en la precisión de los resultados obtenidos, teniendo que buscar cuál es la relación óptima dependiendo del ensayo a realizar [50].

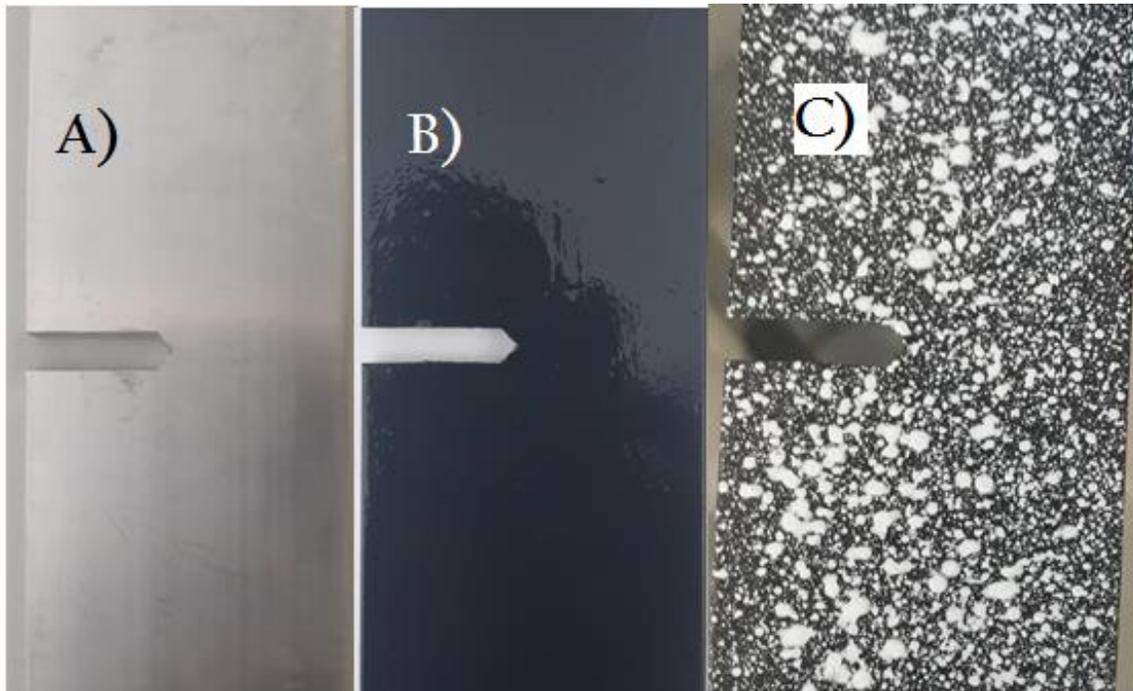


Figura 2.6 C) Probeta con moteado

2.5 Montaje experimental para la técnica DIC

La plataforma de pruebas diseñada para realizar el experimento, se ilustra en la Figura 2.7. La plataforma consta de los siguientes componentes: máquina universal de ensayos Galdabini, una cámara FUJIFILM XP70 configurada en HD y 30 frames, un trípode, luz de alta intensidad y la probeta con el patrón manchado.

Las probetas con el moteado fueron montadas en la máquina universal de ensayos. Con la probeta acoplada en el equipo, se ubicaron las luces en la parte lateral de la máquina de tensión enfocando la pieza, tal como se muestra en la figura 2.7. El objetivo de usar las luces es para incrementar y mejorar el contraste de las imágenes. Por otra parte, se monta la cámara en el trípode, asegurándose fijación, que esté nivelada y se ubica el lente de la cámara a una distancia de 30 centímetros de la muestra.

Finalizado el montaje del experimento, se procede a configurar las opciones de la cámara, para obtener una imagen clara y con alto contraste. Después de completar la configuración de la cámara, se puede iniciar con el experimento. Durante el

ensayo, el sistema de la cámara debe permanecer estático, evitando vibraciones (evitar el contacto con la cámara).

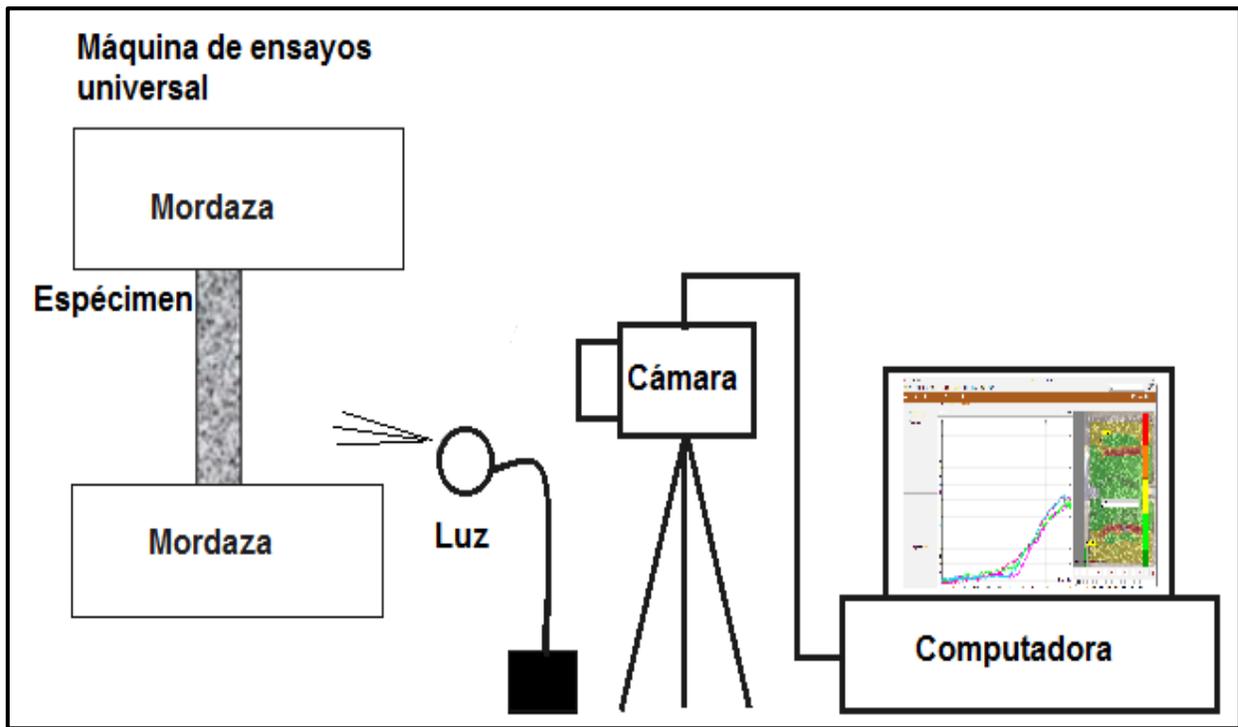


Figura 2.7 Modelo experimental de correlación de imágenes digitales

Se harán dos tipos de pruebas en este trabajo. En la primera prueba, se realizó la captura de imágenes en el rango elástico, a fin de calcular el módulo de Young y en la zona plástica se ejecutó hasta la fractura del material, para obtener las propiedades de tensión de las muestras como: esfuerzo de fluencia, esfuerzo último de tensión y deformación.

2.6 Correlación de imágenes Digitales

Para todas la muestras ensayadas, la resolución de las imágenes fue de 5184 x 3456 pixeles, con un tamaño de 6.22 MB. Todas las imágenes fueron tomadas sobre la cara lateral de las probetas en relación a su posición de montaje en la máquina universal de ensayos.

Se recomienda el un punto intermedio al inicio del ensayo a fin de conocer cuantitativamente la evolución del análisis. Posteriormente, estos parámetros se pueden modificar según las necesidades del estudio.

El tercer parámetro es la frecuencia en la toma de imágenes (hasta 30/segundo) y como se mencionó anteriormente, fue seleccionada una frecuencia igual al rango de datos adquiridos por la máquina de tensión (0.05 segundo).

Un análisis de las deformaciones que sufre el material compuesto se realizó mediante el equipo de correlación, para ello se captaron imágenes cada cinco segundos durante el periodo de crecimiento de grietas y finalmente se realizó el procedimiento de análisis para obtener video e imágenes de la etapa destructiva de la probeta.

2.7 Dimensión de la zona a analizar

Con el desarrollo de diferentes pruebas en el software de GOM se sugiere tener una dimensión de alrededor de 4X4 cm para poder observar resultados interesantes y también poder adaptar la superficie a la dimensión de la probeta (en la ubicación de la muesca de la grieta) como se puede observar en la Figura 2.8 siguiente mostrando una deformación unitaria en la dirección Y.

También al dimensionar la zona es muy importante escalar la serie de imágenes. Como el software calcula el componente de superficie y los elementos que dependen de él y son visibles en la vista 2D a través de todos los pasos. Por lo cual se debe de modificar la calibración de la series de imágenes para tener los valores indicados (deformación unitaria o desplazamientos). Para lo cual se sugiere los siguientes pasos para la calibración:

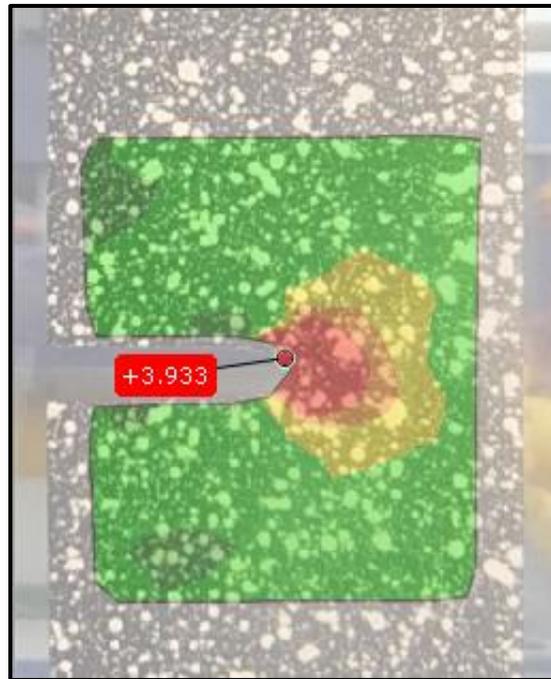


Figura 2.8 Superficie Generada sobre la probeta

1.-Seleccionar la serie de mediciones (ubicado en el árbol principal del programa GOM) y darle clic derecho, seleccionar modificación de parámetros de creación como se muestra en la Figura 2.9.

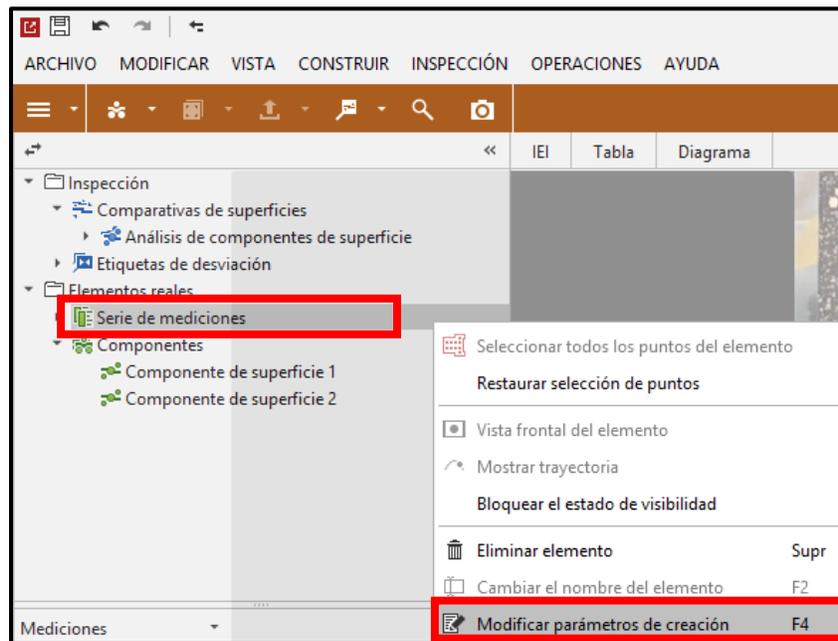


Figura 2.9 1 Secuencia para modificar parámetros

2.-Ya ubicados en el ventana emergente de modificar parámetros de creación, en la Figura 2.10 muestra señalada la pestaña de editar calibración después observar que este seleccionado en **Aplicar a** todos los pasos y dar clic en definir escala.

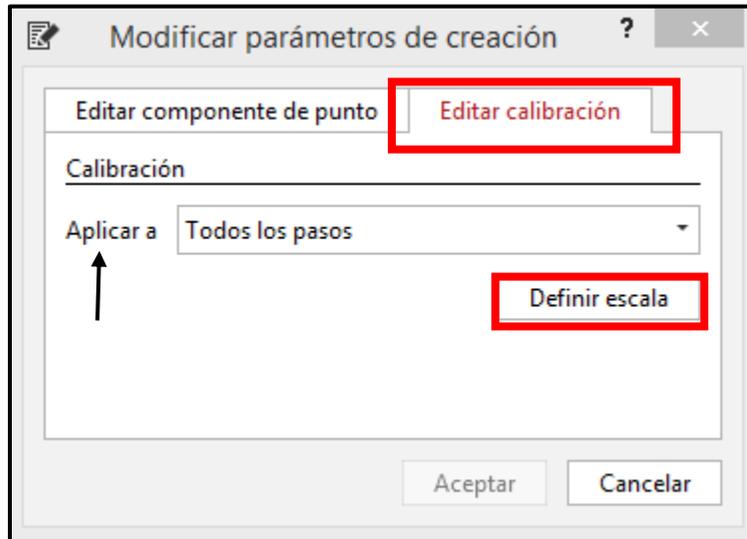


Figura 2.10 Modificar parámetros de escala

3.-Para definir la escala se ubican dos puntos en la zona es la probeta donde se sabe la distancia entre ambas puntos como se puede observar en la Figura 2.11, para este caso se ubican en los bordes de la probeta el cual es tiene una distancia entre puntos de 50.8 mm y por ultimo aceptar.

Por lo cual ya se tendrá correctamente calibrado la correlación de imágenes para obtener datos congruentes.

2.8 Tamaño de faceta y distancia entre

Durante la creación del componente de superficie, el software encuentra facetas cuadradas en las imágenes adquiridas. El software identifica las facetas por medio de la estructura de patrón estocástico.

En el sistema del software encuentra facetas en las imágenes de la cámara. De ese modo, el software puede calcular los puntos de medición en el espacio 2D. Se puede cambiar el tamaño de cada faceta.

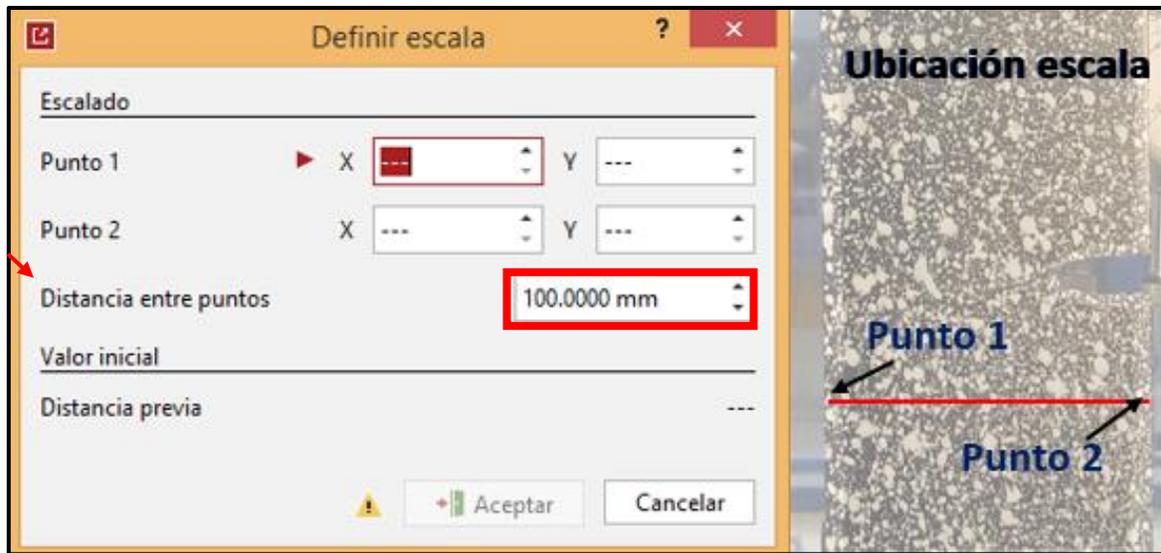


Figura 2.11 Definir escala

Para la faceta por defecto (19 x 19 píxeles), la precisión y el tiempo de cálculo se ajustan el uno al otro. Dependiendo de las tareas de medición y del patrón estocástico, se puede por ejemplo aumentar la precisión o acortar el tiempo de cálculo utilizando un tamaño diferente en la Tabla 2.4 muestras las relaciones efectivas de tamaño de facetas.

Tabla 2.4 Relaciones efectivas para tamaño de facetas

Relaciones efectivas para definir el tamaño de faceta para una distancia entre puntos constante	
El tamaño de la faceta es más grande que el tamaño por defecto	-Tiempo de cálculo más largo -Peor adquisición de efectos locales dentro de la faceta
El tamaño de la faceta es más pequeño que el tamaño por defecto	-Tiempo de cálculo más corto -Mejor adquisición de efectos locales dentro de la faceta

2.9 Distancia entre puntos

Se puede cambiar la distancia que hay entre las facetas individuales. La distancia entre puntos describe la distancia que hay entre los puntos de centro de las facetas

adyacentes. En la Tabla 2.5 muestra los ajustes, donde se modifica la densidad de puntos de medición dentro del componente de superficie. Cuanto es más pequeña la distancia entre puntos, mayor es la densidad de puntos de medición. Para aumentar la resolución espacial, reduzca la distancia entre las facetas. Al mismo tiempo, se modifica el área superpuesta de las facetas.

Tabla 2.5 Relaciones efectivas para distancia entre puntos
Relaciones efectivas para definir la distancia entre puntos

<p>La distancia entre puntos es más pequeña que la distancia por defecto</p>	<p>-Mayor densidad de puntos de medición -Tiempo de cálculo más largo</p>
<p>La distancia entre puntos es más grande que la distancia por defecto</p>	<p>-Menor densidad de puntos de medición -Tiempo de cálculo más corto</p>

Para el análisis de esta investigación se trabajó con un tamaño de faceta de 21 pixeles y una distancia entre puntos de 10 pixeles como muestra la Figura 2.12. Esto también se puede justificar con la figura 4 donde se muestra el comportamiento de diferentes tamaños de facetas y distancias entre puntos para obtener el factor de intensidad de esfuerzos y además de tener una estabilidad adecuada en la curva.

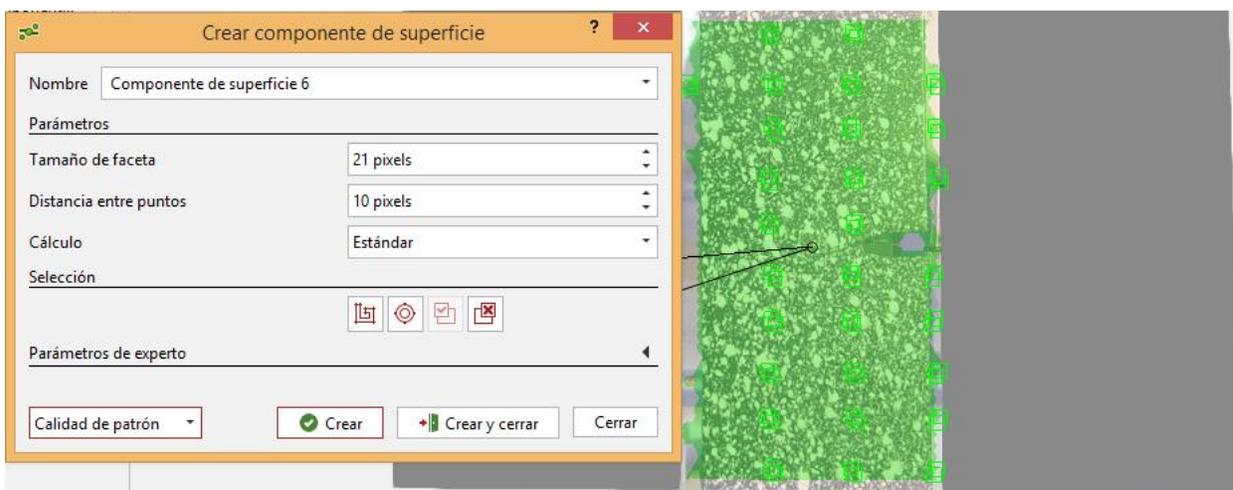


Figura 2.12 Tamaño de faceta y distancia entre puntos óptimos

2.10 Cálculo del Factor de Intensidad de Esfuerzo (K_I)

La base fundamental de la Mecánica de Fractura Lineal Elástica [2], para el análisis del comportamiento de la grieta, basta con conocer el valor del Factor de Intensidad de Esfuerzos. La importancia de K , es que gobierna la magnitud del campo de esfuerzos en la punta de la grieta, además es un parámetro que depende de la geometría y del modo de carga aplicado; de esta K se convierte en el único parámetro significativo para cualquier problema de cuerpos con grietas.

Una vez conocido el Factor de Intensidad de Esfuerzos de una estructura que tenga un comportamiento elástico, se puede establecer las condiciones críticas a las que está sujeta dicha estructura, comparando el K obtenido, con el Factor de Intensidad de Esfuerzos Crítico (K_{IC}), para el cual la grieta se propaga, el cual puede interpretarse en términos del valor crítico (K_{IC}) que se requiere para la propagación de la misma, si:

$K_I > K_{IC}$, La grieta se propagará, siendo K_{IC} la tenacidad a la fractura.

K_I : es función del tamaño y forma de la grieta, del tipo de carga aplicada y de la configuración geométrica de la estructura.

El factor de intensidad de esfuerzo define la amplitud de la singularidad en la punta de la grieta. Esto es, los esfuerzos cerca de la punta se incrementan en proporción a K_I . Además, el parámetro establece completamente las condiciones existentes en la punta de la grieta, ya que conocido éste, es posible calcular el esfuerzo, la deformación y el desplazamiento como una función de r y θ (Figura 2.13), por lo que este parámetro es uno de los más importantes en la mecánica de fractura y una vez conocido, el campo de esfuerzos queda definido por completo [51].

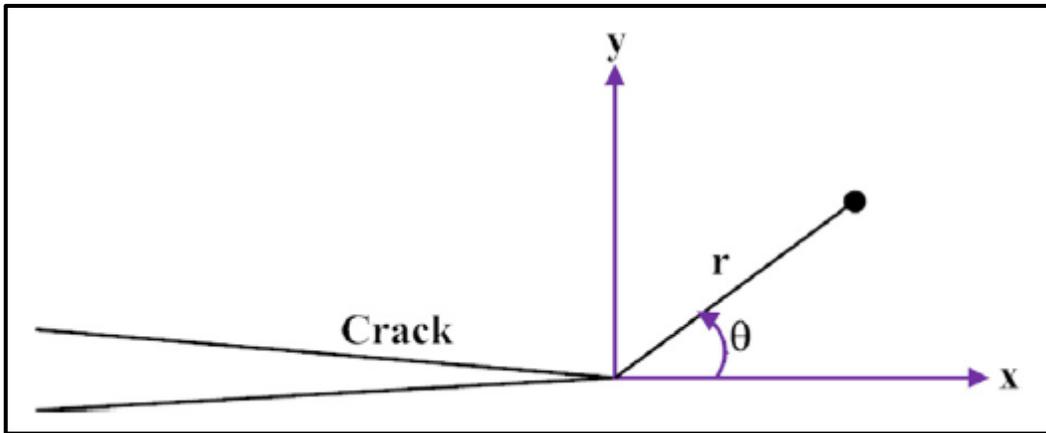


Figura 2.13 Coordenadas polares en punta de grieta [51]

La aplicación de la teoría elástica lineal predice que el esfuerzo tiende a infinito mientras se acerca a la punta de la grieta, pero en materiales reales no puede existir esfuerzo infinito.

Las soluciones analíticas para determinar los factores de intensidad de esfuerzos están limitadas a un número pequeño de situaciones idealizadas, donde los elementos se consideran infinitos. Pero en situaciones prácticas, sucede lo contrario, es decir, de longitudes finitas, pero con carga compleja. Por lo tanto, existe la necesidad de desarrollar mejores técnicas numéricas que proporcionen otro enfoque para la determinación de soluciones acertadas para la predicción del comportamiento de una grieta en la Mecánica de Fractura.

2.10.1 Evaluación experimental del Factor de Intensidad de Esfuerzos basado en el campo de deformaciones

Para calcular el factor de intensidad de esfuerzos a partir de datos de DIC experimentales, se definió un algoritmo numérico para procesar el campo de deformaciones extraído de DIC. Esta función se une al algoritmo de cálculo de factor de intensidad de esfuerzos excesivamente determinista y al cálculo de los esfuerzos en función de los esfuerzos principales (Ec. 18) en la proximidad de una grieta frontal recta en condiciones de cualquier modo de fractura.

$$\sigma = \begin{Bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \tau_{xy} \end{Bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} \quad (18)$$

En el trabajo desarrollado por Farahani [14] y Tavares [13] utiliza un problema plano de un sólido isótropo homogéneo, se usaron las series de expansión de Williams (Ec. 19-22) para el estado de esfuerzo plano fueron utilizados donde la importancia de K_I .

$$\sigma_{xx} = \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_{In} \frac{n}{2} \right) r^{\frac{n}{2}-1} \left\{ \left[2 + (-1)^n + \frac{n}{2} \right] \cos \left(\left(\frac{n}{2} - 1 \right) \theta \right) - \left(\frac{n}{2} - 1 \right) \cos \left(\left(\frac{n}{2} - 3 \right) \theta \right) \right\} \quad (19)$$

$$\sigma_{yy} = \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_{In} \frac{n}{2} \right) r^{\frac{n}{2}-1} \left\{ \left[2 - (-1)^n - \frac{n}{2} \right] \cos \left(\left(\frac{n}{2} - 1 \right) \theta \right) + \left(\frac{n}{2} - 1 \right) \cos \left(\left(\frac{n}{2} - 3 \right) \theta \right) \right\} \quad (20)$$

$$\tau_{xy} = \sum_{n=1}^{\infty} \left(A_{In} \frac{n}{2} \right) r^{\frac{n}{2}-1} \left\{ - \left[(-1)^n + \frac{n}{2} \right] \sin \left(\left(\frac{n}{2} - 1 \right) \theta \right) + \left(\frac{n}{2} - 1 \right) \sin \left(\left(\frac{n}{2} - 3 \right) \theta \right) \right\} \quad (21)$$

$$A_{In} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}} \quad (22)$$

En estas expansiones, r y θ , son las coordenadas polares como se muestran en la figura 11. Donde A_{In} es el coeficiente constante relacionado con las partes de deformación de modo I, n es el orden de los términos. Los factores de intensidad de esfuerzo de Modo I (K_I) están relacionados con los coeficientes de los primeros términos ($n = 1$), que se muestran con A_{In} .

DIC se ha propuesto recientemente para determinar los parámetros de punta de grieta como KI y KII. Por ejemplo, McNeill et al. [52] y Ayatollahi [46] calcularon SIF en el modo I de carga o Rashidi Moghaddam [53], Dehnavi [21] y Zhang y He [10] midieron SIF de modo mixto utilizando el método DIC. En las últimas décadas, el método DIC ha atraído mucha atención en la comunidad de mecánica de fracturas. Si bien la mayoría de estos estudios se han ocupado del uso del método DIC para obtener deformación en componentes agrietados.

2.10.2 Evaluación experimental del Factor de Intensidad de Esfuerzos basado en el campo de desplazamientos

En las técnicas convencionales para determinar los factores de intensidad de esfuerzo, la automatización es difícil porque la posición de la punta de la grieta debe conocerse de antemano. Además, los valores del factor de intensidad de esfuerzo dependen de la coordenada de entrada de grieta en el algoritmo. En el método propuesto, los factores de intensidad de esfuerzo, así como los términos de orden superior y la ubicación de punta de grieta se tratan como incógnitas.

Cuando se obtienen los campos de desplazamiento, el paso de post-procesamiento debe realizarse para calcular los factores de intensidad de esfuerzo de los campos de desplazamiento. Este procedimiento se realiza considerando el área alrededor de la punta de la grieta y aplicando el desplazamiento en ecuaciones de series finitas conocidas como la ecuación de expansión de Williams en esta área. Los desplazamientos del cuerpo rígido en el plano y la rotación rígida del cuerpo se tienen en cuenta para eliminar los errores relacionados con la máquina de prueba, la captura de imágenes y otras fuentes de errores. La relación de Williams está escrita en un sistema de coordenadas polares en la Ec. 23, Ec. 24 y el la ubicación cerca de la punta de la grieta se ilustra en la figura 11.

$$u_x = \sum_{n=1}^{\infty} (A_{In}) \frac{r^{\frac{n}{2}}}{2\mu} \left\{ \left[\kappa + (-1)^n + \frac{n}{2} \right] \cos \left(\left(\frac{n}{2} \right) \theta \right) - \left(\frac{n}{2} \right) \cos \left(\left(\frac{n}{2} - 2 \right) \theta \right) \right\} \quad (23)$$

$$v_y = \sum_{n=1}^{\infty} (A_{In}) \frac{r^{\frac{n}{2}}}{2\mu} \left\{ \left[\kappa - (-1)^n - \frac{n}{2} \right] \sin \left(\left(\frac{n}{2} \right) \theta \right) + \left(\frac{n}{2} \right) \sin \left(\left(\frac{n}{2} - 2 \right) \theta \right) \right\} \quad (24)$$

$$A_{In} = \frac{K_I}{\sqrt{2\pi}} \quad (25)$$

Donde, u_x y v_x son los componentes horizontales y de desplazamiento horizontal, respectivamente, μ es el módulo de corte que es $\frac{E}{2(1+\nu)}$ donde E es el módulo de Young y ν es la relación de Poisson; κ es un factor cuya condición de esfuerzo plano

es $\frac{(3-\nu)}{(1+\nu)}$ y para la deformación plana es de $(3 - 4\nu)$. r E θ indica el sistema de coordenadas polares alrededor de la frente de la grieta como la figura 11.

2.10.3 Consideraciones para la ubicación de coordenadas polares para la estimación del factor de intensidad de esfuerzo

Estas consideraciones son muy importantes para reducir el número de incógnitas en los modelos numérico para el cálculo de factor de intensidad de esfuerzos, el cual debe de ser el sistema de coordenadas polares alrededor de la frente de la grieta.

Para el ángulo θ : En la Figura 2.14 se muestra el comportamiento del factor de intensidad de esfuerzos K_I bajo cargas estáticas con respecto al ángulo de inclinación de la grieta, donde se observa que el factor de intensidad de esfuerzo es máximo cuando se encuentra en la grieta a 0° [10].

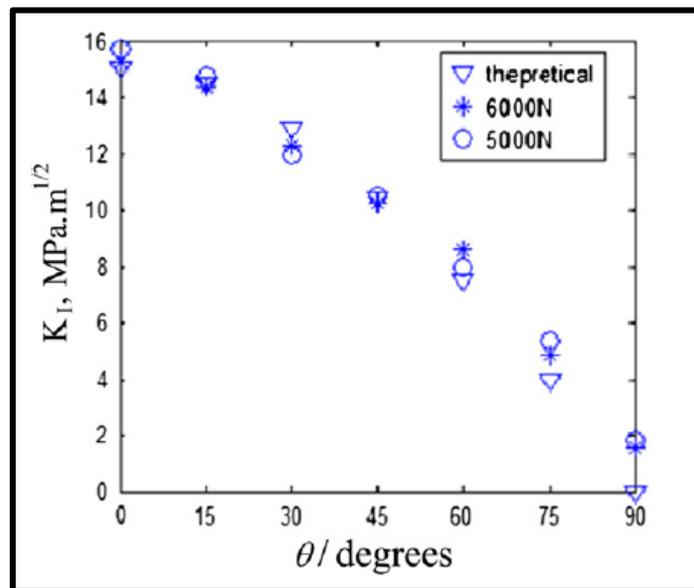


Figura 2.14 Variación del Factor de Intensidad de Esfuerzos con respecto al ángulo de inclinación [10]

Para la distancia (r): esta distancia es muy importante, sirve para evitar que el factor de Intensidad de esfuerzo este cerca o en la singularidad y el factor tienda a infinito por lo cual en trabajos como Tavares [13] muestra cual el comportamiento de la distancia con respecto al deformación unitaria el cual tiende a infinito cuando r se acerca a cero como se muestra en la Figura 2.15, por lo cual se opta por tener una r de 0.02 de la longitud de la grieta.

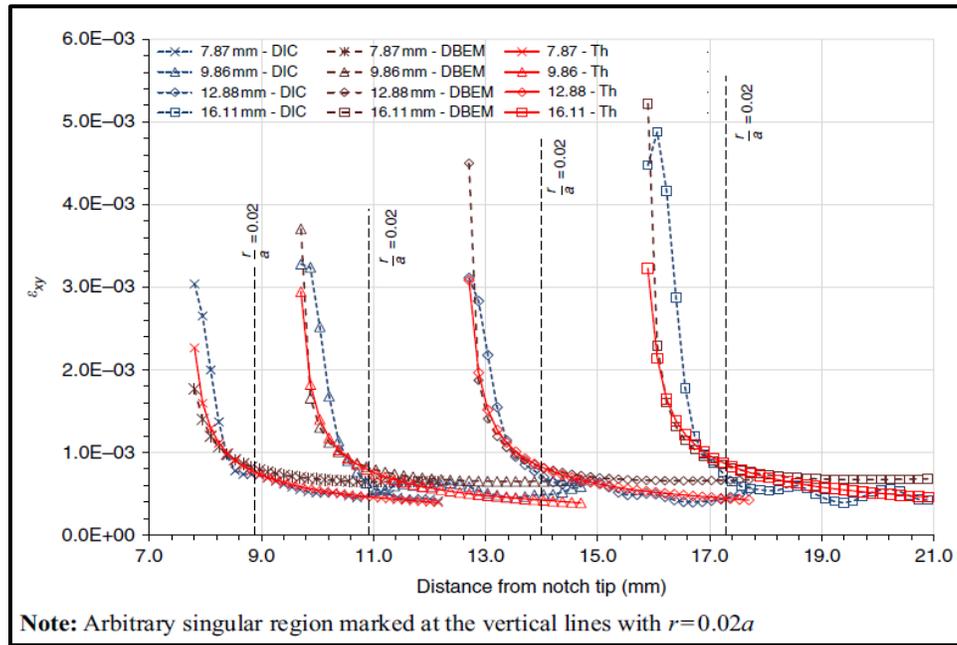


Figura 2.15 Comportamiento de la distancia (r) con respecto al deformación unitaria [13]

Capítulo III Análisis Numérico

En este capítulo se describe el procedimiento que se debe aplicar para obtener el factor de intensidad del esfuerzo a través de MEF. La plataforma de elemento finito utilizada para todos los análisis desarrollados en esta investigación es Ansys Parametric Design Language (APDL).

La ventaja de utilizar APDL es la facilidad de introducir características geométricas y propiedades físicas del modelo que se pretenda elaborar. Además de esto, tareas repetitivas son cómodas de desarrollar al implementar un mecanismo de entrada tipo programación, a través del uso de archivos en los que se definan todas las instrucciones necesarias para la simulación y su posterior solución.

3.1 Factor de Intensidad de Esfuerzo

En el diseño de partes mecánicas muchos de nosotros hemos trabajado con factores de concentración de esfuerzo los cuales nos proporcionan una indicación de la carga promedio que se requiere sobre una parte para que ocurra la fluencia o la deformación plástica, sin embargo el uso de estos factores de concentración de esfuerzo se limitan a estructuras en las cuales todas las dimensiones se conocen de manera precisa, particularmente el radio de curvatura en zonas de alta concentración de esfuerzo.

Cuando existe una grieta en la estructura de una parte mecánica esta ya no puede ser analizada por medio del uso de factores de concentración de esfuerzo ya que su forma es muy diferente a un concentrador de esfuerzo por lo que es necesario utilizar otros métodos de análisis. Para este tipo de problemas es necesario realizar un análisis de Mecánica de la Fractura en el cual se pueda analizar el comportamiento y la evolución de la grieta sobre la parte en la cual se encuentra.

Así mismo para evaluar el comportamiento de crecimiento de la grieta y la participación de estas en la integridad estructural de una máquina rotatoria es necesario conocer los factores de intensidad de esfuerzo a lo largo de la fisura que más adelante se analizará.

Como se mencionó anteriormente K_I es un factor de intensidad de esfuerzo el cual es una función de la geometría, el tamaño y la forma de la grieta, y el tipo de carga el cual está dado por la ecuación (1.8).

K_I es un factor de modo I que es propagación de grieta en apertura.

Existen varios métodos para conocer el factor de intensidad de esfuerzos K_I , en los que se encuentran métodos experimentales, métodos analíticos, métodos indirectos. Sin embargo, el más utilizado es la solución por métodos numéricos (elemento finito). Observando en la ecuación 1.8 que el factor de intensidad de esfuerzos considera la magnitud del esfuerzo y la profundidad de la grieta, lo que

permite establecer la severidad del campo de esfuerzos y así comparado con la tenacidad a la fractura del material se puede predecir si una grieta de propagará. Para obtener KI mediante una solución por métodos numéricos de elemento finito se utiliza ANSYS APDL dentro del cual existen dos métodos para calcular el factor de intensidad de esfuerzos, los cuales son los siguientes.

- Método de Interacción Integral: ANSYS realiza el cálculo de los factores de intensidad de esfuerzo en la solución y almacena los resultados en un archivo de resultados para el post procesamiento.
- Método de extrapolación de desplazamiento. ANSYS realiza el cálculo de los factores de intensidad de esfuerzos durante el post procesamiento.

3.1.1 Evaluación numérica de los parámetros de mecánica de la fractura

Para evaluar los parámetros de la mecánica de fractura se considera lo siguiente:

- Cálculo de la integral J , se basa en el enfoque integral del dominio y se lleva a cabo durante la fase de solución del análisis (CINT).
- Cálculo de la tasa de liberación de energía directa, basada en la técnica de cierre de grieta virtual (VCCT), se lleva a cabo durante la solución (CINT).
- Cálculo de los factores de intensidad de esfuerzo con la integral de interacción durante la solución (CINT).
- Cálculo de los factores de intensidad de esfuerzo con extrapolación durante el post procesamiento (KCALC).

Se considera usar KCALC por la siguiente consideración el método numérico y el método analítico ya que representa la óptima de los dos tipos de métodos numéricos esto ya fue comprobado por la Figura 3.1.

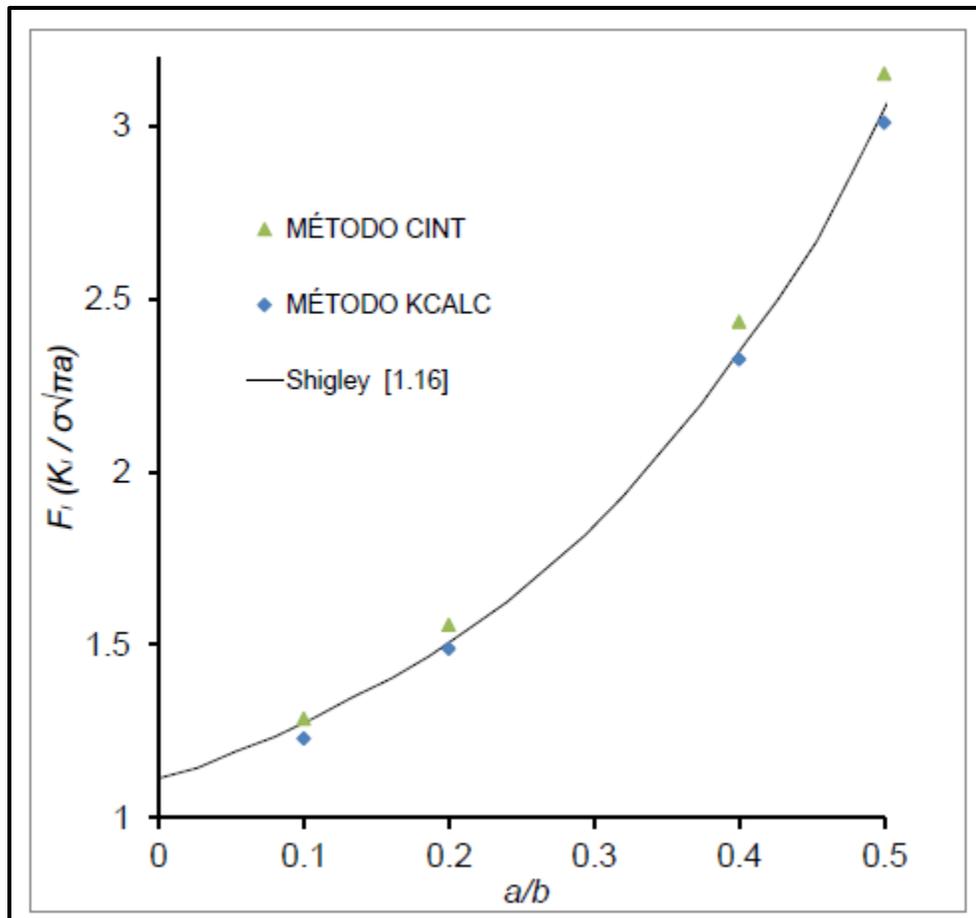


Figura 3.1 Justificación de usar KCALC

3.2 Consideraciones del elemento finito

En este apartado se contemplan las características principales para el desarrollo del método numérico. Lo cual se desarrolla simplificaciones de geometría, los tipos de elementos a utilizar y el procesamiento en ANSYS APDL.

3.2.1 Geometría

En este análisis se considera una placa con grieta en el borde la cual se encuentra sometida a tensión longitudinal como se muestra en la Figura 3.2. Esta configuración geométrica es la apropiada, para semejar las circunstancias de la experimentación.

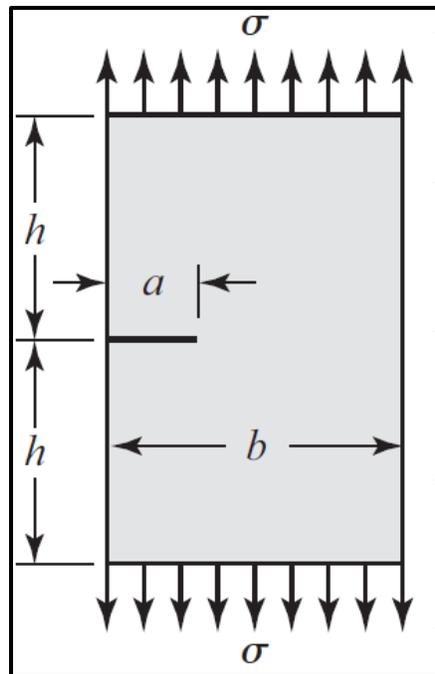


Figura 3.2 Modelo para el análisis numérico

En esta configuración geométrica, a representa la profundidad de la grieta (Línea resaltada), b es el ancho de la placa, $2h$ es el largo de la placa y σ es el esfuerzo longitudinal al que se encuentra sometida, donde, la grieta presenta un estado de tensiones de Modo I (modo de apertura).

3.2.2 Selección de elementos

PLANE183 es de orden superior a 2-D, es un elemento de 6 y 8 nodos. PLANE183 tiene un comportamiento de desplazamiento cuadrático y es muy adecuado para el modelado de mallas irregulares (tales como los producidos por diversos sistemas CAD / CAM).

Este elemento tiene 8 nodos o 6 nodos con dos grados de libertad en cada nodo: traslaciones nodales en las direcciones x y y . El elemento puede ser utilizado como un elemento plano (tensión plana, deformación plana y deformación plana generalizada) o como un elemento de simetría axial. Este elemento tiene plasticidad, hiperelasticidad, fluencia, esfuerzo de rigidez, largas deflexiones, y la capacidad de deformación en gran tamaño.

La geometría, la ubicación de los nodos y el sistema de coordenadas para este elemento se muestran en la Figura 3.3.

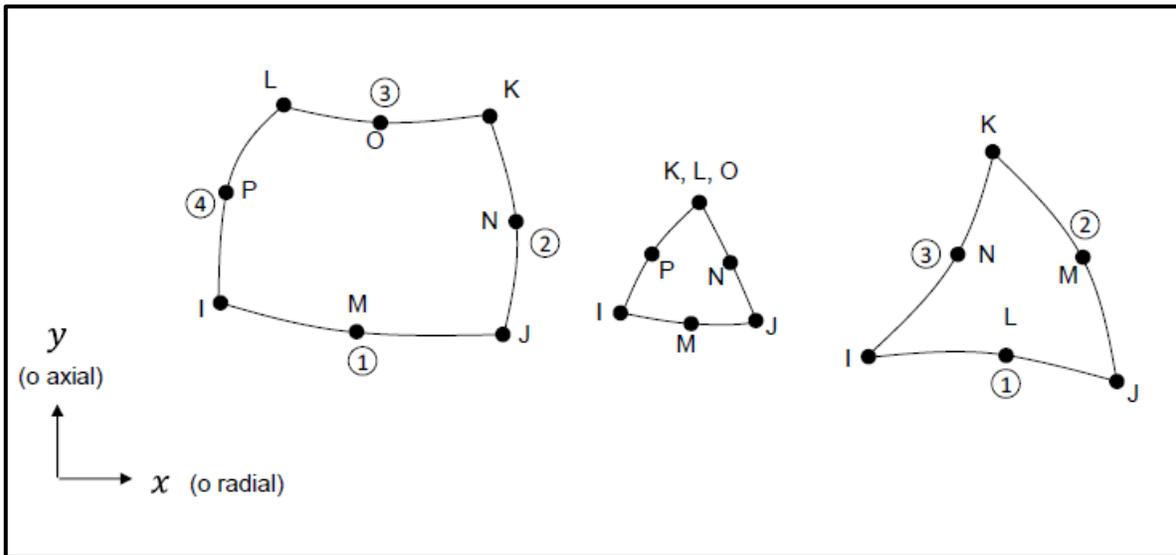


Figura 3.3 Geometría del Plane 183

3.3 Cálculo del factor de intensidad de esfuerzo con extrapolación (KCALC).

Para el análisis se realiza en 2-D en el cual se presenta el procedimiento para obtener los factores de intensidad de esfuerzos de una placa con grieta en el borde como se muestra en la figura 32.

Dado que se trata de un análisis en 2-D, el procedimiento que se utiliza es el siguiente:

- Paso 1: Seleccionar y asignar el tipo de elemento.
- Paso 2: Definir las propiedades del material para el modelo virtual.
- Paso 3: Generar la geometría para el modelo de elemento finito.
- Paso 4: Realizar la discretización del modelo computacional.
- Paso 5: Aplicar las condiciones de frontera.
- Paso 6: Cálculo del factor de intensidad de esfuerzo.

3.3.1 Seleccionar y asignar el tipo de elemento

Para problemas de grieta en 2-D, el tipo de elemento más usual es PLANE183 el cual tiene 6 o 8 nodos (ver figura 33), este tipo de elemento contiene nodos intermedios entre los nodos principales del elemento.

Para seleccionar y asignar este tipo de elemento en el análisis se utiliza la siguiente sintaxis:

```
ET,1,PLANE183,,,0
```

Donde ET es el comando para seleccionar el tipo de elemento, 1 define al elemento como número 1, PLANE183 es el tipo de elemento y 0 se utiliza para esfuerzo plano y 2 es para deformación plana.

3.3.2 Definir las propiedades del material para el modelo virtual

La placa que se utiliza para este análisis tiene un módulo de Young $E = 69.5 \text{ GPa}$ y una relación de Poisson $\nu=0.33$.

Para asignar estas propiedades de material de la placa a la plataforma de ANSYS APDL se utiliza la siguiente sintaxis.

```
MP,EX,1,2.11E5  
MP,PRXY,1,0.3
```

Donde MP define las propiedades lineales del material como una constante o una función de la temperatura, EX y PRXY representan el nombre con el que Ansys reconoce la propiedad del material, en este caso modulo elástico y relación de Poisson, respectivamente, 1 es el número de referencia asociado a este material con los elementos y el ultimo comando es el valor de la propiedad del material.

Hay que hacer mención que al requerir que el resultado de K_I sea en $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$, es necesario ingresar adecuadamente las unidades del módulo de Young, en este caso como se observa en la sintaxis, las unidades del módulo de Young son MPa .

3.3.3 Crear la geometría para el modelo de elemento finito

Si observamos cuidadosamente la geometría de la placa (figura 32), se puede ver un plano de simetría, por lo que resulta conveniente modelar solo la mitad del componente y aplicar la condición de simetría, esto es con el fin de simplificar el modelo y disminuir el número de elementos y nodos del modelo virtual.

En la Figura 3.4 se puede observar la simplificación del modelo de la placa, es decir solo se puede generar la mitad del largo de la placa, siendo solo la longitud h , y aplicar la condición de simetría en la línea verde, la línea roja dimensionada por a representa la grieta de la placa.

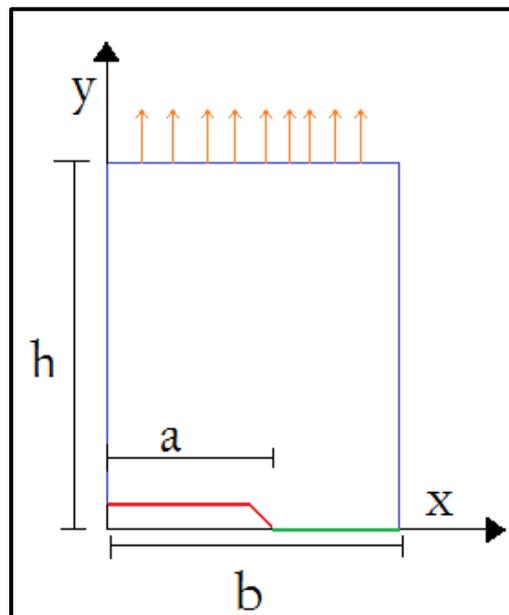


Figura 3.4 Modelo para elemento finito

Donde las dimensiones $h = 0.125 \text{ m}$, corresponde la distancia de la grieta hasta la ubicación de empieza la mordaza de la maquina universal a utilizar; $b = 0.0508 \text{ m}$ en la dimensión del ancho de la probeta de aluminio; $a = 0.0254 \text{ m}$ es el tamaño de la grieta que está dado por la norma ASTM.

El primer paso para generar la simetría de la placa fisurada en Ansys APDL, es definir las dimensiones del modelo para cada caso de análisis, en el plano que se

generará. Esto se hace con la creación de puntos de coordenadas (keypoint) que el programa utilizará para generar la geometría.

Para facilitar la generación de la geometría de la placa fisurada, la punta de la grieta se hará coincidir con el origen del sistema de coordenadas, esto repercutirá en la facilidad del manejo de los demás keypoints. En la Figura 3.5 se puede observar la creación de los keypoints y las líneas que los unen, formando en conjunto la geometría de la placa fisurada.

Para definir cada punto (keypoints) y línea de la placa se utilizan las siguientes líneas de sintaxis, las cuales se introducen al programa.

Tabla 3. 1 Comando de geometría

Comandos para la geometría		
/PREP7	K,4,-a,h,0	
relación=0.5	K,5,-a,cy,0	
h=0.125	k,6,-cx,cy,0	
b=0.0508	L,1,2	
a=relacion*b	L,2,3	
cy=0.00238125	L,3,4	
cx=0.0037	L,4,5	
K,1,0,0,0	L,5,6	
K,2,(b-a),0,0	L,6,1	
K,3,(b-a),h,0		

Figura 3.5 Modelo en ANSYS APDL

Para generar el área se utiliza el comando

AL, L1, L2, L3, L4, L5, L6, L7

EL comando a utilizar AL el cual perímete generar el área a partir de las líneas generadas anterior mente. L1, L2, L3, L4, L5, L6, L7 corresponde al número de línea (en la figura 35 se muestra las líneas que generan el área). La Figura 3.6 se puede observar en área generada la cual servirá para ser análisis bidimensional para comparar contra el análisis experimental.

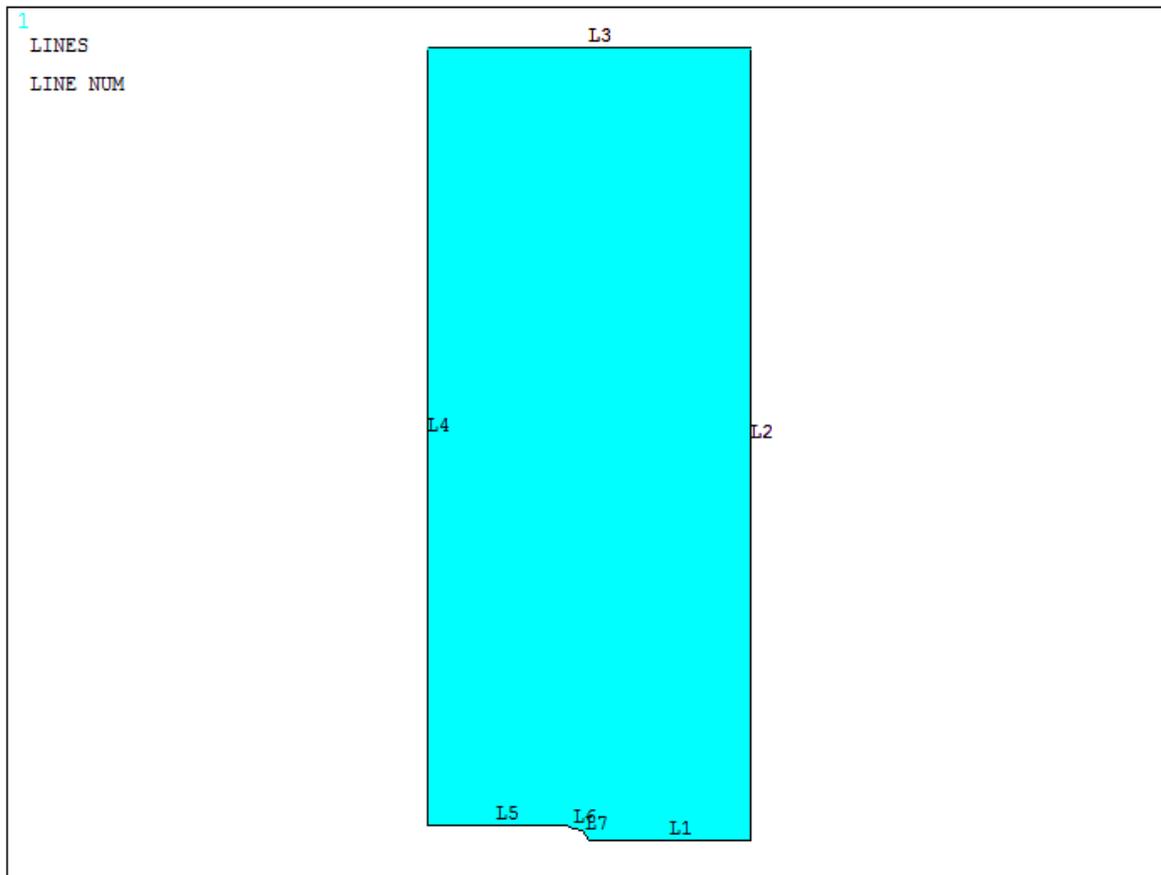


Figura 3.6 Área de la probeta en el análisis bidimensional

Como se comentó, el modelo de placa fisurada se simplificó al realizar solo la mitad del dominio y posteriormente se aplicaría una condición de simetría. Esta condición se aplicara en los 4 modelos mediante la siguiente sintaxis:

DL,4,1,SYMM

Donde el numero 4 indica que a línea que se le aplicará la condición de simetría mediante el comando SYMM es el área 1, que coincide con ser el mismo número de área para los 4 modelos que se realizaron de placa fisurada como la Figura 3. 7.

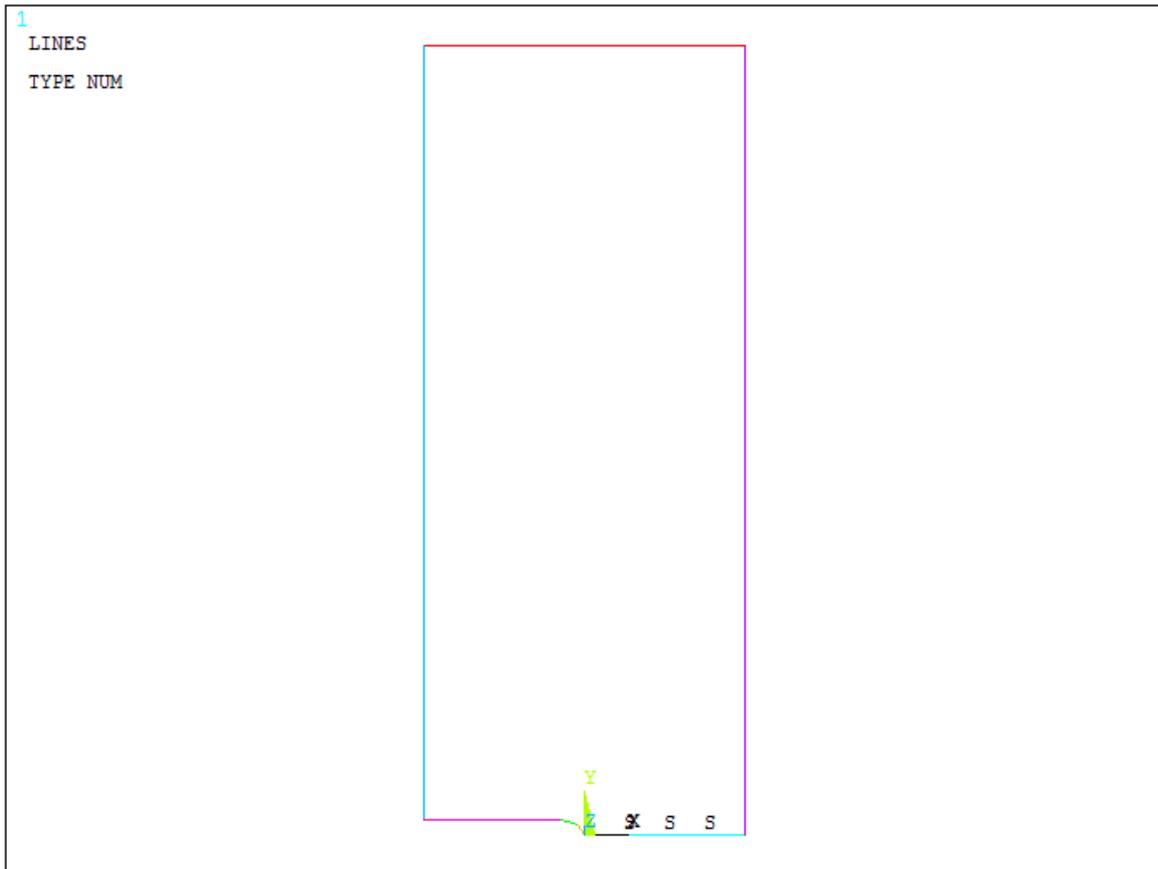


Figura 3. 7 Condición de simetría

3.3.4 Realizar la discretización del modelo computacional

El siguiente paso de este proceso de análisis es realizar la discretización del dominio computacional. El motivo principal de utilizar ANSYS es poder realizar una mejor discretización del modelo, en la sección o parte agrietada se controla la posición de los nodos intermedios para ubicarlos a $\frac{1}{4}$ de distancia entre los nodos principales del elemento. En la Figura 3.8 se muestra una representación general de nodos intermedios a $\frac{1}{4}$ de distancia entre los nodos principales del elemento.

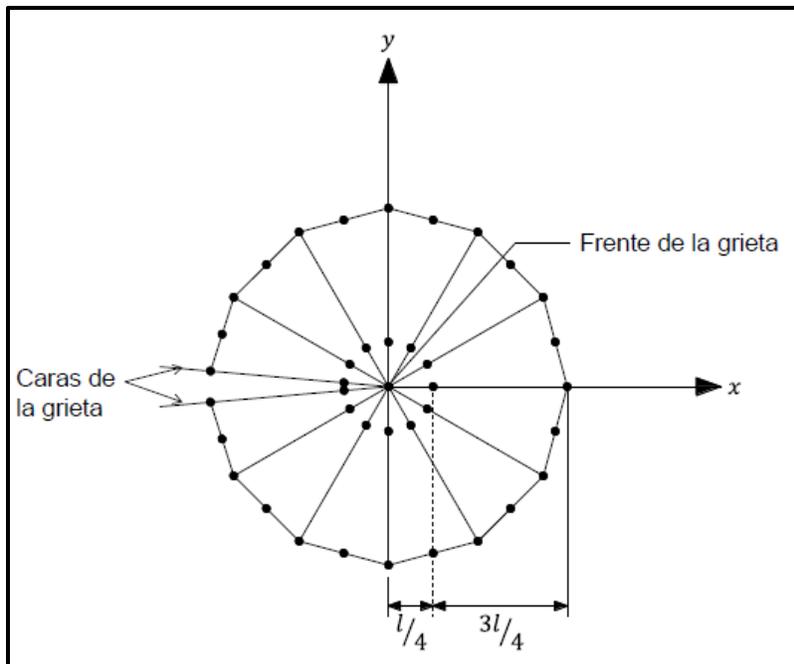


Figura 3.8 Elemento singular con nodos intermedios a $\frac{1}{4}$ de distancia.

Con respecto a esta configuración de nodos intermedios a $\frac{1}{4}$ de distancia entre los nodos principales se realiza la discretización del dominio computacional.

El comando a utilizar es KSCON, corresponde al intensificador de esfuerzo el cual debe indicarse primero en qué punto debe de ubicarse, segundo el radio que tendrá el intensificador, indicar si los que nodos tiene que ir a $\frac{1}{4}$ de distancia entre los nodos principales, cuarto el número de elementos en la circunferencia del intensificador y por último la relación del radio de la segunda fila del concentrador de esfuerzo que también se puede observar en la Figura 3.9.

KSCON,1,0.001,1,16,0.2,

En la siguiente Figura 3.10 se presenta el modelo de elemento finito de la placa. Se puede observar en esta figura que la densidad de la malla es mayor en la zona donde se encuentra la grieta y no es necesario realizar una discretización más densa en zonas donde no se tienen aspectos de mayor consideración, ya que lo único que se incrementa con una discretización más densa son el número de elementos y nodos. Esto repercute en el tiempo que se utiliza para dar solución al proceso de análisis.

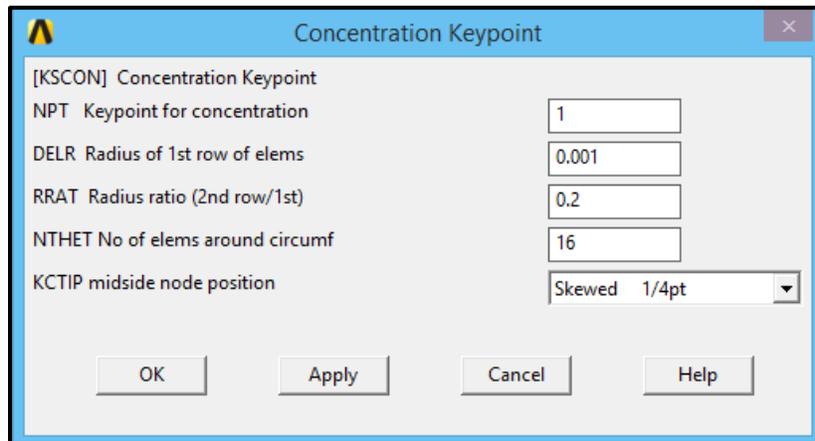


Figura 3.9 Configuración del intensificador de esfuerzos

3.2.1 Aplicar las condiciones de frontera

Para establecer las condiciones de frontera del modelo se consideran las siguientes restricciones. La placa se encuentra sometida a un esfuerzo de tensión longitudinal como se ve en la Figura 3.4 y dado que solo se está modelando la mitad del componente se deben restringir los desplazamientos de los nodos que se encuentran en la línea de simetría en las direcciones adecuadas.

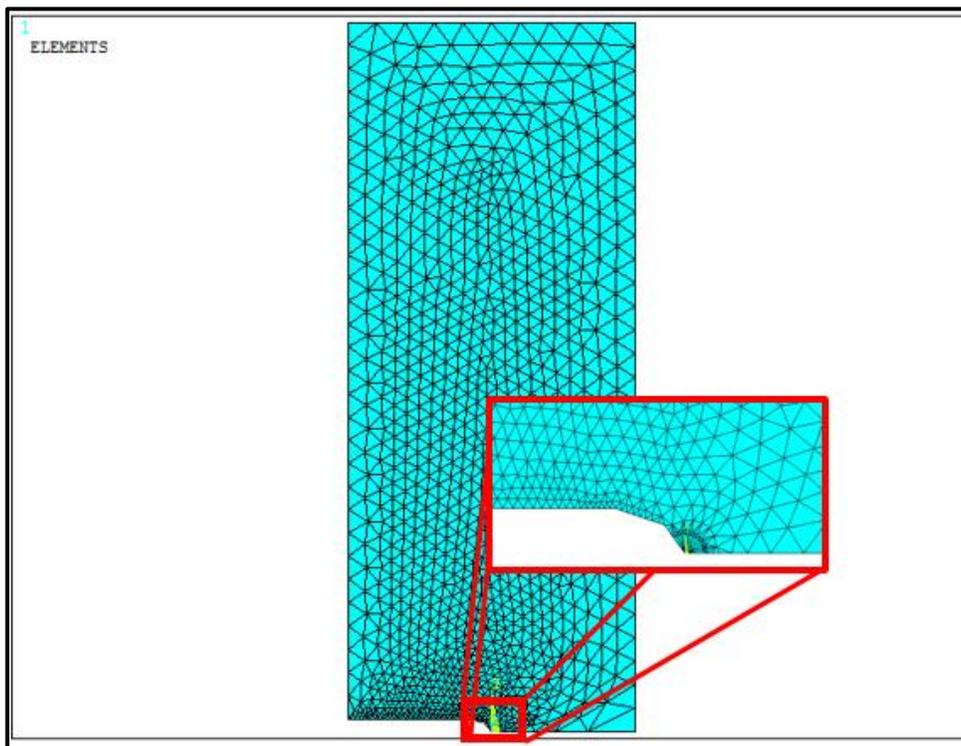


Figura 3.10 Mallado de la geometría

Para realizar esto, se seleccionan todos los nodos que se encuentra en la línea 1 (L1) de la geometría de la placa y se debe restringir su desplazamiento en la dirección y a un valor de cero. En la Figura 3.11 se presenta el resultado de esta condición de frontera.

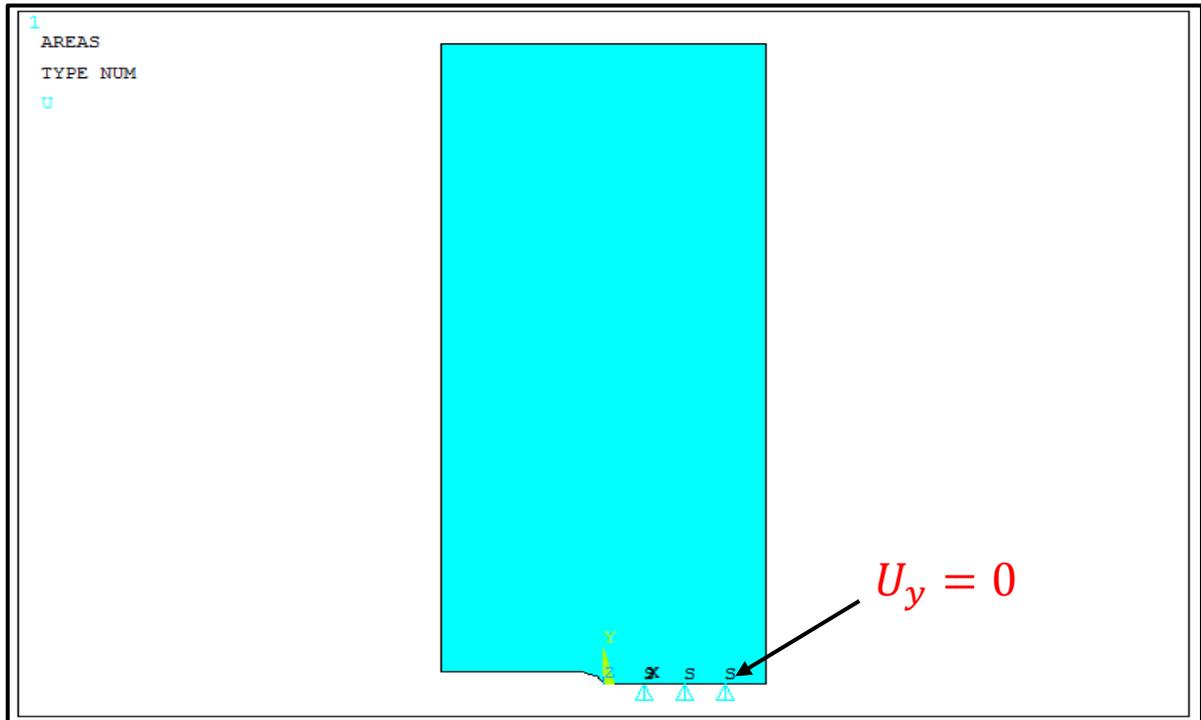


Figura 3.11 Condición de frontera de restricción de desplazamiento en la dirección Y

Otra consideración importante de condición de frontera es que la punta de la grieta del modelo no se debe mover en la dirección x . Esto se realiza seleccionando el nodo que define a la punta de la grieta o frente de la grieta el cual se encuentra en el origen del sistema de coordenadas y se restringe su desplazamiento a un valor de cero como se muestra en la Figura 3.12.

Los demás nodos que se encuentran en esta posición excepto el del origen pueden tener desplazamiento en x al igual que el resto de todo el dominio, así como también se deja libre la dirección z para todos los nodos del dominio computacional.

Por último, para definir por completo las condiciones de frontera del modelo se aplica la carga de la placa. El valor del esfuerzo para este análisis es de 64 MPa y se aplica en la línea 3 (L3) de la geometría, Figura 3.13.

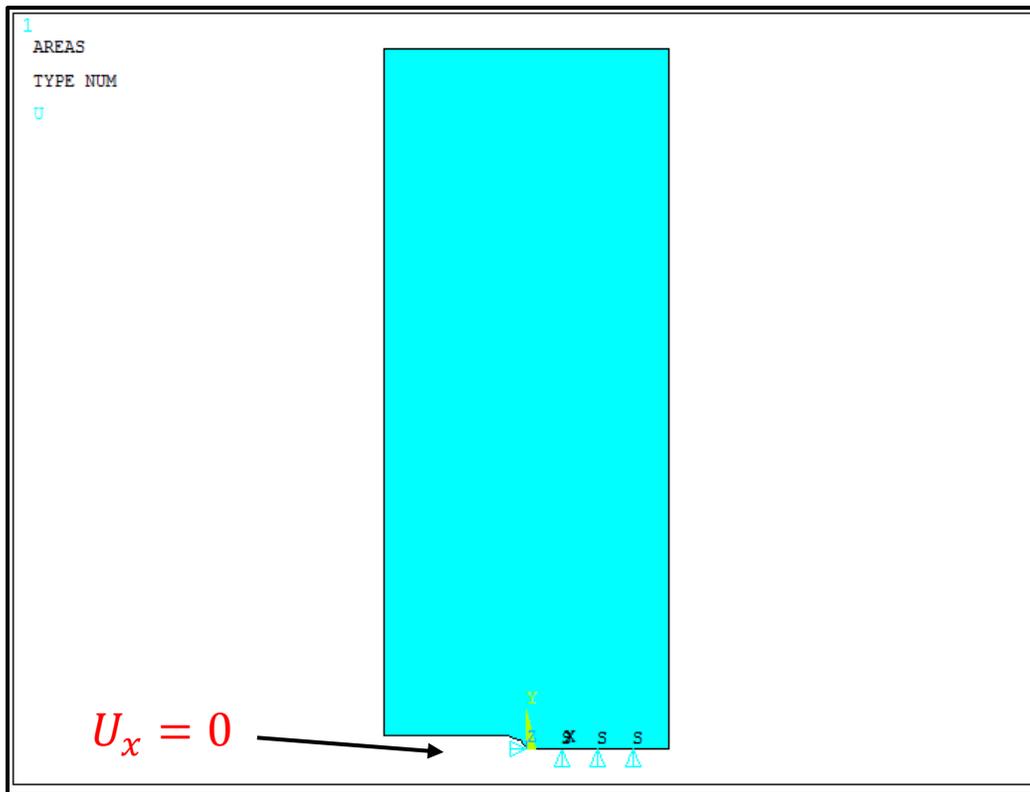


Figura 3.12 Condición de frontera de restricción de desplazamiento en la dirección x

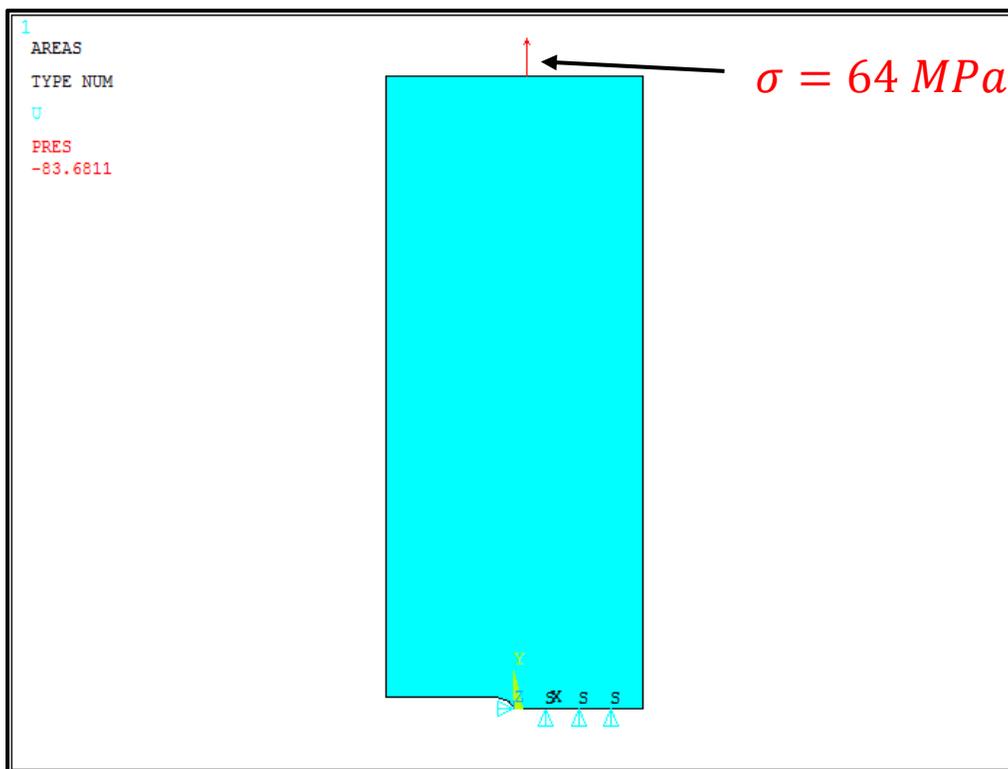


Figura 3.13 Esfuerzo sometido por la carga

3.3.6 Cálculo del factor de intensidad de esfuerzo

De acuerdo al procedimiento para obtener el factor de intensidad del esfuerzo estudiado al inicio de este capítulo es posible elegir solo uno de los nodos que conforman el frente de la grieta, para realizar el cálculo ya que se trata de una placa plana y la carga está distribuida uniformemente sobre la cara superior, por lo tanto el valor del factor de intensidad del esfuerzo tendera a ser el mismo en cualquiera de los nodos del frente de la grieta.

Una vez que se definió el nodo que se va a utilizar para el cálculo del factor de intensidad del esfuerzo, se realizan los ajustes necesarios de acuerdo al procedimiento y la sintaxis que se requieren para el uso del comando KCALC, con la finalidad de compararlo el análisis experimental.

En el posprocesamiento el comando KCALC calcula de modo mixto los factores de intensidad de esfuerzo K_I , K_{II} y K_{III} . El comando se limita a problemas lineales elásticos con un material homogéneo, isotrópico cerca de la región de fractura. Para el cálculo de los factores de intensidad de esfuerzo utilizando el método de extrapolación de desplazamiento, se llevan a cabo los siguientes pasos en el post procesador POST1:

Paso 1: Definir un sistema local de coordenadas en el frente de la grieta

Paso 2: Definir un vector a lo largo de la cara de la grieta

Paso 3: Calcular K_I , K_{II} y K_{III}

Paso 1: Definir un sistema local de coordenadas en el frente de la grieta

El eje x debe ser paralelo a la cara de la grieta (perpendicular al frente de la grieta en modelos 2-D) y el eje y perpendicular a la cara de la grieta (como se muestra en la Figura 3.14).

Comando (s):

CS,11,0,82,89,91,1,1,

CSYS,11,

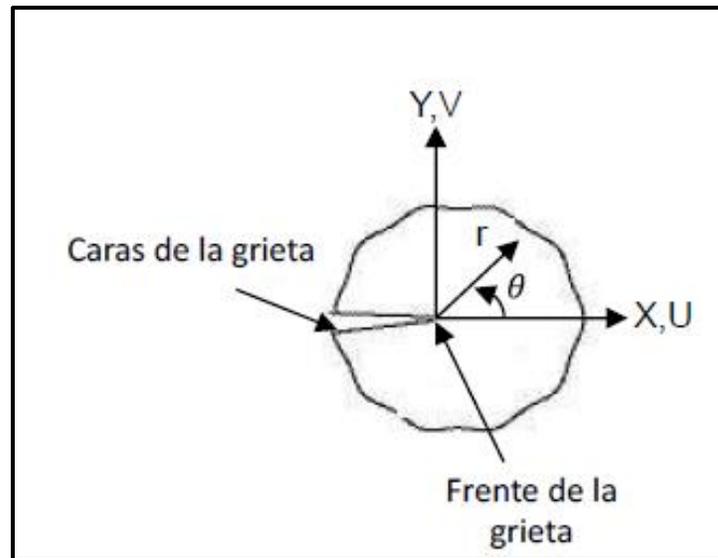


Figura 3.14 Ubicación del sistema de coordenadas

Se define el sistema de coordenada en el frente de grieta el origen y el eje x ubicado en la cara de la grieta utilizando los nodos cercanos al frente de grieta (Para el caso que se utiliza los nodos 82,89,91), esto para evitar el error durante la obtención del valor del factor de intensidad de esfuerzos.

Paso 2: Definir un vector a lo largo de la cara de la grieta

El primer nodo en la ruta debe ser el nodo de frente de la grieta. Para un modelo de media grieta, se requieren dos nodos adicionales, tanto a lo largo de la cara de la grieta como lo muestra la Figura 3.15. Para un modelo de fisura completa, donde se incluyen las dos caras de la grieta, se requieren cuatro nodos adicionales: dos a lo largo de una cara de la grieta y dos a lo largo de la otra cara.

Comando (s):

```
PATH,K1,3,30,20,
PPATH,P51X,1
PATH,STAT
```

Paso 3: Calcular K_I , K_{II} y K_{III}

El campo KPLAN en el comando KCALC especifica si el modelo es con deformación plana o esfuerzo plano. Excepto para el análisis de placas delgadas, el comportamiento asintótico cerca de la punta de la grieta el esfuerzo se cree generalmente para ser de deformación plana. El campo KCSYM especifica si el modelo es un modelo de media grieta con condiciones de contorno de simetría, o un modelo de media grieta con condiciones de contorno asimétrico, o un modelo de grieta completa.

Comando (s):

KCALC,1,1,0,0

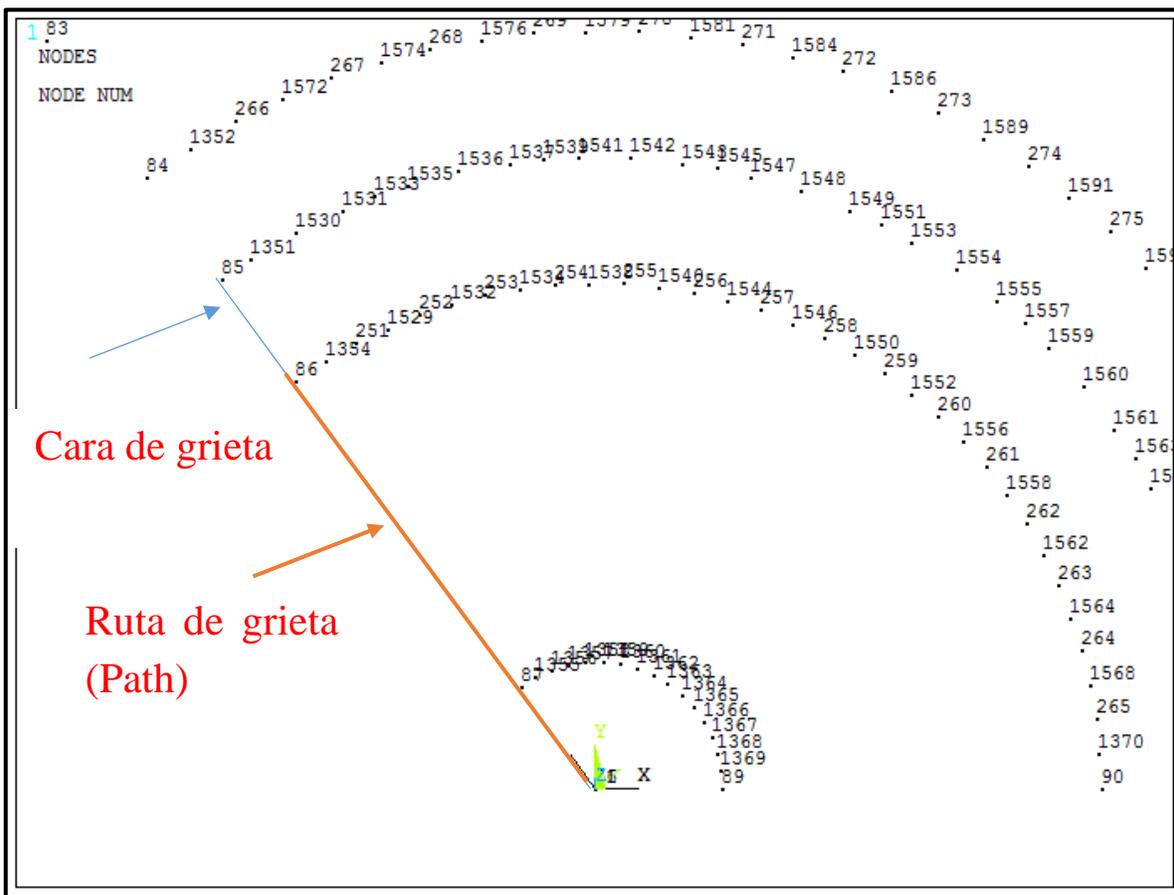


Figura 3.15 Sistema de coordenadas por nodos

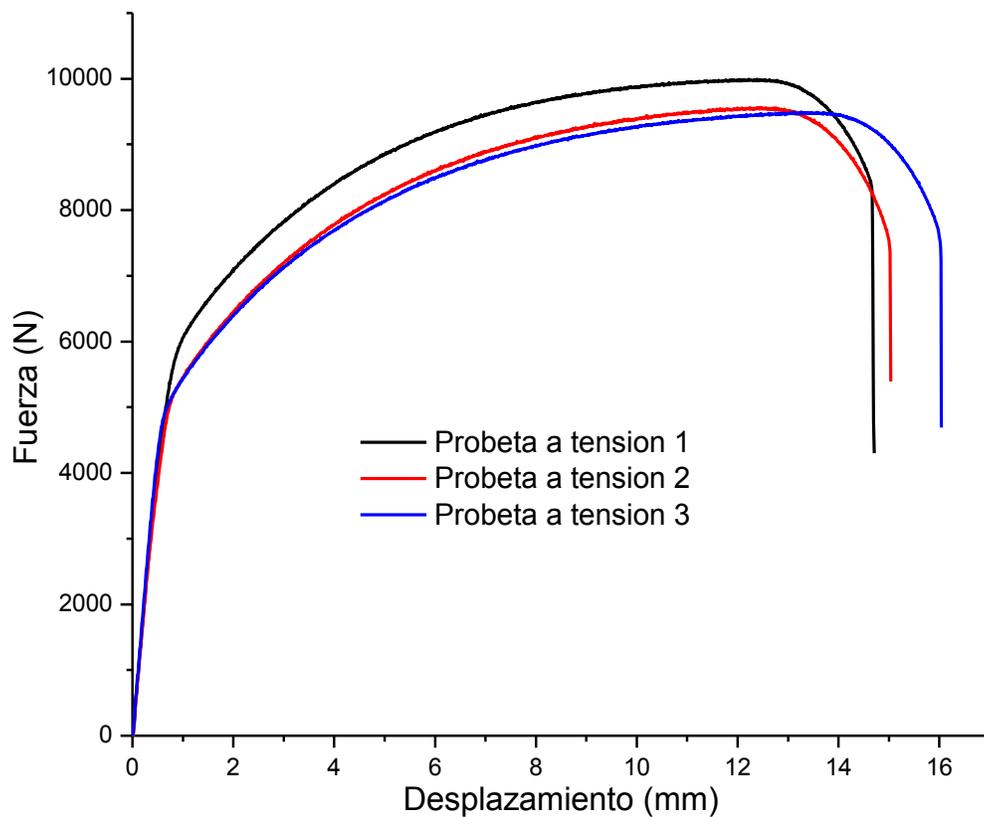
Una vez que se obtiene el modelo de elemento finito de la placa se aprovecha el dominio obtenido y también se evalúa el factor de intensidad de esfuerzos utilizando el método

Capítulo IV Resultados

En esta sección se presentan los resultados de la solución experimental y numérica que se realizaron para la obtención de los factores de intensidad de esfuerzo. Como primer término se realiza una validación de los resultados que se obtienen mediante el método de elemento finito por Ansys APDL con un estudio experimental y de elemento finito de la literatura. En este apartado se comprueban los resultados obtenidos dando validez tanto al programa como a todo el procedimiento desarrollado.

4.1 Aplicación de la carga

La grafica 4.1 muestra la aplicación de la carga en las probetas sometidas a tensión (Figura 2.2) y se puede concluir que son resultados adecuados para obtener el módulo de elasticidad experimental en la zona elástica las tres pruebas fueron realizadas con las mismas características de sensibilidad a la ruptura de 70% y una velocidad de ensayo 5 mm/min.

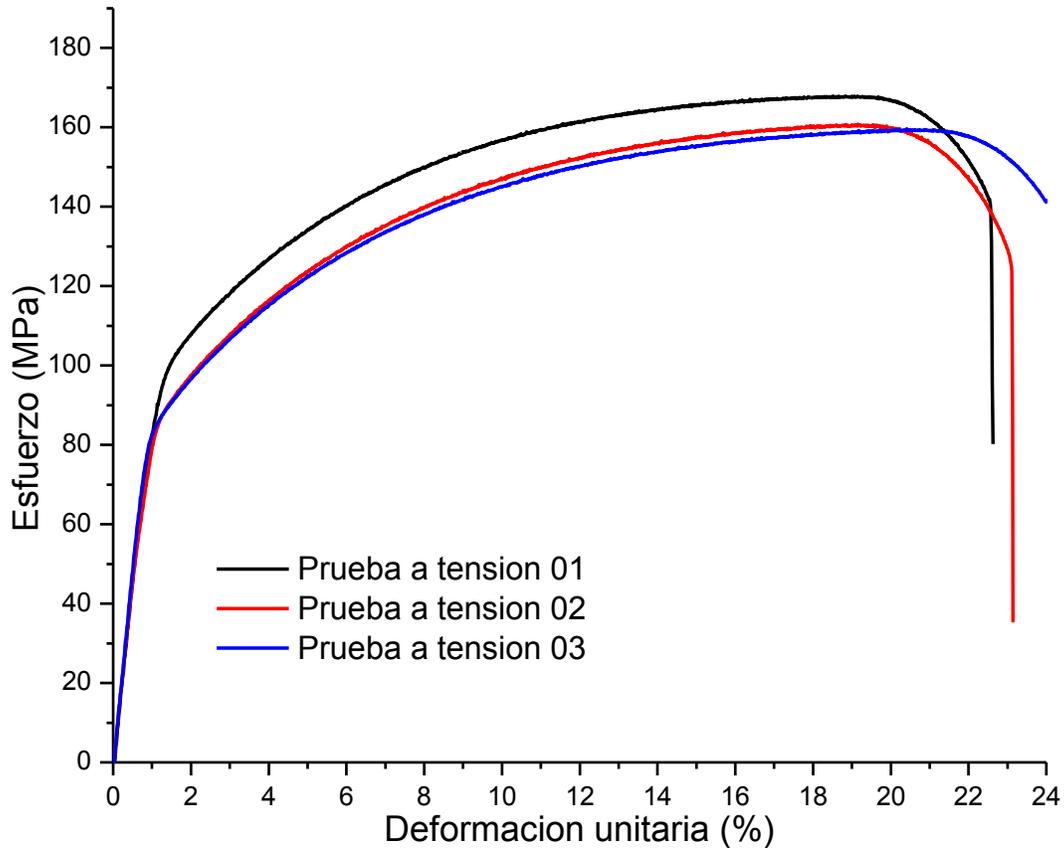


Grafica 4. 1 Aplicación de carga a probetas a tensión

Para obtener las propiedades mecánicas es necesario obtener la Gráfica 4.2 de esfuerzo-deformación. Donde se obtienen las propiedades de módulo de elasticidad, esfuerzo último a la tensión y esfuerzo a la fluencia.

También se mostrará la Gráfica 4.3 correspondiente a la carga aplicada para cuatro probetas con muesca un solo borde (Figura 2.4) cuyas características de ensayo

son las siguientes con una velocidad de avance de 5 mm/min para las tres primeras probetas y para la cuarta una velocidad de 2.5 mm/min:



Grafica 4. 2 Diagrama esfuerzo-deformación

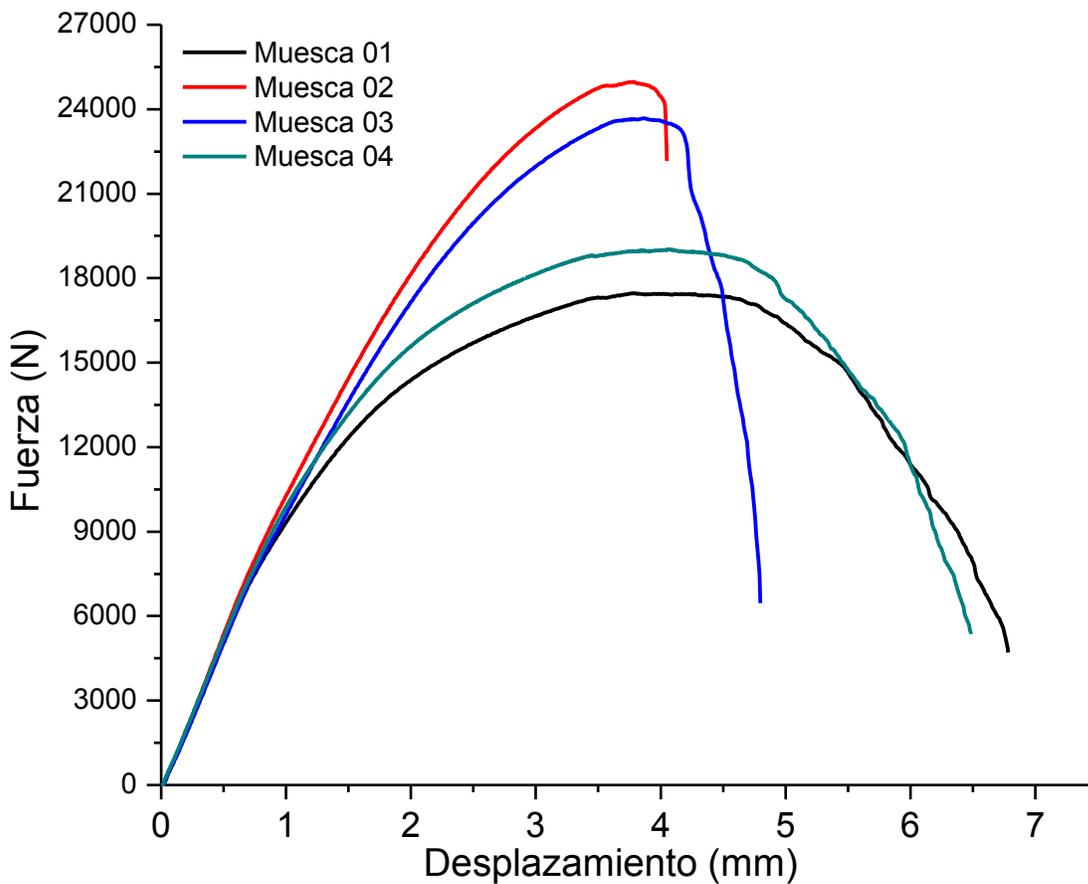
- Probeta 01. Primera prueba exitosa. Detalle se detuvo antes de tiempo la cruceta y por consiguiente no alcanzo la ruptura. Se utilizó las características por default de la máquina de ensayo de 20% de sensibilidad a la ruptura y velocidad de avance de 5 mm/min.

- Probeta 02. Primera prueba no exitosa. Detalle se detuvo antes de tiempo la cruceta al momento de crecer la fisura. Se cambiaron las características de la

máquina de ensayo de 10% de sensibilidad a la ruptura y velocidad de avance de 5 mm/min.

- Probeta 03. Primera prueba exitosa. No se tuvo ningún inconveniente, la probeta alcanzo la ruptura. Se cambiaron las características de la máquina de ensayo de 70% de sensibilidad a la ruptura y velocidad de avance de 5 mm/min, se demostró que una 70% de sensibilidad a la ruptura es una característica indispensables para esta prueba.

- Probeta 04. Primera prueba exitosa. No se tuvo ningún inconveniente, la probeta alcanzo la ruptura. Se mantienen las características de la máquina de ensayo de 70% de sensibilidad a la ruptura pero se modifica velocidad de avance de 5 mm/min a 2.5 mm/min, esto se realizó para que la prueba dure más tiempo de análisis.



Gráfica 4. 3 Aplicación de Carga en Probetas con muesca

4.2 Resultados obtenidos por la técnica DIC

Durante el procesamiento de imágenes se tomó en consideraciones en donde surge la fractura del material como se ilustra en la Figura 4.1. Es el punto donde se obtienen los valores de deformación unitaria y desplazamiento.

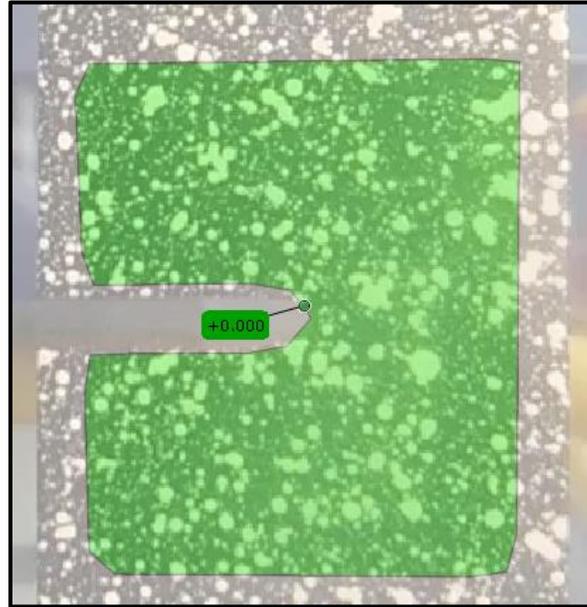


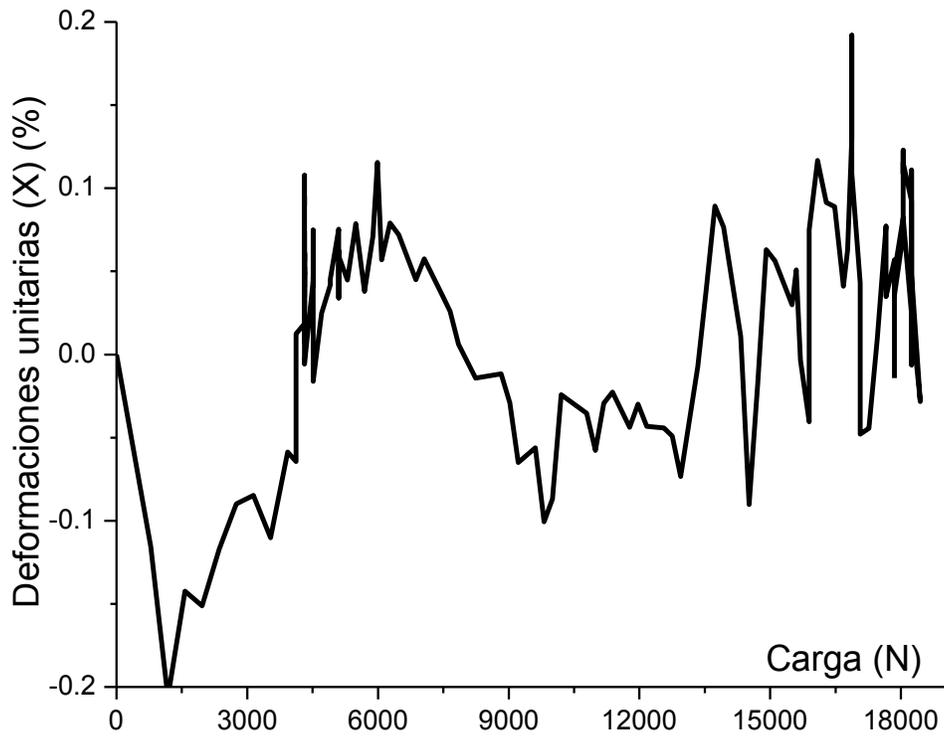
Figura 4.1 Selección de punto para extracción de datos

Los datos que se mostraran solo corresponden al ciclo antes de que empiece a crecer la grieta.

4.2.1 Deformación unitaria en la dirección X

La deformación unitaria en la dirección X muestran los valores cercanos a cero, siendo el valor máximo que alcanzan un 0.2 % de deformación unitaria.

La comparación de resultados de la deformación unitaria en la dirección X es muy semejante entre la técnica experimental y el método numérico, por lo cual es apropiado utilizar este método numérico el cual representa la realidad del procedimiento experimental. A continuación en la Figura 4.2 se muestra la comparación de ambos métodos de lo cual se concluye que hay un error de 33% entre ambos métodos, el error es muy grande ya que la deformación unitaria es muy pequeña (0.01% en el experimental).



Grafica 4.4 Deformación unitaria en X

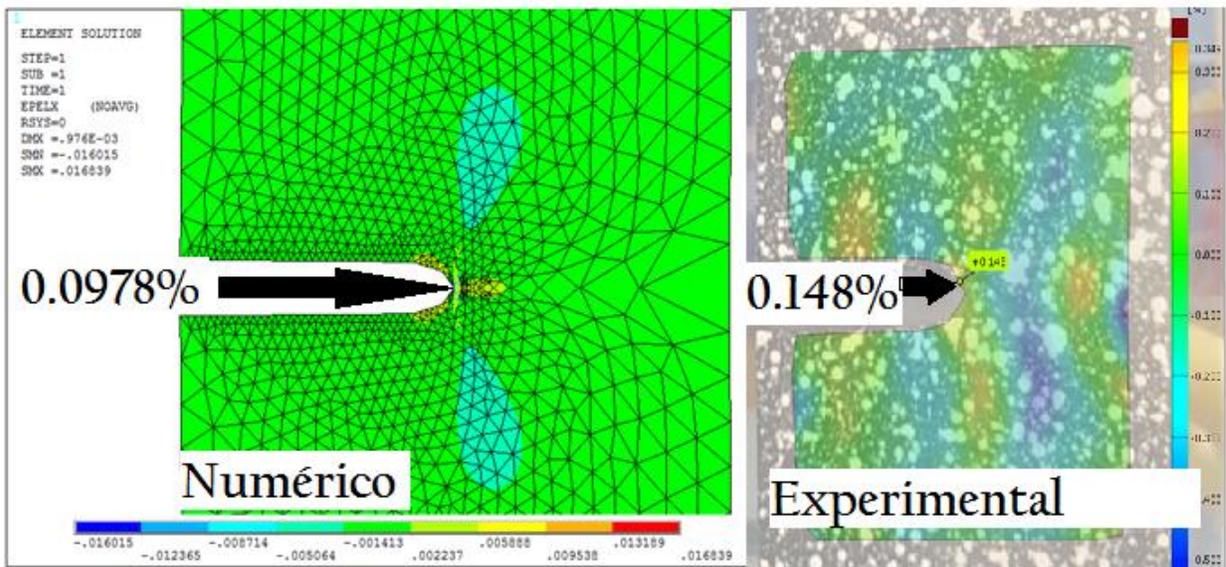
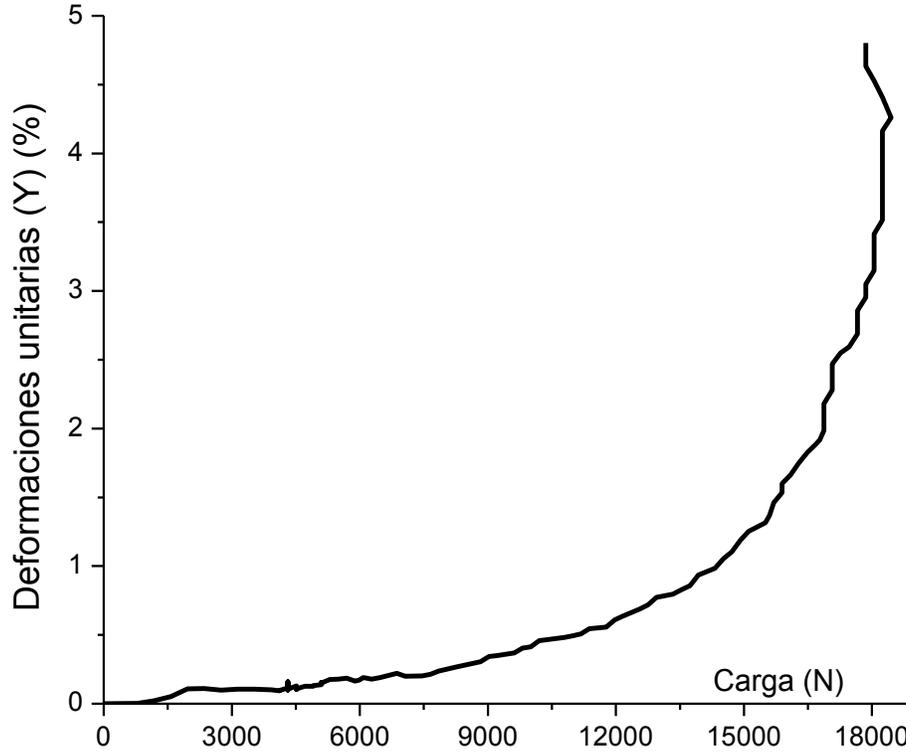


Figura 4.2 Comparación de Numérico y Experimental

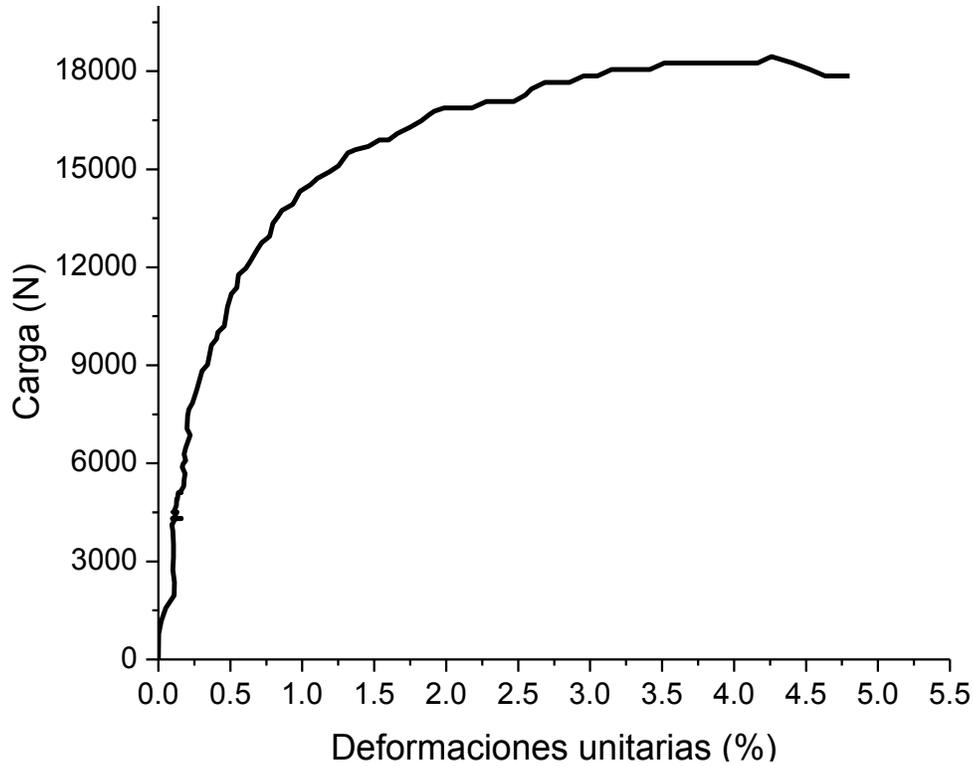
4.2.2 Deformaciones unitarias en la dirección Y

El resultado de la deformación unitaria en Y muestra un incremento hasta un 4%. El cual tiene un mayor impacto en el cálculo del factor de intensidad de esfuerzo.



Gráfica 4. 5 Deformación unitaria en Y

Para apreciar otra forma en que se aplica la carga se presenta la siguiente Gráfica 4.6 la cual intercambia los ejes.



Grafica 4. 6 Deformación unitaria en la dirección Y

Esta deformación unitaria es la representativa en los resultados del factor de intensidad de esfuerzos ya que se puede afectar el comportamiento de la gráfica no sea estable y pueda resultar datos erróneos. Primero se comenta de lo impactante que es la técnica de correlación de imágenes digitales se muestra que en el último paso de carga (17850 N) como se muestra en la Figura 4.3. En se punto se puede observar un error de 3% entre las deformaciones unitaria y además el método experimental es muy representativo.

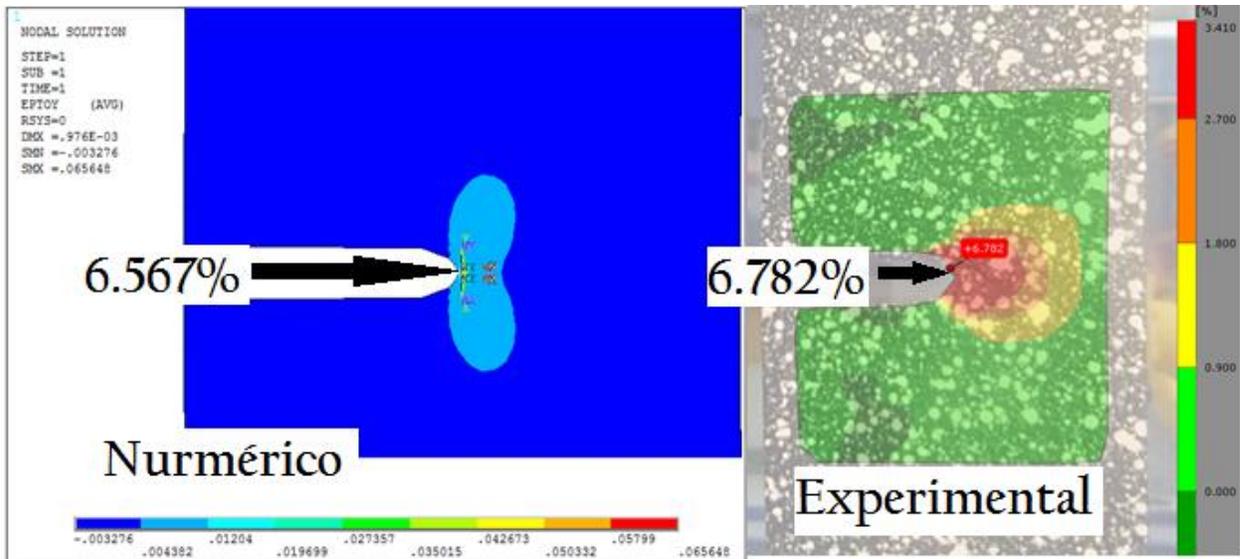
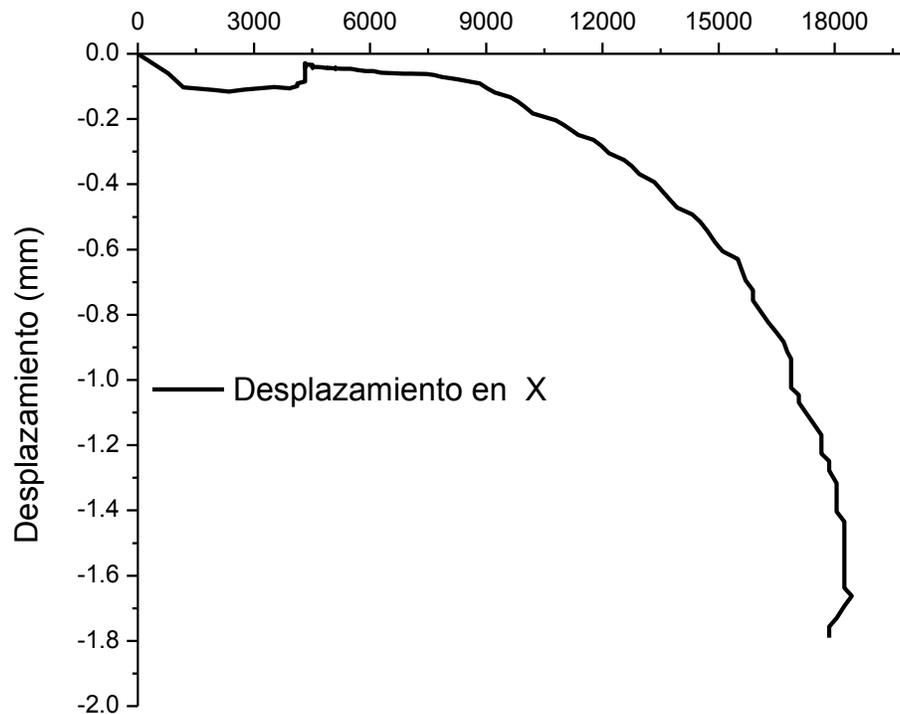


Figura 4.3 Comparación en la deformación unitaria en Y

4.2.3 Desplazamiento en la dirección X

El valor del desplazamiento el principal en el cálculo del factor de intensidad de esfuerzo, porque la solución de ecuaciones, el desplazamiento en Y es 0. Por lo cual es importante la obtención de estos datos, donde se desplaza -1.8 mm sobre el eje x ubicado sobre el mismo punto.

Este punto importante en otro procedimiento para obtener el factor de intensidad de esfuerzo el cual es solamente influenciado por el desplazamiento en X. Donde alcanza un valor de error de 25% correspondiente al numérico que alcanza una desplazamiento de 1.1 mm en la misma ubicación.



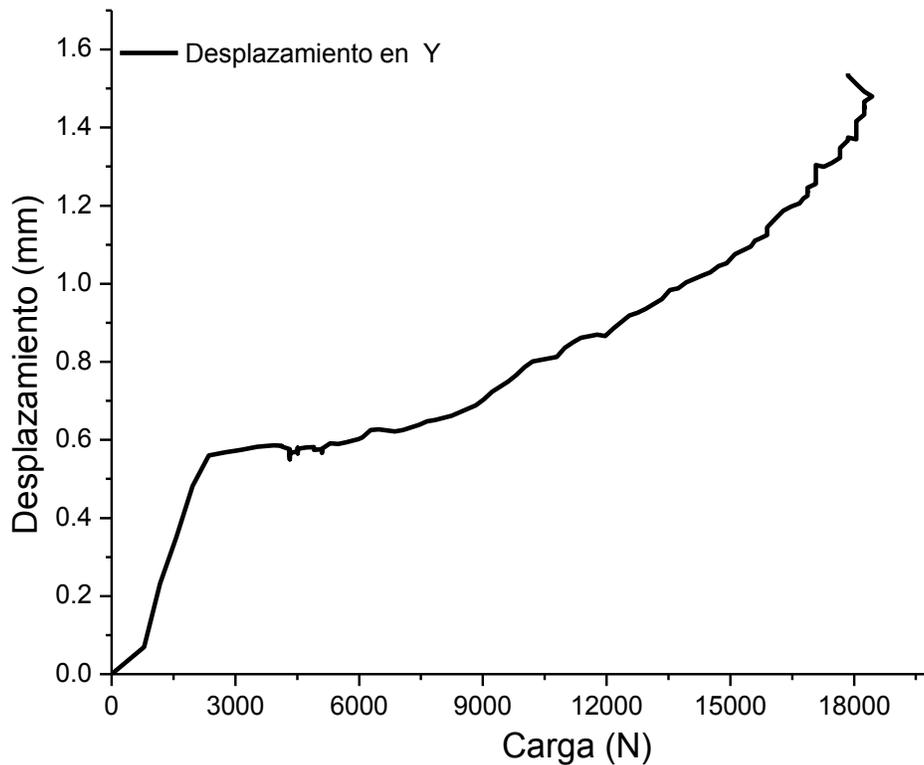
Gráfica 4.7 Desplazamiento en X

4.2.4 Desplazamiento en la dirección Y

La siguiente grafica muestra los datos en la dirección Y, alcanza valores de desplazamiento 1.5 mm. Este valor no se requiere en el cálculo del factor de intensidad de esfuerzo; ya que las características del modo de fractura y la simplificación del ángulo para la ubicación del punto a evaluar; hacen que la ecuación 24 sea cero.

4.3 Calculo del factor de intensidad de esfuerzo experimental

A continuación se muestran tres diferentes resultados para la obtención del factor de intensidad de esfuerzo. Los primeros dos se refiere a un cálculo experimental basado en dos diferentes criterios (desplazamiento y deformación unitaria) y el ultimo se refiere al método numérico utilizando ANSYS APDL

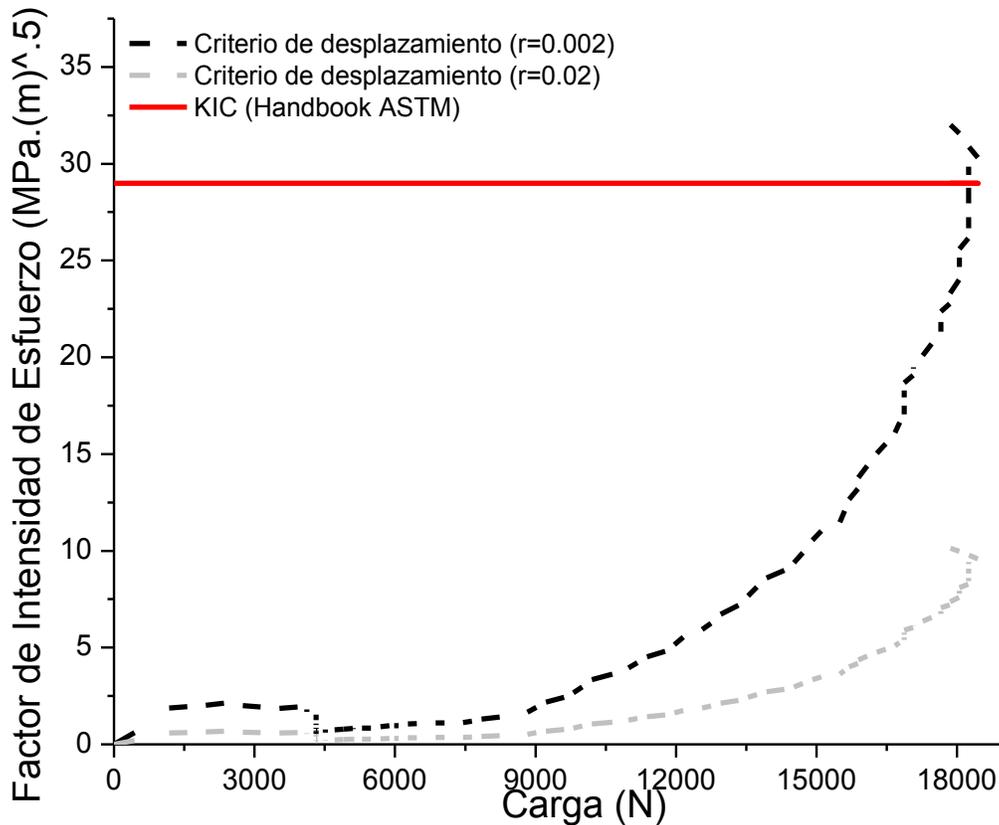


Gráfica 4.8 Desplazamiento en Y

4.3.1 Criterio de Desplazamiento

Para el cálculo del factor de intensidad de esfuerzo es necesario, que a partir de las deformaciones transformar a esfuerzo para la solución de ecuaciones. De las cuales se considera solo la ecuación 23. Ya que la ecuación para este caso es 0 al momento de solucionarlas. En la gráfica 4.7 muestra el comportamiento de Factor de intensidad de Esfuerzos con dos diferentes valores r , el cual es la distancia cerca del frente de grieta ($r=0.02a$, $r=0.002a$). También se ilustra el K_{IC} del material obtenido de un Handbook de la ASTM.

Para el cual apropiado aceptar este método ya que tiene un comportamiento real para obtener el factor de intensidad de esfuerzo K_{IC} .



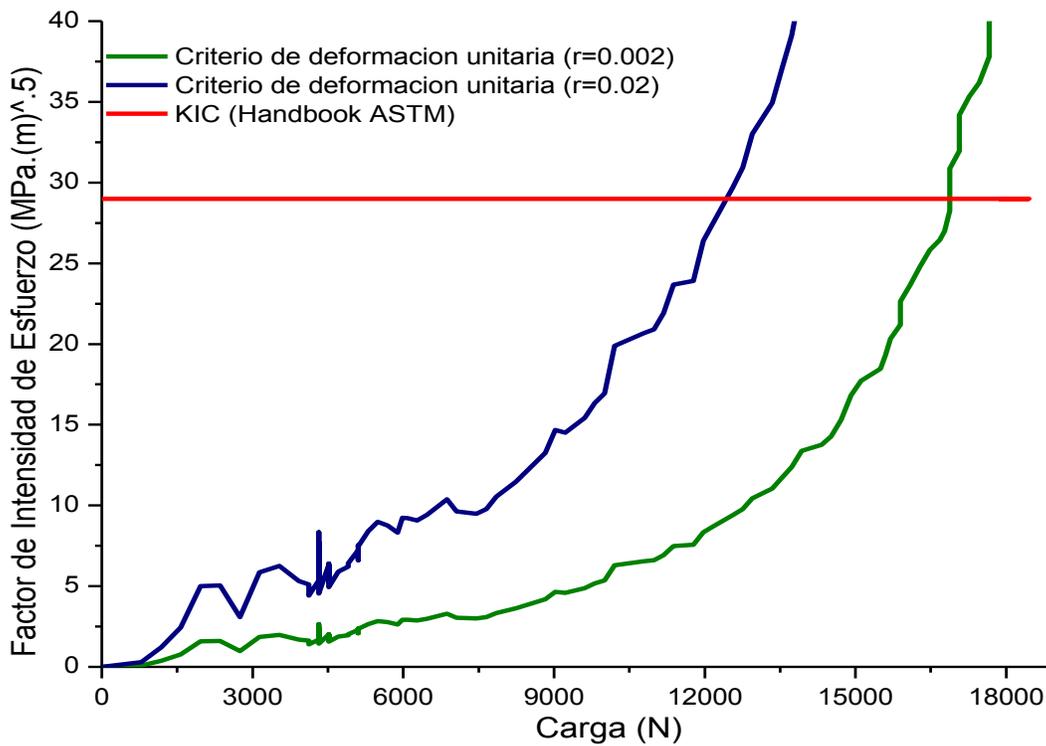
Gráfica 4.9 Factor de intensidad de Esfuerzo (Desplazamiento)

4.3.2 Criterio de Deformación

Este método es muy conservador para obtener el factor de intensidad de esfuerzo a comparación del método de desplazamiento en la gráfica 4.8 se demuestra.

4.4 Calculo del factor de intensidad de esfuerzo del método numérico

En la siguiente imagen me muestra el valor del factor de intensidad crítico obtenido con ANSYS APDL el cual muestra un valor de $33.351 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ como se observa en la imagen obtenida en la Figura 4.4.



Grafica 4.10 Factor de intensidad de Esfuerzo (Deformación unitaria)

```

KCALC Command
File
**** CALCULATE MIXED-MODE STRESS INTENSITY FACTORS ****
ASSUME PLANE STRESS CONDITIONS
ASSUME A HALF-CRACK MODEL WITH SYMMETRY BOUNDARY CONDITIONS (USE 3 NODES)
EXTRAPOLATION PATH IS DEFINED BY NODES:      82      89      88
WITH NODE      82 AS THE CRACK-TIP NODE

USE MATERIAL PROPERTIES FOR MATERIAL NUMBER      1
EX =      69500.      NUXY =      0.33000      AT TEMP =      0.0000

**** KI =      33.351      ,      KII =      0.0000      ,      KIII =      0.0000      ****
    
```

Figura 4.4 Factor de intensidad Crítico (Numérico)

En la siguiente tabla me muestra el valor del factor de intensidad crítico el cual muestra un error de 2% entre el numérico y el experimental.

Con esto se puede concluir lo importante que es la técnica experimental ya que puede obtener el Factor de Intensidad a diferentes valores de carga y además

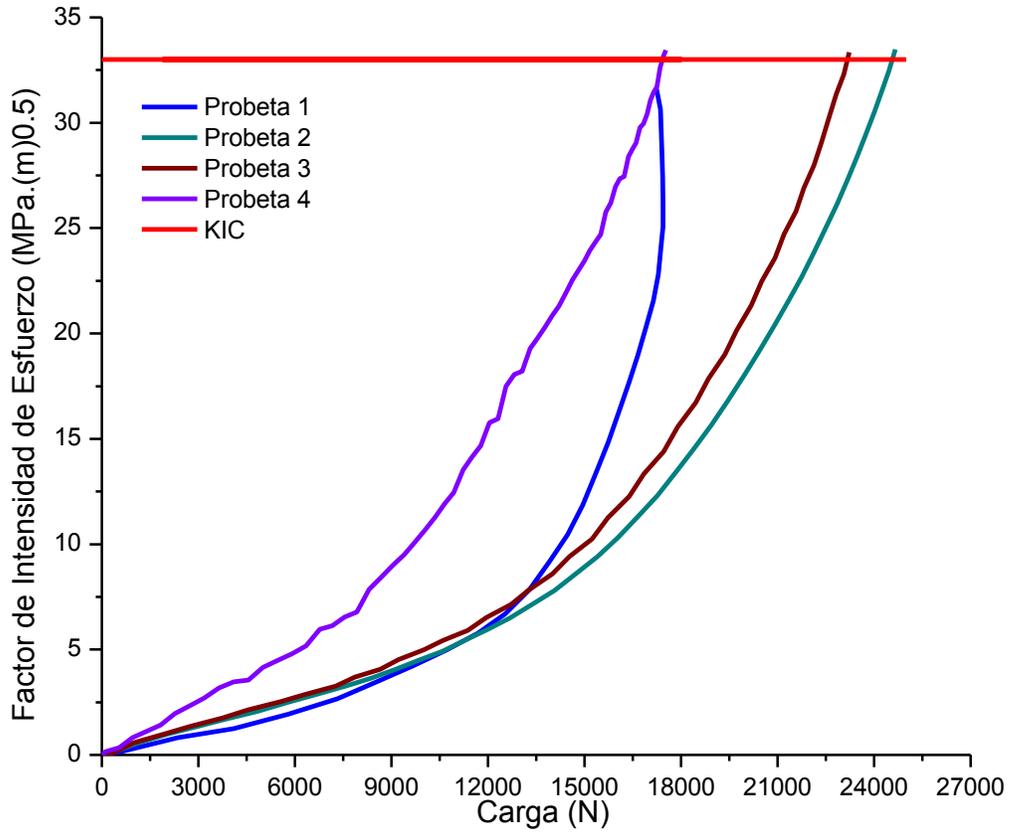
conocer el Factor de Intensidad Crítico del material ya que se obtendrá antes que se propague la grieta. De la misma forma estar comparando los resultados experimentales del factor de intensidad con los encontrados en bibliografía especializada (Handbook ASTM).

Tabla 1 Comparación de Factor de Intensidad Critico

Criterio de desplazamiento ($r=0.002$)	Método numérico (ANSYS APDL)
32.6461 $MPa\sqrt{m}$	33.351 $MPa\sqrt{m}$

Con esto se puede concluir lo importante que es el la técnica experimental ya que puede obtener el Factor de Intensidad a diferentes valores de carga y además conocer el Factor de Intensidad Crítico del material ya que se obtendrá antes que se propague la grieta. De la misma forma estar comparando los resultados experimentales del factor de intensidad con los encontrados en bibliografía especializada (Handbook ASTM).

La importante aportación del trabajo que se estableció el procedimiento para obtener el factor de intensidad de esfuerzo crítico como se muestra en la Grafica 4.11 la cual muestra las cuatro probetas con muesca que alcanzan el valor de 33 $MPa\sqrt{m}$ aproximadamente en todas las probetas. En esta grafica solo se utilizó el procedimiento de desplazamiento ya que es el método experimental con el cual se puede justificar el método numérico utilizado. Este procedimiento también en una aportación de la investigación.



Grafica 4. 11 Factor de intensidad critico

Conclusiones

El procesamiento de correlación de imágenes es muy práctico para evaluar casos de fractura ya que es un tema que en los últimos años, tiende a la innovación de estos tipos de técnica experimentales. En este trabajo los procedimientos experimentales y numéricos son aceptados dependiendo las características que se requieran para su análisis.

Con respecto a los resultados obtenidos de la correlación de imágenes, son impactantes los resultados visuales para posteriormente hacer la comparación de resultados con el análisis numérico. El principal caso es en la deformación unitaria con un error de 4%.

Se concluye que el método de desplazamiento es capaz de ubicar el factor de intensidad crítico y poderlo comparar con elemento finito, los cuales muestra un error de un 2 % entre los dos casos. Este es el punto importante en el desarrollo de esta tesis ya que otros autores emiten este punto que es fundamental en el campo de la mecánica de la fractura.

El método de deformaciones unitarias en conservador para evaluar el factor de seguridad, esto sirve para evitar situaciones riesgosas o una fractura no deseada la cual perjudique la producción en una empresa o grandes pérdidas materiales.

Anexos

Programación para el análisis numérico en ANSYS APDL para la carga de 17854.2 N

```
/PREP7
ET,1,PLANE183
KEYOPT,1,1,1
KEYOPT,1,3,0
KEYOPT,1,6,0
MP,EX,1,69500
MP,PRXY,1,0.33
relacion=0.5
h=0.125
b=0.0508
a=relacion*b
cy=0.00238125
cx=0.0037
ccy=0.0015
ccx=0.0011
K,1,0,0,0
K,2,(b-a),0,0
K,3,(b-a),h,0
K,4,-a,h,0
K,5,-a,cy,0
k,6,-cx,cy,0
k,7,-ccx,ccy,0
L,1,2
L,2,3
L,3,4
L,4,5
```

```
L,5,6
L,6,7
L,7,1
FLST,2,7,4
FITEM,2,5
FITEM,2,6
FITEM,2,7
FITEM,2,1
FITEM,2,2
FITEM,2,3
FITEM,2,4
AL,P51X
DL,1,1,SYMM
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,3
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,16, , , ,1
!*
FLST,5,1,4,ORDE,1
FITEM,5,4
CM,_Y,LINE
LSEL, , , ,P51X
CM,_Y1,LINE
CMSEL,,_Y
!*
LESIZE,_Y1, , ,32,.2, , , ,1
!*

```

FLST,5,1,4,ORDE,1

FITEM,5,2

CM,_Y,LINE

LSEL, , , ,P51X

CM,_Y1,LINE

CMSEL,,_Y

!*

LESIZE,_Y1, , ,32, , , ,1

!*

FLST,5,1,4,ORDE,1

FITEM,5,5

CM,_Y,LINE

LSEL, , , ,P51X

CM,_Y1,LINE

CMSEL,,_Y

!*

LESIZE,_Y1, , ,32,.2, , , ,1

!*

FLST,5,1,4,ORDE,1

FITEM,5,6

CM,_Y,LINE

LSEL, , , ,P51X

CM,_Y1,LINE

CMSEL,,_Y

!*

LESIZE,_Y1, , ,8, , , , ,1

KSCON,1,0.001,1,16,0.2,

MSHKEY,0

CM,_Y,AREA

ASEL, , , , 1

CM,_Y1,AREA

```
CHKMSH,'AREA'  
CMSEL,S,_Y  
!*  
AMESH,_Y1  
FLST,2,1,4,ORDE,1  
FITEM,2,3  
/GO  
!*  
SFL,P51X,PRES,-83.68110236 %Solo se cambia el esfuerzo al que está sometido  
en las mordazas de la maquina universal  
,  
FLST,2,1,4,ORDE,1  
FITEM,2,1  
!*  
/GO  
DL,P51X, ,UY,0  
FLST,2,1,3,ORDE,1  
FITEM,2,1  
!*  
/GO  
DK,P51X, ,0, ,0,UX, , , , ,  
FINISH  
/SOL  
!*  
ANTYPE,0  
/STATUS,SOLU  
SOLVE FINISH  
/POST1  
NPLOT  
/ZOOM,1,RECT,0.300338,-0.892857,0.382501,-0.932143  
FLST,2,3,1  
FITEM,2,82
```

FITEM,2,89

FITEM,2,88

!*

PATH,K1,3,30,20,

PPATH,P51X,1

PATH,STAT

!*

CS,11,0,82,89,91,1,1,

CSYS,11,

!*

RSYS,11

AVPRIN,0

AVRES,2,

/EFACET,1

LAYER,0

FORCE,TOTAL

!*

KCALC,1,1,0,0

Anexos de imágenes de método experimentación y numérico.
 Deformación unitaria en X

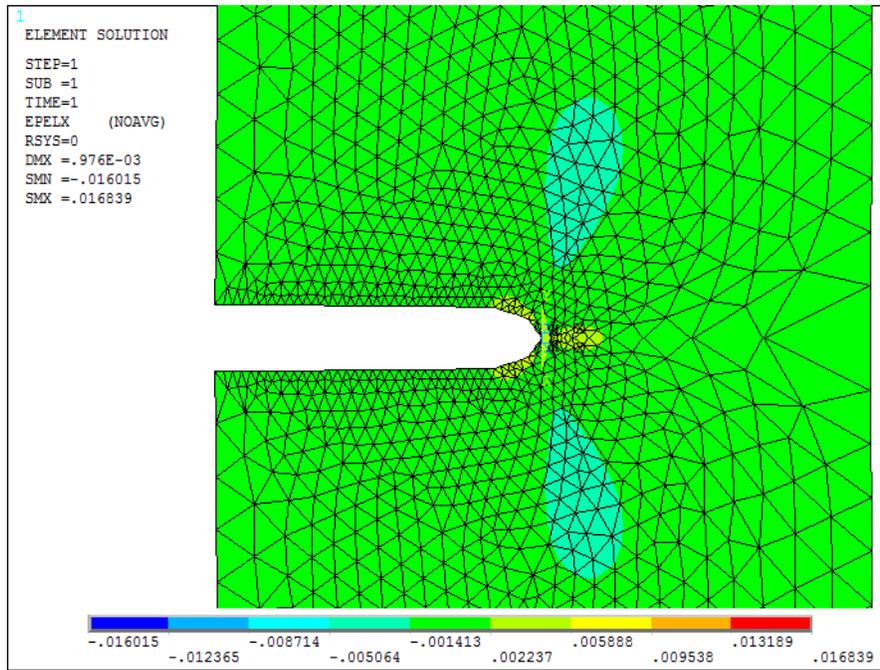


Figura anexo 1 Deformación unitaria en X Numérico

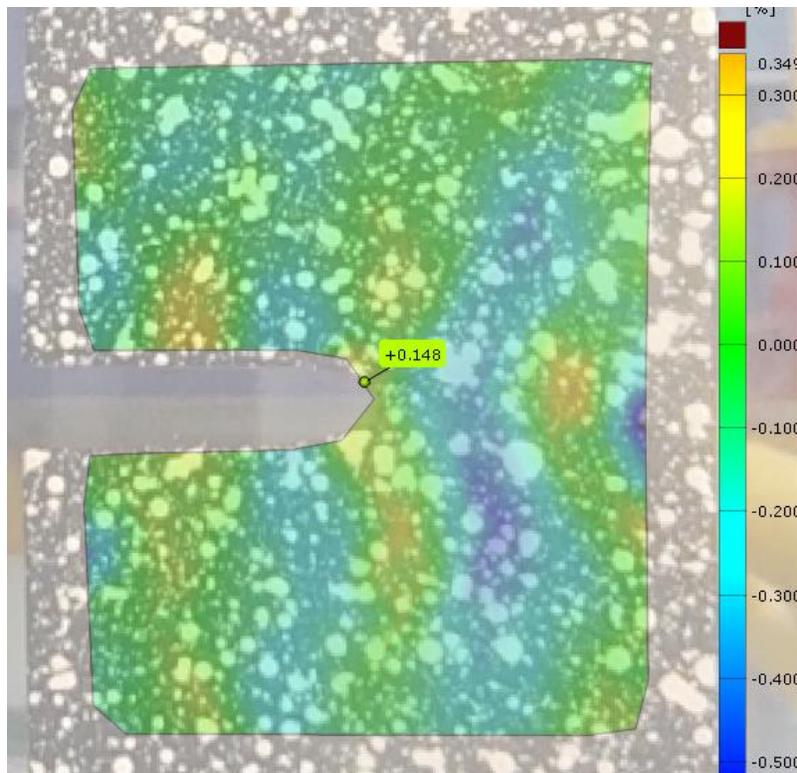


Figura anexo 2 Deformación unitaria en X Experimental

Deformación unitaria en Y

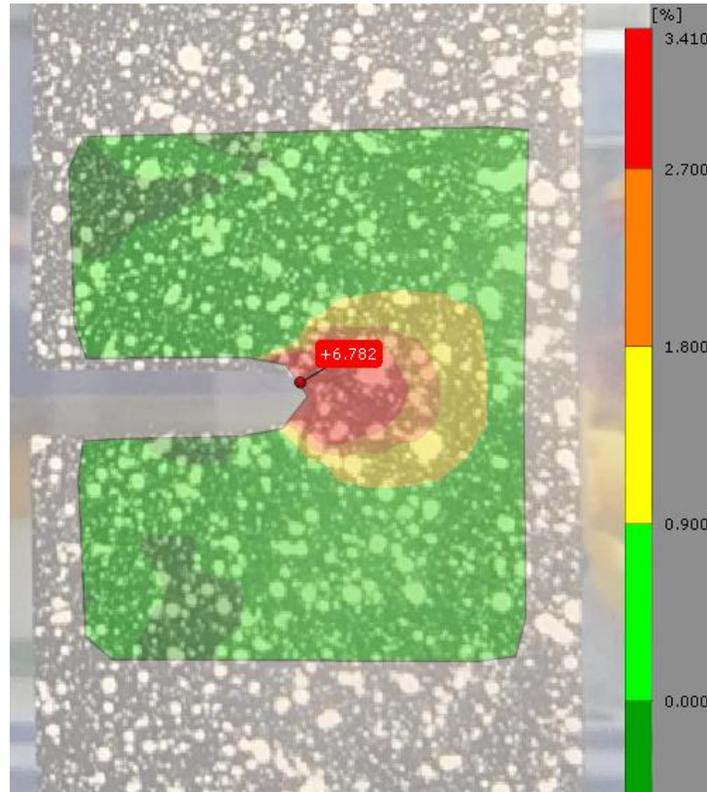


Figura anexo 3 Deformación unitaria en Y Experimental

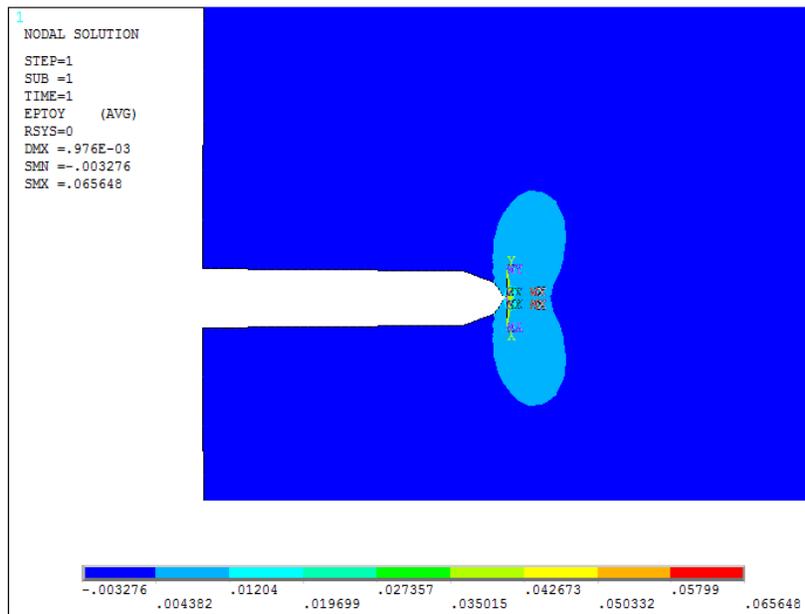


Figura anexo 4 Deformación unitaria en Y Numérico

Desplazamiento en la dirección X

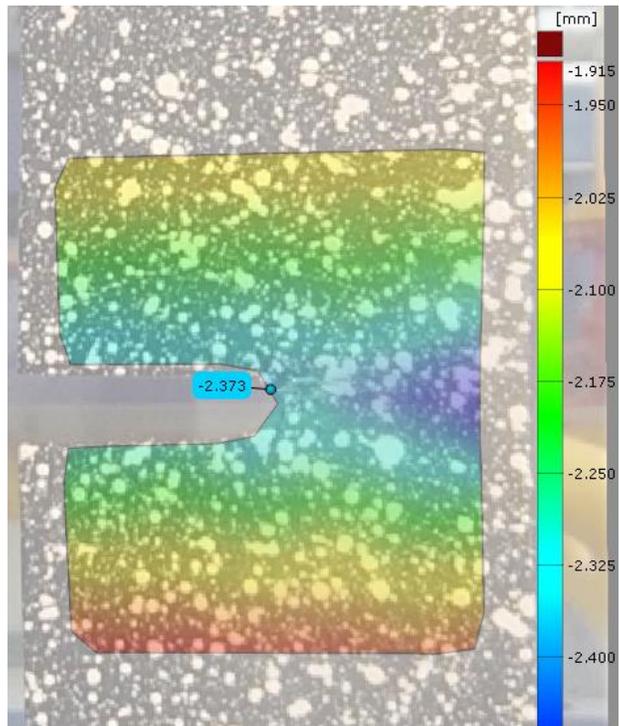


Figura anexo 5 Desplazamiento en la dirección X Experimental

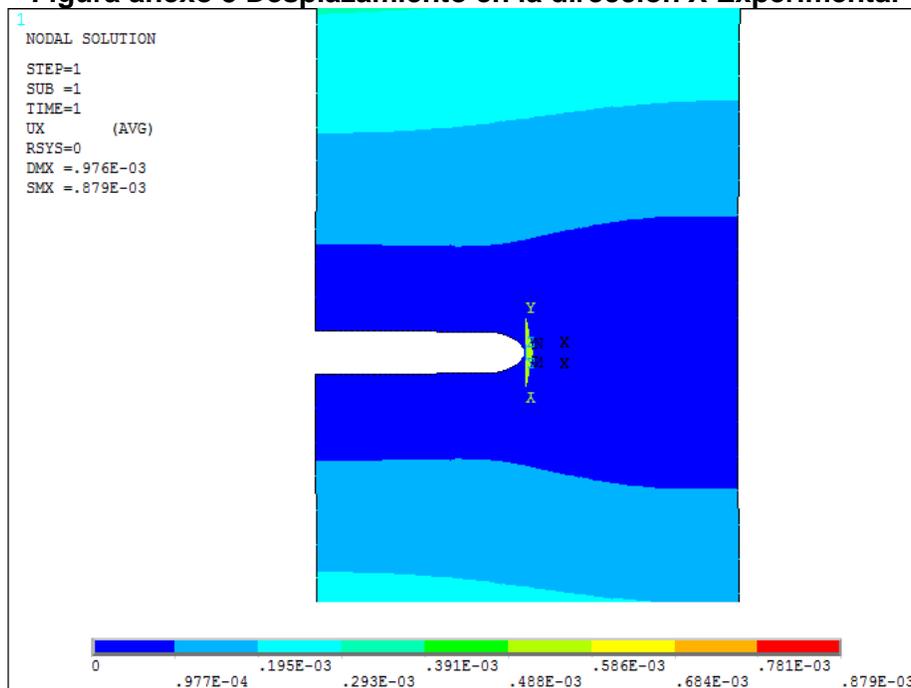


Figura anexo 6 Desplazamiento en la dirección X Numérico

Desplazamiento en la dirección Y

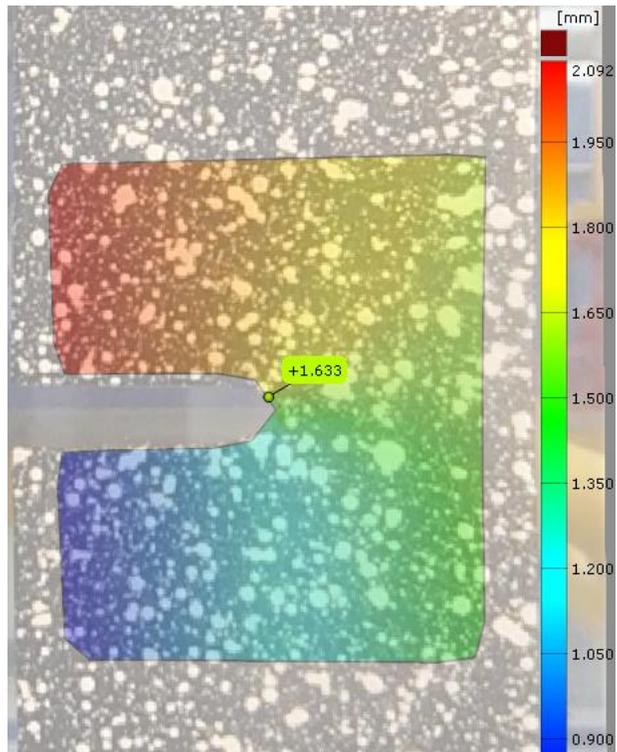


Figura anexo 7 Desplazamiento en la dirección Y Experimental

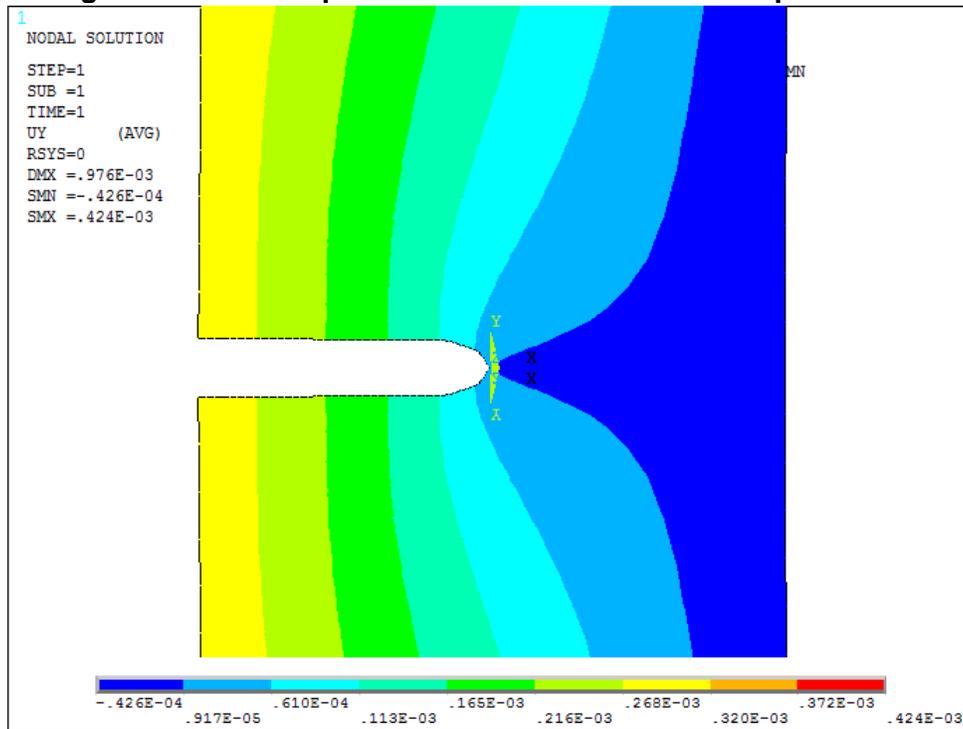


Figura anexo 8 Desplazamiento en la dirección Y Numérico

Referencias

- [1] M. Mehdikhani, «Full-field strain measurements at the micro-scale in fiber-reinforced composites using digital image correlation,» *Composite Structures*, pp. 192-201, 2016.
- [2] A. T. L., *Fracture Mechanics*, USA: Taylor & Francis, 2005.
- [3] J. E. Gordon, *The New Science of Strong Materials*, London: Penguin Books, London: Penguin Books, 1970.
- [4] R. W. Hertzberg, *Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials*, USA: Jon Wiley & Sons, 1996.
- [5] Ö. B. E. T. L. Parnas, «Strain gage methods for measurement of opening mode stress intensity factor,» *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 55, n° 3, pp. 485-492, 1996.
- [6] M. & P. C. Williams, «On the Stress Distribution at the Base of a Stationary Crack,» *Applied Mechanis*, p. 109–114., 1957.
- [7] E. Ghafoori, «Analytical calculation of stress intensity factor of cracked steel I-beams with experimental analysis and 3D digital image correlation measurements,» *Engineering Fracture Mechanics*, pp. 3226-3242, 2011.
- [8] G. P. F.M. Sánchez- Arévalo, «Use of digital image correlation to determine the mechanical behavior o materials,» *Materials Characterization*, pp. 1572-1579, 2008.
- [9] Y. Hos, «Measurements of strain fields around crack tips under proportional and non-proportional mixed-mode fatigue loading,» *International Journal of Fatigue*, pp. 87-98, 2016.
- [10] R. Zhang, «Measurement of mixed-mode stress intensity factors using digital image correlation method,» *OpticsandLasersinEngineering*, pp. 1001-1007, 2012.
- [11] M. A. Sutton, «The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D ditital image correlation measurements,» *Optics and Lasers in Engineering*, pp. 747-757, 2008.
- [12] Q. Lin, «Opening and mixed mode fracture processes in a quasi-brittle material via digital imaging,» *Engineering Fracture Mechanics*, pp. 176-192, 2014.
- [13] T. R. D. B. Paulo José Tavares, «SIF determination with digital image correlation,» *International Journal of Structural Integrity*, vol. Vol. 6 , n° No. 6, pp. 668-676, 2015.
- [14] P. J. T. Behzad V. Farahani, «A fracture mechanics study of a compact tension Specimen: Digital image correlation, finite elemen and meshless methods,» *Procedia Structural Integrity* , vol. 5, pp. 920-927, 2017.
- [15] J. W. S.R. Heinz, «Uniaxial compression analysis of glassy polymer networks using digital image correlation,» *Polym. Test*, vol. 29, p. 925–932, 2010.
- [16] K. Ramesh, *Digital Photoelasticity*, Springer, 2000.
- [17] J. W. a. R. Dally, *Experimental Stress Analysis*, McGraw-Hill, 1978.

- [18] A. E. M. T. Seyedmeysam Khaleghian, «Analysis of effective parameters for stress intensity factors in the contact problem between an asymmetric wedge and a half-plane using an experimental method of photoelasticity,» *Materials & Design*, vol. 43, pp. 447-453, 2013.
- [19] H. R. M. Marcelo CoelhoGoiato, «A photoelastic and strain gauge comparison of two attachments for obturator prostheses,» *The Journal of Prosthetic Dentistry*, vol. 117, n° 5, pp. 685-689, 2017.
- [20] G. R. Irwin, «Handbuch der physik,» *Springer*, vol. VI, p. 551, 1958.
- [21] Y. D. Mohammadreza , «Utilizing digital image correlation to determine stress intensity factors,» *Polymer Testing*, pp. 28-35, 2014.
- [22] F. P. R. Paris, «Photoelastic Determination of KI and KII: A Numerical Study on Experimental Data,» *Experimental Mechanics*, vol. 37, n° 1, pp. 45-55, 1997.
- [23] K. Hoffmann, *An Introduction to Measurements using Strain Gages*, Alsbach, Germany: Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, 1989.
- [24] J. Z. J. Wei, «A two-strain-gage technique for determining mode I stress-intensity factor,» *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 28, pp. 135-140, 1997.
- [25] K. M. Debaleena Chakraborty, «Experimental determination of mode I stress intensity factor in orthotropic materials using a single strain gage,» *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 173, pp. 130-145, 2017.
- [26] P. B. J. Z. Feipeng Zhu, «Measurement of true stress–strain curves and evolution of plastic zone of low carbon steel under uniaxial tension using digital image correlation,» *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 65, pp. 81-89, 2015.
- [27] Z. H. A. F. Andrei Kotousov, «Application of digital image correlation technique for investigation of the displacement and strain fields within a sharp notch,» *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, vol. 79, pp. 51-57, 2015.
- [28] M. Y. G. L.-C. P. Chernyatin A.S., «Mathematical and numerical correction of the DIC displacements for determination of stress field along crack front,» *Procedia Structural Integrity*, vol. 2, pp. 2650-2658, 2016.
- [29] M. R. Y. D. N. S. Iman Eshraghi, «Effect of subset parameters selection on the estimation of mode-I stress intensity factor in a cracked PMMA specimen using digital image correlation,» *Polymer Testing*, vol. 37, pp. 193-200, 2014.
- [30] G. S.W.Boyd., «Speckle pattern quality assessment for digital image correlation,» *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 51, pp. 1368-1378, 2013.
- [31] G. V. G. Knauss, «Submicron deformation field measurements: Part 2. Improved digital image correlation,» *Experimental Mechanics*, vol. 38, n° 2, pp. 86-92, 1998.
- [32] I. Correlated Solutions, «Digital Image Correlation: Overview of Principles and Software,» de *University of South Carolina*, South Carolina USA, 2009.

- [33] S. Y. P. C. Riccardella, «Twenty Years of Fracture Mechanics and Flaw Evaluation Applications in the ASME Nuclear Code,» *Journal of Pressure Vessel Technology*, vol. 113, pp. 145-153, 1991.
- [34] R. G. B. & J. K. Nisbett., Shigley's Mechanical Engineering Design, México: McGRAW-HILL, 2012.
- [35] H. L. a. W. R. Edwals, Fracture Mechanics, Edward Arnol Publication, 1989.
- [36] H. Westergaard, «Fracture Mechanics Trans., ASME,» *J. Appl. Mech*, vol. 61, pp. 49-61, 1939.
- [37] S. R. B.N. Rao, «An efficient meshless method for fracture analysis of crack,» *Computation Mechanics* , vol. 26, pp. 398-408, 2000.
- [38] J. P. S. D. Daxini, «A Review on Recent Contribution of Meshfree Methods to Structure and Fracture Mechanics Applications,» *The Scientific World Journal*, vol. 2014, pp. 56-69, 2014.
- [39] P. J. T. P. M. Behzad V. Farahani, «Stress intensity factor calculation through thermoelastic analysis, finite element and RPIM meshless method,» *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 183, pp. 66-78, 2017.
- [40] G. E. Blandford, «Two-dimensional stress intensity factor computations using the boundary element method,» *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 17, pp. 387-404, 1981.
- [41] A. M.H., «A new generation of boundary element methods in fracture mechanics,» *International Journal of Fracture*, vol. 86, pp. 91-125, 1997.
- [42] C. A. B. a. J. Dominguez, Boundary Elements-An Introductory Course, Southampton, U.K: Computational Mechanics Publications, 1989.
- [43] M. H. A. A. Portela, «The dual boundary element method: effective implementation for crack problems,» *International Journal for numerical methods in Enginnering*, vol. 33, pp. 1269-1287, 1992.
- [44] P. Wriggers, Nonlinear Finite Element Methods, Germany: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008.
- [45] M. Méité, «Mixed mode fracture properties characterization for wood by Digital Images Correlation and Finite Element Method coupling,» *Engineering Fracture Mechanics*, pp. 86-100, 2013.
- [46] M. M. Majid R. Ayatollahi, «Digital image correlation method for calculating coefficients of Williams expansion in compact tension specimen,» *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 90, pp. 26-33, 2017.
- [47] R. G. Budynas, Shigley's mechanical engineering design, Missouri University of Science and Technology: Mcgraw-Hill , 2014.
- [48] ASTM, «Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials,» de *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM International, 2008.

- [49] A. International, «Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials,» de *Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*, ASTM International, 2008.
- [50] G. S. J.M.Dulieu-Barton, «Speckle pattern quality assessment for digital image correlation,» *Optics and Lasers in Engineering*, pp. 1368-1378, December 2013.
- [51] H. R. M. Sander, «Lifetime predictions for real loading situations—concepts and experimental results of fatigue crack growth,» *International Journal of Fatigue*, vol. 25, pp. 999-1005, 2003.
- [52] W. P. S. R. McNEILL, «Estimation of stress intensity factor by digital image correlation,» *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 28, n° 1, pp. 101-112, 1987.
- [53] M. A. ., F. B. M. Rashidi Moghaddam, «Mixed Mode Fracture Analysis Using Generalized Averaged Strain Energy Density Criterion for Linear Elastic Materials,» *International Journal of Solids and Structures*, vol. 120, pp. 137-145, 2017.
- [54] M. Z. Y. T. J.R. Yates, «Quantifying crack tip displacement fields with DIC,» *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 77, pp. 2063-2076, 2010.