

Análisis de la influencia de concentradores de esfuerzo en la propagación de grietas por fatiga.

María Juliana Baquero Ardila

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniera Mecánica

Director

Jairo Andrés Mantilla Villalobos

Ingeniero Mecánico, M.Sc (e).

Codirector

Alberto David Pertuz Comas

Ingeniero Mecánico, PhD.

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físicomecánicas
Escuela de Ingeniería Mecánica
Bucaramanga

2024

Dedicatoria

Dedico este trabajo a todas aquellas personas que fueron un apoyo a lo largo de los últimos años.

Especialmente a mi madre, mi tía y a mis abuelas, por su presencia y apoyo incondicional.

A mi hermano, cuya vida ha sido fuente de mi más grande admiración desde mis primeros años. A él, gracias por su tiempo, sus palabras y motivación.

A mis compañeros de carrera, de cuyo crecimiento personal fui testigo durante estos años y los cuales fueron en muchas ocasiones un apoyo tanto académico como emocional.

A mis docentes, cuya dedicación y amor por su oficio fueron fundamentales para transcurrir este camino de crecimiento personal y profesional.

Y finalmente a todas aquellas personas cuya lucha constante ha hecho posible el acceso a la educación pública, gratuita y de calidad.

Gracias a todos por acompañarme en este camino de aprendizaje.

Agradecimientos

A lo largo del planteamiento y desarrollo de esta tesis, tuve la fortuna de contar con el apoyo y la colaboración de muchas personas, cuyas contribuciones hicieron posible los resultados obtenidos.

En primer lugar, agradezco a mi director de proyecto Jairo Andrés Mantilla Villalobos, por su dedicación, paciencia, orientación y retroalimentación, que fueron fundamentales para encaminar este proyecto hasta su completa realización.

A mi codirector Alberto Pertuz, por su conocimiento y eficiente gestión de parte del equipo utilizado.

Al profesor Oscar Bohórquez, por haber sido el principal benefactor del material utilizado, y cuyo rol como director del semillero de manufactura incentivó en mí el camino de la investigación y la diferenciación profesional.

Al profesor Diego Villegas, cuyo voto de confianza hizo posible el cargo como auxiliar del laboratorio de ensayos mecánicos y todo el aprendizaje que eso implicó.

A Cesar y Fredy, técnicos encargados del taller de metalmecánica cuyo trabajo y experiencia fue de gran ayuda para la manufactura de las probetas, así como de las modificaciones a los accesorios utilizados.

A todas las personas que participaron en este proyecto de diversas formas, les agradezco enormemente por su contribución.

Contenido

Introducción	16
1. Planteamiento del problema	18
1.1 Justificación.....	19
2. Objetivos	21
2.1 Objetivo general	21
2.2 Objetivos específicos.....	21
3. Marco teórico	22
3.1 Mecánica de la fractura lineal elástica	22
3.2 Modos de fractura.....	22
3.2.1 Modo I.....	23
3.2.2 Modo II.....	23
3.2.3 Modo III	23
3.3 Factor de intensidad de esfuerzo	23
3. ASTM E399.....	24
3.5 Integral J.....	24
3.6 Cargas de fatiga.....	25
3.7 ASTM E647.....	25
3.8 Crecimiento de grieta por fatiga.....	26
3.8.1 Modelo de Paris.....	27
3.9 Método dual de elementos de contorno (BEM)	27

4. Metodología	28
4.1 Definición de los parámetros del ensayo.....	29
4.2 Correlación digital de imágenes	41
4.3 Simulaciones	47
4.4 Planteamiento del enfoque de análisis	48
5. Resultados	51
5.1 Definición de los parámetros del ensayo.....	51
5.2 Correlación digital de imágenes	65
5.3 Análisis de los resultados obtenidos.....	75
6. Conclusiones	97
7. Recomendaciones.....	99
8. Referencias	100
9. Apéndices	102

Lista de tablas

Tabla 1. Intervalo de Δa analizado para cada geometría	50
Tabla 2. Porcentajes de error entre los factores de intensidad de esfuerzo para modo I de fractura, obtenidos por la norma ASTM E399 y por el simulador DBEM Analsys.	55
Tabla 3. Número de ciclos contra Δa obtenidos en la simulación.	66
Tabla 4. Constantes de Paris obtenidas.	66
Tabla 5. Probetas pertenecientes a cada configuración de la geometría 27.	78
Tabla 6. Porcentaje de error entre los resultados de ΔN experimentales y numéricos.	84

Lista de figuras

Figura 1. Modos de fractura.....	22
Figura 2. Gráficas en el crecimiento de grieta por fatiga. a) Tamaño de grieta vs Número de ciclos, b) Tasa de crecimiento de grieta.....	26
Figura 3. Mallado de la geometría a partir de DBEM Analisys.....	30
Figura 4. Parámetros iniciales de mallado.....	31
Figura 5. Tasa de crecimiento de grieta por fatiga para AISI 316L.	31
Figura 6. Interfaz DBEM Analisys con los parámetros correspondientes a la simulación.....	32
Figura 7. Análisis de trayectoria de grieta a) Geometría (mm), carga y restricciones b) Comparación entre FEM de G.A. Ruiz-Muñoz y los resultados experimentales de Ingraftea.....	33
Figura 8. 39 geometrías simuladas en DBEM Analisys.....	35
Figura 9. Variaciones de la geometría 27 a) Configuración 1 b) Configuración 2.....	36
Figura 10. Probetas mecanizadas de algunas geometrías seleccionadas.....	37
Figura 11. Soportes de PLA con fibra de carbono para accesorio de flexión a tres puntos.....	38
Figura 12. Montaje de los ensayos experimentales.....	39
Figura 13. Onda de carga programada a) Ensayos modo I b) Ensayos modo mixto.....	40
Figura 14. Escala milimétrica establecida para la probeta 3 de la geometría 1.....	41
Figura 15. Secuencia fotográfica de trayectoria de propagación para la geometría 1- probeta 3.....	41

Figura 16. Enfoque para la adecuación de las constantes de Paris usadas en la simulación.....	43
Figura 17. Secuencia fotográfica reducida de la trayectoria de propagación de la geometría 6 - probeta 2.....	44
Figura 18. Secuencia fotográfica reducida de la trayectoria de propagación de la geometría 16 - probeta 1.....	44
Figura 19. Secuencia fotográfica reducida de la trayectoria de propagación de la geometría 27 - probeta 2.....	45
Figura 20. Secuencia fotográfica reducida de la trayectoria de propagación de la geometría 21 - probeta 1.....	45
Figura 21. Secuencia fotográfica reducida de la trayectoria de propagación de la geometría 22 - probeta 1.....	46
Figura 22. Secuencia fotográfica reducida de la trayectoria de propagación de la geometría 24 - probeta 1.....	46
Figura 23. Parámetros de crecimiento requeridos por el software.....	48
Figura 24. Esquema ilustrativo del enfoque utilizado para el análisis del tamaño de incremento de grieta contra el incremento del número de ciclos.....	49
Figura 25. Dimensiones definidas para la probeta base Modo I.....	51
Figura 26. Zona de crecimiento controlado.....	53

Figura 27. Graficas generadas por DBEM Analisis. a) Trayectoria de propagación. b) geometría deformada. c) a vs N . d) K 's vs a	53
Figura 28. Comparación de trayectorias de propagación entre FEM de G.A. Ruiz-Muñoz y los resultados obtenidos por DBEM.....	56
Figura 29. Geometrías seleccionadas con base en la simulación.....	58
Figura 30. Geometría 1.....	59
Figura 31. Geometría 6.....	59
Figura 32. Geometría 16.....	59
Figura 33. Geometría 27.....	59
Figura 34. Geometría 21.....	60
Figura 35. Geometría 22.....	60
Figura 36. Geometría 24.....	60
Figura 37. Onda de fuerza requerida para los ensayos de flexión a tres puntos con modo I de fractura.....	61
Figura 38. Programación de ensayo de fatiga para modo I de fractura.....	62
Figura 39. Onda de fuerza requerida para los ensayos de flexión a tres puntos con modo II de fractura.....	63
Figura 40. Programación de ensayo de fatiga para modo mixto de fractura.....	64
Figura 41. Tasa de crecimiento de grieta para el AISI 316 L.....	67

Figura 42. Trayectorias de propagación de grieta obtenidas para la geometría 1.....	68
Figura 43. Trayectorias de propagación de grieta obtenidas para la geometría 6.....	69
Figura 44. Trayectorias de propagación de grieta obtenidas para la geometría 16.....	71
Figura 45. Trayectorias de propagación de grieta obtenidas para la geometría 27.....	72
Figura 46. Trayectorias de propagación de grieta obtenidas para la geometría 21, 22 y 24.....	73
Figura 47. Gráfico comparativo Δa contra ΔN de la geometría 1.....	75
Figura 48. Gráfico comparativo Δa contra ΔN de la geometría 6.....	77
Figura 49. Gráfico comparativo Δa contra ΔN de la geometría 16.....	78
Figura 50. Gráfico comparativo Δa contra ΔN de la geometría 27.....	79
Figura 51. Sección analizada a) Geometría 6 b) Geometría.....	80
Figura 52. Tasa de crecimiento de grieta contra tamaño de grieta, Sin agujero (Geometría 6) Con agujero (Geometría 27- Configuración 1).....	81
Figura 53. Tasa de crecimiento de grieta contra tamaño de grieta, Sin agujero (Geometría 6) Con agujero (Geometría 27- Configuración 1).....	82
Figura 54. Trayectorias de propagación sobrepuestas.....	82
Figura 55. Gráfico comparativo Δa contra ΔN de la geometrías 21, 22 y 24.....	83
Figura 56. Gráfico comparativo KI, KII y Keq contra tamaño de grieta - Geometría 1.....	85
Figura 57. Gráfico comparativo KI, KII y Keq contra tamaño de grieta - Geometría 6.....	86
Figura 58. Gráfico comparativo KI, KII y Keq contra tamaño de grieta - Geometría 16.....	87

Figura 59. Trayectoria de propagación Geometría 16.....	87
Figura 60. Gráfico comparativo KI, KII y Keq contra tamaño de grieta - Geometría 27.....	88
Figura 61. Gráfico comparativo KI, KII y Keq contra tamaño de grieta - Geometría 21.....	89
Figura 62. Gráfico comparativo KI, KII y Keq contra tamaño de grieta - Geometría 22.....	89
Figura 63. Gráfico comparativo KI, KII y Keq contra tamaño de grieta - Geometría 24.....	90
Figura 64. KII contra tamaño de grieta - Geometrías 1, 6, 16 y 27.....	91
Figura 65. Incrementos de trayectoria – Geometría 16.....	92
Figura 66. Incrementos de trayectoria – Geometría 27. a) Configuración 1. b) Configuración 2.....	93
Figura 67. KII contra tamaño de grieta - Geometrías 21, 22 y 24.....	93
Figura 68. Incrementos de trayectoria – Geometría 22.....	94
Figura 69. Variación angular absoluto contra el tamaño de grieta – Geometría 22.....	95
Figura 70. Variación angular local contra el tamaño de grieta – Geometría 22.....	95

Lista de apéndices

Apéndice A. Datos obtenidos para la geometría 1.....	102
Apéndice B. Datos obtenidos para la geometría 6.....	103
Apéndice C. Datos obtenidos para la geometría 16.	104
Apéndice D. Datos obtenidos para la geometría 27-Configuración 1	105
Apéndice E. Datos obtenidos para la geometría 27-Configuración 2.	106
Apéndice F. Datos obtenidos para la geometría 21.	108
Apéndice G. Datos obtenidos para la geometría 22.	108
Apéndice H. Datos obtenidos para la geometría 24.	109
Apéndice I. Probetas ensayadas de la geometría 1.....	110
Apéndice J. Probetas ensayadas de la geometría 6.	111
Apéndice K. Probetas ensayadas de la geometría 16.	111
Apéndice L. Probetas ensayadas de la geometría 27, configuración 1 y configuración 2.	112
Apéndice M. Probetas ensayadas de las geometrías 21, 22 y 24.	112

Glosario

AB (Flexion Arc- Shaped): también conocido como espécimen de flexión en forma de arco, es un tipo de muestra utilizada en pruebas de fractura y mecánica de materiales para medir la resistencia al crecimiento de grietas bajo carga de flexión.

AT (Arc-Shaped Tension): Muestra estándar de tracción en forma de arco, es un tipo de muestra utilizado en pruebas de mecánica de fractura para medir la resistencia a la propagación de grietas bajo una carga de tracción.

BEM (Método de Elementos de Contorno): Método numérico que se enfoca en discretizar solo las superficies o fronteras de un dominio, reduciendo significativamente el número de ecuaciones a resolver.

CT (Compact Tension): Muestra estándar utilizada en ensayos de mecánica de fractura para evaluar la tenacidad a la fractura de materiales.

DCT (Disk-Shaped Compact): Muestra estándar utilizada en ensayos de mecánica de fractura con configuración circular o en forma de disco

DIC (Correlación Digital de Imágenes): Técnica experimental de medición óptica utilizada para analizar y medir desplazamientos, deformaciones y cambios en la superficie de un material o estructura sometida a carga.

Entalla: Discontinuidad geométrica en un material, un corte, muesca o ranura en la superficie de una pieza. Es un punto crítico donde se generan concentraciones de tensiones, y por consiguiente la iniciación de grietas.

FEM (Método de Elementos Finitos): Método numérico que divide un dominio grande y complejo en elementos más pequeños y manejables, donde las ecuaciones diferenciales que describen el comportamiento físico del sistema pueden resolverse de manera aproximada

Grieta: Fisura o discontinuidad en un material que puede debilitar su estructura, propagarse y comprometiendo la integridad del componente.

K_{IC} (Tenacidad a la fractura): Valor crítico del factor de intensidad de esfuerzo en el que el material comienza a fracturarse de manera inestable.

K_{th} (Umbral de fractura): Valor mínimo del factor de intensidad de esfuerzo por debajo del cual no se produce crecimiento de grieta por fatiga.

MFLE (Mecánica de la Fractura Lineal Elástica): Enfoque teórico que analiza y predice el comportamiento de materiales que contienen grietas o defectos bajo condiciones de carga, asumiendo que el material se comporta de manera lineal elástica hasta el momento de la fractura.

SIF (Factor de intensidad de esfuerzos): Define la magnitud y dirección de los esfuerzos en la vecindad de la punta de una grieta.

Resumen

Título: Análisis de la influencia de concentradores de esfuerzo en la propagación de grietas por fatiga*

Autor: María Juliana Baquero Ardila**

Palabras Clave: Crecimiento de grieta por fatiga, Método dual de elementos de contorno, Factor de intensidad de esfuerzos, Integridad estructural, 316L.

Descripción: Este trabajo propone el análisis de la influencia de concentradores de esfuerzo en la trayectoria de propagación de grieta y la vida útil en placas agujeradas, pre entalladas en AISI 316L mediante ensayos experimentales y simulación computacional. Los ensayos experimentales se realizaron para 24 probetas, cuya dirección de laminación se aseguró paralela al eje de la carga aplicada. Los especímenes fueron dimensionados con base en la norma ASTM E399 para flexión tres puntos, se ensayaron 7 geometrías, la geometría base con la grieta centrada, se utilizó para la caracterización de la tasa de crecimiento de grieta en el material, por otro lado, los especímenes restantes se diseñaron con la grieta desfasada del centro con el objetivo de tener modo mixto de fractura. Para los ensayos de grieta desfasada, se incorporaron diferentes agujeros, cuya localización y dimensiones se definieron a partir de simulación computacional por medio del método dual de elementos de contorno, mismo método con el cual se contrastan todos los resultados experimentales obtenidos. Para las corridas experimentales se utilizó la máquina universal de ensayos MTS Bionix y se capturaron para cada ensayo fotografías en la zona de propagación, disminuyendo periódicamente la frecuencia de la onda de fatiga de 40 Hz a 5 Hz. Determinando posteriormente el tamaño de grieta por medio de correlación digital de imágenes para obtener los comportamientos de tamaño de grieta contra número de ciclos y la trayectoria de propagación. Observando como la presencia de un agujero influye en la curvatura de la grieta, haciendo que esta se desvíe o colapse directamente hacia él, debido a que K_{II} aumenta cuando la trayectoria se ve influenciada por el agujero, en contraste con una disminución de K_I . Además, se evidenció como la ubicación estratégica de un agujero, evita que la grieta colapse de manera prematura y aumenta considerablemente la vida útil de un componente.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Pregrado en Ingeniería Mecánica. Director: Jairo Andrés Mantilla Villalobos. Ingeniero mecánico M.Sc (e). Codirector: Alberto David Pertuz Comas. Ingeniero Mecánico, PhD.

Abstract

Title: Analysis of the Influence of Stress Concentrators on Fatigue Crack Propagation*

Author(s): María Juliana Baquero Ardila**²

Key Words: Fatigue Crack Growth, Dual Boundary Element Method, Stress Intensity Factor, Structural Integrity, 316L.

Description: This work proposes the analysis of the influence of stress concentrators on the crack propagation path and the lifespan of holed, pre-notched plates made of AISI 316L through experimental tests and computational simulation. The experimental tests were conducted on 24 specimens, ensuring that the laminating direction was parallel to the axis of the applied load. The specimens were sized based on ASTM E399 standards for three-point bending, testing seven geometries. The baseline geometry, with a centrally located crack, was used to characterize the crack growth rate in the material. Conversely, the remaining specimens were designed with an offset crack to achieve a mixed-mode fracture. For the offset crack tests, various holes were incorporated, with their location and dimensions defined through computational simulation using the dual boundary element method, which was also used to contrast all the obtained experimental results. The experimental runs utilized the MTS Bionix universal testing machine, capturing photographs of the propagation area for each test while gradually reducing the fatigue wave frequency from 40 Hz to 5 Hz. Subsequently, crack size was determined using digital image correlation to obtain the crack size behavior against the number of cycles and the propagation trajectory. It was observed how the presence of a hole influences the curvature of the crack, causing it to deviate or collapse directly towards it, as KII increases when the trajectory is influenced by the hole, contrasting with a decrease in KI. Furthermore, it was demonstrated that the strategic placement of a hole prevents premature crack collapse and significantly extends the lifespan of a component.

*Bachelor's Thesis

Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Undergraduate in Mechanical Engineering. Director: Jairo Andrés Mantilla Villalobos, Mechanical Engineer, M.Sc (e). Codirector: Alberto David Pertuz Comas, Mechanical Engineer, PhD.

Introducción

Cuando se diseña un elemento mecánico cuya aplicación contempla estar sometido a cargas fluctuantes, con el tiempo se logran evidenciar ciertos cambios en el material y en la estructura del componente. Estos cambios se deben a fenómenos muy evidentes como el desgaste y la deformación plástica, y a otros menos notorios como la fatiga, que es el proceso de deterioro gradual de un material sometido a cargas variables durante un periodo de tiempo en el que se van acumulando microfisuras en el material que son difíciles de detectar, produciendo eventualmente la nucleación de una grieta, su propagación, la falla repentina del componente y la falla en cadena del sistema que conforma. Este fenómeno se considera de gran importancia debido a que sus consecuencias en la mayoría de los casos pueden ser catastróficas dependiendo del escenario al que se haga referencia.

A lo largo de la historia se han evidenciado las enormes consecuencias que este fenómeno ha causado a componentes estructurales de puentes, elementos rotativos en la industria del transporte, elementos móviles de maquinaria, dispositivos médicos, entre otros.

Algunos ejemplos de esto son el vuelo 232 de United Airlines, en el que se registró la muerte de 111 personas a bordo debido a una grieta nucleada y propagada por fatiga en el ventilador de uno de sus motores (McEvily et al, 2016), o el caso del tren de alta velocidad ICE 884, en el que una de sus ruedas falló por fatiga, causando el descarrilamiento del tren y la muerte de 101 personas (Brumsen, 2011).

Por otro lado, si se hace referencia a dispositivos médicos como prótesis ortopédicas, resulta evidente que la población joven tiende a imponer cargas de mayor magnitud y frecuencia que la población de edad avanzada, haciendo que estas sean más propensas a fallar por fatiga (S. Griza,

2008). Estos dispositivos se fabrican con materiales muy específicos que presentan propiedades químicas de biocompatibilidad, así como una gran resistencia mecánica, destacando los aceros inoxidables como una alternativa muy atractiva en el mercado para la fabricación de implantes, placas y tornillos.

El AISI 316L en particular es un acero inoxidable ampliamente utilizado en prótesis ortopédicas, como es el caso de las prótesis de cadera, cuya vida útil una vez implantada es de 15 a 20 años, su fallo antes de los 10 años se considera poco frecuente, pero puede ocurrir debido a diferentes factores entre los cuales estadísticamente predomina la fatiga (Kiani Khouzani et al., 2018).

Dicho lo anterior, se considera de suma importancia investigar el comportamiento de este material ante el fenómeno de la fatiga y su principal consecuencia, que es la nucleación y propagación de una grieta, la cual tiene una afectación importante sobre la integridad y vida útil del componente. Adicional a esto se plantea tener en cuenta también, el factor adicional de la geometría del componente, que puede afectar el comportamiento de propagación de grieta.

Este documento se organiza de la siguiente forma, inicialmente se presenta el planteamiento del problema y su justificación, en los que se establece la motivación y el impacto de la investigación, seguidos por un breve marco teórico en el que se destacan conceptos importantes para el desarrollo del tema.

El apartado de metodología explica el desarrollo del proyecto, empezado por la definición de los parámetros para los ensayos experimentales de fatiga, seguido por el procesamiento digital de imágenes y el desarrollo de las simulaciones, continuando con la obtención, el análisis comparativo y la discusión de los resultados obtenidos experimentalmente y por el método dual de

elementos de contorno. Finalmente terminando con las respectivas conclusiones y recomendaciones.

1. Planteamiento del problema

Cuando un elemento está sometido a cargas de fatiga, la aparición de microfisuras iniciales y su posterior propagación, pueden deberse a defectos superficiales, micro inclusiones del material, concentradores de esfuerzos directamente relacionados con la geometría del componente o su proceso de fabricación, estas variables tienen un impacto directo sobre cómo nuclea y se propaga la grieta, sin embargo, muchas veces el punto de nucleación de una grieta puede ser completamente impredecible.

Es por esto que se considera importante estudiar dichos factores que inciden de manera directa en el comportamiento de los defectos estructurales existentes de un material, muchos de los cuales están sujetos directamente con el proceso de manufactura y el acabado geométrico final del componente. En el caso del acabado geométrico, hace referencia a la geometría final que tendrá una pieza, lo cual será el resultado de un proceso de diseño direccionado a una aplicación específica, que además juega un papel muy importante en el comportamiento del material ante la aparición de un defecto como una grieta.

Esto hace que sea necesario el desarrollo de técnicas que permitan aumentar la confiabilidad del elemento en operación, para las cuales se deben estudiar las variables que mayor incidencia tienen en el comportamiento de la propagación de la grieta, en consecuencia se propone estudiar la influencia de la geometría como concentradores de esfuerzo, específicamente la presencia de agujeros en un elemento, que a diferencia de aspectos microestructurales más complejos, son un factor bajo la capacidad de control del diseñador mecánico.

El anterior análisis propone responder la pregunta: ¿Cómo influye la presencia de agujeros en la trayectoria de propagación de grieta y la vida útil del elemento?, esto se busca analizar mediante la realización de ensayos experimentales y simulaciones de crecimiento de grieta en láminas agujeradas pre entalladas bajo cargas de fatiga.

1.1 Justificación

Cuando un material está sometido a cargas dinámicas por debajo de su límite elástico, ocurre el fenómeno de la fatiga, el cual causa la aparición de microgrietas que se propagan progresivamente y deterioran el material hasta causar su fractura. La mecánica de la fractura ha estudiado ampliamente este fenómeno, así como desarrollado diferentes modelos de crecimiento como los de Paris, Klesnil–Lukas y Forman–Newman, comúnmente utilizados para predecir la propagación de grietas bajo diversas condiciones de carga en materiales con comportamiento lineal elástico (Díaz-Rodríguez et al., 2024), así como cuantificar su crecimiento y la vida remanente del elemento, lo que resulta ser indispensable en procesos de diseño y selección de materiales.

Teniendo en cuenta que la falla repentina de un componente durante su funcionamiento puede tener consecuencias graves, como desencadenar en un daño significativo del equipo, la interrupción de la línea de producción o incluso lesiones personales. El crecimiento de grieta es un fenómeno físico ampliamente estudiado en diferentes materiales cuyas aplicaciones requieren que estén sometidos a cargas variables. Desde polímeros como el nylon, el policarbonato y el polimetilmetacrilato (PMMA), usados como matrices de materiales compuestos con diferentes aplicaciones (Hertzberg et al., 1970), hasta aceros inoxidables austeníticos utilizados para la fabricación de reactores nucleares (James, 1976), han sido estudiados bajo estas condiciones.

Por otro lado, también se encuentran estudios en dispositivos médicos cuya aplicación implica estar sujeto a variabilidad en las cargas de servicio, además de presentar concentradores de esfuerzo en su geometría, estas son las placas de osteosíntesis o placas de fijación ósea, dispositivos ortopédicos agujereados cuya función es alinear, estabilizar y absorber las cargas de huesos fracturados durante su proceso de curación (Kanchanomai et al., 2008). Estos dispositivos ortopédicos generalmente son fabricados en materiales como el titanio y el acero inoxidable quirúrgico, siendo este último mucho más utilizado debido a su costo relativamente bajo y buenas propiedades mecánicas.

Dichos estudios se han realizado tanto experimental como numéricamente, y pretenden estimar la vida útil de un componente con estas características, así como estudiar el comportamiento del material, buscando optimizar futuros procesos de diseño y fabricación.

De igual modo, el presente trabajo propone analizar el comportamiento de propagación de grieta en placas agujerada de acero inoxidable 316L bajo cargas de fatiga, para ensayos de flexión a tres puntos con presencia de modo I y modo mixto de fractura.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Analizar la influencia de agujeros en la trayectoria de propagación de grieta y la vida útil en placas de acero AISI 316L sometidas a cargas de fatiga.

2.2 Objetivos específicos

1. Definir los parámetros de geometría, carga, montaje y sistema de adquisición de imágenes para los ensayos de crecimiento de grieta en acero AISI 316L bajo cargas de fatiga.
2. Determinar la trayectoria de propagación de grieta mediante el software de procesamiento de imágenes IMAGEJ para las diferentes geometrías ensayadas experimentalmente.
3. Simular los ensayos de crecimiento de grieta a través del método dual de elementos de contorno utilizando el software DBEM Analysis, para obtener los factores de intensidad de esfuerzos K_I y K_{II} durante la propagación.
4. Analizar la influencia de agujeros mediante la variación del posicionamiento de la entalla en la trayectoria de propagación de grieta, la vida útil y los factores de intensidad de esfuerzo, complementando los resultados de la simulación con los obtenidos experimentalmente.

3. Marco teórico

Esta sección tiene como propósito contextualizar al lector, proporcionando bases conceptuales sólidas que sustenten el origen y las bases del presente estudio. En esta se encuentran conceptos relacionados con la mecánica de la fractura, la normativa utilizada y el método de simulación empleado.

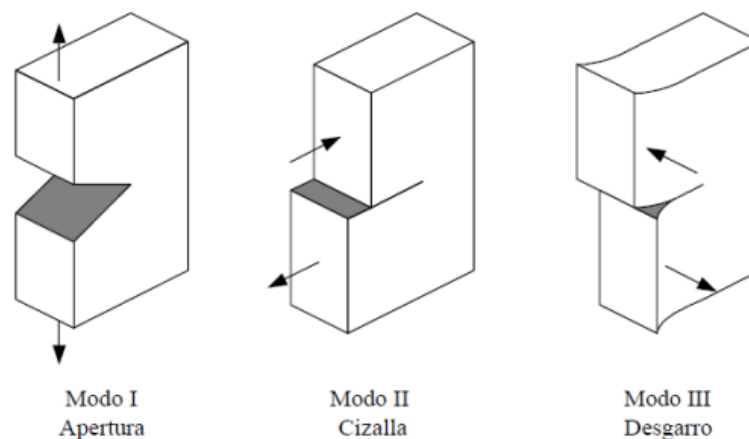
3.1 Mecánica de la fractura lineal elástica

Es una rama de la mecánica de materiales que se encarga de estudiar el comportamiento de los sólidos expuestos a cargas externas con presencia de grietas o fisuras, y con un comportamiento predominantemente elástico, es decir, que no presenten evidentes deformaciones plásticas antes de la fractura.

3.2 Modos de fractura

Dependiendo de cómo sean los desplazamientos relativos de la superficie de fractura durante la propagación de una grieta, se tienen tres modos básicos de fractura (Shao et al., 2012).

Figura 1. *Modos de fractura*



Tomado de Dynamic characteristics of cracked gear and three-dimensional crack propagation analysis. (p. 1345), por Shao, 2012.

3.2.1 Modo I: Las superficies de la grieta se alejan perpendicularmente una de la otra.

3.2.2 Modo II: Las superficies de la grieta se alejan entre sí en sentido opuesto, pero en la dirección del avance de la grieta.

3.2.3 Modo III: Las superficies de la grieta se alejan entre sí en dirección perpendicular a la dirección de avance.

3.3 Factor de intensidad de esfuerzo

En la mecánica de la fractura este parámetro describe la magnitud de los esfuerzos en la punta de la grieta y se utiliza para predecir el comportamiento de esta en cada instante, su cálculo depende del tamaño de la grieta, las condiciones de carga y la geometría de la probeta, para cada modo de fractura se obtiene un K_I , K_{II} y K_{III} respectivamente (Chambel et al., 2016). Este parámetro se calcula de manera local, es decir que existe un valor particular para cada instante, puede calcularse por medio de formulaciones matemáticas con base a la geometría y los parámetros de aplicación de carga, así como por medio de métodos numéricos.

El factor de intensidad de esfuerzo también se utiliza como un criterio de falla y cuando alcanza valores críticos, se le denomina tenacidad a la fractura K_{IC} . Esta propiedad se define como la capacidad que tiene un material para absorber cargas antes de fracturarse por completo.

Por lo tanto, se entiende que si el $K_{aplicado} \geq K_{IC}$, habrá fractura.

Además, se tiene también el parámetro ΔK_{th} que es el umbral de fractura. Se afirma que, por debajo de este valor, el crecimiento de la grieta es insignificante y se suele establecer que no existe.

3.4 ASTM E399

La norma ASTM E399 proporciona un método estandarizado para el cálculo experimental de los factores de intensidad de esfuerzos y la tenacidad a la fractura en materiales metálicos pre entallados bajo condiciones predominantemente de deformación plana y elástica. Además, proporciona parámetros geométricos estandarizados para probetas de flexión, Compact Tension C(T), Disk-Shaped Compact DC(T), Arc-Shaped Tension A(T) y flexion Arc-Shaped A(B).

Para el caso de este proyecto, se trabajó con ensayos de flexión a tres puntos para materiales dúctiles, este ensayo se prefirió debido a que su amplia superficie permite visualizar más claramente el crecimiento de la grieta (Jørgensen et al., 2018).

3.5 Integral J

Otra manera de calcular los factores de intensidad de esfuerzo K_I y K_{II} de forma computacional es haciendo uso de la integral J, estrategia que se adopta en el software DBEM propuesto en la metodología para simular los ensayos. La integral J representa la energía necesaria para generar un incremento infinitesimal de grieta (Rice, 1968), dada por la siguiente ecuación:

$$J = \int_T \left[W dy - T \frac{\partial u}{\partial x} \partial s \right] \quad (1)$$

3.6 Cargas de fatiga

La fatiga es un fenómeno que se presenta cuando un elemento estructural o mecánico es sometido a cargas fluctuantes, lo que significa que la magnitud de estas cargas varía de manera cíclica a lo largo del tiempo, lo que provoca un deterioro progresivo del material. Con el transcurso del tiempo, este proceso de carga y descarga repetitiva conduce a la formación de microfisuras en el material, las cuales tienden a crecer y a propagarse, comprometiendo de manera paulatina la integridad estructural del componente y resultando en la fractura catastrófica de este. Es importante destacar que las cargas fluctuantes que inducen este fenómeno son usualmente inferiores a las cargas que provocarían una falla por fluencia generalizada del material (Hernández Albañil et al., 2002), es decir, son cargas que no alcanzan el límite plástico del material, pero, aun así, son suficientes para iniciar y propagar la fractura a lo largo del tiempo.

Se debe agregar que, a partir de la variación de la carga de fatiga entre F_{\min} y F_{\max} , se obtiene un valor de factor de intensidad de esfuerzo para cada una y se determina un ΔK como la diferencia entre K_{\max} y K_{\min} , permitiendo estimar una razón de crecimiento de grieta para cada instante de la propagación.

3.7 ASTM E647

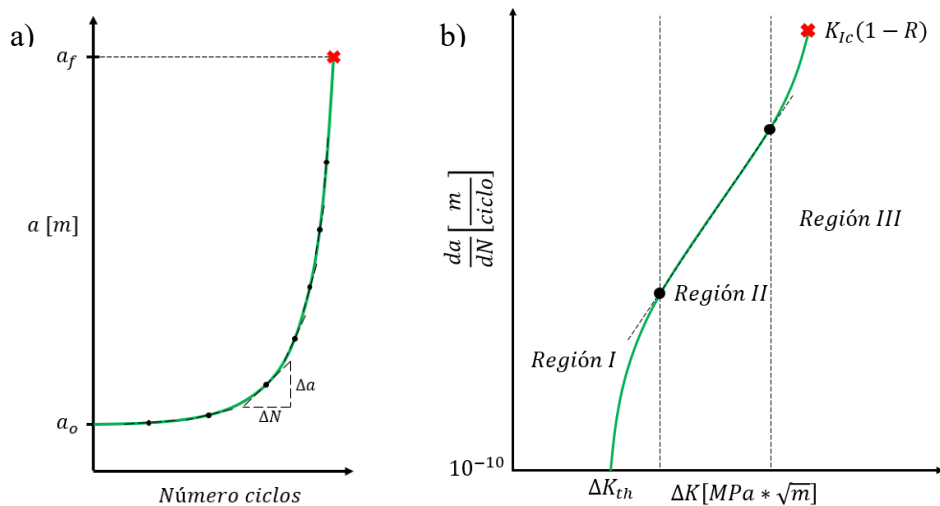
La norma ASTM E647 (*E647 Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates*, n.d.) proporciona pautas y especificaciones para obtener la tasa de crecimiento de grieta por fatiga en función del rango del factor de intensidad de esfuerzo ΔK , desde el umbral de fractura, hasta la inestabilidad controlada por el K_{IC} .

3.8 Crecimiento de grieta por fatiga

Una vez obtenidos los tres datos esenciales que son el número de ciclos de falla (N), el tamaño de grieta (a) y los factores de intensidad de esfuerzo (K), se obtienen las gráficas de comportamiento a vs N seguida de la gráfica de la tasa crecimiento de grieta da/dN vs ΔK en escala logarítmica (Hsu et al., 2013), que describe la razón de crecimiento de grieta, es independiente de la geometría del elemento (Plata et al., 2023) y dependiente de la razón de cargas de fatiga y del material.

En la figura 2 se evidencian las tres regiones de crecimiento, la región I de crecimiento lento, la región de II de crecimiento controlado y la región III de crecimiento inestable.

Figura 2. Gráficas en el crecimiento de grieta por fatiga. a) Tamaño de grieta vs Número de ciclos, b) Tasa de crecimiento de grieta



Como se evidencia, en las regiones I y III se dificulta la medición experimental del crecimiento de la grieta, esto porque para la región I se requiere una gran cantidad de ciclos de carga para que la grieta crezca una magnitud poco apreciable y en la región III se requiere una cantidad muy pequeña de ciclos antes de alcanzar la tenacidad a la fractura, es por esto que la región II de crecimiento controlado, que manifiesta un comportamiento potencial, transcurrido

durante un número de ciclos más amplio, permite analizar fácilmente el comportamiento de la propagación (Schönherr et al., 2022).

Para medir el comportamiento de crecimiento de la grieta, se han desarrollado una gran cantidad de modelos matemáticos que se acoplan mejor a unas regiones que, a otras, resaltando que es fundamental encontrar un modelo que describa la región de crecimiento controlado.

3.8.1 Modelo de Paris

Este modelo describe el comportamiento de la grieta cuando se sitúa en la región de crecimiento estable, se observa en la ecuación 2, donde C y m son constantes que dependen del material (INTRODUCCIÓN A LA MECÁNICA DE LA FRACTURA Y ANÁLISIS DE FALLAS, 2008).

$$\frac{da}{dN} = C \Delta K^m \quad (2)$$

3.9 Método dual de elementos de contorno (DBEM)

Es un modelo computacional con base en principios matemáticos, utilizado para resolver problemas de mecánica de sólidos relacionados con la mecánica de la fractura. Este, a diferencia de otros métodos numéricos como el método de elementos finitos FEM, discretiza la frontera y no el dominio del modelo, esto es útil porque se facilitan los algoritmos de mallado y reduce el orden de las ecuaciones, resultando en una disminución del tiempo de cálculo (Mantilla et al., 2024).

Para el análisis de crecimiento de grieta por medio del DBEM, se necesitan conocer las condiciones de frontera del caso particular, las restricciones de desplazamiento y las condiciones de tracción, además de las propiedades del material (módulo de elasticidad y módulo de Poisson).

Es importante mencionar que, según el modelo de propagación de grieta empleado, son necesarias diferentes constantes del material.

Además, se debe agregar que una vez establecido el tamaño inicial de la entalla y el número de elementos en los cuales se dividió durante el preproceso de mallado, se deben establecer los parámetros incrementales del método, estos son:

Longitud del incremento: hace referencia a la magnitud que tendrá cada incremento de la grieta durante la simulación, es decir, el tamaño que crece en cada iteración.

Longitud incremental: hace referencia a la cantidad de veces que crece cada elemento.

Número de incrementos: hace referencia al total de iteraciones durante la simulación.

4. Metodología

El desarrollo de este proyecto se divide en diferentes etapas metodológicas, inicialmente se trata la fase de definición de los parámetros del ensayos, esta consta de la definición de la geometría, carga, montaje y programación de los ensayos experimentales. Seguido de esto se trata la fase de procesamiento digital de imágenes, en la cual se realiza el proceso de escalado, filtrado y medición de las variaciones de posición de la grieta a lo largo del tiempo.

A continuación, se trata la fase del modelado de las geometrías con el fin de la realización de las simulaciones computacionales, y finalmente se cierra el proceso metodológico con la explicación del enfoque utilizado para el análisis de los resultados obtenidos.

4.1 Definición de los parámetros del ensayo

Para establecer los parámetros geométricos y de carga de la probeta base (sin agujeros), se empleó la norma ASTM E399 para ensayos de flexión tres puntos, el cual es uno de los métodos más frecuentemente aplicados para el cálculo de la tenacidad a la fractura y los factores de intensidad de esfuerzo en materiales metálicos, basándose en relaciones geométricas y de carga (ASTM, 2023).

Las dimensiones utilizadas, se definieron buscando principalmente un área lo suficientemente grande para apreciar la trayectoria de grieta, pero a su vez, el tamaño preciso para obtener la mayor cantidad de probetas de cada lámina (507x150 mm) de material disponible.

En cuanto a los parámetros de carga, estos se definieron basados en estudios previos de la tasa crecimiento de grieta por fatiga en acero inoxidable AISI 316L (Benachour et al., 2010). Lo anterior se llevó a cabo utilizando la fórmula de la variación del factor de intensidad de esfuerzo producto de las cargas de fatiga (4). Se tomó un ΔK ubicado en el inicio de la zona de crecimiento estable, buscando obtener un valor de K_{eq} inicial que finalmente fue reemplazado en las fórmulas proporcionadas por la norma ASTM E399 (4) junto con los valores geométricos definidos previamente, para calcular la carga necesaria en los ensayos de Modo I.

$$\Delta K = K_{eq}(1 - R) \quad (3)$$

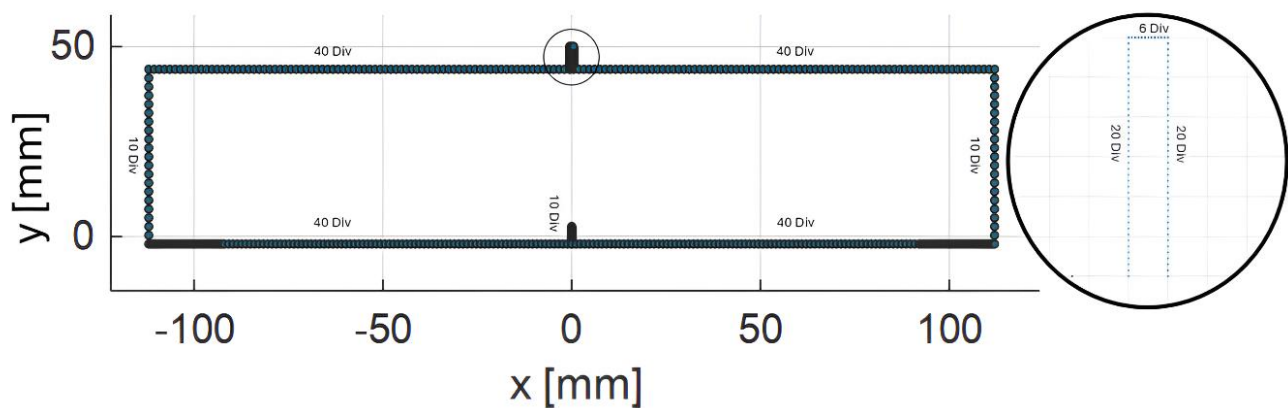
$$K = \frac{PS}{\sqrt{BB} W^{\frac{3}{2}}} f\left(\frac{a}{W}\right) \quad (4)$$

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = 3 \sqrt{\frac{a}{W}} \frac{1.99 - \left(\frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right) \left[2.15 - 3.93 \frac{a}{W} + 2.7 \left(\frac{a}{W}\right)^2\right]}{2 \left(1 + 2 \frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right)^{\frac{3}{2}}} \quad (5)$$

Este enfoque tuvo como propósito de obtener suficiente carga para acelerar el fenómeno de la nucleación de la grieta y de este modo asegurar el inicio de la prueba en la región de crecimiento controlado, a la par de verificar que la máquina universal de ensayos MTS Bionix contara con dicha capacidad.

Por otra parte, y con la finalidad de tener un método adicional al cálculo experimental basado en la norma ASTM para los factores de intensidad de esfuerzo, se realizó la construcción de la misma probeta en el software de elementos de contorno DBEM Anisys, utilizando la geometría y la cargas anteriormente definidas, se llevó a cabo el mallado de la geometría mediante su preproceso en GID, asignando diferente cantidad de divisiones para cada uno de los segmentos.

Figura 3. Mallado de la geometría a partir de DBEM Anisys.




Es importante resaltar que, para la geometría de la simulación en DBEM Anisys se realizó una extensión de W en el punto exacto de aplicación de la carga, con la hipótesis de obtener una distribución de esfuerzos constante en la probeta, según el principio de Saint-Venant.

Una vez creada la geometría y generada la malla en GID, se procedió a cargarla en DBEM Anisys, obteniendo los siguientes parámetros de mallado:

Figura 4. *Parámetros iniciales de mallado.*

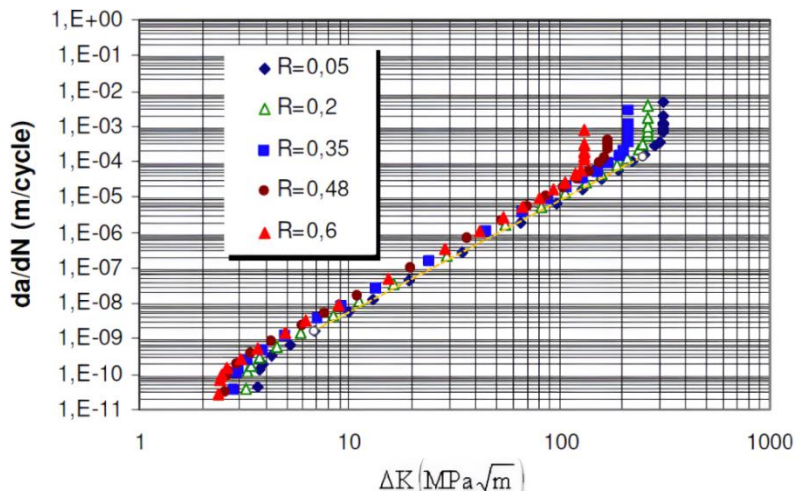
DBEM_Analysis

 **Cargar archivo GiD**

Número de nodos	<input type="text" value="572"/>
Número de elementos	<input type="text" value="286"/>
Número de condiciones de desplazamiento	<input type="text" value="3"/>
Número de condiciones de tracción	<input type="text" value="26"/>
Número de fronteras cerradas (Boundary zones)	<input type="text" value="1"/>
Número de puntos internos	<input type="text" value="0"/>

Para determinar los valores de las constantes de Paris C y m necesarias para la simulación, se utilizó la herramienta WebPlotDigitizer para encontrar las coordenadas de los puntos correspondientes a la zona de crecimiento controlado, presentes en la gráfica de tasa de crecimiento de grieta obtenida por Benachour (Benachour et al., 2010) para el 316L con una relación de cargas de 0,05. Dichos puntos se graficaron en escala logarítmica, obteniendo las constantes con ayuda de Matlab.

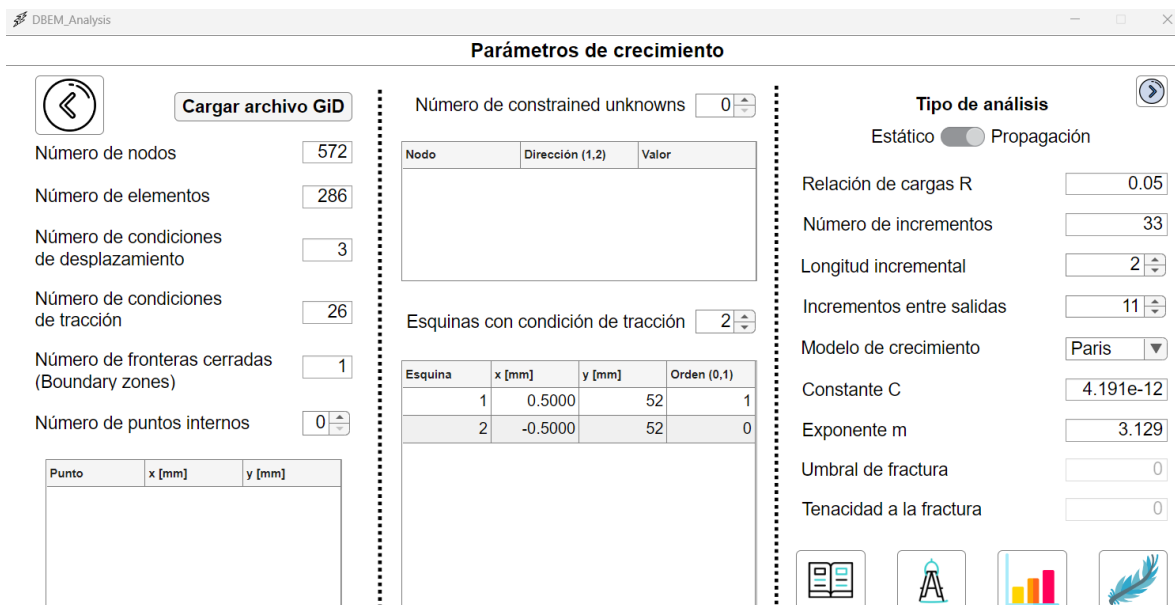
Figura 5. *Tasa de crecimiento de grieta por fatiga para AISI 316L.*



Tomado de *Effect of geometrical and loading parameters on fatigue crack growth of stainless steel 316L* (p. 3), por Benachour M, 2010, ASME 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis.

Por último, se definieron los parámetros finales conociendo que la entalla inicial de 4,6 mm tiene 10 elementos, para una longitud individual de 0,46 mm. El tamaño final que considera tenacidad a la fractura del material es de 35,49 mm. Dando como resultado un Δa de 30,89 mm y un total de $33,57 \approx 34$ incrementos de 0,92 mm cada uno. Por otra parte, se colocaron las coordenadas de las esquinas en condición de tracción, las cuales son las dos esquinas de la región extendida de la probeta (Figura 3).

Figura 6. Interfaz DBEM Analisis con los parámetros correspondientes a la simulación.



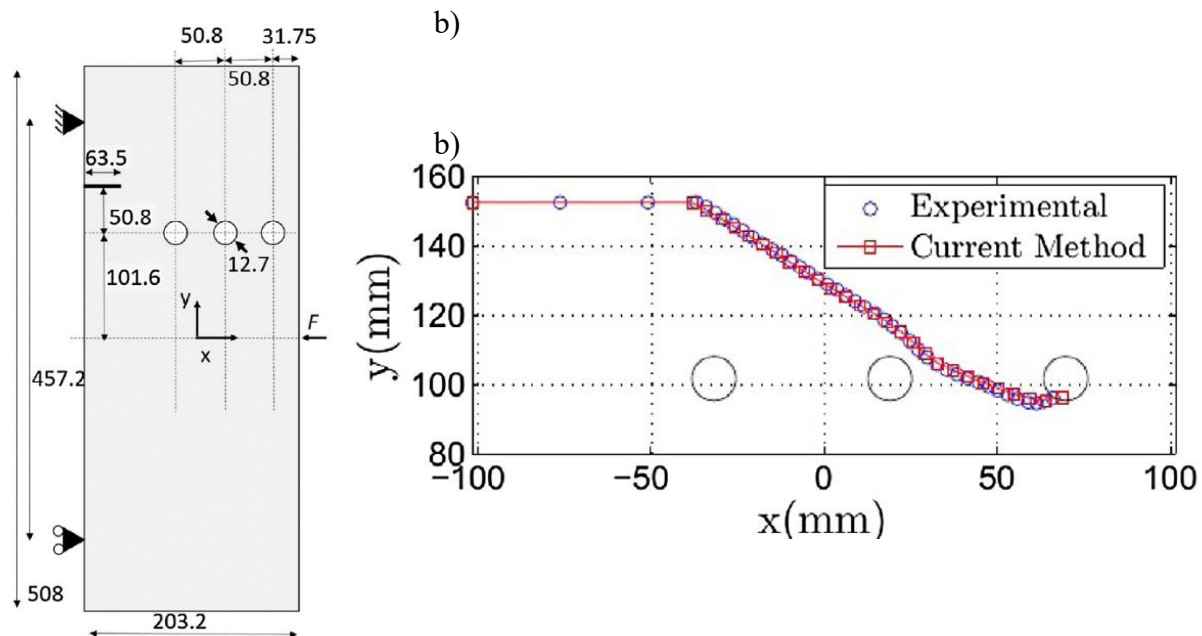
Una vez establecida toda la información requerida, el software presentó las gráficas correspondientes a la tasa de crecimiento de grieta con la ley de Paris, la geometría deformada, la trayectoria de propagación, el tamaño de grieta contra el número de ciclos y los factores de intensidad de esfuerzos contra el tamaño de grieta.

Dichos valores de factores de intensidad de esfuerzo calculados para modo I se compararon con los valores teóricos calculados a partir de la norma ASTM E399, obteniendo el error

porcentual entre estos, con el objetivo de ver la fiabilidad del simulador DBEM Analisis y así emplearlo para calcular los valores de K_I y K_{II} para los ensayos experimentales de modo mixto.

Respecto a la validación de los factores de intensidad de esfuerzo para modo mixto, se tomaron como referencia los ensayos experimentales de crecimiento de grieta en Polimetilmetacrilato (PMMA) realizados por Ingrassia AR (Ingrassia, 1990) y simulados por G.A. Ruiz-Muñoz (Ruiz-Muñoz, 2018) con el método de elementos finitos FEM, en los cuales se logra apreciar la trayectoria de propagación de grieta en una probeta pre entallada, con tres agujeros y sometida a cargas de fatiga a flexión a tres puntos.

Figura 7. Análisis de trayectoria de grieta a) Geometría (mm), carga y restricciones b) Comparación entre FEM de G.A. Ruiz-Muñoz y los resultados experimentales de Ingrassia.



Tomado de *Method to analyse multiple site damage fatigue before and after crack coalescence* (p. 7), por Ruiz-Muñoz, G. A, 2018, *Engineering Fracture Mechanics*.

Posteriormente, se modeló en el software DBEM Analisis la geometría propuesta por la literatura consultada y se generó la trayectoria de propagación con este método, buscando comparar

la trayectoria obtenida, con la trayectoria mostrada en la literatura, ya que previamente validado K_I , solo se necesita validar la desviación en la dirección de crecimiento para obtener los valores de K_{II} a partir de la ecuación 6.

$$\theta_t = 2 \tan^{-1} \left(\frac{K_I}{4K_{II}} \pm \frac{1}{4} \sqrt{\left(\frac{K_I}{K_{II}}\right)^2 + 8} \right) \quad (6)$$

Una vez verificada la validez de los factores de intensidad de esfuerzo obtenidos con el simulador DBEM Anisys para la probeta base, se procedió a realizar diferentes simulaciones con el objetivo de encontrar comportamientos interesantes en la trayectoria de propagación, los factores de intensidad de esfuerzo y el número de ciclos. En total se realizaron 39 simulaciones en las cuales se varió el número, el diámetro y la ubicación de los agujeros, así como la ubicación de la entalla. Para las simulaciones con agujeros, se buscó que se presentaran tanto K_I como K_{II} y que los agujeros influenciaran la trayectoria de propagación de grieta, además de que el factor de intensidad de esfuerzos equivalente no superara la tenacidad a la fractura del material, esto para establecer un tamaño final de grieta y de esta manera poder analizar una trayectoria de propagación definida.

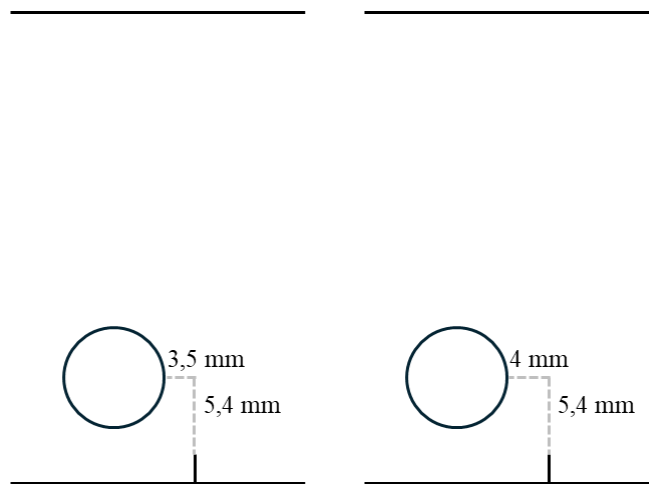
Figura 8. 39 geometrías simuladas en DBEM Analisis.



Del total de geometrías simuladas se seleccionaron siete, la primera de ellas fue la probeta base con la entalla centrada, buscando obtener a partir de esta, la gráfica de tasa de crecimiento de grieta da/dN vs ΔK y, por consiguiente, las constantes C y m necesarias para ajustar la simulación con base en parámetros obtenidos experimentalmente. Para la segunda geometría se optó por desfasar la entalla 46 mm, ya que fue la configuración no perforada que mayor presencia de modo mixto tuvo en la simulación. Para la tercera geometría, se seleccionó la geometría perforada número 16 debido a que se evidencia la influencia del agujero en la trayectoria de propagación, además de una alteración considerable de los valores de los factores de intensidad de esfuerzo para modo

mixto. Para la cuarta geometría, se seleccionó la geometría perforada número 27 a raíz de que en los resultados de esta simulación se hizo evidente el incremento en el número de ciclos en comparación con la geometría no perforada con el mismo desfase en la grieta, para esta geometría se realizaron dos variaciones de la posición del agujero, buscando demostrar la sensibilidad que tiene la cercanía entre el agujero y la entalla, respecto al incremento del número de ciclos.

Figura 9. Variaciones de la geometría 27 a) Configuración 1 b) Configuración 2



Finalmente, se optó por elegir las geometrías perforadas 21, 22 y 24 para los tres ensayos restantes, debido al interesante comportamiento de propagación de grieta en relación con el posicionamiento horizontal de los agujeros respecto a la entalla.

En cuanto a la manufactura de las probetas, se cortó por chorro de agua la geometría exterior de los 18 especímenes a ensayar, con un tamaño muestral de tres para las geometrías 1,6,16, 27-1 y 27-2, y una muestra de una probeta para las geometrías 21,22, y 24. Es importante mencionar que debido al método de manufactura empelado, las caras de las probetas presentaron un pequeño ángulo de corte que después fue reducido por medio de mecanizado convencional con refrigeración, esto para asegurar que las superficies en contacto con los soportes y con el punto de

aplicación de carga, estuviesen paralelas entre sí. Una vez se obtuvo la geometría rectangular exterior, se realizó la entalla a partir de corte por hilo, buscando obtener un corte más preciso en la zona de nucleación de la grieta, así mismo, las perforaciones de las probetas agujeradas se taladraron en su respectiva ubicación usando refrigerante para evitar la aparición de esfuerzos residuales debido al aumento de la temperatura.

Figura 10. *Probetas mecanizadas de algunas geometrías seleccionadas.*



Por otra parte, y en cuanto a los parámetros de ejecución del ensayo, fue imprescindible sintonizar el PID de la máquina universal de ensayos en control fuerza para asegurar el comportamiento adecuado del equipo durante el ensayo.

Posteriormente se definieron los parámetros de ejecución del ensayo de modo I en el software MTS Multipurpose. Para evitar que el movimiento oscilatorio de alta frecuencia de la máquina afectara el enfoque de la cámara para la captura de imágenes, se añadió una frecuencia baja de 0.1 Hz durante 3 ciclos que actuó cada 2000 ciclos, permitiendo tomar fotografías cada 100 segundos de prueba, tiempo que iba incrementando progresivamente cuando se adicionan los 30 segundos de duración la frecuencia baja. Además, se definió una rampa y una frecuencia de muestreo de 10 Hz para el ensayo.

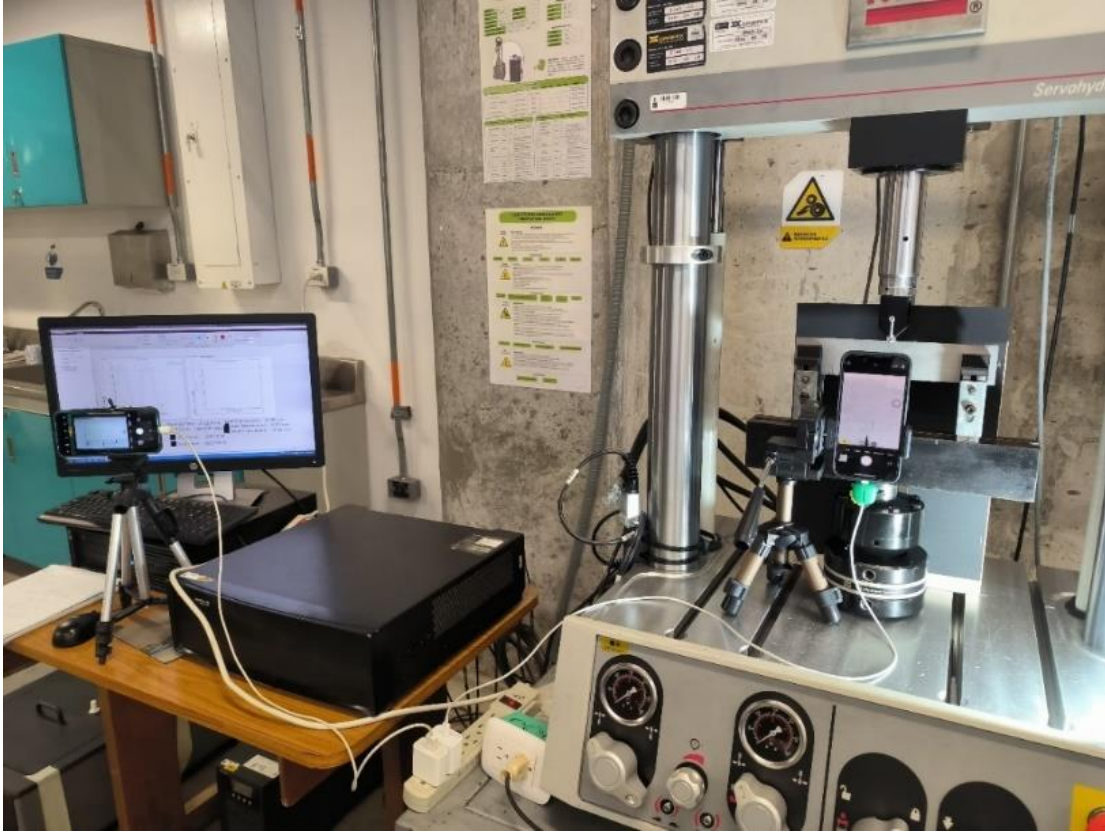
Por otro lado, para la definición de los parámetros del ensayo en las probetas con modo mixto de fractura, se realizó el cálculo proporcional de la fuerza buscando un valor de K_{eq} de 21,05, con la fuerza obtenida se utilizó el mismo enfoque de alta y baja frecuencia con iguales magnitudes.

Una vez obtenida la programación adecuada del ensayo, se procedió con la adecuación física de la prueba, que consistió en la postura de los accesorios de flexión a tres puntos junto con cuatro soportes fabricados por manufactura aditiva en PLA con fibra de carbono, cuyo fin fue evitar el fenómeno del pandeo en la probeta durante el ensayo. Además, se incorporó un fondo negro en la parte trasera de montaje para tener un mayor contraste entre el contorno de la probeta y el fondo, además de esto, se instaló una lámpara que proporcionó iluminación en la zona de la entalla. Finalmente se añadieron dos cámaras con sus respectivos soportes y obturadores bluetooth, una cámara de 12 Megapíxeles con Macro se empleó para capturar fotográficamente la zona de la entalla, mientras que una cámara de 48 Megapíxeles se encargó de documentar la pantalla de ejecución del ensayo. El objetivo de esto fue tomar ambas fotografías en el mismo instante, instante en el que la carga aplicada a la probeta fue la máxima, ya que con esto se puede observar la máxima apertura de ambas caras de la grieta.

Figura 11. *Soportes de PLA con fibra de carbono para accesorio de flexión a tres puntos.*

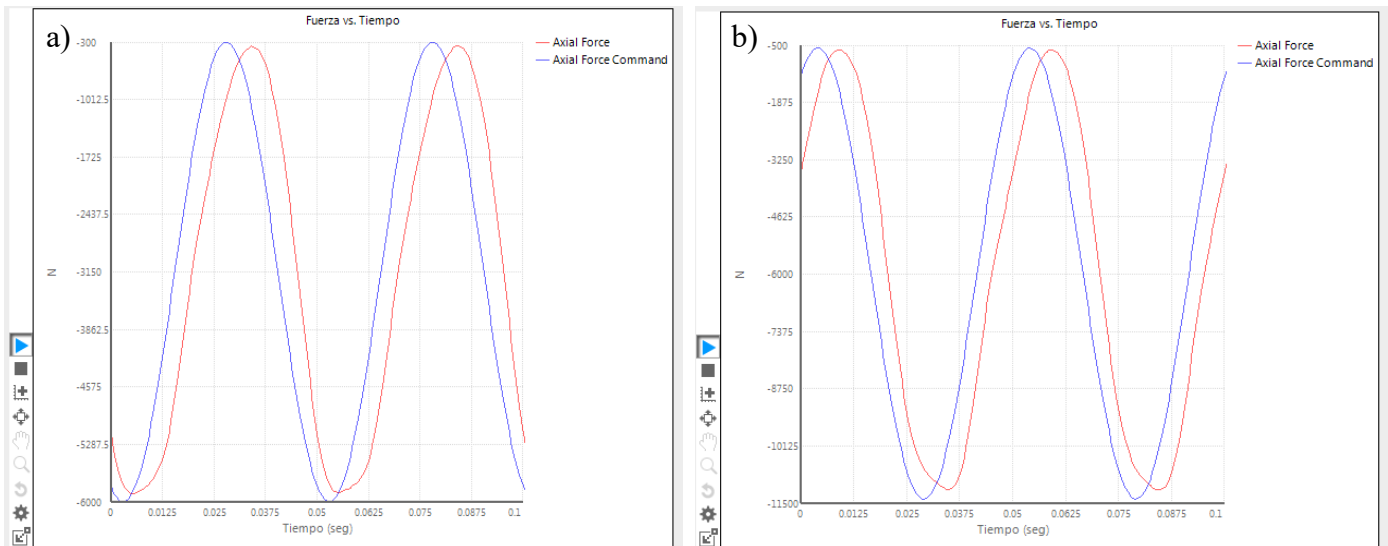


Figura 12. Montaje de los ensayos experimentales.



Para cada fotografía de la grieta, se tomó simultáneamente una fotografía de la pantalla de ejecución del ensayo, la cual mostraba el número de ciclos y la onda de carga en ese mismo instante. Además, es importante mencionar que el poder observar la onda de carga en tiempo real, aseguró la captura de la imagen en el punto de máxima carga, así como la apertura máxima de las caras de la grieta.

Figura 13. Onda de carga programada a) Ensayos modo I b) Ensayos modo mixto.



De esta manera se realizaron las pruebas experimentales y se tomaron las respectivas secuencias fotográficas para cada ensayo, la fotografías obtenidas en formato .HEIF se convirtieron a .TIFF con ayuda del programa AVS Image Converter, conservando la calidad original de la imagen, con el objetivo de posteriormente ser procesadas digitalmente en el software ImageJ. De este modo se dio por cumplido el primer objetivo de este trabajo de investigación.

4.2 Procesamiento digital de imágenes

Una vez realizados los ensayos de crecimiento de grieta para los tres especímenes de la geometría base y obtenidas las imágenes para cada intervalo de ciclos, se realizó un proceso de escalado respecto a una escala inicial aplicada a la primera imagen obtenida antes de iniciar el ensayo, además se aplicaron dos filtros, uno de contraste para mejorar la definición de la imagen y otro monocromático con fondo oscuro con el objetivo de identificar mejor la grieta.

Figura 14. *Escala milimétrica establecida para la probeta 3 de la geometría 1.*

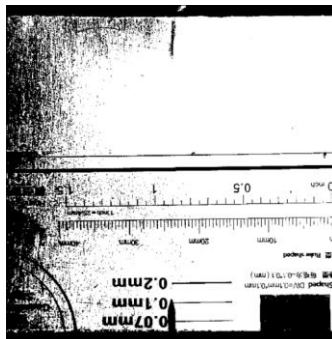
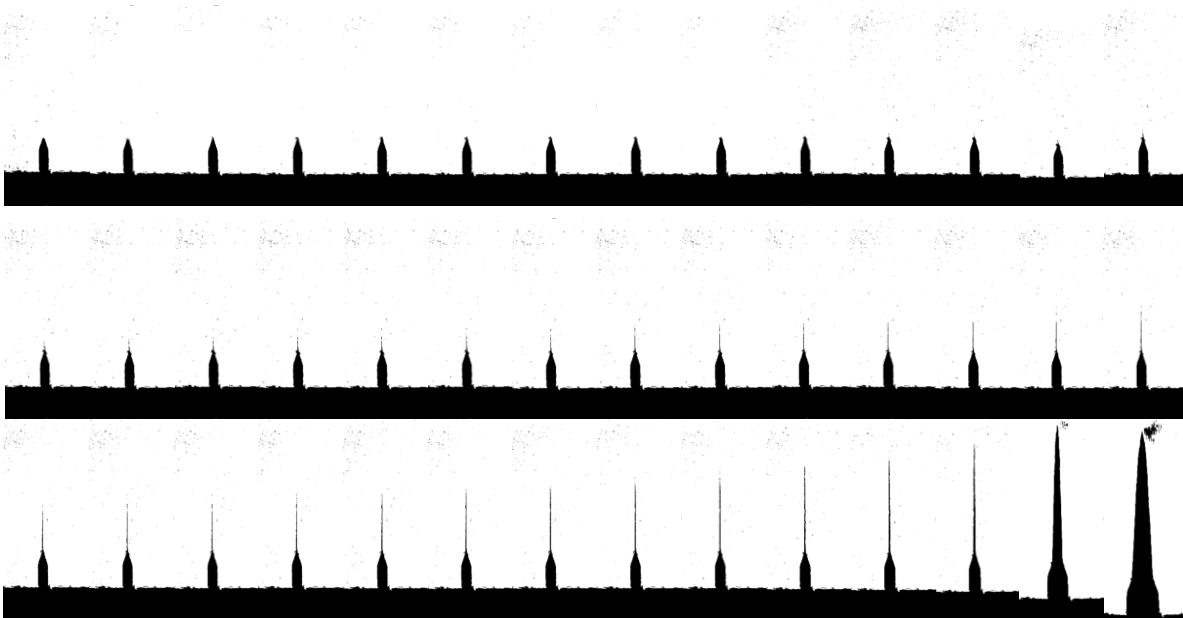


Figura 15. *Secuencia fotográfica de trayectoria de propagación para la geometría 1- probeta 3.*

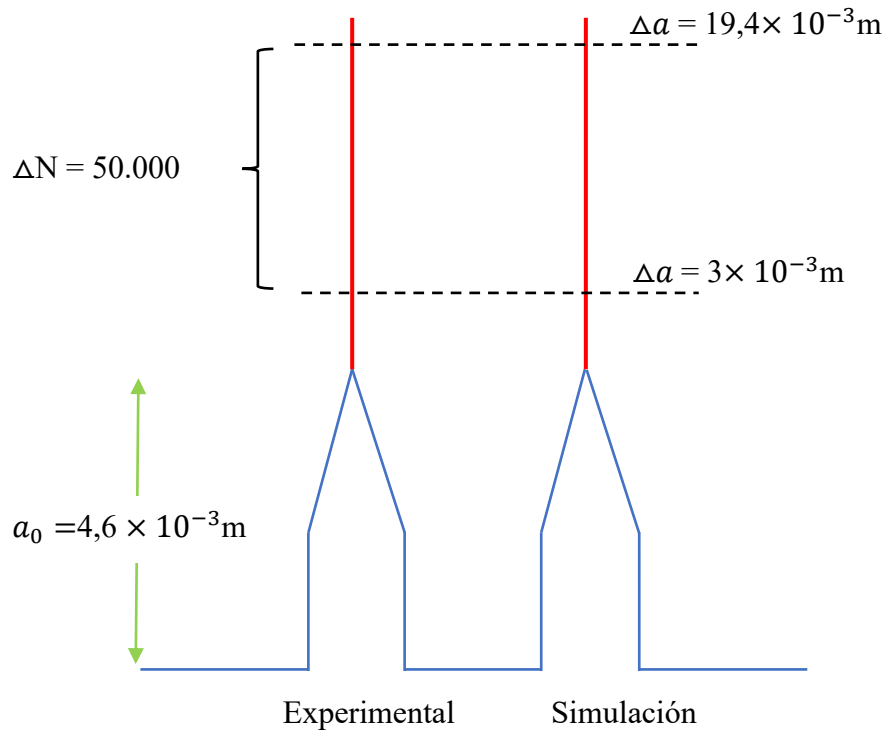


Después de esto, se añadieron segmentos lineales para la medición de la grieta en cada fotografía, agregando que los segmentos lineales en la última imagen captada corresponden a la trayectoria de propagación de grieta final obtenida. Posteriormente se ejecutó la herramienta de medición para tomar el tamaño en milímetros de la grieta para cada una de las fotografías, los resultados de estas dimensiones se tabularon junto con su correspondiente número de ciclos.

Con el objetivo de obtener resultados numéricos cercanos a la realidad, se decantó por obtener experimentalmente las constantes C y m de la ley de Paris para el material analizado por medio de la norma ASTM E399, este procedimiento se llevó a cabo para las probetas con modo I de fractura a través de la obtención experimental del tamaño de grieta a , número de ciclos y factores de intensidad de esfuerzo K_I , utilizando la fórmula de la variación del factor de intensidad de esfuerzo producto de las cargas de fatiga (4), para cada valor de K_I se calculó un respectivo valor de ΔK , así como se recurrió a el método del trapecio para el cálculo del da/dN . De esta manera se obtuvo la tasa de crecimiento de grieta experimental para el AISI 316L y se calcularon las constantes C y m , como el corte de la gráfica con el eje Y , y la pendiente, respectivamente.

Conforme a las constantes experimentales previamente obtenidas, se precedió a establecer unas constantes adecuadas para la simulación, cuyos resultados tuvieran un comportamiento similar al observado experimentalmente, para ello se definió un enfoque que consistió en variar las constantes experimentales hasta obtener un ΔN cercano a 50.000 ciclos para un intervalo de Δa definido, este intervalo fue desde un $\Delta a = 3$ mm hasta un $\Delta a = 19,4$ mm, teniendo en cuenta que el tamaño inicial de la entalla fue de $a_0=4,6$ mm. Las constantes encontradas cuyos resultados tuvieron este mismo comportamiento, fueron las que posteriormente se utilizaron para la simulación.

Figura 16. Enfoque para la adecuación de las constantes de Paris usadas en la simulación.



Por otro lado, los ensayos y mediciones experimentales se realizaron de igual modo para las demás geometrías seleccionadas a las cuales se les aplicó su respectiva escala y filtro de contraste, en las figuras 17,18,19,10,21 y 22 se puede observar una de las secuencias fotográficas reducidas de cada geometría, es decir, algunas de las imágenes reales donde se observa el incremento de la grieta. Respecto a la medición de las imágenes, cada incremento de Δa se tabuló junto a su correspondiente número de ciclos para su posterior análisis

Figura 17. *Secuencia fotográfica reducida de la trayectoria de propagación de la geometría 6 - probeta 2.*



Figura 18. *Secuencia fotográfica reducida de la trayectoria de propagación de la geometría 16 - probeta 1.*

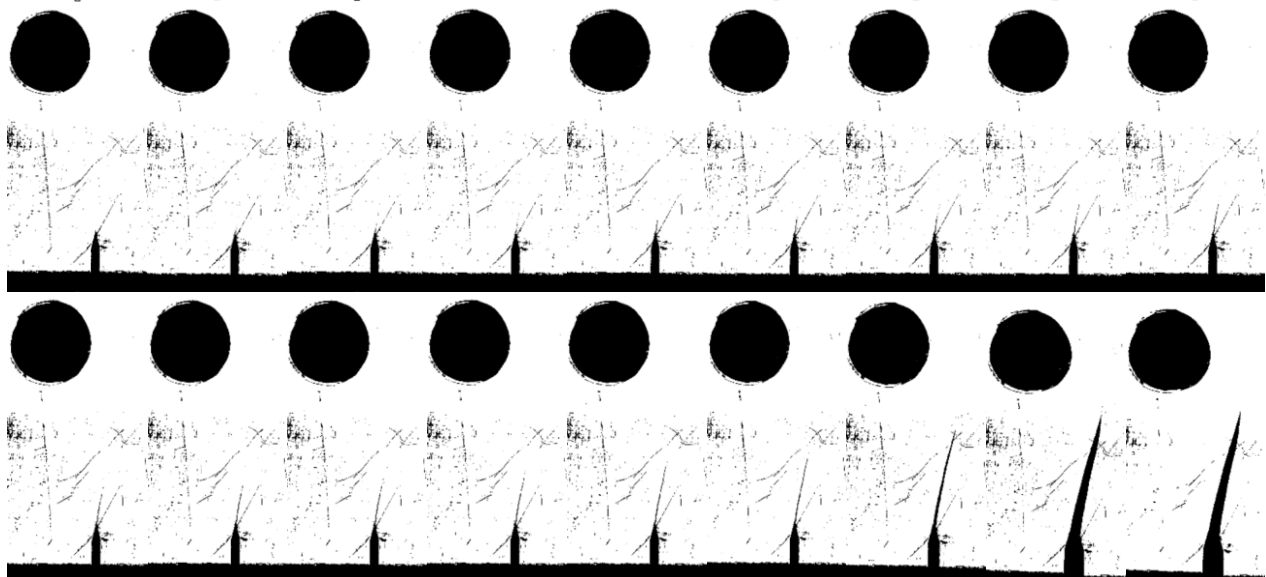


Figura 19. *Figura 18. Secuencia fotográfica reducida de la trayectoria de propagación de la geometría 27 - probeta 2.*

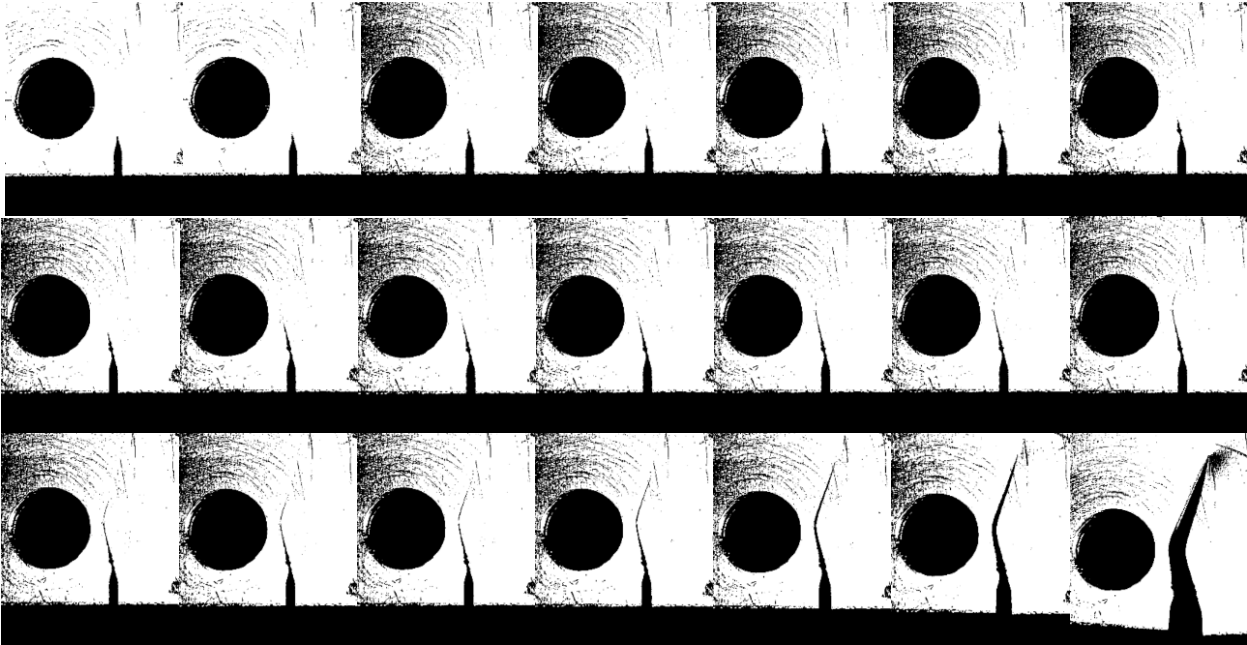


Figura 20. *Secuencia fotográfica reducida de la trayectoria de propagación de la geometría 21 - probeta 1.*

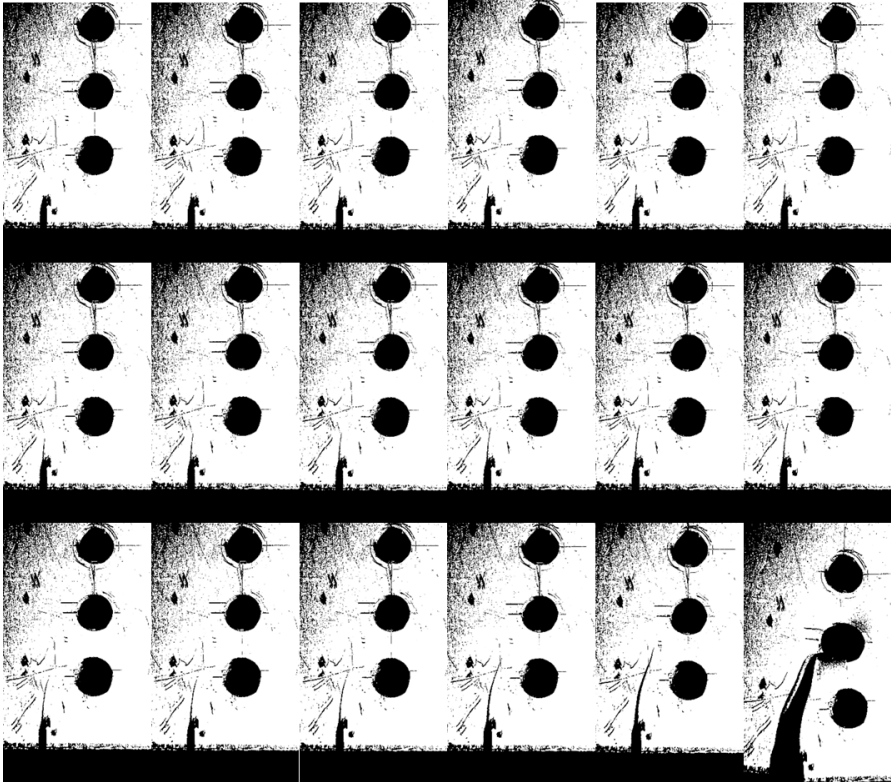


Figura 21. *Secuencia fotográfica reducida de la trayectoria de propagación de la geometría 22 - probeta 1.*

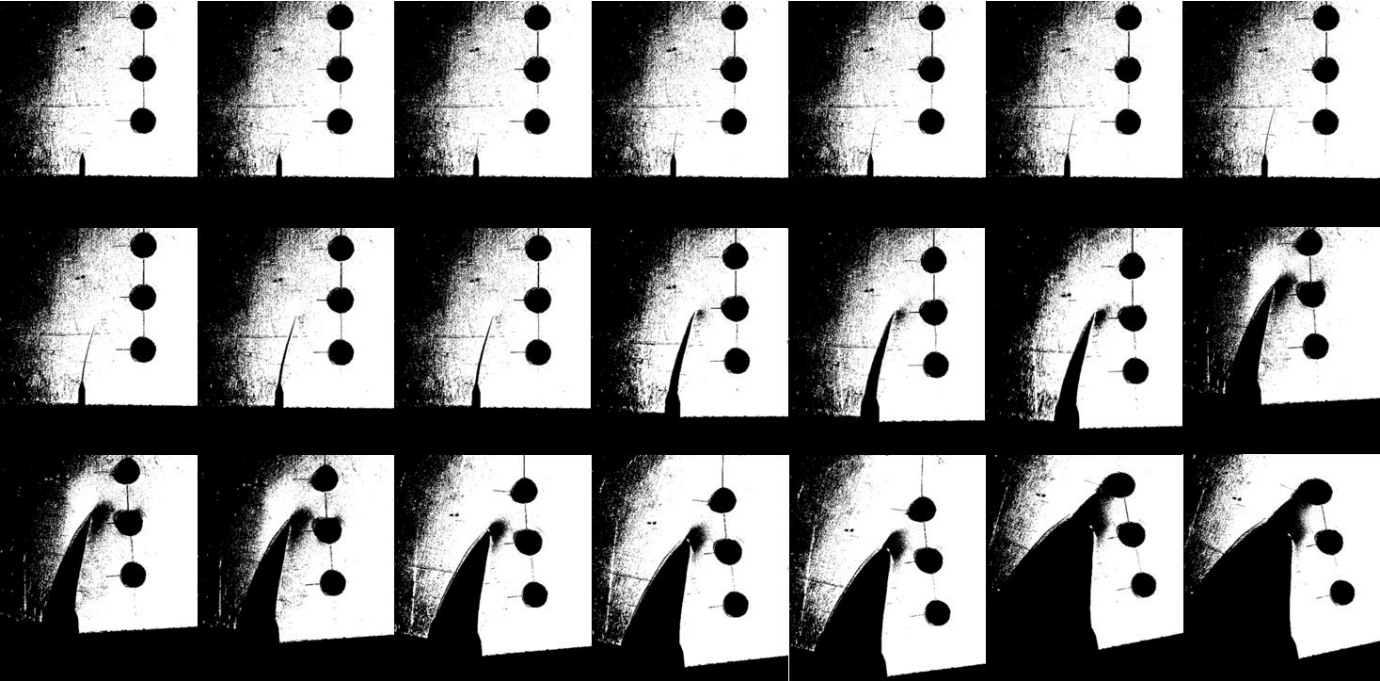
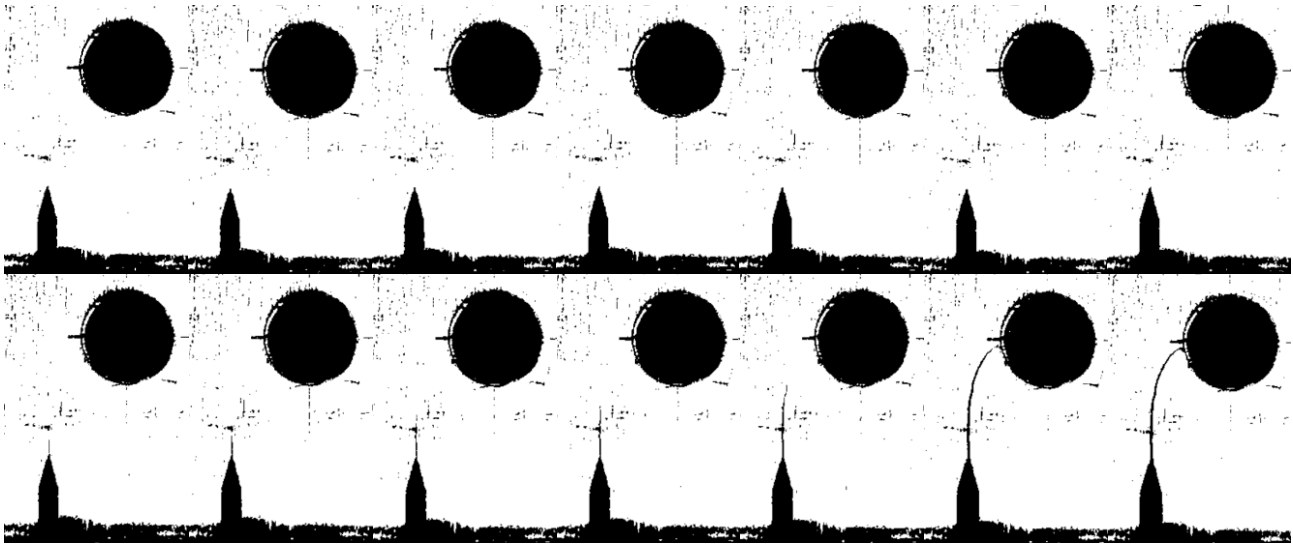


Figura 22. *Secuencia fotográfica reducida de la trayectoria de propagación de la geometría 24 - probeta 1.*




Finalmente, mediante el uso de WebPlotDigitizer, se extrajeron de las fotografías, los puntos correspondientes a la de trayectoria final de cada una de las probetas ensayadas, con el objetivo de ser representadas por medio de Matlab, lo que permitió una visualización detallada y una posterior comparación con los resultados numéricos.

4.3 Simulaciones

Una vez obtenidos experimentalmente los incrementos de Δa con su respectivo número de ciclos, se procedió a ajustar las simulaciones con las constantes previamente obtenidas, para esto se realizó el mallado de las 7 geometrías en el software de preproceso GID, en este se definieron las condiciones de frontera y se asignaron la cantidad de elementos para cada segmento, para el caso de la entalla cuya longitud inicial es de 4,6 mm, se asignaron 10 elementos, obteniendo así una longitud del elemento en la punta de la grieta de 0,46 mm. Posteriormente los archivos .DAT se importaron desde el software DBEM Analisis, una vez importadas las diferentes geometrías, se definieron el número de fronteras cerradas de cada una, así como las esquinas en condición de tracción.





Así mismo se seleccionó el tipo de análisis de propagación con una relación de cargas de 0,05, la cual se eligió con base en la literatura consultada. En cuanto a los parámetros incrementales, la longitud incremental se fijó de 2, es decir que cada elemento de 0,46 mm crece dos veces dando como resultado una longitud del incremento de 0,92 mm y un total de 33 incrementos para una grieta con un tamaño máximo de 35,46 mm. Adicional a esto se definieron 11 incrementos entre salidas, lo cual hace referencia a la frecuencia con la que se generan y se guardan los resultados de la simulación. Finalmente se añadieron los valores de las constantes de Paris obtenidas para la simulación.

Figura 23. *Parámetros de crecimiento requeridos por el software.*

Tipo de análisis 

Estático Propagación

Relación de cargas R	<input type="text" value="0.05"/>
Número de incrementos	<input type="text" value="33"/>
Longitud incremental	<input type="text" value="2"/>
Incrementos entre salidas	<input type="text" value="11"/>
Modelo de crecimiento	<input type="text" value="Paris"/>
Constante C	<input type="text" value="7.173e-14"/>
Exponente m	<input type="text" value="4.325"/>
Umbral de fractura	<input type="text" value="0"/>
Tenacidad a la fractura	<input type="text" value="0"/>

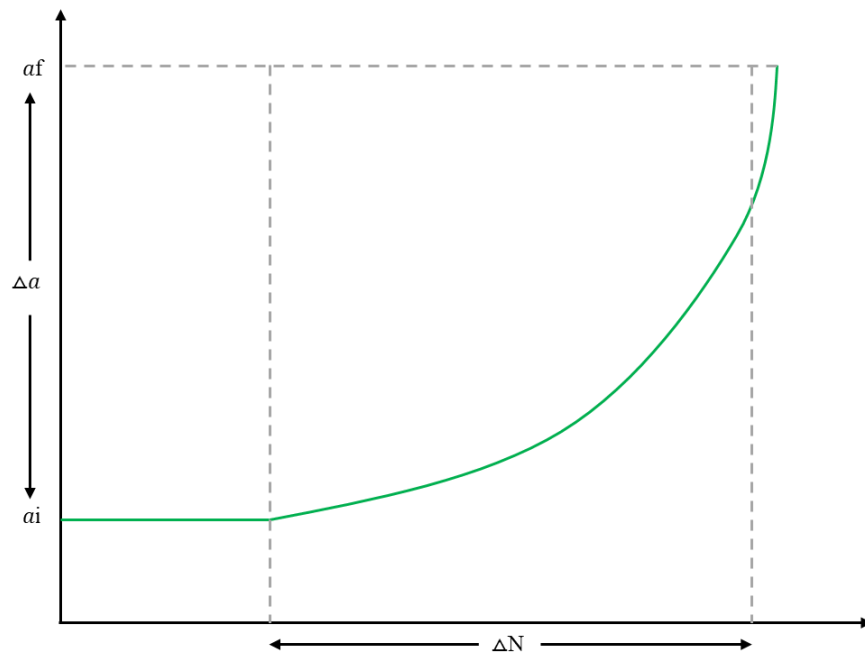
Una vez diligenciados los campos requeridos, se generó un archivo de texto que finalmente se combinó con el archivo que contenía la geometría, generando así un archivo con todos los parámetros requeridos para realizar la simulación, en este punto se selecciona la salida que se desea graficar y la escala de la configuración deformada. Finalmente, el simulador realiza el proceso iterativo y genera archivos de texto correspondientes a: Δa contra número de ciclos, K_I , K_{II} , y K_{eq} , así como trayectoria de propagación y la geometría deformada.

4.4 Planteamiento del enfoque de análisis

Para empezar, se graficaron los datos obtenidos de Δa contra incremento del número de ciclos para las probetas experimentales y las simulaciones, es oportuno mencionar que para cada geometría se estableció un rango específico de Δa para el análisis, dicho rango tuvo como valor de Δa inicial un tamaño de grieta lo suficientemente grande para evitar errores de medición iniciales,

y un Δa final del tamaño máximo observado antes de la fractura, de la probeta experimental cuyo tamaño de grieta final observado fue inferior a las demás. Este enfoque tuvo como objetivo que el análisis no tuviese en cuenta el intervalo inicial de ciclos donde ocurre la nucleación, el cual es un fenómeno con una variabilidad muy amplia.

Figura 24. Esquema ilustrativo del enfoque utilizado para el análisis del tamaño de incremento de grieta contra el incremento del número de ciclos.



Así mismo, se debe mencionar que este enfoque no tiene en cuenta la región de crecimiento inestable, ya que experimentalmente no se logran obtener datos de esta región debido al crecimiento acelerado de la grieta.

Para todas la geometrías el intervalo de crecimiento inició desde un Δa de 3,3 mm, a excepción de la geometría 24, cuyo Δa inicial fue de 0,5 mm. Respecto al Δa final, este valor fue el máximo obtenido para la probeta cuyo Δa fue inferior al de las demás probetas de su misma geometría.

Tabla 1.*Intervalo de Δa analizado para cada geometría*

Geometría	Δa inicial [mm]	Δa final [mm]
1	3,3	19,89
6	3,3	19,54
16	3,3	15,51
27	3,3	19,03
21	3,3	12,18
22	3,3	17,49
24	0,5	7,64

De esta manera se tuvo un rango de medición definido para cada geometría, los datos obtenidos se graficaron de la siguiente forma: para cada una de las geometrías 1, 6 y 16, se obtuvieron cuatro curvas, tres de ellas de los resultados experimentales y una de los resultados obtenidos por medio de la simulación, por otra parte, para la geometría 27, se obtuvieron ocho curvas, seis de resultados experimentales y una de resultados simulados para cada configuración, continuando con las probetas 21, 22 y 24, de las cuales solo se obtuvieron dos curvas para cada geometría, una experimental y una por medio de la simulación.

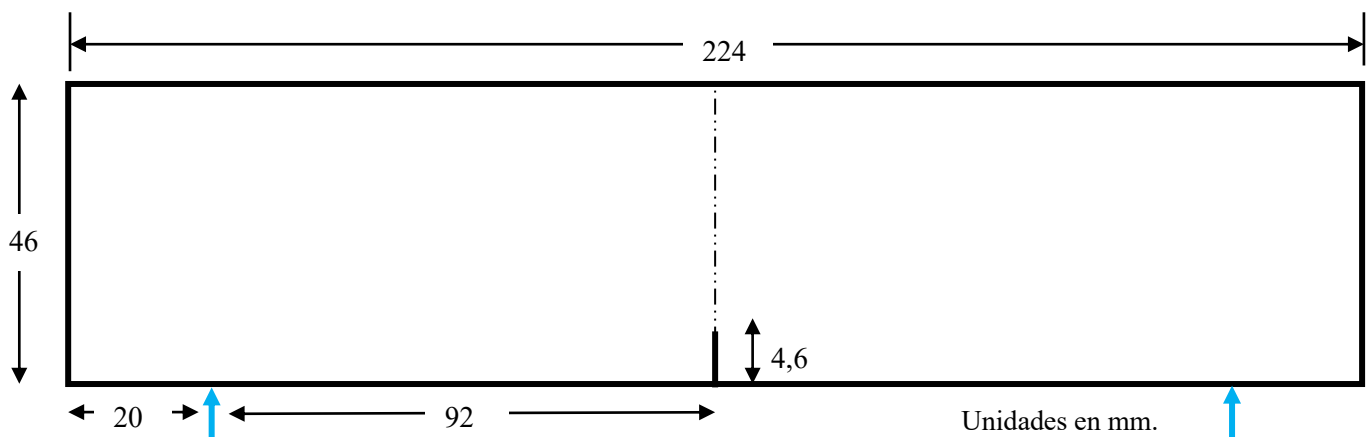
Posteriormente, los resultados obtenidos para cada una de la geometrías por medio de simulación, referentes a los factores de intensidad de esfuerzo contra el tamaño de grieta, se graficaron con ayuda de Matlab para su posterior análisis. Adicionalmente se planteó verificar la relación entre la tasa de crecimiento y el tamaño de grieta, para analizar la variabilidad de a tasa de crecimiento de grieta a lo largo de la trayectoria de propagación

5. Resultados

5.1 Cálculo y definición de los parámetros del ensayo

La definición de los parámetros geométricos se hizo de acuerdo con la norma ASTM E399 para una geometría de flexión tres puntos con relaciones ancho:alto de 4:1.

Figura 25. Dimensiones definidas para la probeta base Modo I.



En cuanto a la carga, se tomó como referencia el valor de ΔK ubicado en la parte inicial del comportamiento lineal de la gráfica de crecimiento de grieta por fatiga, es decir donde inicia la región de crecimiento controlado, encontrada por Benachour (Benachour et al, 2010) para un $R=0,05$, la cual muestra un valor de ΔK de $20 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$. Utilizando la fórmula de la variación del factor de intensidad de esfuerzo producto de las cargas de fatiga (ecuación 3), para un Δk de $20 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ se obtiene un K_{eq} de $21,05 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$. De esta manera, para la tenacidad a la fractura del material $K_{IC} = 219,6 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$ (Benachour et al, 2010) y un K inicial de $21,05 \text{ MPa} \sqrt{\text{m}}$, para la geometría base, se calculó un tamaño de grieta máximo de 35,49 mm.

$$20 = K_{eq}(1 - 0.05)$$

$$K_{eq} = K_I = 21,05$$

A continuación, utilizando las ecuaciones para el cálculo de los factores de intensidad de esfuerzo presentes en la norma ASTM E399 (ecuación 4), se reemplazaron los valores geométricos obtenidos previamente del tamaño de la entalla y alto de la probeta, junto con el valor inicial de K_I deseado de 21,05 [MPa \sqrt{m}] para obtener la fuerza máxima requerida en el ensayo y así iniciar la prueba en la zona de crecimiento controlado, para una lámina calibre 4.5 milímetros de acero 316L, obteniendo una respectiva carga de 5997 N.

$$f\left(\frac{a}{W}\right) = 3 \sqrt{\frac{0,0046}{0,046}} \frac{1.99 - \left(\frac{0,0046}{0,046}\right) \left(1 - \frac{0,0046}{0,046}\right) \left[2.15 - 3.93 \frac{0,0046}{0,046} + 2.7 \left(\frac{0,0046}{0,046}\right)^2\right]}{2 \left(1 + 2 \frac{0,0046}{0,046}\right) \left(1 - \frac{0,0046}{0,046}\right)^{\frac{3}{2}}}$$

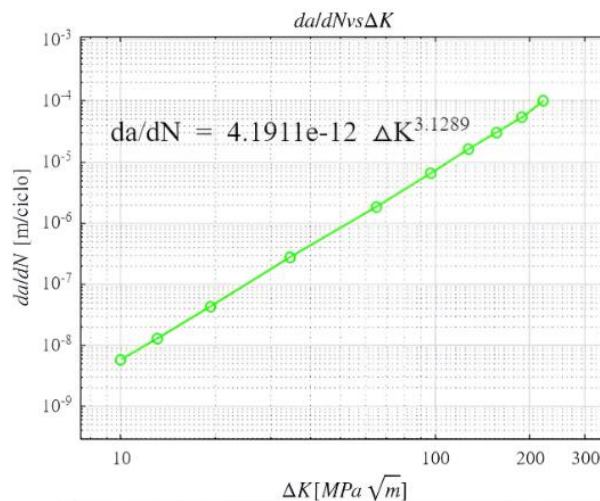
$$21,05 = \frac{P \times 0,184}{\sqrt{0,0045 \times 0,0045} \cdot 0,046^{\frac{3}{2}}} f\left(\frac{a}{W}\right)$$

$$P = 5997 \text{ N}$$

Posteriormente, se realizó la construcción de la probeta en el software de elementos de contorno DBEM Analisis. Las constantes C y m requeridas por el simulador, se obtuvieron con ayuda de WebPlotDigitizer y Matlab, el primero facilitó la obtención de las coordenadas para los puntos de la gráfica de la tasa de crecimiento de grieta proporcionada por Benachour (Benachour

et al, 2010), y con el segundo se graficó la función exponencial que describe el modelo de Paris (ecuación 2), cuyos valores fueron de $4,1911 \times 10^{-12}$ y 3,1289 respectivamente.

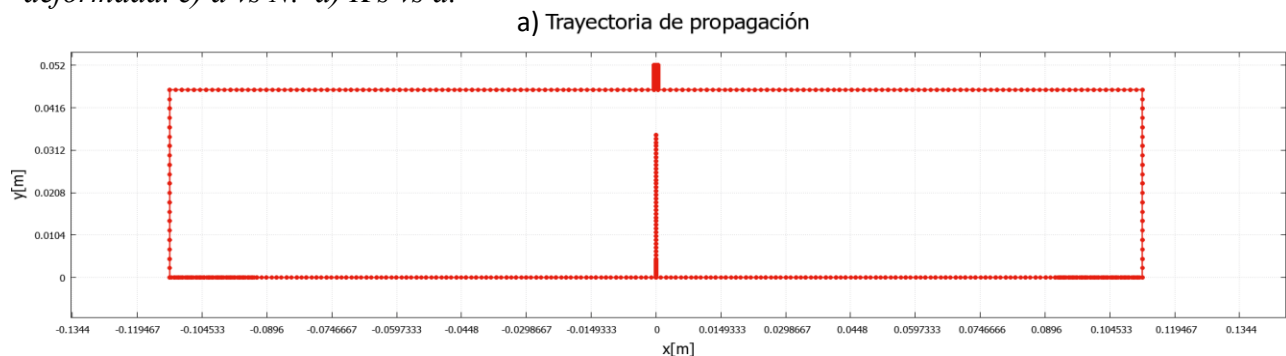
Figura 26. Zona de crecimiento controlado.



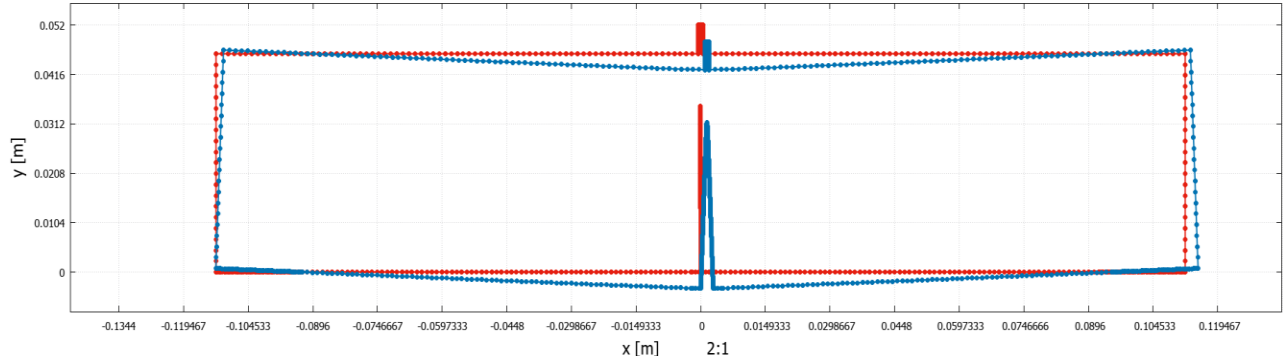
Tomado de *Effect of geometrical and loading parameters on fatigue crack growth of stainless steel 316L* (p. 3), por Benachour M, 2010, ASME 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis.

Una vez se tuvo la información requerida por el software de elementos de contorno, este se ejecutó, generando las siguientes gráficas, así como archivos que contienen los datos tabulados para K_I , K_{II} y K_{Eq} .

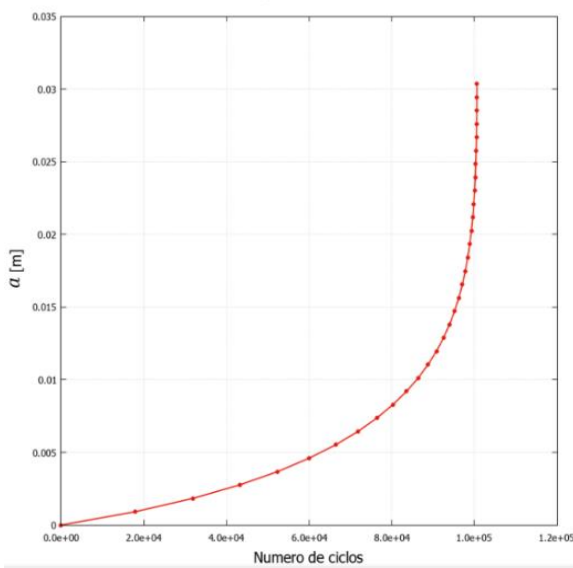
Figura 27. Graficas generadas por DBEM Analisis. a) Trayectoria de propagación. b) geometría deformada. c) a vs N . d) K 's vs a .



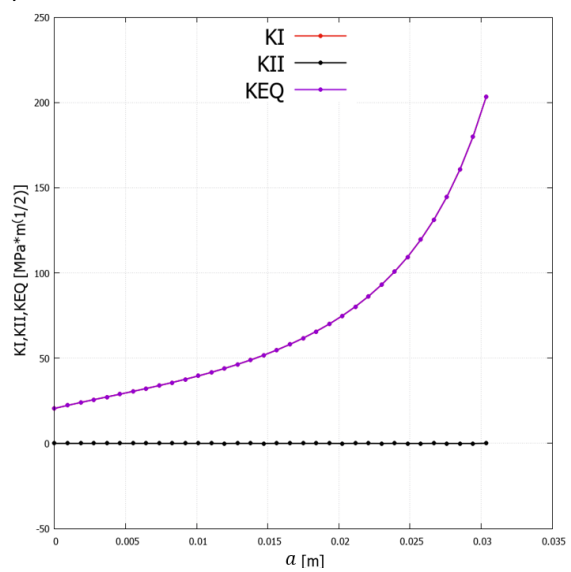
b) Geometría deformada



c) Crecimiento de grieta vs Número de ciclos



d) Factores de intensidad de esfuerzo vs crecimiento de grieta



De esta manera, los valores de factores de intensidad de esfuerzo calculados para modo de fractura I con el simulador DBEM Analsys, también se calcularon con la norma ASTM E399 , para posteriormente calcular el error porcentual teniendo como valores teóricos los proporcionados por la norma.

Tabla 2.

Porcentajes de error entre los factores de intensidad de esfuerzo para modo I de fractura, obtenidos por la norma ASTM E399 y por el simulador DBEM Analisisys.

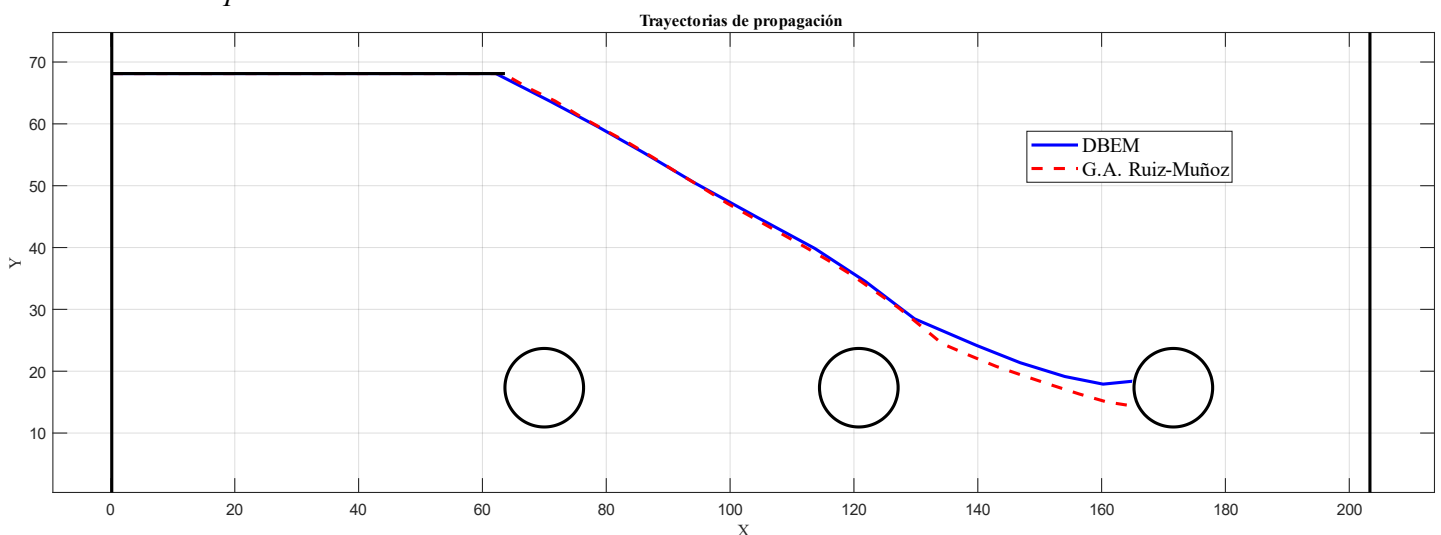
KI				
a	a/W	ASTM E399	DBEM	% ERROR
4,60	0,10	21,05	20,49	2,68
5,52	0,12	22,82	22,29	2,33
6,44	0,14	24,47	23,99	1,99
7,36	0,16	26,07	25,63	1,68
8,28	0,18	27,63	27,24	1,40
9,20	0,20	29,20	28,86	1,16
10,12	0,22	30,80	30,50	0,97
11,04	0,24	32,44	32,17	0,82
11,96	0,26	34,14	33,90	0,70
12,88	0,28	35,93	35,70	0,62
13,80	0,30	37,81	37,59	0,57
14,72	0,32	39,80	39,58	0,55
15,64	0,34	41,93	41,70	0,55
16,56	0,36	44,20	43,95	0,57
17,48	0,38	46,63	46,35	0,60
18,40	0,40	49,26	48,94	0,64
19,32	0,42	52,09	51,74	0,68
20,24	0,44	55,17	54,77	0,72
21,16	0,46	58,51	58,07	0,77
22,08	0,48	62,17	61,67	0,80
23,00	0,50	66,17	65,63	0,82
23,92	0,52	70,59	70,00	0,83
24,84	0,54	75,46	74,83	0,84
25,76	0,56	80,89	80,21	0,83
26,68	0,58	86,94	86,24	0,80
27,60	0,60	93,74	93,02	0,77
28,52	0,62	101,43	100,70	0,72
29,44	0,64	110,18	109,45	0,67
30,36	0,66	120,22	119,50	0,60
31,28	0,68	131,84	131,14	0,53
32,20	0,70	145,41	144,74	0,46
33,12	0,72	161,43	160,79	0,40
34,04	0,74	180,59	179,95	0,36
34,96	0,76	203,83	203,19	0,32

En la tabla 2 se observa como el porcentaje de error se mantiene siempre por debajo del 5% y es considerablemente mayor en los primeros 6 incrementos, esto se debe a que la norma contempla un rango de $0,2 < a/W < 1$, pero el tamaño de la entalla establecida es el 4,6 mm o sea un $a/W = 0,1$ debido a limitaciones geométricas.

De esta manera se puede validar que los errores obtenidos a partir del software de método dual de elementos de contorno DBEM Anisys, son lo suficientemente bajos para ser despreciables, es por esto que pueden ser tomados como una fuente fiable para obtener los factores de intensidad de esfuerzo K_I .

En cuanto los factores de intensidad de esfuerzo para modo mixto, estos se validaron haciendo una comparación de la trayectoria de propagación de grieta obtenida a partir de la literatura, con la obtenida por el simulador DBEM Anisys para una misma geometría y condiciones de carga en la literatura. Esto porque teniendo previamente validado K_I , solo hace falta validar la desviación de la dirección de crecimiento θ_t para considerar que se tienen resultados confiables de K_{II} .

Figura 28. Comparación de trayectorias de propagación entre FEM de G.A. Ruiz-Muñoz y los resultados obtenidos por DBEM.

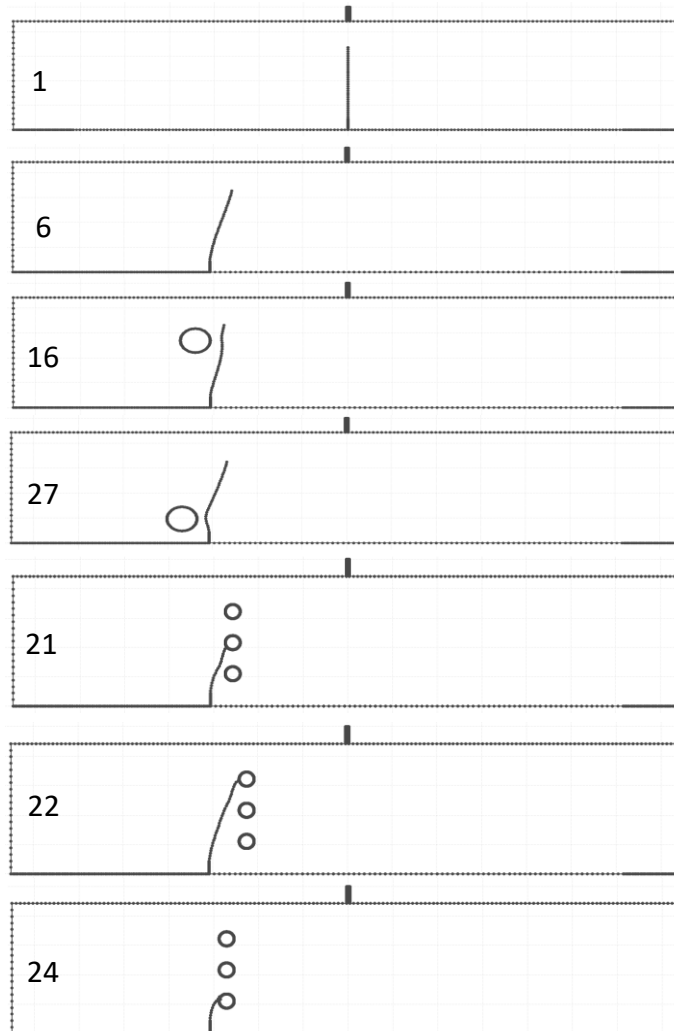


De lo anterior se concluyó que los resultados de K_I y K_{II} que se obtienen a partir del simulador son válidos y pueden utilizarse en conjunto con resultados experimentales.

A continuación, se procedió con la realización de 39 simulaciones, para las 6 primeras se varió la posición de la entalla, buscando la aparición y el incremento del modo mixto de fractura. Posteriormente, para las 33 simulaciones restantes, de las primeras 6 geometrías, se seleccionó la que mayor curvatura presentara en su trayectoria de propagación y a partir de esta, se añadieron agujeros en diferentes coordenadas con el objetivo de evidenciar cambios en la trayectoria de propagación, con relación a la influencia de los agujeros.

Con base en las diferentes simulaciones realizadas, se observaron una gran variedad de comportamientos, entre los cuales destacan el desvío completo de la trayectoria original, la disminución y el aumento de la vida útil de la probeta, así como el desvío seguido de la recuperación posterior de la trayectoria original, entre otros comportamiento interesantes. Se seleccionaron las siete geometrías analizadas en este proyecto y con base en ellas, se manufacturaron un total de 18 probetas para ser ensayadas experimentalmente

Figura 29. Geometrías seleccionadas con base en la simulación.



A continuación, se muestran cada una de las geometrías seleccionadas con sus respectivas dimensiones, entre las cuales se destacan: la distancia de separación horizontal y vertical, de la entalla respecto a los agujeros.

Figura 30. Geometría 1.

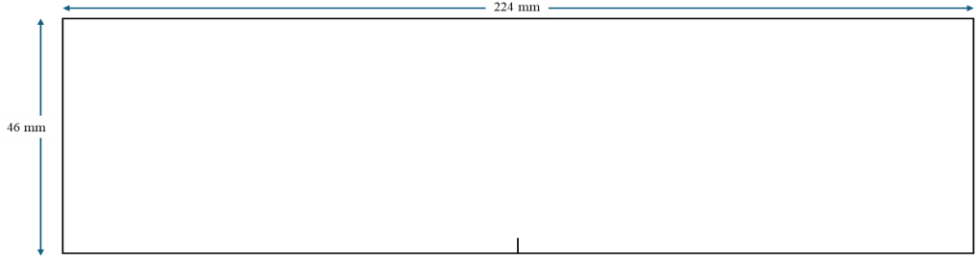


Figura 31. Geometría 6.

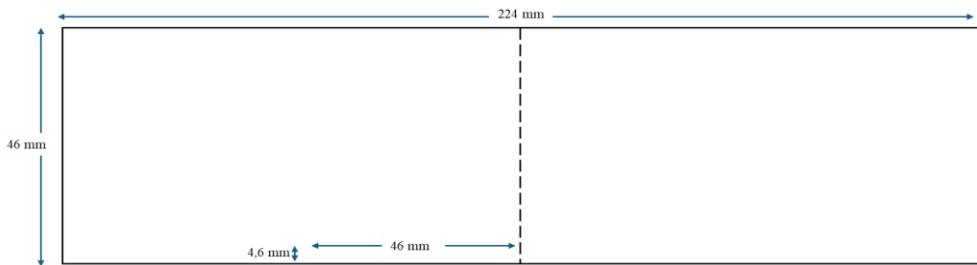


Figura 32. Geometría 16.

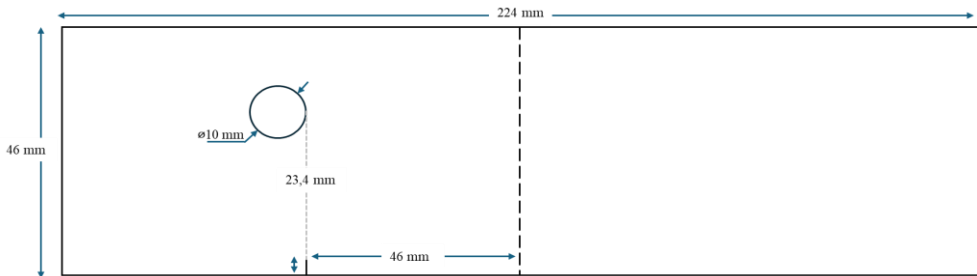


Figura 33. Geometría 27.

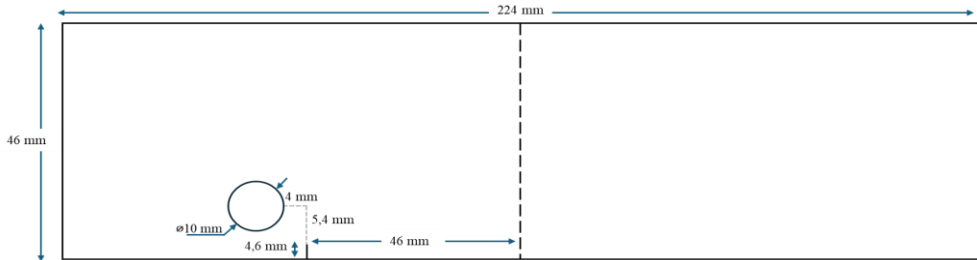


Figura 34. Geometría 21

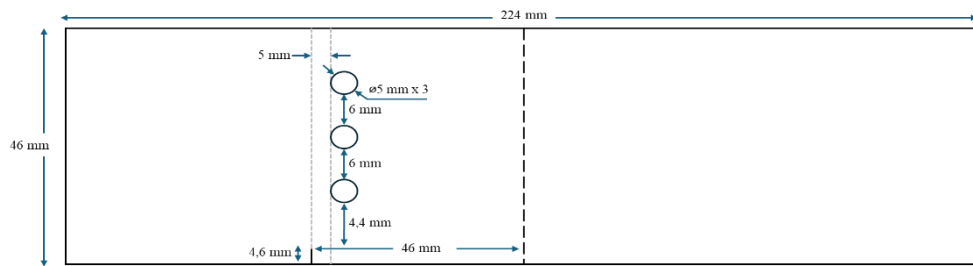


Figura 35. Geometría 22.

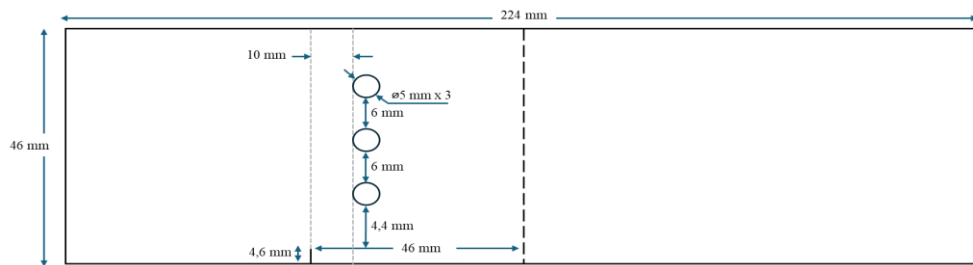
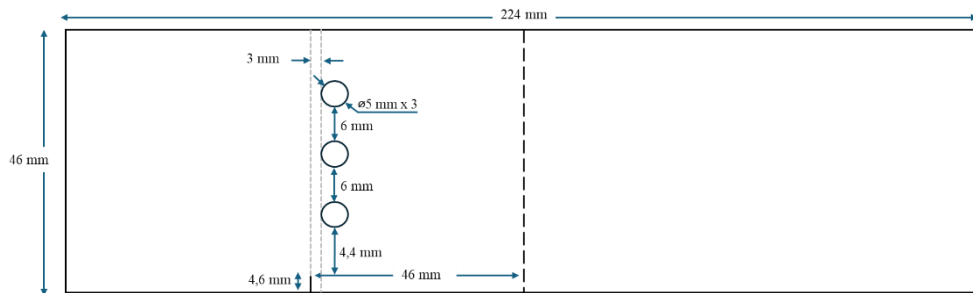


Figura 36. Geometría 24.



Una vez se tuvieron las probetas físicas, se procedió a la programación del ensayo. Para esto se calcularon las rampas con base en la carga máxima obtenida para Modo I de 5997 N \approx 6000 N a compresión, utilizando una relación de cargas R de 0,05, se calculó una fuerza mínima de 300 N también a compresión y a partir de esto, una amplitud de carga de 5700 N.

$$0,05 = \frac{F_{\min}}{6000 \text{ N}}$$

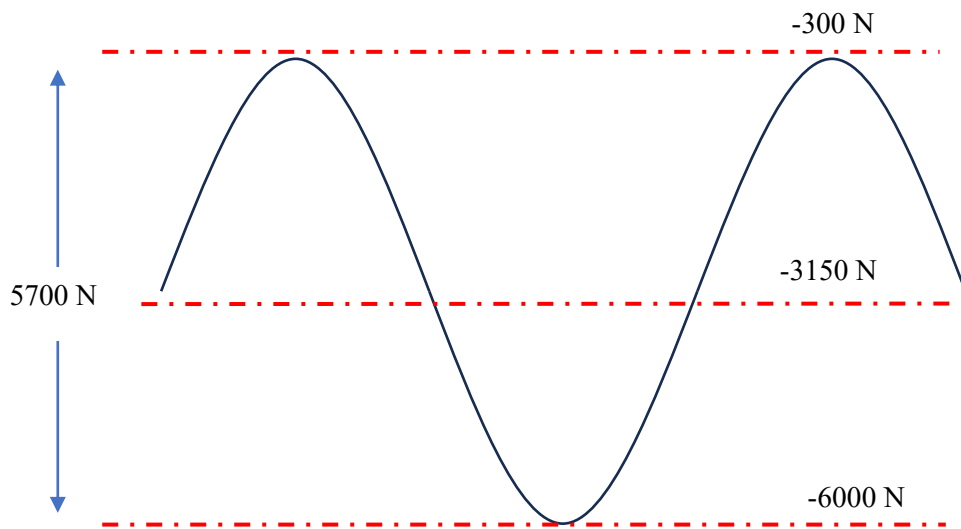
$$F_{\min} = 300 \text{ N}$$

De esta manera, se obtuvo la amplitud de la onda y se definió la rampa a compresión adecuada como la suma entre la fuerza mínima a compresión y la mitad de la amplitud de carga.

$$\text{Rampa} = 300 \text{ [N]} + \left(\frac{5700 \text{ [N]}}{2} \right)$$

$$\text{Rampa} = 3150 \text{ N}$$

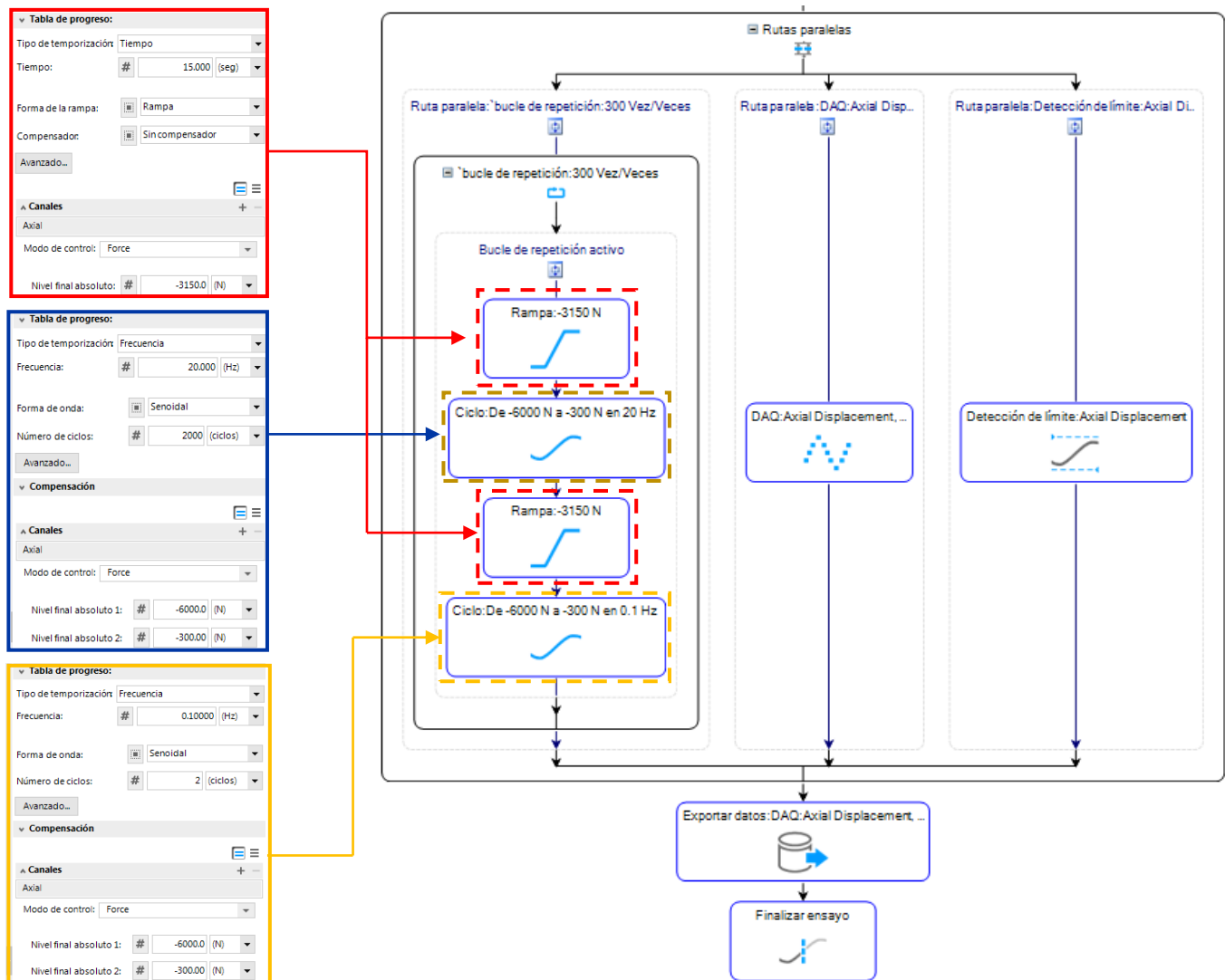
Figura 37. Onda de fuerza requerida para los ensayos de flexión a tres puntos con modo I de fractura.



Finalmente se programó el inicio de la prueba con una rampa de -3138,425 N con duración de 15 segundos, encargada de llevar la fuerza hasta el punto medio de la onda. Seguido de esto, se asignó la amplitud de la onda definiendo la fuerza máxima y mínima, así como la frecuencia de

aplicación de carga de 20 Hz con una duración de 200 ciclos, seguida nuevamente de la rampa de -3138,425 N encargada de llevar la onda nuevamente hasta el punto medio para finalmente volver aplicar la misma amplitud de onda, pero esta vez con una frecuencia de aplicación de carga de 0.1 Hz y con una duración de 3 ciclos.

Figura 38. Programación de ensayo de fatiga para modo I de fractura.



Por otro lado, para establecer la carga adecuada para las probetas con la entalla desfasada y con modo mixto de fractura, se realizó la simulación de esta geometría utilizando inicialmente la misma fuerza de 5997 N utilizada en las probetas de modo I, pero en este caso la simulación arrojó

como resultado un K_{eq} inicial de $11,13 \text{ MPa } \sqrt{\text{m}}$, muy por debajo del $21,05 \text{ MPa } \sqrt{\text{m}}$ esperados para iniciar en la zona de crecimiento controlado, de manera que se optó por calcular este valor proporcionalmente para un K_{eq} objetivo de $21,05 \text{ MPa } \sqrt{\text{m}}$, para el cual se obtuvo una fuerza máxima aproximada de 11400 N a compresión.

Para la fuerza calculada y con una relación de cargas R de $0,05$, se calculó una fuerza mínima de 570 N también a compresión y a partir de esto, una amplitud de carga de 10830 N .

$$0,05 = \frac{F_{\min}}{11400}$$

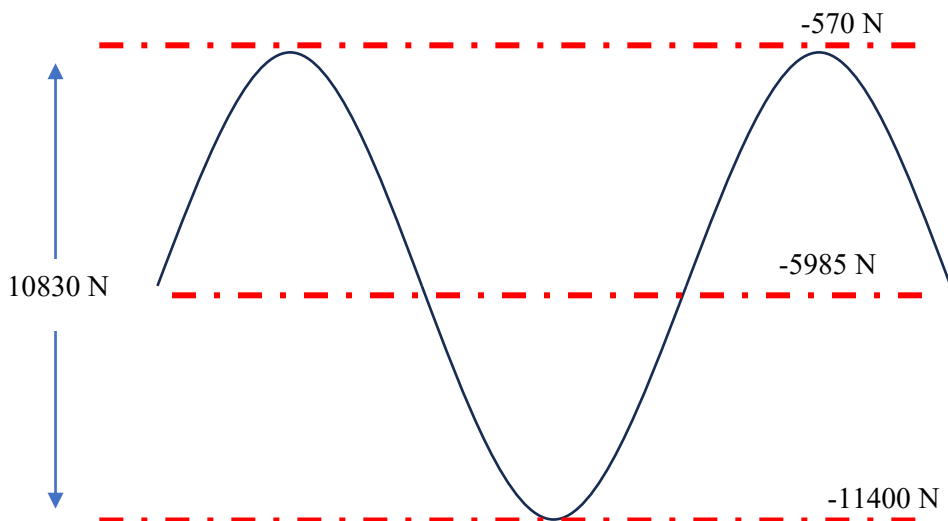
$$F_{\min} = 570 \text{ N}$$

De esta manera, se obtuvo la amplitud de la onda y se definió la rampa adecuada como la suma entre la fuerza mínima a compresión y la mitad de la amplitud de carga.

$$\text{Rampa} = 570 \text{ [N]} + \left(\frac{10830 \text{ [N]}}{2} \right)$$

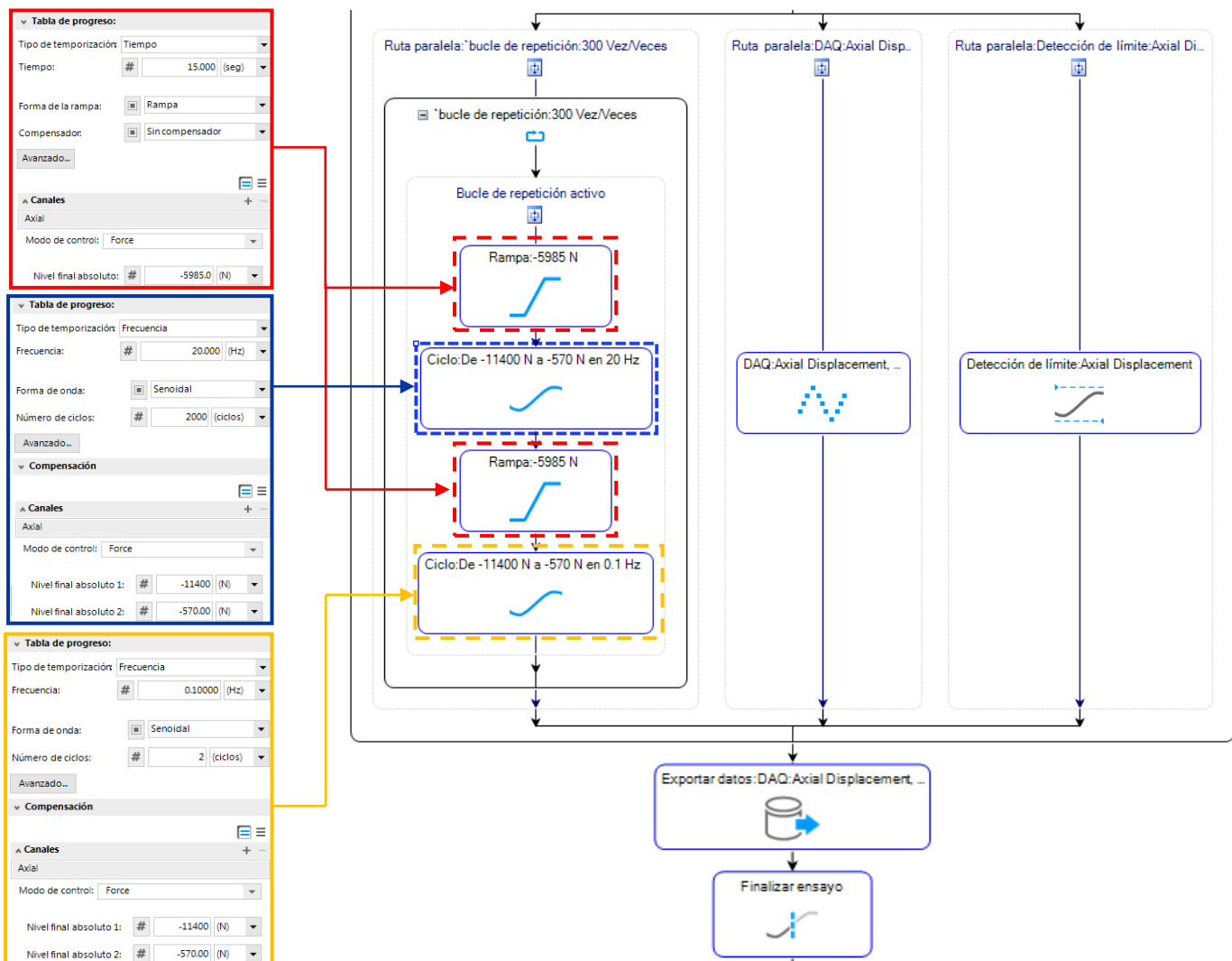
$$\text{Rampa} = -5985 \text{ N}$$

Figura 39. Onda de fuerza requerida para los ensayos de flexión a tres puntos con modo II de fractura.



Para la programación del ensayo con modo mixto de fractura se programó el inicio de la prueba con una rampa de -5985 N con duración de 15 segundos, encargada de llevar la fuerza hasta el punto medio de la onda. Seguido de esto, se asignó la amplitud de la onda definiendo la fuerza máxima y mínima, así como la frecuencia de aplicación de carga también de 20 Hz con una duración de 200 ciclos, seguida nuevamente de la rampa de -5985 N encargada de llevar la onda nuevamente hasta el punto medio para finalmente volver aplicar la misma amplitud de onda, pero esta vez con una frecuencia de aplicación de carga de 0.1 Hz y con una duración de 3 ciclos.

Figura 40. Programación de ensayo de fatiga para modo mixto de fractura.



Una vez concluida la programación de ambos ensayos, se procedió con el montaje físico, la realización de los ensayos y la toma de las secuencias fotográficas para cada probeta, dichas fotografías tuvieron un cambio de formato conservando la calidad de la imagen para ser procesadas digitalmente en el software ImageJ, de esta manera se dio por concluido el objetivo de la definición de parámetros de geometría, carga, montaje y sistema de adquisición de imágenes para los ensayos de crecimiento de grieta en acero AISI 316L bajo cargas de fatiga.

5.2 Procesamiento digital de imágenes

Mediante las secuencias fotográficas procesadas de las probetas de geometría base, se obtuvieron los resultados correspondientes a número de ciclos y tamaño de grieta experimentales, con estos datos y a partir del uso de la norma ASTM E399, se calcularon los factores de intensidad de esfuerzo para cada incremento del tamaño de grieta, a partir de los cuales se generó la tasa de crecimiento de grieta experimental para el material analizado, y por consiguiente, las constantes de Paris experimentales.

Ahora bien, para asegurar la concordancia de las simulaciones con los resultados experimentales previamente obtenidos, para las simulaciones se calcularon unas constantes C y m , cuyo comportamiento se mostró acorde con el experimental, haciendo uso del enfoque previamente mencionado.

Tabla 3.*Número de ciclos contra Δa obtenidos en la simulación.*

N	Δa [m]	N	Δa [m]
0,00	0	115936	0,01564001
28778	0,00092000	116365	0,01656001
49157	0,00184000	116697	0,01748001
64187	0,00276000	116951	0,01840001
75582	0,00368000	117145	0,01932001
84386	0,00460000	117291	0,02024002
91280	0,00552000	117400	0,02116002
96729	0,00644000	117480	0,02208002
101061	0,00736000	117539	0,02300002
104518	0,00828000	117580	0,02392002
107283	0,00920000	117610	0,02484002
109495	0,01012001	117630	0,02576002
111263	0,01104001	117644	0,02668003
112674	0,01196001	117653	0,02760003
113796	0,01288001	117659	0,02852003
114685	0,01380001	117663	0,02944003
115386	0,01472001	117665	0,03036003

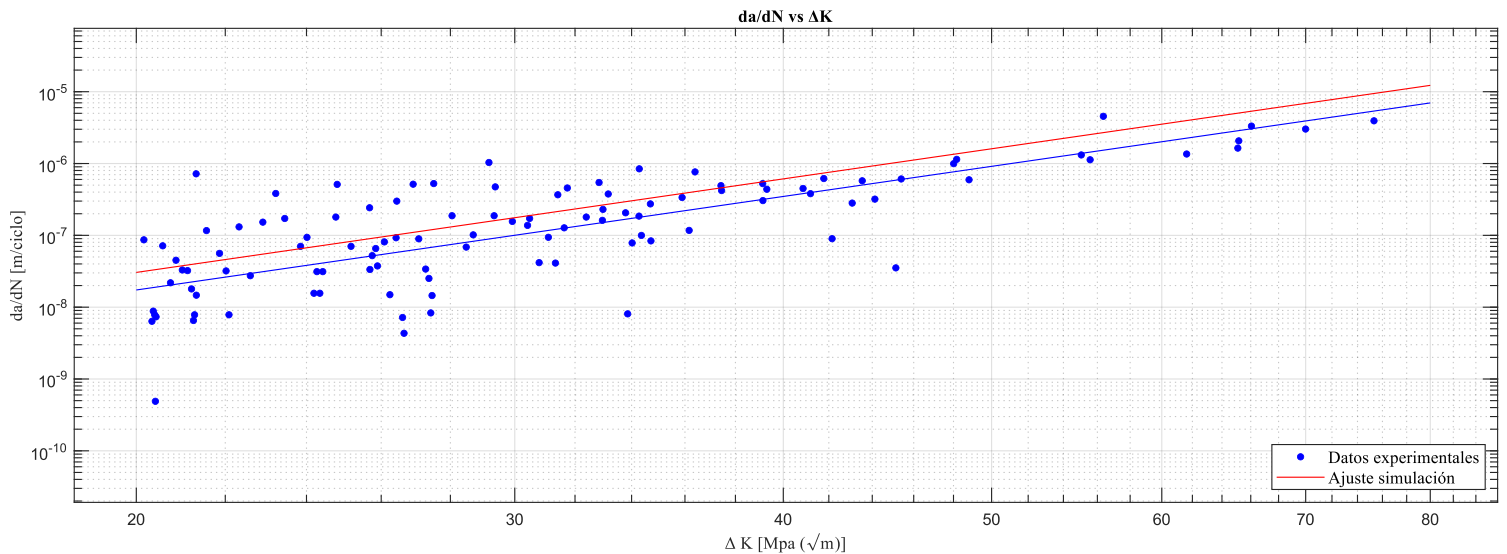
A partir de interpolación, para un Δa de 3×10^{-3} [m] se tienen 67159,96 ciclos y para un Δa de $19,4 \times 10^{-3}$ [m] se tienen 117158,39 ciclos, valores entre los cuales se obtiene un ΔN de 49998,43 ciclos, el cuál fue el valor más cercano al ΔN experimental obtenido para ese incremento en el Δa . De esta forma se obtuvieron las constantes C y m experimentales y las adecuadas para la simulación.

Tabla 4.*Constantes de Paris obtenidas.*

	C	m
Experimental	4,083e-14	4,325
Simulación	7,173e-14	4,325

A continuación, se muestra la tasa de crecimiento de grieta obtenida experimentalmente para el material analizado, junto con la recta resultante del respectivo ajuste de las constantes C y m, cuyo comportamiento se adaptó al obtenido experimentalmente.

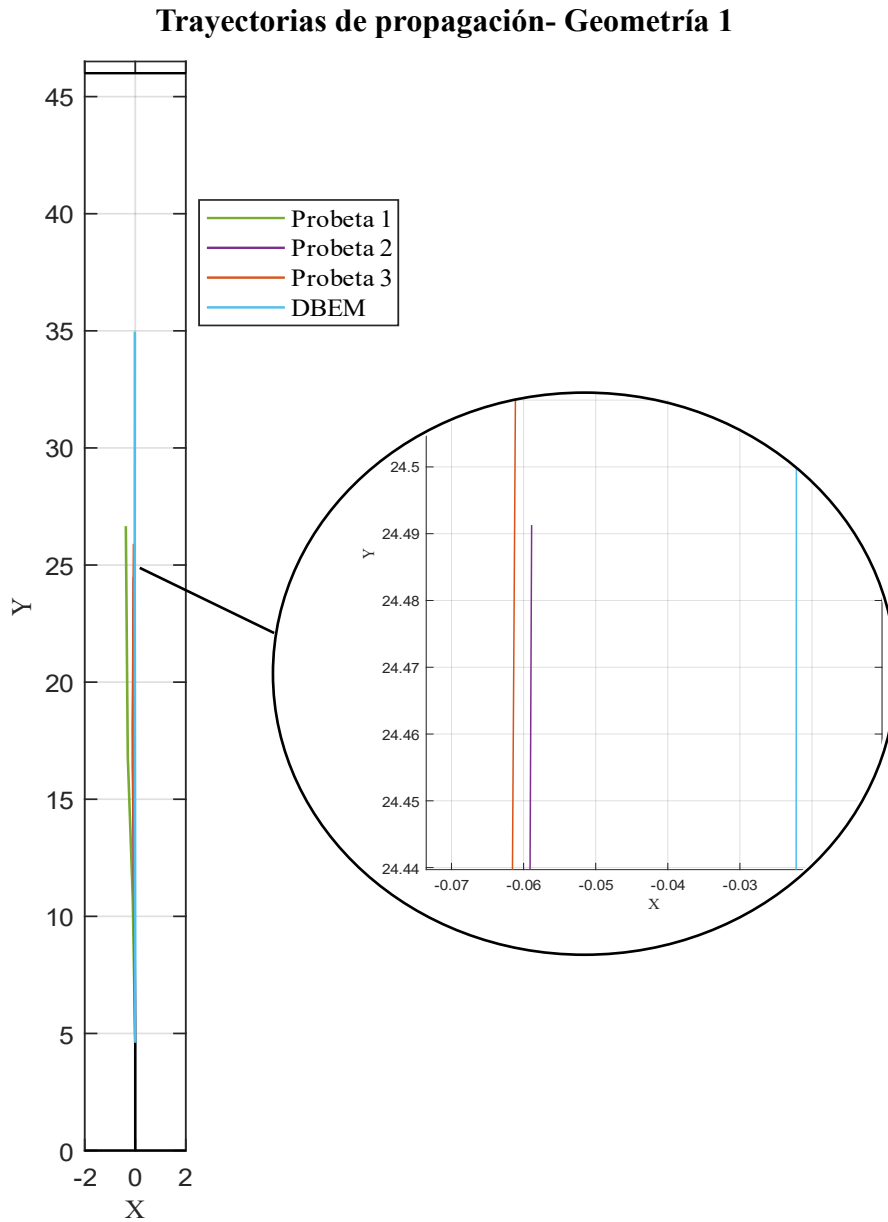
Figura 41. Tasa de crecimiento de grieta para el AISI 316 L.



Por otro lado, a partir de las constantes obtenidas para la simulación, se procedió a realizar una serie de simulaciones utilizando el software DBEM Analysis, las cuales fueron aplicadas para cada una de las geometrías. El objetivo de esto fue, por un lado, determinar con precisión las trayectorias de propagación de grieta y, por otro, obtener los factores de intensidad de esfuerzo K_I y K_{II} , con el fin de realizar un análisis comparativo riguroso entre los resultados obtenidos numéricamente a través de las simulaciones y el comportamiento experimental. Con esto se pretendía evaluar la validez y precisión del modelo simulado en relación con los ensayos ejecutados.

A continuación, se presentan las comparaciones entre las trayectorias obtenidas experimentalmente con las obtenidas por medio de simulación para cada geometría.

Figura 42. Trayectorias de propagación de grieta obtenidas para la geometría 1.

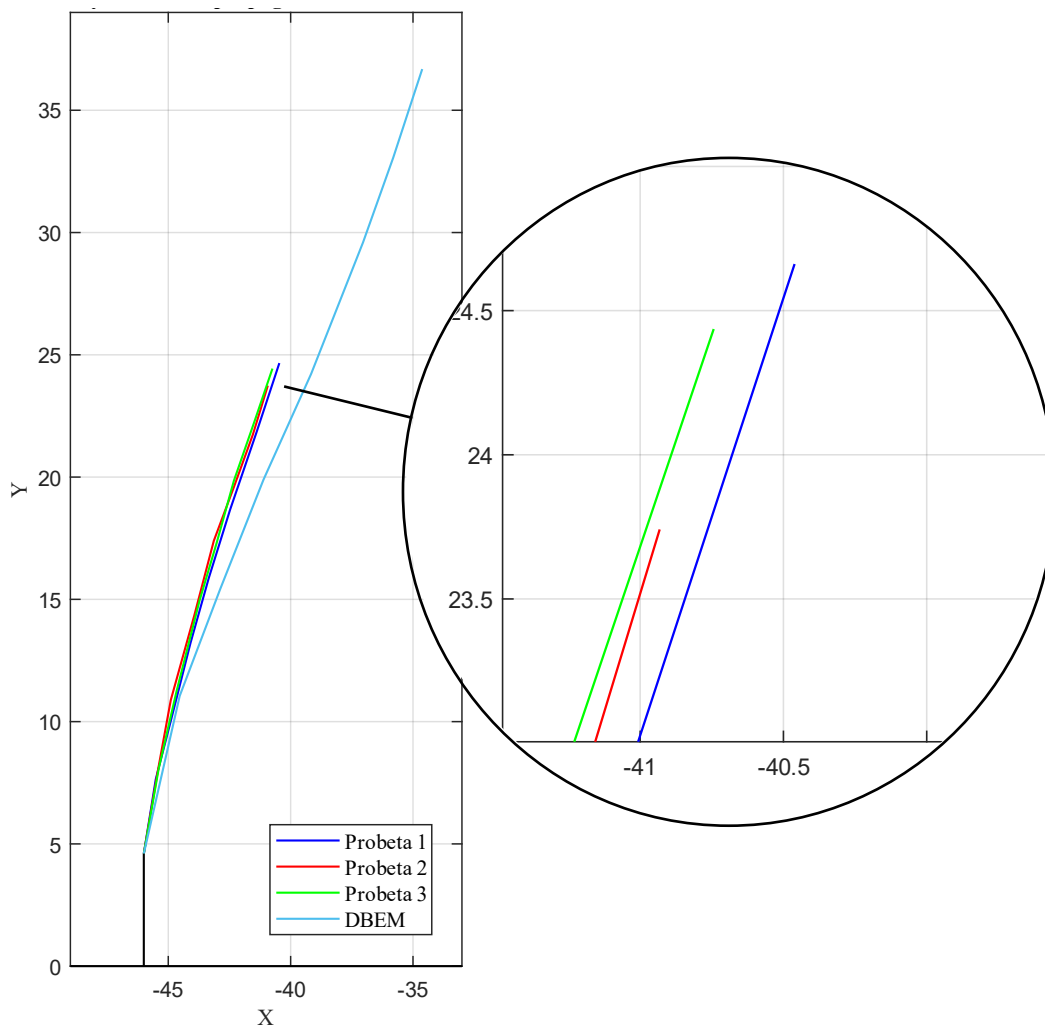


En cuanto a las trayectorias obtenidas, para la geometría 1, cuya entalla está centrada y colineal con el punto de aplicación de carga, los resultados de la simulación muestran un comportamiento ideal en el cual solo se presenta modo I de fractura, es decir que la apertura de las caras de la grieta ocurre únicamente en dirección perpendicular a la dirección de aplicación de la carga, esto ocurre debido a la distribución simétrica de tensiones en el ensayo, además de esto, la

carga de 6000 N aplicada, es menor en comparación con las pruebas de modo mixto, debido a que el momento flector es máximo justo en el punto de aplicación de la carga, y disminuye lineal y simétricamente hacia los extremos.

Por otra parte, los resultados experimentales muestran una leve desviación respecto a los resultados numéricos, máxima en el caso de la probeta 1 con 0,73317 mm, esto se debe principalmente a la suma de las posibles inexactitudes dimensionales de la probeta, junto con las imprecisiones del montaje experimental, el cuál es directamente afectado por una mayor cantidad de variables.

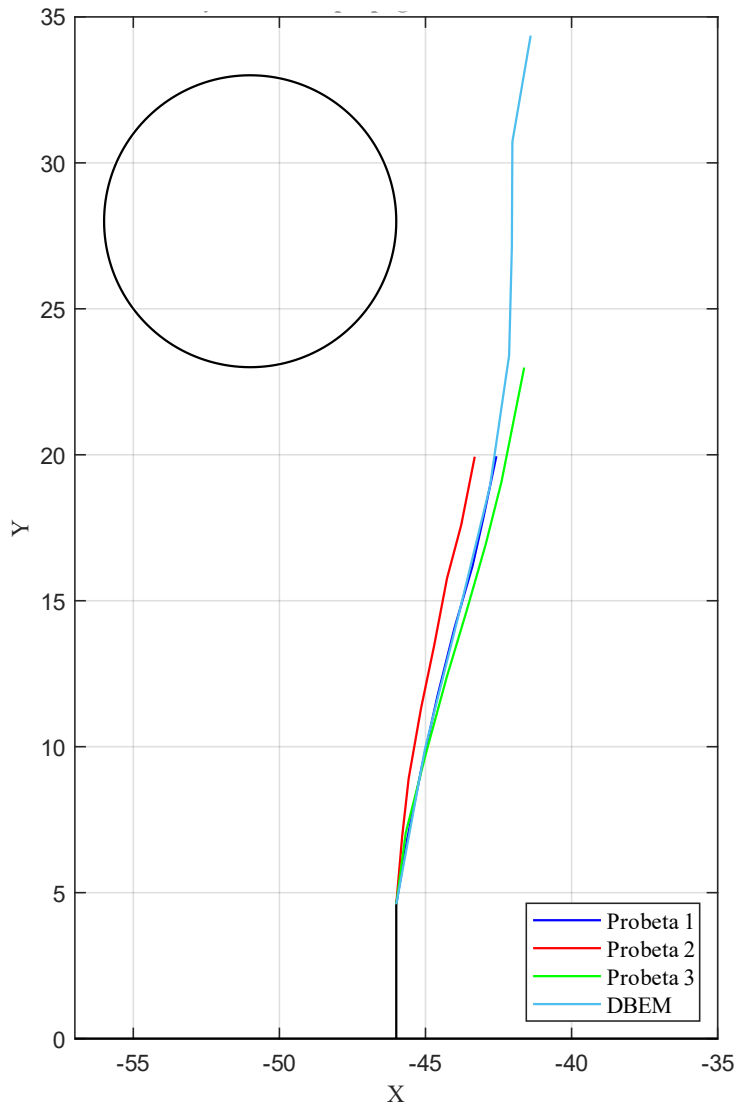
Figura 43. Trayectorias de propagación de grieta obtenidas para la geometría 6.



Para la geometría 6, cuya entalla estaba desfasada 4,6 milímetros hacia la izquierda, los resultados muestran un comportamiento de modo mixto de fractura, es decir, que la apertura de las caras de la grieta ocurre tanto en dirección perpendicular a la aplicación de la carga, como en dirección paralela a esta. Además de esto, es evidente la inclinación que va presentando la grieta, en la que se tiende a desviar hacia el centro de la probeta, esto se da porque la grieta busca dirigirse hacia la zona donde hay una mayor concentración de tensiones, que en este caso sería donde se está aplicando la carga.

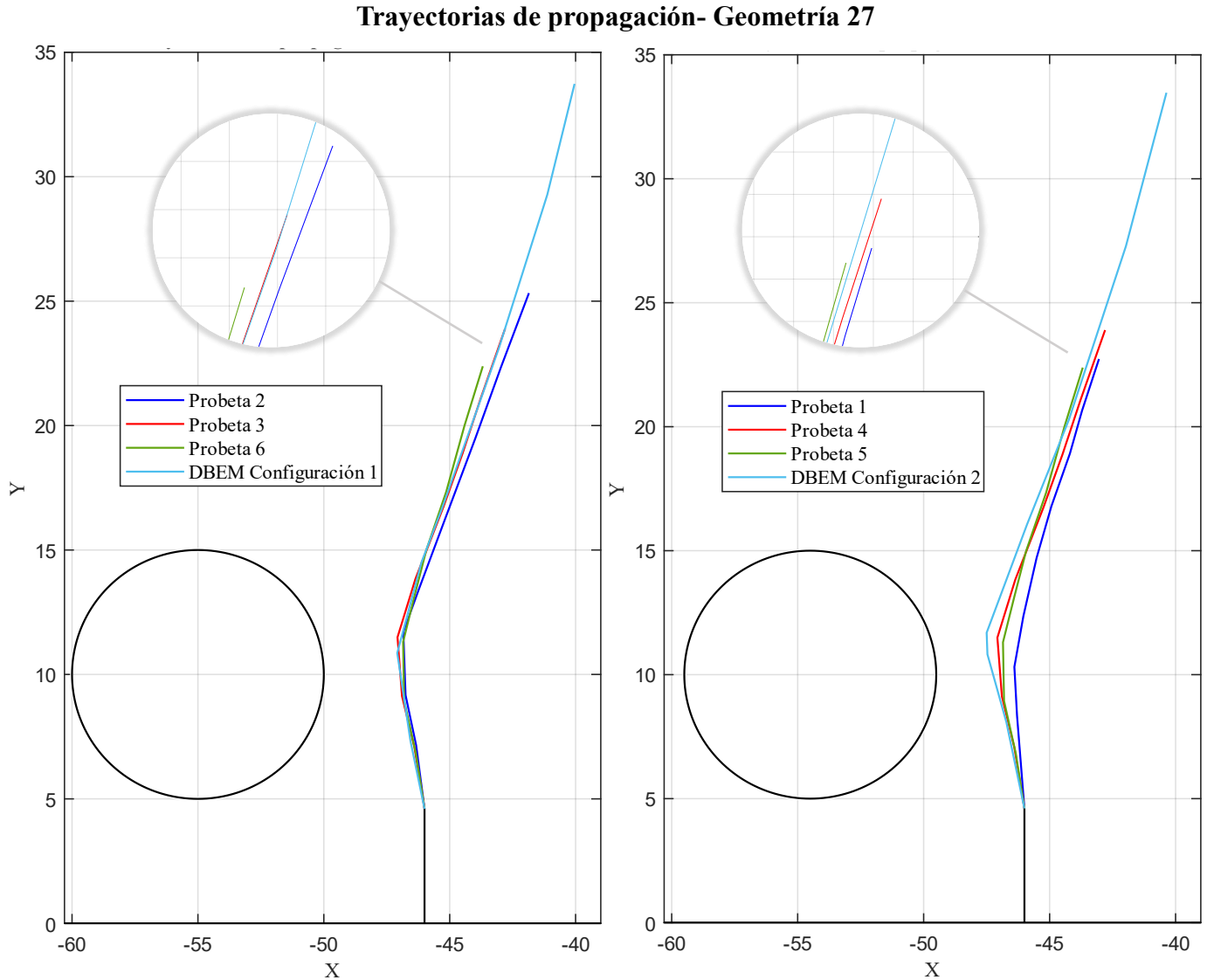
Por otra parte, se puede observar una diferencia importante en la trayectoria de propagación de los resultados numéricos respecto a los experimentales, esto puede deberse tanto a posibles inexactitudes en el punto de aplicación de la carga, las cuales causan que la distribución de tensiones en la probeta no sea perfectamente simétrica y la grieta no tenga la inclinación esperada, como a la dificultad de medición que se tiene para grandes deformaciones.

Figura 44. Trayectorias de propagación de grieta obtenidas para la geometría 16.



Para la geometría 16, las pruebas experimentales y el método de simulación, muestran resultados muy similares, adicional a esto, se puede observar como la trayectoria de propagación tiende a tener una disminución en la pendiente en comparación con la geometría 6, cuya entalla tiene la misma ubicación, pero no presenta agujero. Esto se debe a que el agujero actúa como un concentrador de esfuerzo, que, debido a su proximidad con la trayectoria de propagación de la grieta, tiende a atraerla y modificar su trayectoria original.

Figura 45. Trayectorias de propagación de grieta obtenidas para la geometría 27.

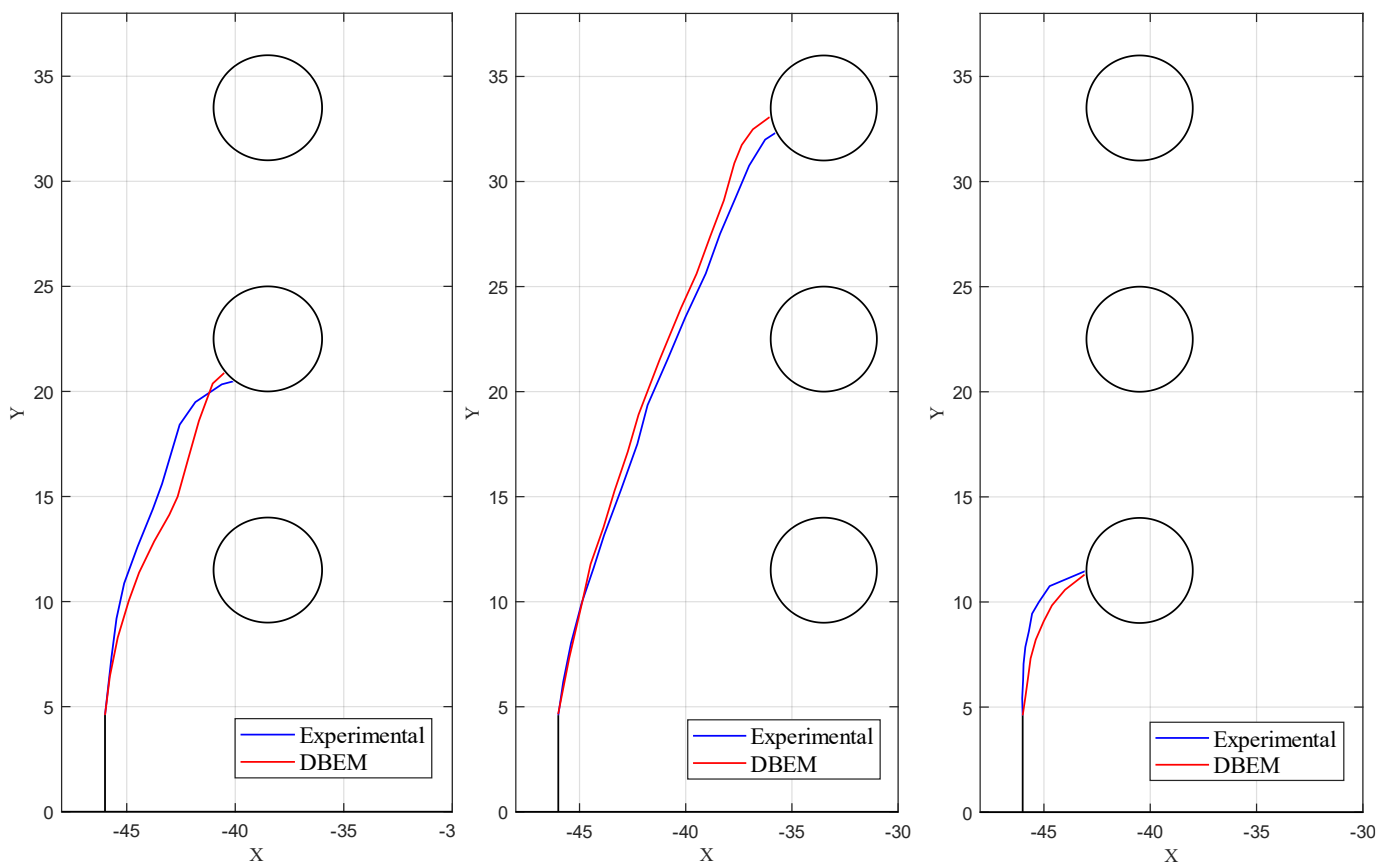


Para la geometría 27, se graficaron individualmente ambas configuraciones (Figura 45). Inicialmente se puede observar que las trayectorias obtenidas experimentalmente tienen una gran similitud respecto a la trayectoria obtenida numéricamente, en estas se observa una desviación inicial en dirección al concentrador de esfuerzo y una posterior inclinación hacia el punto con mayor concentración de tensiones, es decir el centro de la probeta. En cuanto a la variación de 0,5 mm de la cercanía entre la entalla y el agujero, se puede apreciar una variación entre ambas configuraciones de aproximadamente 4 grados en la inclinación inicial de las trayectorias, la cual

se reduce a aproximadamente 1 grado para la inclinación final. Finalmente es notorio que para la configuración número 2, es decir, la geometría cuyo agujero se encuentra 0,5 mm más cerca de la entalla, los comportamientos experimentales tienen una variación más amplia que para la configuración número 1, así como también tienen un menor acercamiento al agujero a pesar de que su influencia sobre ellas se supone más temprana.

Figura 46. Trayectorias de propagación de grieta obtenidas para la geometría 21, 22 y 24.

Trayectorias de propagación- Geometrías 21, 22 y 24



Para las geometrías 21, 22 y 24, que cuentan con tres agujeros igualmente equidistantes verticalmente, pero con una distancia horizontal variable respecto a la entalla, se puede apreciar una amplia semejanza entre las trayectorias reales con las simuladas. Para la geometría 24 cuya distancia horizontal entre la entalla y los agujeros es de 3 mm, el primer agujero presenta una

influencia inmediata en el comportamiento de la grieta, para la geometría 21 cuya distancia horizontal entre la entalla y los agujeros es de 5 mm, los agujeros presentan una influencia temprana en la trayectoria de propagación, y finalmente, para la geometría 22 cuya distancia horizontal entre la entalla y los agujeros es de 10 mm, ambas trayectorias coinciden con exactitud hasta una distancia vertical de 11 milímetros, lo cual podría deberse a que los dos primeros agujeros están lo suficientemente alejados de la grieta y no la afectan en gran medida hasta esa distancia.

Según los resultados experimentales, el comportamiento observado coincide en lo expresado por Ingraffea AR, el cual menciona que un agujero comienza a afectar la trayectoria de la grieta, cuando la punta de la grieta está a una distancia de aproximadamente un diámetro de agujero (Ingraffea AR & Grigoriu M., 1990).

Por otra parte, es importante mencionar que se observa un buen acercamiento entre los resultados experimentales y los simulados. Las variaciones en las trayectorias de ambos métodos pueden deberse a una gran cantidad de variables, como lo son las simplificaciones y aproximaciones del modelo matemático utilizado por el método de simulación, las imprecisiones de alineación en el montaje experimental, la irregularidades geométricas causadas por el método de fabricación y la dificultad en la digitalización de la trayectoria al final de la propagación, debido a las grandes deformaciones de la probeta. Estas diferencias son esperables debido a la naturaleza idealizada de las simulaciones frente a la complejidad del ensayo experimental.

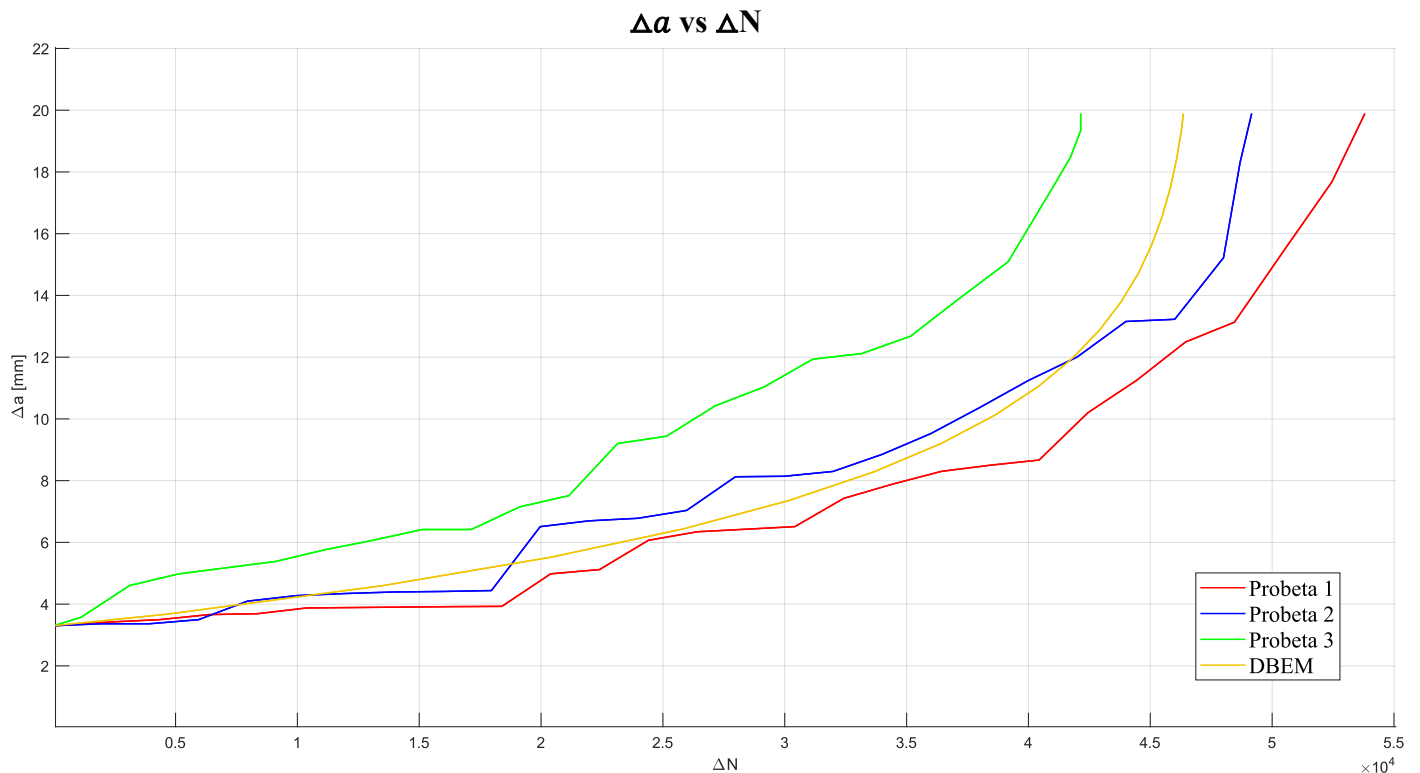
Finalmente, es importante mencionar que en los resultados obtenidos por medio de simulación para todas aquellas geometrías cuya grieta no colisiona contra el agujero, la grieta se propaga hasta alcanzar la tenacidad a la fractura, mientras que experimentalmente ocurre lo mismo, pero debido a que la trayectoria final de propagación ocurre dentro de la región de crecimiento inestable, es decir que se necesitan muy pocos ciclos para alcanzar la tenacidad a la fractura del

material, se dificulta en gran medida la medición experimental de la trayectoria de propagación al final del ensayo. Por otra parte, se obtuvieron los resultados correspondientes a los factores de intensidad de esfuerzo para cada incremento del tamaño de grieta de cada geometría, estos datos se tabularon para su posterior análisis gráfico y se encuentran en los apéndices F, G y H.

5.3 Análisis de los resultados obtenidos.

Para empezar, se graficaron los datos obtenidos de Δa contra número de ciclos para las probetas experimentales y las simulaciones, a continuación, se presentan los resultados obtenidos para cada geometría. En cuanto a la geometría 1, es decir la geometría base con la entalla alineada con el punto de aplicación de carga, se obtuvieron los siguiente resultados de Δa vs ΔN .

Figura 47. Gráfico comparativo Δa contra ΔN de la geometría 1.

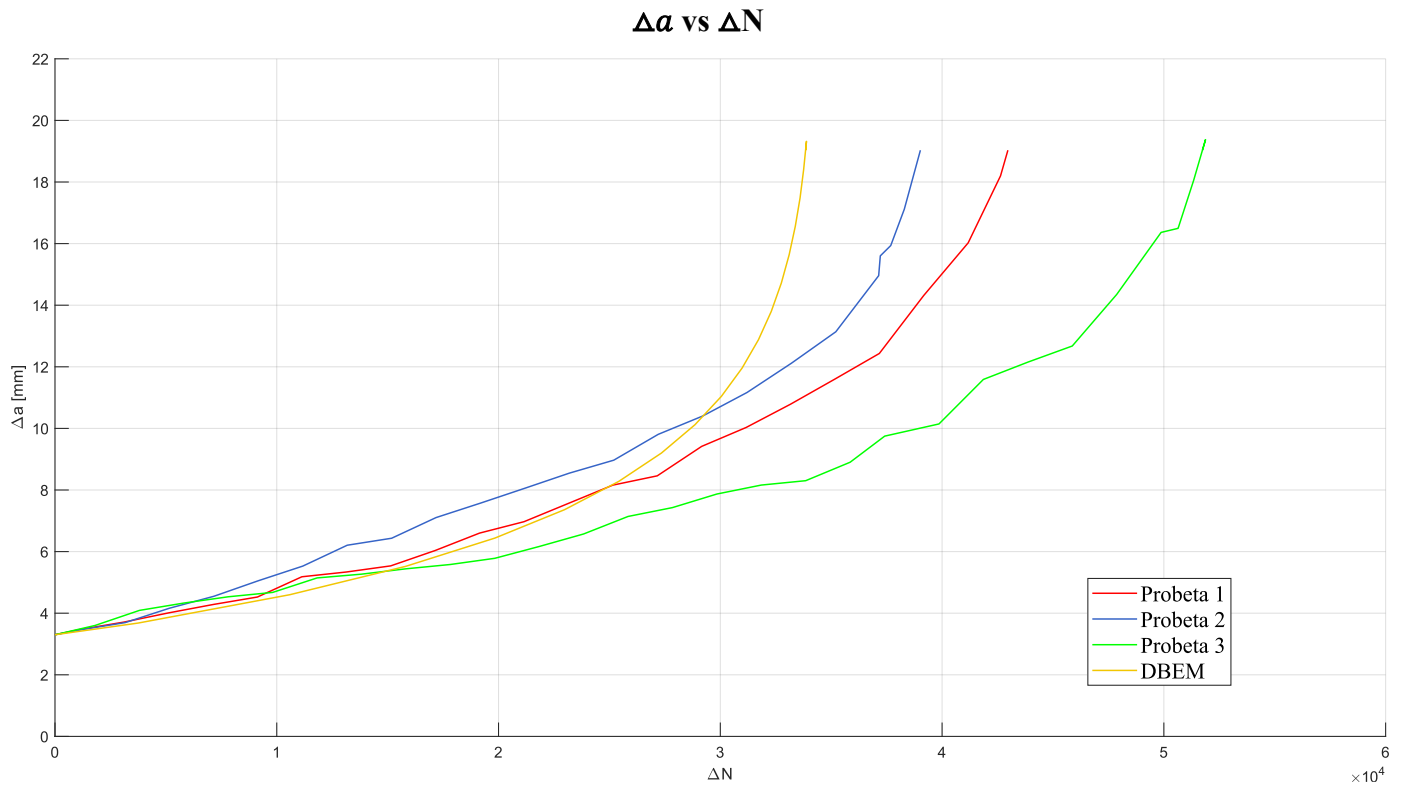


Para este análisis comparativo, se definió un intervalo de crecimiento desde un tamaño de incremento de grieta de 3,3 mm hasta un tamaño máximo de incremento de grieta de 19,89 mm, esto con el objetivo de analizar el comportamiento de crecimiento sin tener en cuenta el intervalo de ciclos que experimentalmente ocupa el fenómeno de nucleación.

Para los datos obtenidos se evidencia que el ΔN que abarca la región de crecimiento controlado, se encuentra entre 42142 y 53806 ciclos, con un promedio de 48370 ciclos para los resultados experimentales y con un porcentaje de error del 4,15% respecto a la simulación, capturando valores máximos de Δa hasta de 22,05 mm para la probeta número 1, es importante mencionar también que la probeta número 1 presenta una reducción notable en el número de ciclos totales y un Δa inicial mayor respecto a las demás probetas (Apéndice A) debido a que esta fue utilizada para realizar la programación de los ensayos, por lo tanto presenta un número de ciclos de nucleación adicionales que no se tuvieron en cuenta y que finalmente no afectan el análisis debido a que se trabaja con la diferencia obtenida para un intervalo de trayectoria.

Con respecto a la geometría 6, cuya entalla estaba desfasada 46 mm del punto de aplicación de carga, se obtuvieron los siguientes resultados de Δa vs ΔN .

Figura 48. Gráfico comparativo Δa contra ΔN de la geometría 6.

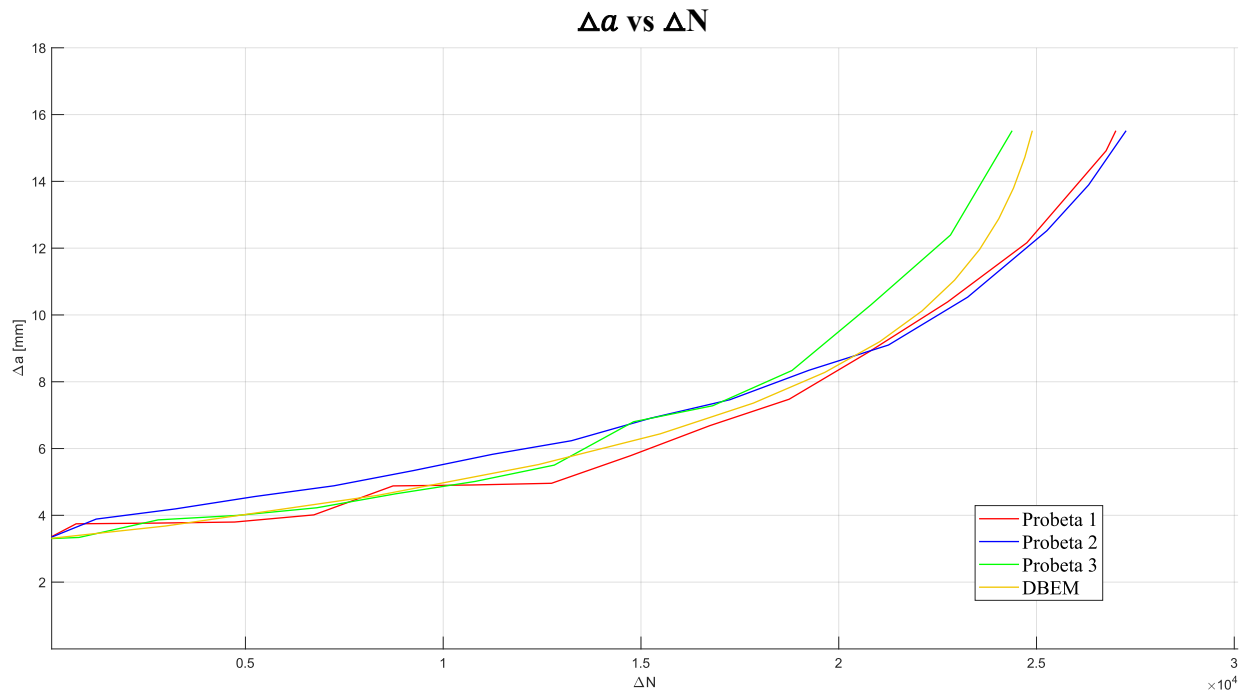


Para este análisis comparativo el intervalo de crecimiento definido fue desde un tamaño de incremento de grieta de 3,3 mm hasta un tamaño máximo de incremento de grieta de 19,03 mm. Obteniendo datos que ubican el ΔN entre 33854 y los 51739 ciclos, con un promedio de 44576 ciclos para los resultados experimentales y con un porcentaje de error del 24,05% respecto a la simulación.

En lo que respecta a la geometría 16, la cual presenta la estalla desfasa 46 mm del centro y un agujero de 10 mm de diámetro ubicado en la parte superior izquierda desde la entalla. Se definió un intervalo de crecimiento desde un tamaño de incremento de grieta de 3,3 mm hasta un tamaño máximo de incremento de grieta de 15,51 mm, obteniendo datos de ΔN entre 24383 y los

27265 ciclos, con un promedio de 26218 ciclos para los resultados experimentales y con un porcentaje de error del 5,05% respecto a la simulación.

Figura 49. Gráfico comparativo Δa contra ΔN de la geometría 16.



Para la geometría 27, la cual presenta la entalla desfasada 46 mm del centro y un agujero de 10 mm de diámetro ubicado en la parte superior izquierda desde la entalla, además de dos diferentes configuraciones en las que varía 0,5 mm la distancia horizontal entre la entalla y el agujero. A continuación, se presentan las probetas pertenecientes a cada configuración:

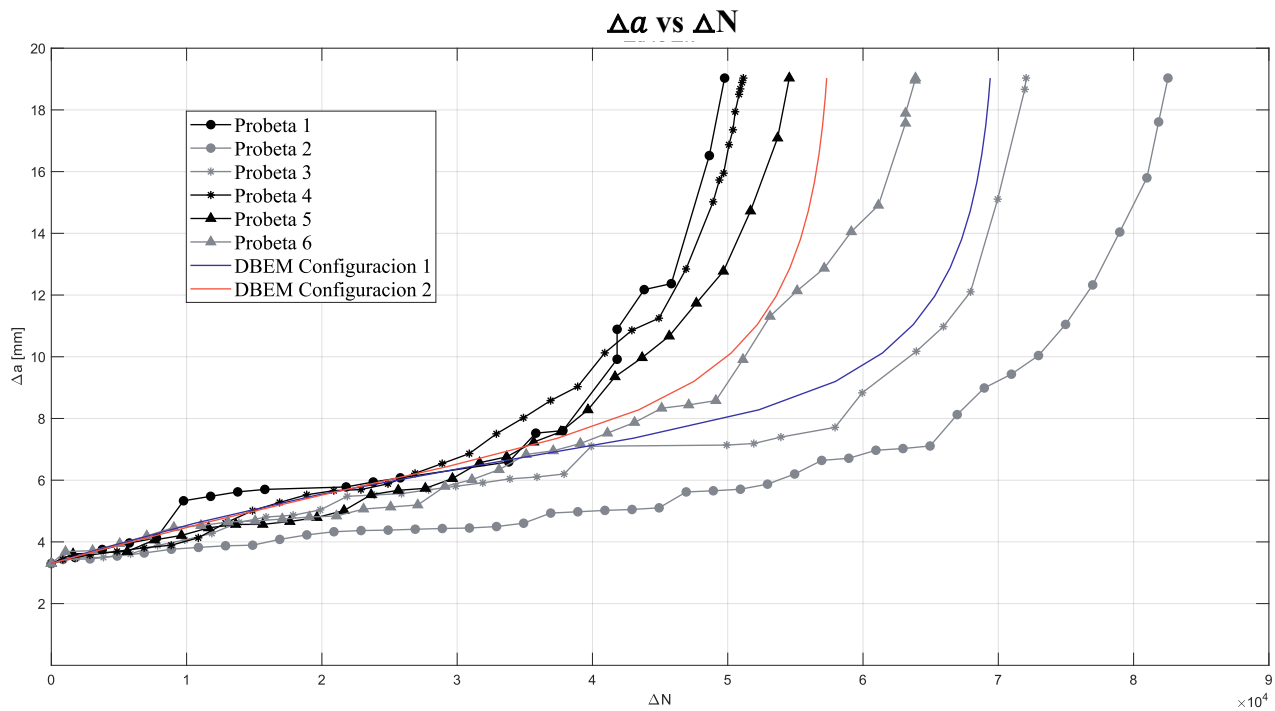
Tabla 5.

Probetas pertenecientes a cada configuración de la geometría 27.

Configuración 1	Probeta 2
	Probeta 3
	Probeta 6
Configuración 2	Probeta 1
	Probeta 4
	Probeta 5

Se definió un intervalo de crecimiento desde un tamaño de incremento de grieta de 3,3 mm hasta un tamaño máximo de incremento de grieta de 19,03 mm, a partir de esto se pudo evidenciar como las configuraciones 1 y 2 tuvieron un ΔN experimental promedio de 72825 y 51825 ciclos respectivamente, con porcentajes de error del 4,7% y 10,58% respecto a la simulación.

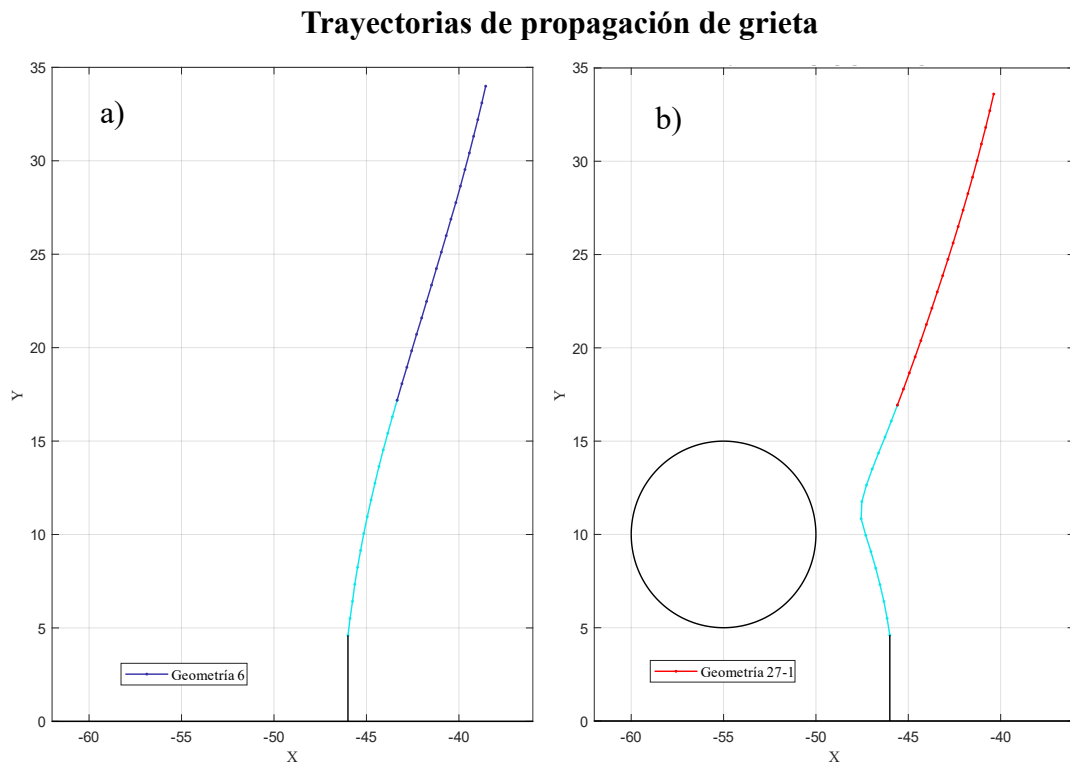
Figura 50. Gráfico comparativo Δa contra ΔN de la geometría 27.



De lo anterior obtenemos que dichos resultados pueden ser comparados con el ΔN de 44575 ciclos obtenido en la geometría número 6 para el mismo Δa . Esta comparación resulta conveniente debido a que ambas geometrías tienen la entalla en la misma ubicación y solo difieren entre sí en la presencia del agujero, lo cual resulta en un aumento de 28249 ciclos para la configuración 1 y 7249 ciclos para la configuración 2, es decir, un aumento de la vida útil del 63,37% y el 16,26% respectivamente. Que, con una frecuencia de 20 Hz, equivalen a una duración adicional importante de 24 y 6 minutos respectivamente.

Con esto en mente se dispuso a graficar la tasa de crecimiento en función del tamaño de grieta para la geometría 6 y para la configuración 1 de la geometría 27, buscando observar la afectación producida por el concentrador de esfuerzos en la tasa de crecimiento, explicando así el incremento del 63,37% de la vida útil de la probeta. Es importante mencionar que este análisis se hizo hasta un tamaño de grieta de aproximadamente 12,88 mm (Incremento 14), debido que es la zona de la grieta más afectada por el agujero.

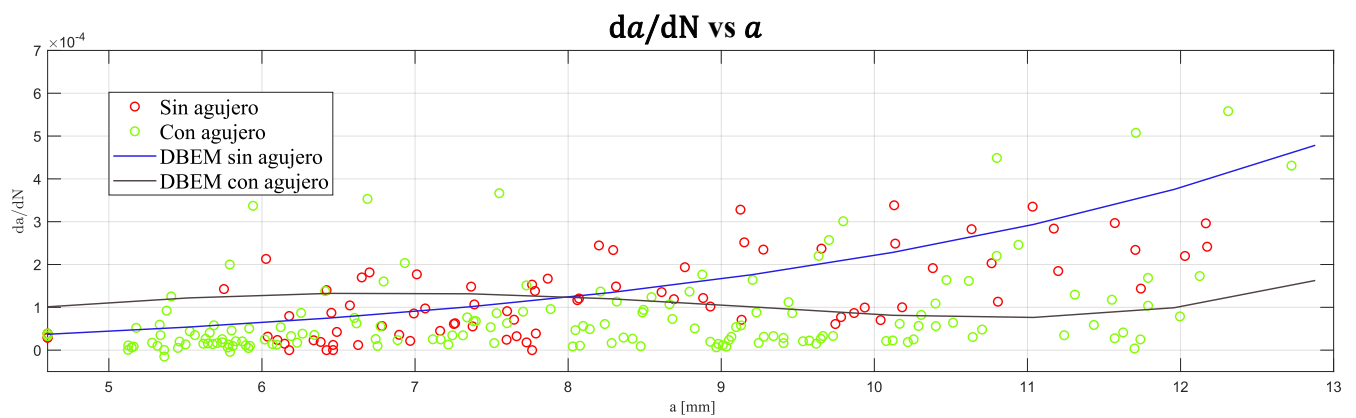
Figura 51. Sección analizada a) Geometría 6 b) Geometría 27.



De la figura 52 se puede evidenciar que desde el inicio de la propagación, hasta aproximadamente un tamaño de grieta de 8 mm (Incremento 9), la tasa de crecimiento de grieta es mayor para las probetas con agujero, esto se debe a que inicialmente el agujero incrementa la tasa de crecimiento en dicha zona, debido a que está lo suficientemente cerca como para atraer a la grieta en su etapa inicial, aumentando los valores de K_{II} de manera significativa y produciendo a

su vez un mayor K_{eq} , lo cual sugiere según Paris que el Da/DN sea mayor. Además, este desvío hacia la izquierda, la ubica en una región donde el momento flector es menor (figura 54), lo cual repercute en la posterior disminución del K_{eq} y por lo tanto el da/dN , una vez la grieta abandona la zona afectada por el agujero, lo cual incrementa significativamente la vida útil del componente. Esto se puede observar en la figura 53, donde la tasa de crecimiento de grieta, para la geometría con agujero se mantienen por debajo de la que si tiene agujero.

Figura 52. Tasa de crecimiento de grieta contra tamaño de grieta, Sin agujero (Geometría 6) Con agujero (Geometría 27- Configuración 1).



También se considera importante mencionar que, a pesar de estar en la región de crecimiento controlado, al agujero afecta la tasa de crecimiento de grieta causando un decremento en el factor de intensidad de esfuerzos efectivo, caracterizado por un decremento en el modo I y un incremento en el modo II debido a la curvatura de la trayectoria. Lo cual se intentará observar en el análisis de lo K.

Figura 53. Tasa de crecimiento de grieta contra tamaño de grieta, Sin agujero (Geometría 6) Con agujero (Geometría 27- Configuración 1).

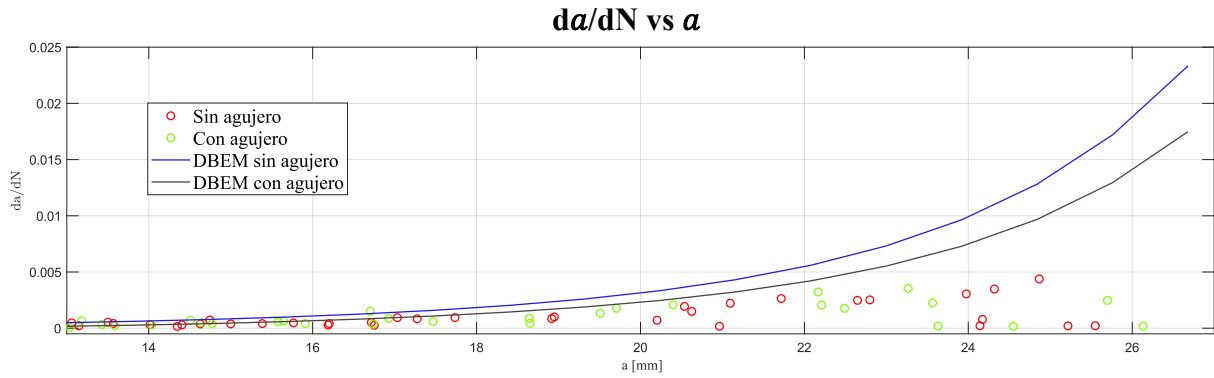
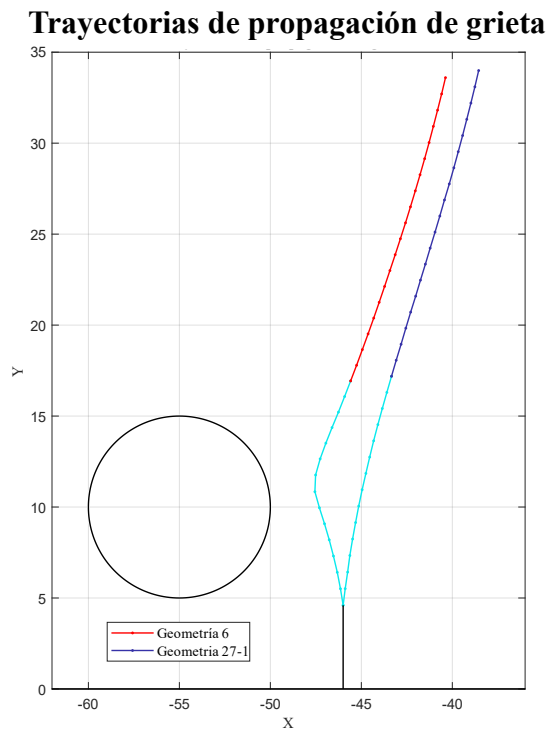
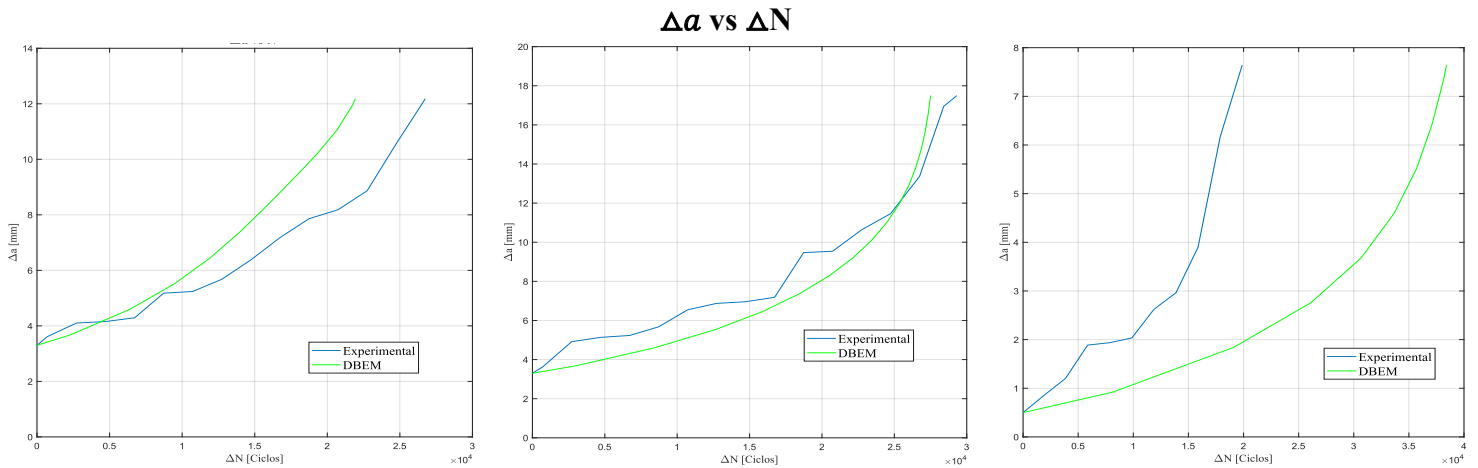


Figura 54. Trayectorias de propagación sobrepuestas.



Finalmente, para las geometrías 21, 22 y 24, las cuales tienen tres agujeros distribuidos verticalmente con una distancia horizontal variable y de las cuales solo se realizó un ensayo experimental por geometría, se obtuvieron los siguientes resultados.

Figura 55. Gráfico comparativo Δa contra ΔN de la geometrías 21, 22 y 24.



Empezando por la geometría 21, el análisis comparativo tuvo un intervalo de crecimiento definido que fue desde un incremento de grieta de 3,3 mm hasta un tamaño máximo de incremento de grieta de 12,18 mm, obtenido de este, un valor de ΔN experimental de 26752 ciclos y un ΔN 21927 ciclos para la simulación. Continuando con la geometría 22, el intervalo fue desde los 3,3 mm hasta los 17,49 mm, resultando un de ΔN experimental de 29311 ciclos y un ΔN 27500 ciclos para la simulación. Terminando con la geometría 24 y debido a corta vida útil, el intervalo fue desde los 0,5 mm hasta los 7,64 mm, resultando un de ΔN experimental de 19878 ciclos y un ΔN 38416 ciclos para la simulación.

Tabla 6.

Porcentaje de error entre los resultados de ΔN experimentales y numéricos.

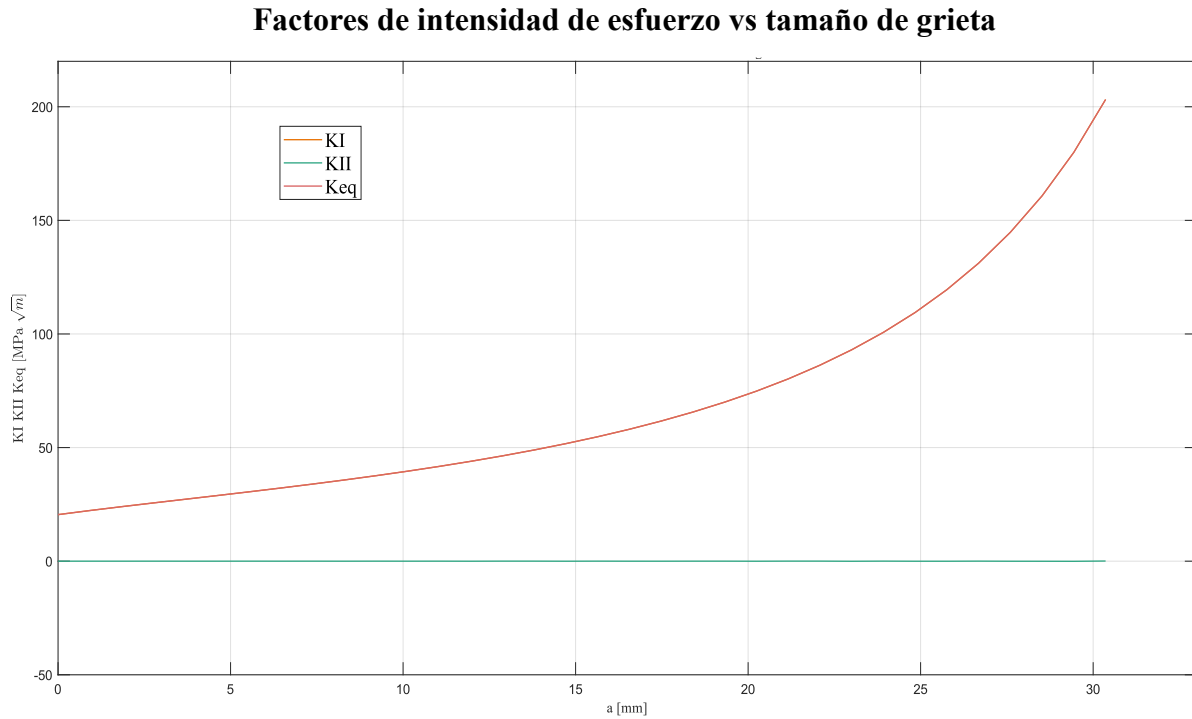
Geometría	Porcentaje de error
21	18,03 %
22	6,17 %
24	93,25 %

En el caso de estas tres últimas geometrías, no es posible comparar su vida útil debido a que los crecimientos son muy diferentes ya que las grietas colisionan contra los agujeros a diferentes tamaños.

Por otro lado, referente al análisis de los factores de intensidad de esfuerzo de cada geometría, se graficaron en Matlab los resultados obtenidos por el simulador DBEM Analisis.

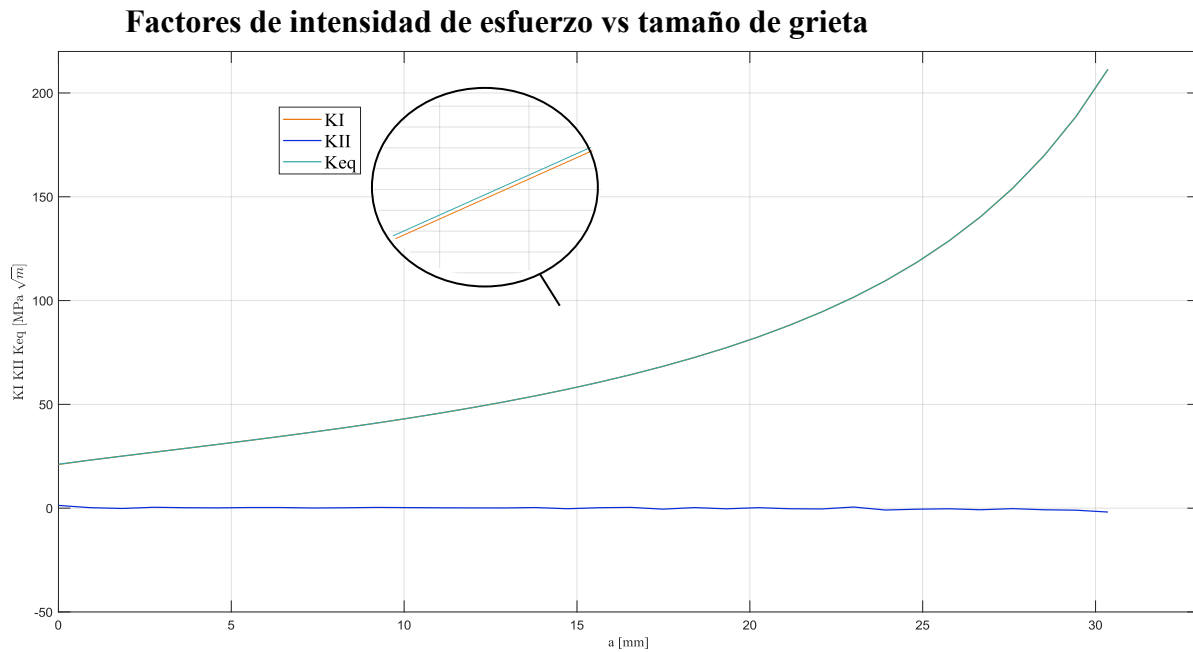
Empezando por la geometría número 1, la gráfica muestra una ausencia de modo mixto ya que los factores de intensidad de esfuerzo para modo II de fractura permanecen constantes para cada incremento y los factores de intensidad de esfuerzo para modo I se superponen con los factores de intensidad de esfuerzo equivalentes. Esto quiere decir que en condiciones ideales esta geometría solo presenta modo I de fractura, es decir, que únicamente las superficies de la grieta se alejan perpendicularmente una de la otra.

Figura 56. Gráfico comparativo K_I , K_{II} y K_{eq} contra tamaño de grieta - Geometría 1.



Continuando con la geometría número 6, la gráfica muestra valores pequeños y negativos de K_{II} , esto puede deberse a que la componente de cizalla es relativamente débil comparada con la de la apertura, pero igualmente afecta levemente la trayectoria de propagación, logrando una leve inclinación para cada incremento. Según los datos obtenidos, K_I y K_{II} son en promedio un 99,98% y un 0,015% del $K_{equivalente}$ respectivamente, es por esto que las curvas de $K_{equivalente}$ y K_I se ven superpuestas a simple vista, pero no son completamente coincidentes.

Figura 57. Gráfico comparativo K_I , K_{II} y K_{eq} contra tamaño de grieta - Geometría 6.



En lo que respecta a la geometría número 16, su comportamiento es bastante similar a las anteriores, pero con valores ligeramente menores de K_{II} a partir de un tamaño de grieta de 20,24 mm hasta que la grieta alcanza un tamaño de 24,84 mm, punto a partir del cual K_{II} empieza a aumentar. Esta zona comprende desde el incremento 22 hasta el 27, los cuales se encuentran en la zona afectada por el agujero y ocurre principalmente porque inicialmente el agujero atrae a la grieta, disminuyendo su inclinación inicial hasta recuperarse justo después de atravesar dicha zona. Este comportamiento puede apreciarse con mayor detalle en la figura 59.

Figura 58. Gráfico comparativo K_I , K_{II} y K_{eq} contra tamaño de grieta - Geometría 16.

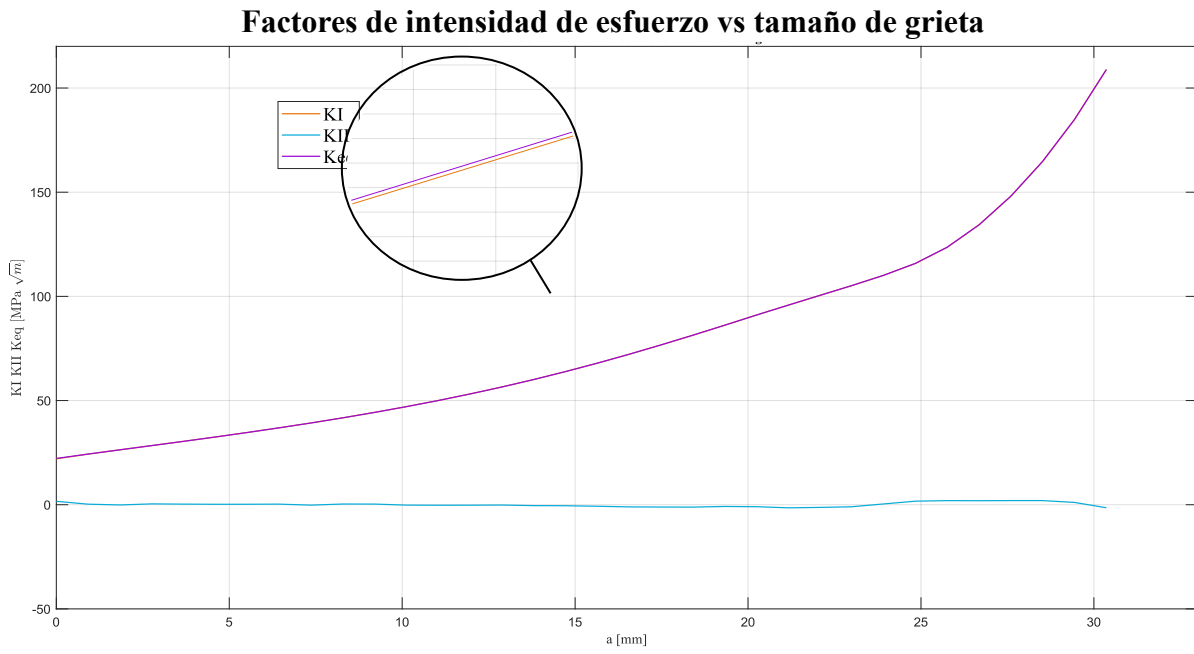
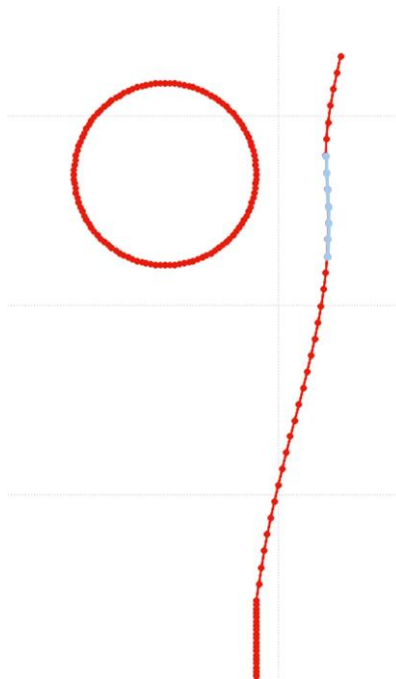
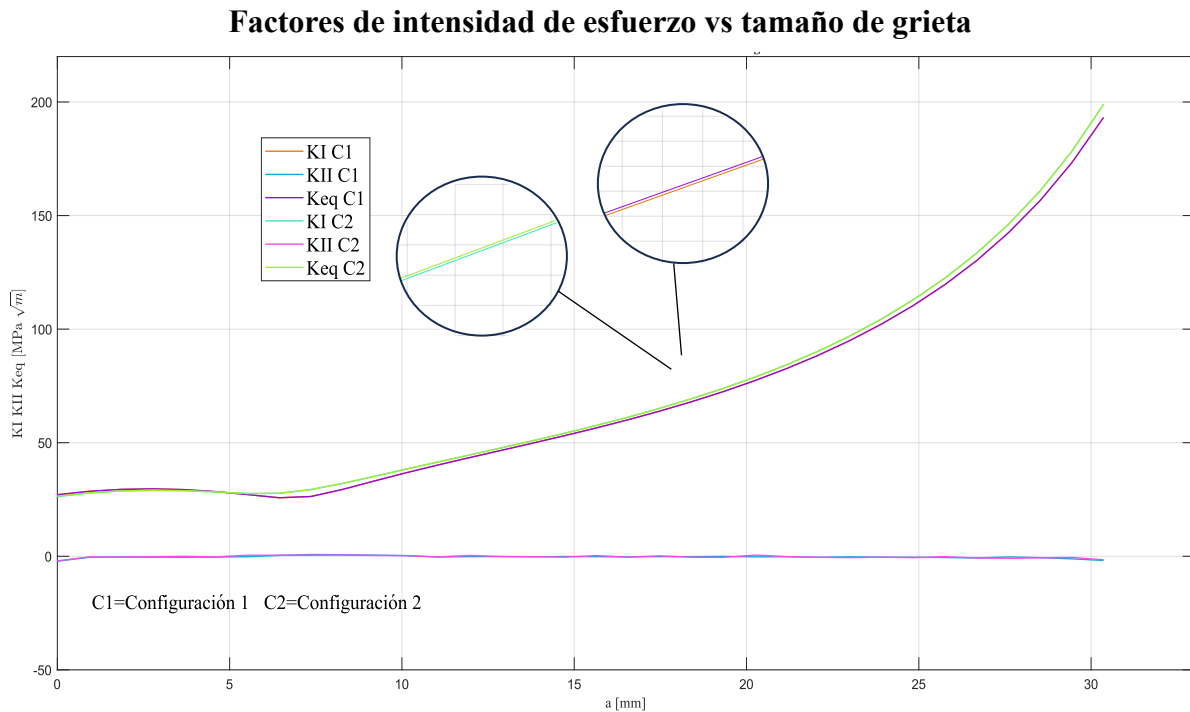


Figura 59. Trayectoria de propagación Geometría 16.



Continuando con la geometría 27, se puede observar un aumento significativo de K_{II} para el primer incremento, punto en el que alcanza un valor de -2,00, es decir, un 0,57% del K_{eq} , esto se debe a la influencia inmediata que tiene el agujero respecto a la entalla.

Figura 60. Gráfico comparativo K_I , K_{II} y K_{eq} contra tamaño de grieta - Geometría 27.



Finalmente, respecto a las geometrías 21, 22 y 24, en las dos primeras se tiene un comportamiento similar a los observados anteriormente, sin embargo, esto no ocurre para la geometría 24, la cual presenta una disminución y un aumento abrupto del K_I y K_{II} respectivamente para el último incremento, el cual es justo el incremento que colapsa contra el agujero.

Figura 61. Gráfico comparativo K_I , K_{II} y K_{eq} contra tamaño de grieta - Geometría 21.

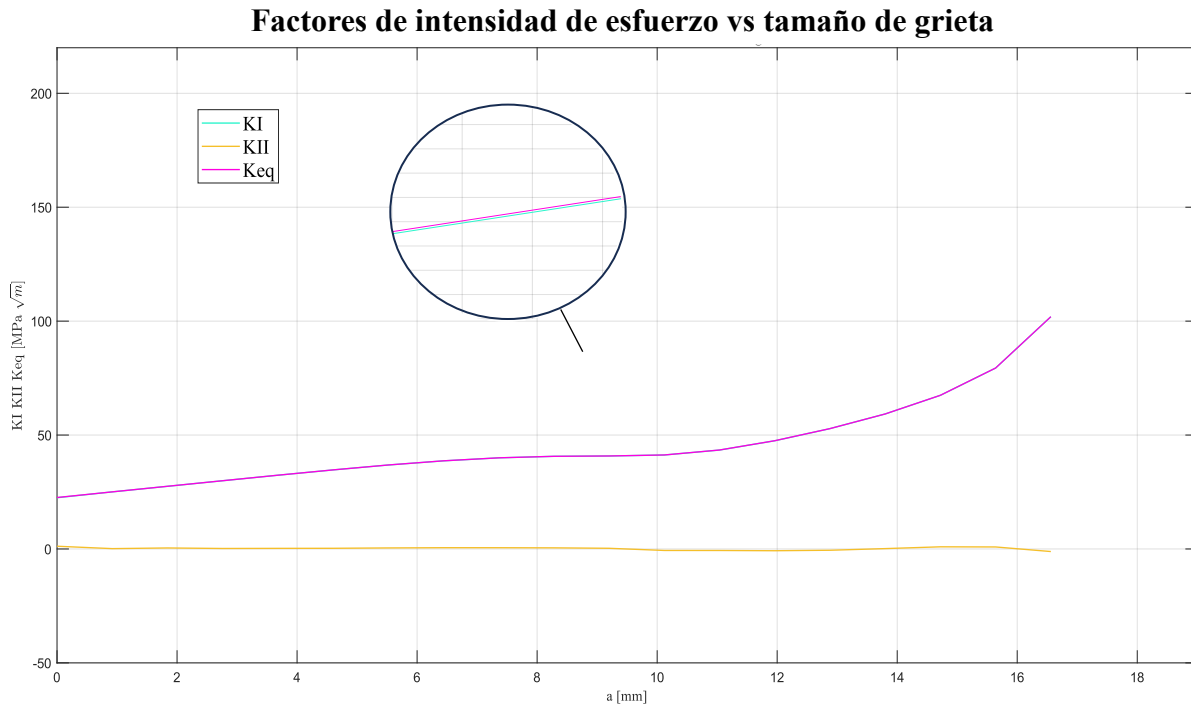


Figura 62. Gráfico comparativo K_I , K_{II} y K_{eq} contra tamaño de grieta - Geometría 22.

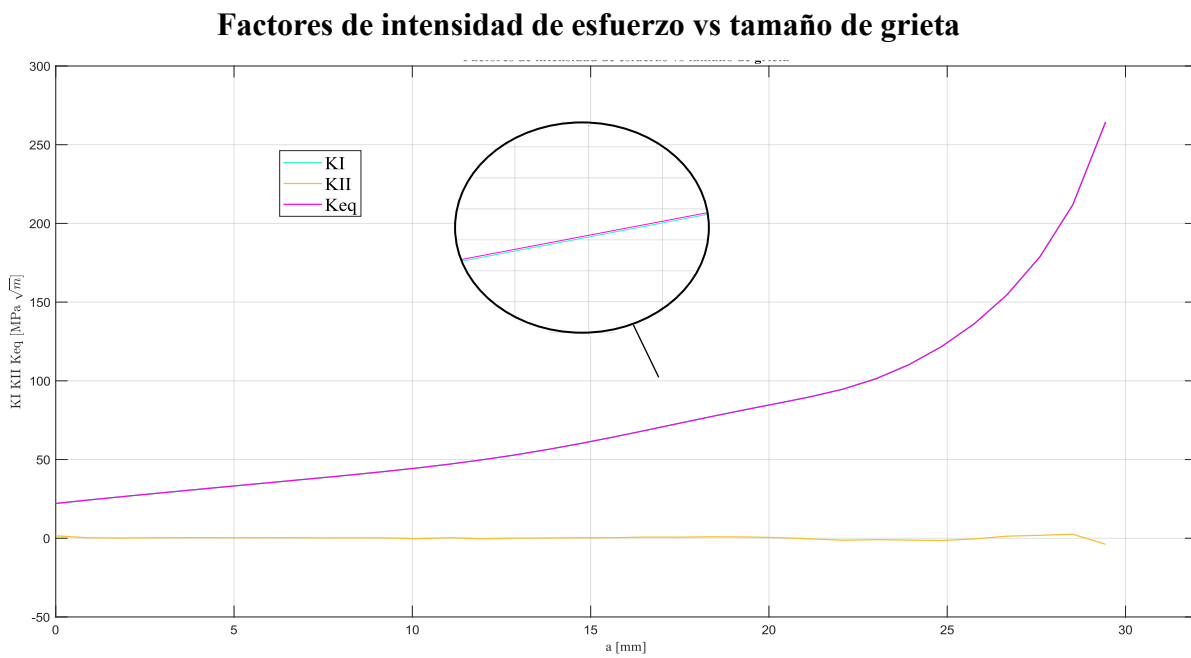
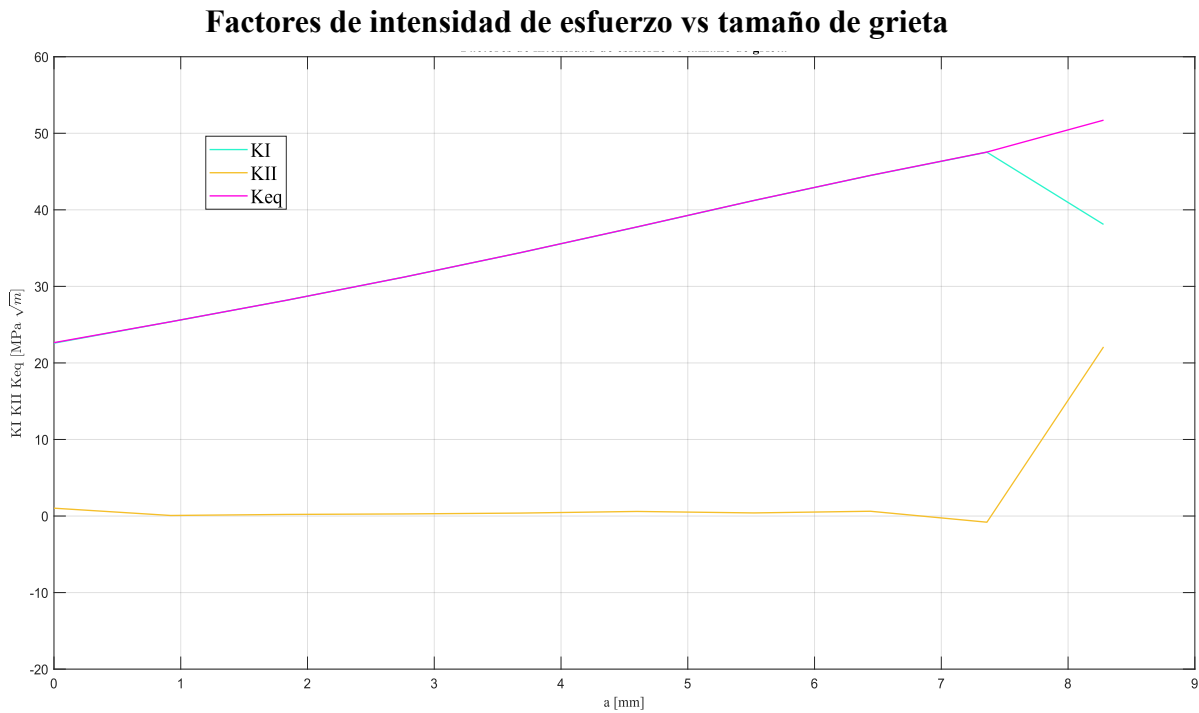
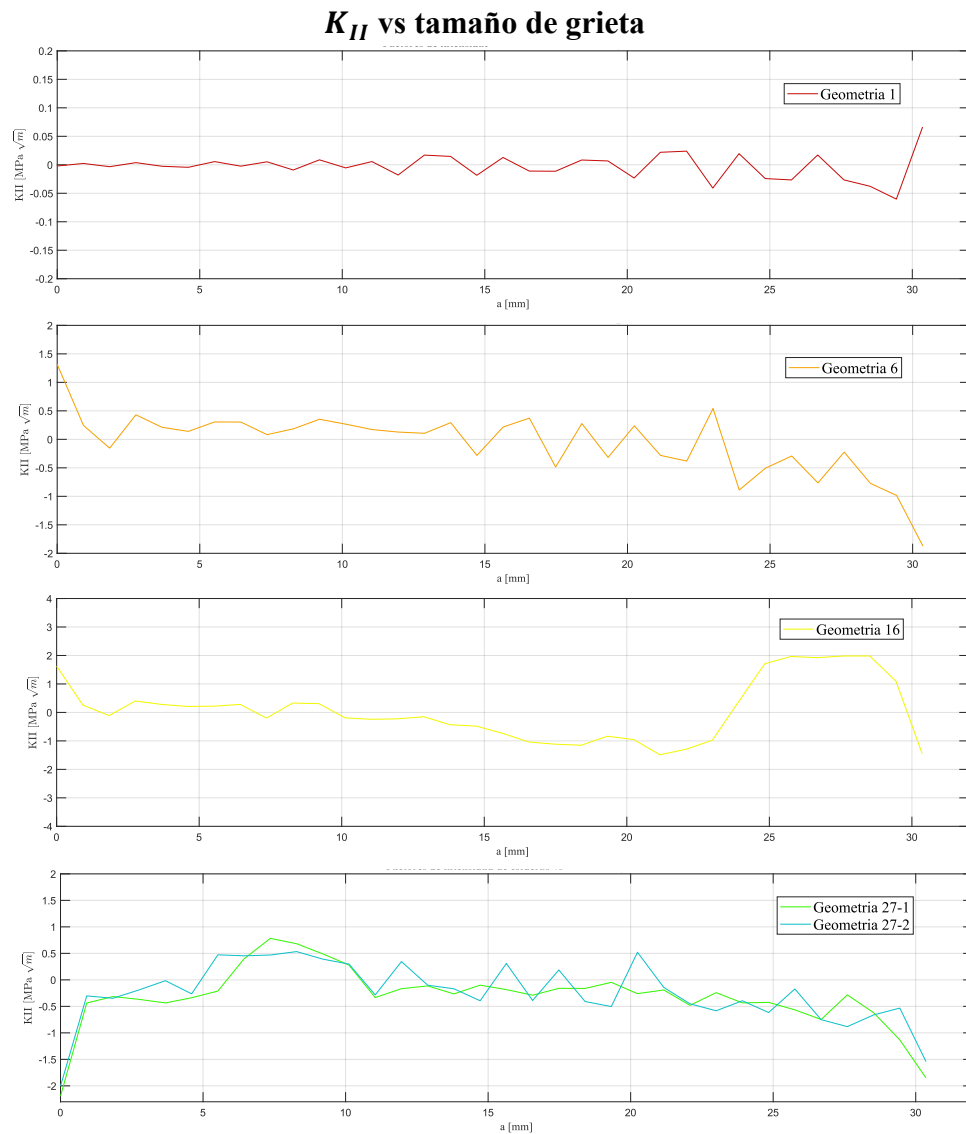


Figura 63. Gráfico comparativo K_I , K_{II} y K_{eq} contra tamaño de grieta - Geometría 24.



Se debe agregar que adicionalmente se graficaron individualmente los datos obtenidos de K_{II} para cada geometría, con el objetivo de visualizar más a detalle sus variaciones a lo largo de la trayectoria.

Figura 64. K_{II} contra tamaño de grieta - Geometrías 1, 6, 16 y 27.

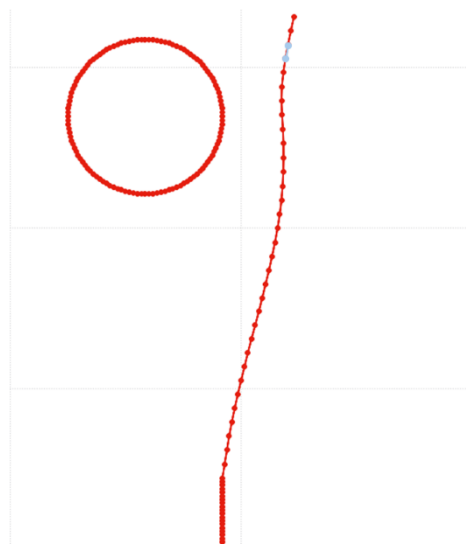


Para empezar, es importante mencionar que la variación de K_{II} entre valores positivos y negativos, está relacionada con la dirección del deslizamiento relativo de las caras de la grieta.

Para la geometría número 1, se puede ver que los valores de K_{II} se encuentran en un rango muy reducido que va desde el 0 hasta un valor máximo de 0,066 para el ultimo incremento, es decir, justo antes de la falla.

Para la geometría número 6, la magnitud de K_{II} aumenta considerablemente en comparación con la primera geometría, mostrando sus valores de mayor magnitud justo para el primer y el último incremento, 1,3161 y -1,8724 respectivamente, esto puede deberse principalmente a que, para esta geometría asimétrica, el primer incremento induce un modo mixto significativo, lo que hace que la grieta se desvíe con respecto a su orientación original y posteriormente se propague con pequeños ángulos, que se intercalan entre positivos y negativos, típico del modo I. Finalmente, para los últimos incrementos se observa un incremento el K_{II} , debido a la curvatura de la grieta y a que los esfuerzos cortantes presentes pueden ser más importantes e intensificar el modo de deslizamiento. Continuando con la geometría 16, el comportamiento con mayor K_{II} se presenta en el incremento 31, el cual curva la grieta nuevamente hacia la derecha al salir de la zona influenciada por el agujero.

Figura 65. Incrementos de trayectoria – Geometría 16.



Por otra parte, para la geometría 27, sus dos configuraciones coinciden en presentar los valores más grandes de K_{II} para el inicio de la programación, en los cuales la grieta se ve influenciada a encontrar el agujero. Presentando los ángulos de crecimiento mayores.

Figura 66. Incrementos de trayectoria – Geometría 27. a) Configuración 1. b) Configuración 2.

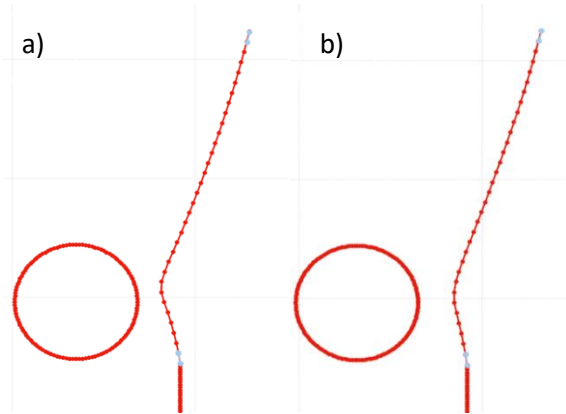
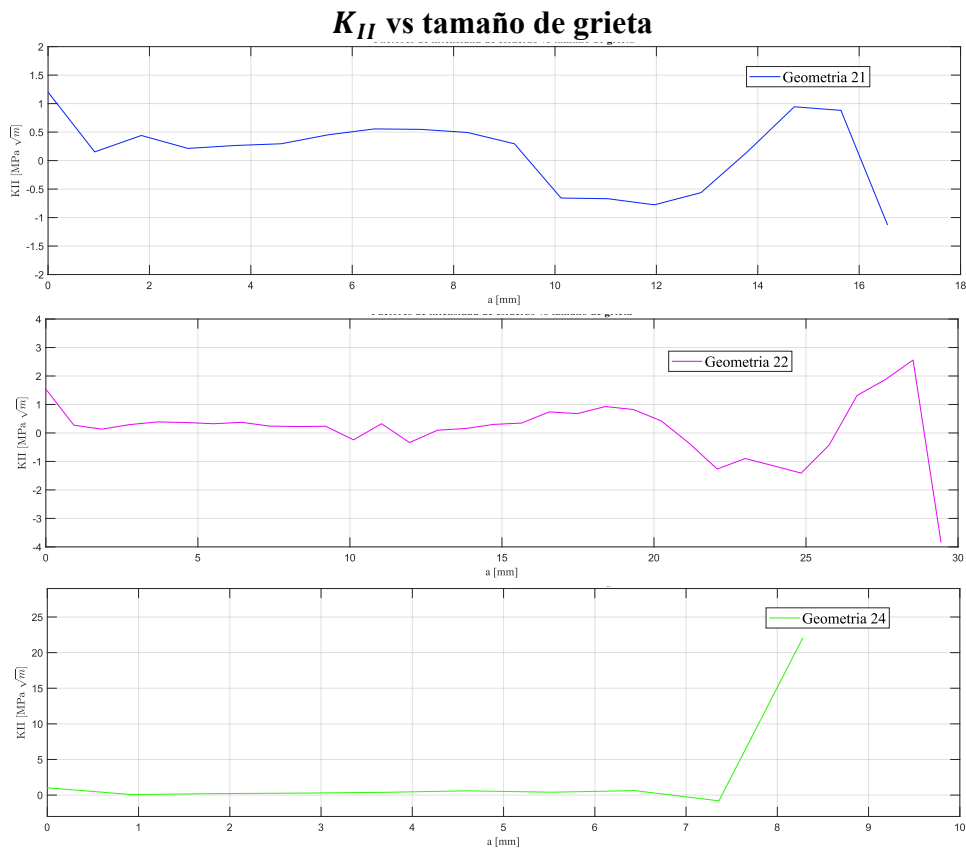
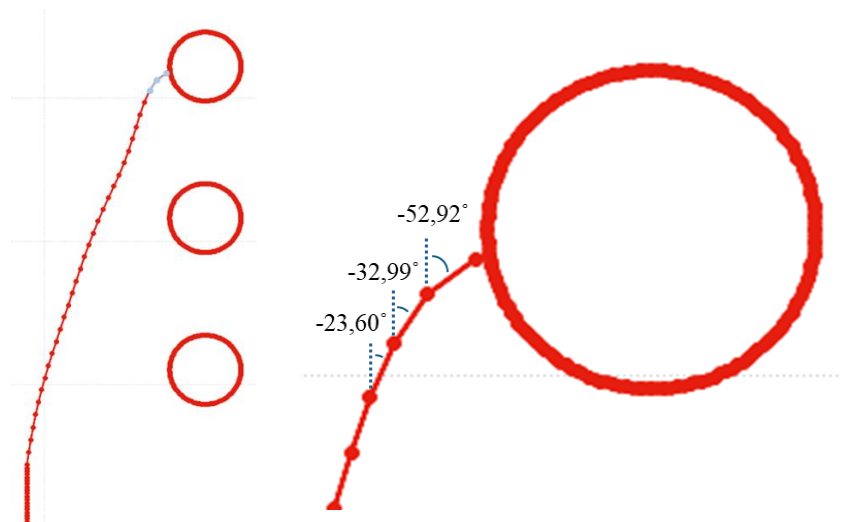


Figura 67. K_{II} contra tamaño de grieta - Geometrías 21, 22 y 24.



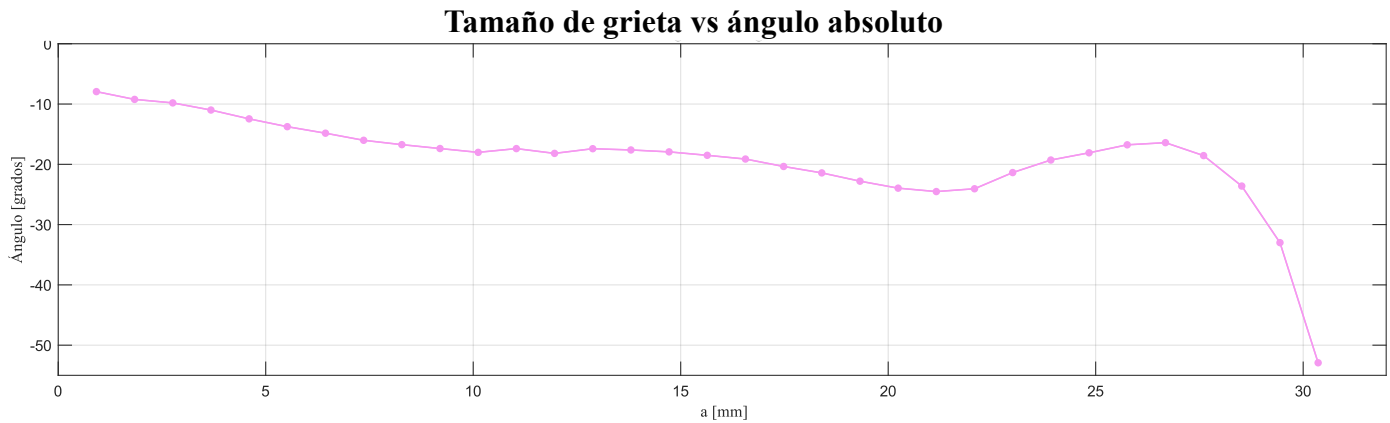
Finalmente, para las geometrías restantes los resultados simulados muestran que los mayores incrementos de K_{II} siguen estando en el primer y le ultimo incremento para las geometrías 21 y 24, mientras que para la geometría 22, las mayores magnitudes de K_{II} se encuentran en los dos últimos incrementos. Como se puede apreciar en la siguiente imagen de los ángulos absolutos de trayectoria respecto a la vertical.

Figura 68. Incrementos de trayectoria – Geometría 22.



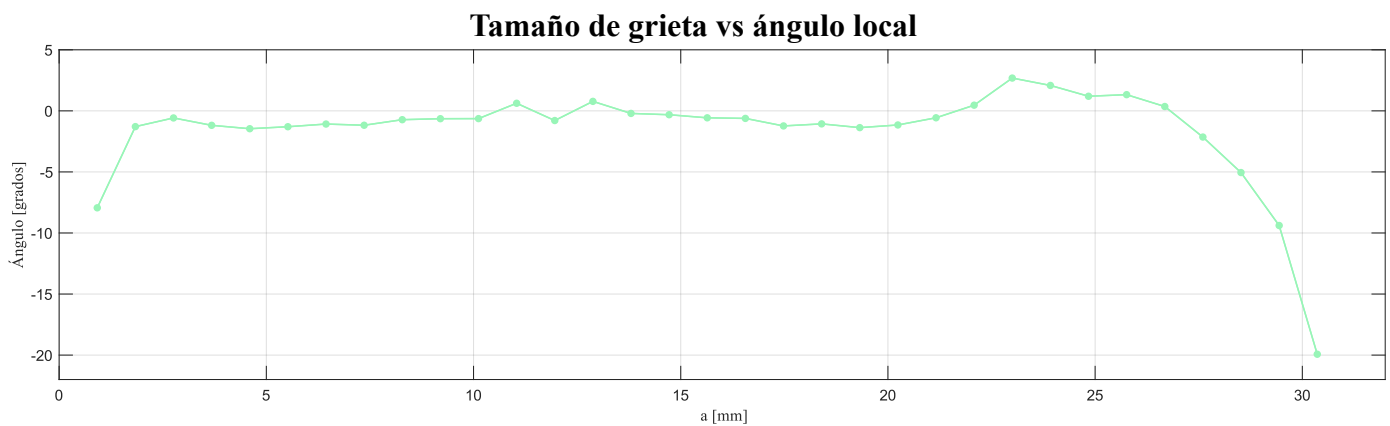
De igual modo, se puede observar cómo varía el ángulo de inclinación absoluto y local para cada uno de los 33 incrementos de la simulación correspondiente a la geometría 22, siendo importante resaltar que la medida de esta variación angular se trabaja siempre de manera local para cada incremento respecto al anterior, cuando se trata de la variable angular que relaciona K_I y K_{II} .

Figura 69. Variación angular absoluto contra el tamaño de grieta – Geometría 22.



En cuanto al ángulo absoluto, se puede ver que este disminuye gradualmente hasta aproximadamente el incremento 23, el cual tiene un tamaño de grieta de 21,16 mm. Esto se debe a que la grieta inicialmente se curva en sentido horario, a su vez, es notable que a partir de este punto el ángulo empieza a aumentar, lo cual quiere decir que el sentido de la grieta empieza a curvarse levemente, hasta que finalmente alcanzada por la influencia del agujero, retoma su dirección inicial.

Figura 70. Variación angular local contra el tamaño de grieta – Geometría 22.



Por otro lado, haciendo referencia al ángulo local de inclinación de la trayectoria, se inicia con un ángulo de magnitud considerable en sentido horario, el cual disminuye notablemente para el segundo incremento debido a que al ser una magnitud medida de manera local, sus posteriores incrementos tienen una variación mínima hasta que el cambio de inclinación en la trayectoria sea muy notorio, lo cual ocurre en el instante de aproximación hacia el agujero.

Lo anterior muestra que los factores de intensidad de esfuerzo para modo II de fractura, tienen mayores magnitudes durante la grieta incipiente y su fase final, la primera, siendo la pauta inicial que determina la dirección de propagación que tendrá la grieta a lo largo de la probeta, y la última, la fase en la que se logra el mayor cambio de la magnitud de inclinación de los incrementos, para los casos donde hay una colisión con el concentrador de esfuerzos.

6. Conclusiones

Los resultados obtenidos evidencian como la posición del agujero respecto a la entalla y a la distribución de momento flector a lo largo de la probeta, tiene consecuencia en cómo se comportan los factores de intensidad de esfuerzo y por consiguiente la trayectoria de propagación de la grieta. Observando que, para configuraciones geométricas cuyo agujero se encuentra ubicado entre la entalla y la zona de mayor momento flector, la grieta se curva a medida que aumenta el K_{II} y disminuye el K_I con mayores tasas de crecimiento, a su vez, para geometrías cuyo agujero se encuentra antes de la entalla y de la zona de mayor momento flector, inicialmente la grieta tiende a tener una disminución del K_{II} y aumento del K_I , disminuyendo notoriamente la curvatura inicial de la grieta y ubicándola en una zona con menor magnitud de momento, retrasando notoriamente la tasa de crecimiento de grieta por fatiga.

Respecto a las trayectorias obtenidas, se evidencia un buen acercamiento entre los resultados experimentales y las simulaciones, a pesar de la dificultad de medición causada por la gran deformación y la presencia de pandeo producidos experimentalmente al final de los ensayos.

En cuanto a los porcentajes de error obtenidos en la variación del tamaño de grieta contra el número de ciclos para las geometrías 21, 22 y 24, se presume que la alta discrepancia obtenida podría deberse a que el enfoque lineal elástico utilizado por el método dual de elementos de contorno, puede no ser muy fiable para la condición plástica que se genera en la punta de la grieta, afectada por los concertadores de esfuerzo ubicados en su trayectoria temprana y en dirección a la zona de mayor momento. Esto se evidencia en la disminución del porcentaje de error a medida que los concertadores se alejan hacia el centro de la probeta.

El método de procesamiento digital de imágenes presentó gran dificultad de medición para tamaño de grieta inferiores a 3 milímetros, causando una amplia incertidumbre en el cálculo de la tasa de crecimiento de grieta al inicio de la propagación.

En general se puede concluir que el estudio de propagación de grietas por fatiga presenta una amplia sensibilidad en cuanto a la geometría de las probetas, esto se pudo evidenciar en las diferencias de trayectoria y número de ciclos de todas las probetas ensayadas y especialmente en las dos configuraciones de la geometría 27. Estas variaciones pueden darse por las tolerancias del método de manufactura, así como las posibles imperfecciones en el montaje.

7. Recomendaciones

Se recomienda configurar el ensayo para disminuir con mayor frecuencia la velocidad de aplicación de la carga en la región de crecimiento inestable, , se estima que de esta manera se podrían obtener datos más precisos y en mayor cantidad.

En cuanto a la captura de las imágenes, se considera importante recomendar el uso de un lente macro con una mayor resolución, aumentando la calidad, reduciendo la posible distorsión óptica y por consiguiente, disminuyendo el error al momento de realizar las mediciones del tamaño de grieta.

Se recomienda establecer límites de desplazamiento durante la ejecución del ensayo, con el fin de evitar el pandeo de la probeta al momento de la falla, además de prestar minuciosa atención al posicionamiento inicial de la probeta durante el montaje experimental.

Respecto a las geometrías 21, 22 y 24, se recomienda aumentar el tamaño de la muestra a fin de obtener una mayor trazabilidad en los resultados.

8. Referencias

- ASTM. (2023). *Standard Test Method for Linear-Elastic Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials*.
- Benachour, M., Hadjoui, A., & Benachour, N. (2010). Effect of geometrical and loading parameters on fatigue crack growth of stainless steel 316L. *ASME 2010 10th Biennial Conference on Engineering Systems Design and Analysis. ESDA2010*, 1, 351–355.
<https://doi.org/10.1115/ESDA2010-24055>
- Brumsen, M. (2011). Case Description: The ICE Train Accident near Eschede. *Issues in Business Ethics*, 28, 157–168. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9334-9_16/FIGURES/16_5_189875_1_EN
- Chambel, P., Martins, R. F., & Reis, L. (2016). Research on fatigue crack propagation in CT specimens subjected to loading modes I, II or III. *Procedia Structural Integrity*, 1, 134–141.
<https://doi.org/10.1016/J.PROSTR.2016.02.019>
- Díaz-Rodríguez, J. G., Mantilla-Villalobos, J. A., Bohórquez-Becerra, O. R., Gómez-Gamboa, E., & Del Jesús Martínez, M. (2024). Experimental and Numerical Evaluation of Equivalent Stress Intensity Factor Models under Mixed-Mode (I+II) Loading. *Infrastructures* 2024, 9(3), 45.
<https://doi.org/10.3390/INFRASTRUCTURES9030045>
- E647 Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates*. (n.d.). Retrieved October 16, 2023, from <https://www.astm.org/standards/e647>
- Hernández Albañil, H., Espejo Mora, E., & Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería, Departamento de Mecánica. (2002). *Mecánica de fractura y análisis de falla*.
https://books.google.com/books/about/Mec%C3%A1nica_de_fractura_y_an%C3%A1lisis_de_fal.html?hl=es&id=4thN1y4un2UC
- Hertzberg, R. W., Nordberg, H., & Manson, J. A. (1970). Fatigue crack propagation in polymeric materials. *Journal of Materials Science*, 5(6), 521–526.
<https://doi.org/10.1007/BF00556040/METRICS>
- Hsu, J. P., Wang, D., Kahn, H., Ernst, F., Michal, G. M., & Heuer, A. H. (2013). Fatigue crack growth in interstitially hardened AISI 316L stainless steel. *International Journal of Fatigue*, 47, 100–105.
<https://doi.org/10.1016/J.IJFATIGUE.2012.07.014>
- Ingraffea AR, & Grigoriu M. (1990). *Probabilistic Fracture Mechanics: A Validation of Predictive Capability*.
https://www.researchgate.net/publication/235186821_Probabilistic_Fracture_Mechanics_A_Validation_of_Predictive_Capability
- Introducción a la mecánica de la fractura y análisis de fallas*. (n.d.).
- James, L. A. (1976). Fatigue-crack propagation in austenitic stainless steels. *Atomic energy Review*, 14, 1.

- Jørgensen, J. B., Kildegaard, C., & Sørensen, B. F. (2018). Design of four-point SENB specimens with stable crack growth. *Engineering Fracture Mechanics*, *191*, 168–186.
<https://doi.org/10.1016/J.ENGFRACTMECH.2018.01.018>
- Kanchanomai, C., Phiphobmongkol, V., & Muanjan, P. (2008). Fatigue failure of an orthopedic implant – A locking compression plate. *Engineering Failure Analysis*, *15*(5), 521–530.
<https://doi.org/10.1016/J.ENGFAILANAL.2007.04.001>
- Kiani Khouzani, M., Bahrami, A., & Eslami, A. (2018). Metallurgical aspects of failure in a broken femoral HIP prosthesis. *Engineering Failure Analysis*, *90*, 168–178.
<https://doi.org/10.1016/J.ENGFAILANAL.2018.03.018>
- Mantilla, J. A., Martínez, M., Villegas, D. F., Bohorquez, O., & Díaz, J. G. (2024). *Dual boundary element method for comparative studies on fatigue crack growth models*. *Engineering Structures and Materials*, 409–422. <https://doi.org/10.5267/j.esm.2024.5.001>
- McEvily, A. J., Ishihara, S., & Mutoh, Y. (2016). 1989 DC-10 crash: A cold case mystery solved. *Engineering Fracture Mechanics*, *157*, 154–165.
<https://doi.org/10.1016/J.ENGFRACTMECH.2015.10.003>
- Plata, J. A. G., Bonazzi, L. H. C., Sarzosa, D. F. B., & Ruggieri, C. (2023). Effect of compression precracking on the near threshold fatigue crack propagation in an AISI 316L stainless steel. *International Journal of Fatigue*, *170*, 107553.
<https://doi.org/10.1016/J.IJFATIGUE.2023.107553>
- Rice, J. R. (1968). A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks. *Journal of Applied Mechanics*, *35*(2), 379–386.
<https://doi.org/10.1115/1.3601206>
- Ruiz-Muñoz, G. A. (2018). Method to analyse multiple site damage fatigue before and after crack coalescence. *Engineering Fracture Mechanics*, *188*, 416–430.
<https://doi.org/10.1016/J.ENGFRACTMECH.2017.09.011>
- Schönherr, J. A., Duarte, L., Madia, M., Zerbst, U., Geilen, M. B., Klein, M., & Oechsner, M. (2022). Robust determination of fatigue crack propagation thresholds from crack growth data. *Materials 2022, Vol. 15, Page 4737*, *15*(14), 4737. <https://doi.org/10.3390/MA15144737>
- Griza, S. (2008). | *Fatigue failure analysis of a specific total hip prosthesis stem design*. *International Journal of Fatigue*, *30*(8), 1325–1332.
<https://scihub.se/https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2007.11.005>
- Shao, R., Jia, P., & Dong, F. (2012). Dynamic characteristics of cracked gear and three-dimensional crack propagation analysis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, *227*(6), 1341–1361.
<https://doi.org/10.1177/0954406212461326>

9. Apéndices

Apéndice A. Datos obtenidos para la geometría 1.

I	DBEM			Probeta 1			Probeta 2			Probeta 3		
	Δa	N	KI	Δa	N	KI	Δa	N	KI	Δa	N	KI
0	0,00	0	20,49	0,00	0	20,49	0,00	0	20,49	0,00	0	20,49
1	0,92	28778	22,29	3,32	12022	27,02	3,30	102152	26,98	3,08	96143	26,62
2	1,84	49157	23,99	3,42	14025	27,20	3,36	104155	27,10	3,57	98146	27,44
3	2,76	64187	25,63	3,50	16030	27,32	3,36	106158	27,10	4,60	100149	29,20
4	3,68	75582	27,24	3,66	18035	27,60	3,50	108161	27,32	4,98	102153	29,85
5	4,60	84386	28,86	3,69	20038	27,65	4,10	110164	28,34	5,38	106158	30,56
6	5,52	91281	30,50	3,88	22042	27,97	4,28	112167	28,65	5,76	108161	31,22
7	6,44	96729	32,17	3,92	28054	28,04	4,34	114170	28,76	6,07	110164	31,78
8	7,36	101061	33,90	3,93	30058	28,05	4,39	116173	28,85	6,42	112167	32,40
9	8,28	104519	35,70	4,98	32062	29,86	4,41	118176	28,88	6,42	114170	32,40
10	9,20	107284	37,59	5,12	34065	30,10	4,44	120179	28,93	7,15	116173	33,75
11	10,12	109496	39,58	6,07	36070	31,77	6,51	122182	32,56	7,51	118176	34,43
12	11,04	111264	41,70	6,34	38074	32,26	6,70	124185	32,91	9,20	120179	37,82
13	11,96	112674	43,95	6,51	42081	32,57	6,78	126188	33,06	9,44	122182	38,31
14	12,88	113796	46,35	7,43	44086	34,27	7,04	128191	33,53	10,42	124185	40,49
15	13,80	114685	48,94	7,89	46090	35,15	8,13	130194	35,62	11,03	126188	41,92
16	14,72	115387	51,74	8,30	48094	35,97	8,14	132198	35,65	11,93	128191	44,13
17	15,64	115937	54,77	8,50	50098	36,37	8,30	134200	35,97	12,11	130194	44,60
18	16,56	116365	58,07	8,67	52102	36,71	8,85	136203	37,08	12,68	132197	46,08
19	17,48	116697	61,67	10,20	54106	39,98	9,52	138206	38,50	13,90	134200	49,55
20	18,40	116952	65,63	11,25	56110	42,44	10,36	140209	40,35	15,09	136203	53,29
21	19,32	117146	70,00	12,49	58114	45,58	11,24	142212	42,41	17,73	138206	63,20
22	20,24	117292	74,83	13,13	60118	47,33	12,01	144215	44,31	18,49	138769	66,59
23	21,16	117401	80,21	15,42	62122	54,42	13,16	146218	47,40	19,34	139179	70,68
24	22,08	117481	86,24	17,68	64126	63,03	13,23	148221	47,60	20,49	139560	76,87
25	23,00	117539	93,02	20,12	65609	74,78	15,22	150224	53,73	21,31	139768	81,81
26	23,92	117581	100,70				18,32	150906	65,82			
27	24,84	117610	109,45				19,89	151379	73,56			
28	25,76	117631	119,50									
29	26,68	117644	131,14									
30	27,60	117653	144,74									
31	28,52	117659	160,79									
32	29,44	117663	179,95									
33	30,36	117665	203,19									

I= Número del incremento

Apéndice B. Datos obtenidos para la geometría 6.

I	DBEM					Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3	
	Δa	N	KI	KII	Keq	Δa	N	Δa	N	Δa	N
0	0,00	0	21,05	1,32	21,177	0,00	0	0,00	0	0,00	0
1	0,92	24827	23,16	0,25	23,161	3,16	72107	3,18	70104	3,27	72107
2	1,84	41903	25,07	-0,15	25,075	3,47	74110	3,46	72107	3,60	74110
3	2,76	54184	26,93	0,43	26,943	3,71	76113	3,69	74110	4,09	76113
4	3,68	63263	28,81	0,21	28,813	4,01	78116	4,16	76113	4,33	78116
5	4,60	70100	30,70	0,14	30,699	4,28	80119	4,55	78116	4,53	80119
6	5,52	75322	32,62	0,30	32,623	4,53	82122	5,05	80119	4,68	82122
7	6,44	79353	34,59	0,30	34,598	5,18	84125	5,53	82122	5,15	84125
8	7,36	82487	36,64	0,08	36,643	5,34	86128	6,21	84125	5,27	86128
9	8,28	84936	38,76	0,18	38,761	5,54	88131	6,43	86128	5,44	88131
10	9,20	86859	40,98	0,35	40,982	6,03	90134	7,11	88131	5,58	90134
11	10,12	88371	43,31	0,27	43,317	6,60	92137	7,57	90134	5,78	92137
12	11,04	89561	45,78	0,17	45,780	6,97	94140	8,06	92137	6,17	94140
13	11,96	90497	48,39	0,13	48,393	7,57	96143	8,55	94140	6,57	96143
14	12,88	91233	51,16	0,11	51,159	8,16	98146	8,97	96143	7,14	98146
15	13,80	91812	54,11	0,29	54,111	8,46	100149	9,81	98146	7,43	100149
16	14,72	92265	57,27	-0,28	57,271	9,42	102152	10,40	100149	7,87	102152
17	15,64	92619	60,66	0,22	60,659	10,03	104155	11,17	102152	8,16	104155
18	16,56	92895	64,32	0,37	64,326	10,79	106158	12,12	104155	8,30	106158
19	17,48	93108	68,28	-0,49	68,285	11,60	108161	13,14	106158	8,90	108161
20	18,40	93272	72,60	0,28	72,598	12,43	110164	14,96	108089	9,75	109720
21	19,32	93398	77,31	-0,32	77,308	14,32	112167	15,60	108161	10,14	112167
22	20,24	93493	82,47	0,24	82,475	16,02	114170	15,94	108632	11,59	114170
23	21,16	93565	88,19	-0,28	88,188	18,20	115628	17,12	109243	12,15	116173
24	22,08	93618	94,52	-0,38	94,524	19,57	116173	19,54	110163	12,68	118176
25	23,00	93658	101,58	0,54	101,588	19,72	116360			14,35	120179
26	23,92	93687	109,52	-0,89	109,527	20,27	116517			16,36	122182
27	24,84	93707	118,51	-0,51	118,514	20,95	116673			16,50	122948
28	25,76	93722	128,73	-0,29	128,728					18,05	123649
29	26,68	93732	140,44	-0,76	140,441					19,38	124185
30	27,60	93739	154,03	-0,22	154,034					20,62	124591
31	28,52	93743	169,93	-0,77	169,939						
32	29,44	93746	188,76	-0,98	188,770						
33	30,36	93748	211,41	-1,87	211,432						

I= Número del incremento

Apéndice C. Datos obtenidos para la geometría 16.

I	DBEM					Probeta 1		Probeta 2		Probeta 3	
	Δa	N	KI	KII	Keq	Δa	N	Δa	N	Δa	N
0	0,00	0	22,04	1,63	22,215	0,00	0,00	0,00	0	0,00	0
1	0,92	20207	24,30	0,26	24,309	2,51	64095	2,93	54080	3,24	70104
2	1,84	34024	26,35	-0,11	26,355	3,75	66098	3,89	56083	3,34	72107
3	2,76	43881	28,38	0,40	28,385	3,77	68101	4,19	58086	3,86	74110
4	3,68	51097	30,42	0,28	30,423	3,80	70104	4,56	60090	4,00	76113
5	4,60	56473	32,51	0,21	32,507	4,01	72107	4,88	62092	4,23	78116
6	5,52	60524	34,66	0,22	34,662	4,88	74110	5,34	64095	4,65	80119
7	6,44	63603	36,90	0,28	36,898	4,91	76113	5,83	66098	5,01	82122
8	7,36	65957	39,23	-0,20	39,234	4,96	78116	6,23	68101	5,50	84125
9	8,28	67764	41,69	0,33	41,698	5,79	80119	6,91	70104	6,80	86128
10	9,20	69153	44,30	0,31	44,304	6,69	82122	7,46	72107	7,28	88131
11	10,12	70222	47,07	-0,19	47,069	7,48	84125	8,35	74110	8,34	90134
12	11,04	71044	50,00	-0,24	50,006	8,88	86128	9,10	76113	10,31	92137
13	11,96	71677	53,15	-0,23	53,148	10,39	88131	10,53	78116	12,39	94140
14	12,88	72162	56,50	-0,15	56,501	12,16	90134	12,52	80119	16,40	96143
15	13,80	72535	60,07	-0,43	60,077	14,92	92137	13,89	81174	17,11	96475
16	14,72	72821	63,89	-0,48	63,895	15,61	92420	15,52	82122	17,75	96655
17	15,64	73040	67,92	-0,73	67,935						
18	16,56	73208	72,19	-1,04	72,212						
19	17,48	73337	76,67	-1,11	76,698						
20	18,40	73437	81,32	-1,15	81,342						
21	19,32	73514	86,13	-0,84	86,141						
22	20,24	73575	91,00	-0,95	91,015						
23	21,16	73623	95,75	-1,49	95,787						
24	22,08	73662	100,47	-1,29	100,498						
25	23,00	73694	105,17	-0,98	105,186						
26	23,92	73720	110,11	0,38	110,111						
27	24,84	73742	115,80	1,71	115,840						
28	25,76	73758	123,57	1,97	123,618						
29	26,68	73770	134,33	1,92	134,367						
30	27,60	73779	148,09	1,98	148,125						
31	28,52	73784	164,84	1,98	164,871						
32	29,44	73787	184,91	1,10	184,919						
33	30,36	73789	208,84	-1,45	208,852						

I= Número del incremento

Apéndice D. Datos obtenidos para la geometría 27-Configuración 1

I	DBEM					Probeta 2		Probeta 3		Probeta 6	
	Δa	N	KI	KII	Keq	Δa	N	Δa	N	Δa	N
0	0,00	0	26,90	-2,19	27,163	0,00	0	0,00	0	0,00	0
1	0,92	9091	28,60	-0,44	28,607	3,13	64095	3,29	58086	2,95	80119
2	1,84	16633	29,45	-0,32	29,451	3,43	66098	3,48	60089	3,68	82122
3	2,76	23573	29,70	-0,37	29,704	3,45	68101	3,50	62092	3,72	84125
4	3,68	30563	29,35	-0,44	29,356	3,54	70104	3,61	64095	3,94	86128
5	4,60	38239	28,47	-0,34	28,471	3,64	72107	3,89	66098	4,19	88131
6	5,52	47343	27,16	-0,21	27,164	3,76	74110	4,06	68101	4,47	90134
7	6,44	58655	25,76	0,40	25,768	3,82	76113	4,28	70104	4,53	92137
8	7,36	70699	26,30	0,78	26,333	3,87	78116	4,63	72107	4,64	94140
9	8,28	79981	29,43	0,68	29,449	3,89	80119	4,81	74110	4,68	96143
10	9,20	85637	33,14	0,49	33,153	4,08	82122	4,86	76113	4,74	98146
11	10,12	89109	36,76	0,28	36,760	4,23	84125	5,04	78116	4,81	100149
12	11,04	91386	40,16	-0,33	40,165	4,33	86128	5,48	80119	4,84	102152
13	11,96	92968	43,43	-0,17	43,430	4,37	88131	5,52	82122	5,06	104155
14	12,88	94110	46,62	-0,11	46,625	4,38	90134	5,57	84125	5,13	106158
15	13,80	94958	49,83	-0,27	49,828	4,41	92137	5,69	86128	5,20	108161
16	14,72	95597	53,10	-0,10	53,099	4,43	94140	5,80	88131	5,80	110164
17	15,64	96084	56,50	-0,18	56,498	4,45	96143	5,91	90134	6,02	112167
18	16,56	96456	60,08	-0,29	60,085	4,50	98146	6,04	92137	6,34	114170
19	17,48	96742	63,90	-0,16	63,904	4,61	100149	6,10	94140	6,83	116173
20	18,40	96960	68,02	-0,16	68,022	4,93	102152	6,20	96143	6,95	118176
21	19,32	97127	72,45	-0,05	72,455	4,98	104155	7,10	98146	7,19	120179
22	20,24	97253	77,32	-0,26	77,324	5,02	106158	7,14	108161	7,53	122182
23	21,16	97348	82,62	-0,19	82,624	5,05	108161	7,19	110164	7,87	124185
24	22,08	97419	88,47	-0,48	88,473	5,10	110164	7,40	112167	8,33	126188
25	23,00	97471	94,97	-0,24	94,974	5,62	112167	7,71	116173	8,44	128191
26	23,92	97510	102,25	-0,43	102,249	5,66	114170	8,83	118176	8,58	130194
27	24,84	97538	110,40	-0,42	110,400	5,71	116173	10,17	122182	9,91	132197
28	25,76	97558	119,63	-0,57	119,637	5,87	118176	10,98	124185	11,31	134200
29	26,68	97572	130,19	-0,75	130,198	6,20	120180	12,10	126188	12,14	136203
30	27,60	97581	142,40	-0,28	142,403	6,64	122182	15,11	128191	12,87	138206

31	28,52	97588	156,57	-0,62	156,575	6,71	124185	18,67	130194	14,05	140209
32	29,44	97592	173,26	-1,13	173,276	6,97	126188	19,03	130297	14,91	142212
33	30,36	97594	193,14	-1,85	193,164	7,03	128191			17,57	144215
34						7,11	130194			17,89	144315
35						8,12	132197			18,96	144921
36						8,99	134200			21,10	145871
37						9,43	136203			21,53	146046
38						10,04	138206				
39						11,05	140209				
40						12,33	142212				
41						14,04	144215				
42						15,80	146218				
43						17,61	147089				
44						19,95	148221				

I= Número del incremento

Apéndice E. Datos obtenidos para la geometría 27-Configuración 2.

I	DBEM					Probeta 1		Probeta 4		Probeta 5	
	Δa	N	KI	KII	Keq	Δa	N	Δa	N	Δa	N
0	0,00	0	26,24	-2,00	26,467	0,00	0	0,00	0	0,00	0
1	0,92	10149	27,89	-0,30	27,891	3,27	60089	3,13	56083	3,22	56083
2	1,84	18539	28,75	-0,35	28,757	3,49	62092	3,43	58086	3,61	58086
3	2,76	26195	29,07	-0,19	29,070	3,75	64095	3,58	60089	3,69	62092
4	3,68	33778	28,88	-0,02	28,880	3,96	66098	3,69	62092	4,06	64095
5	4,60	41814	28,31	-0,26	28,311	4,13	68101	3,81	64095	4,21	66098
6	5,52	50668	27,61	0,47	27,626	5,33	70104	3,89	66098	4,45	68101
7	6,44	59915	27,72	0,45	27,732	5,48	72107	4,13	68100	4,57	70105
8	7,36	68067	29,38	0,47	29,391	5,62	74110	4,61	70104	4,57	72107
9	8,28	74068	32,09	0,53	32,102	5,70	76114	5,01	72107	4,66	74110
10	9,20	78138	35,19	0,39	35,193	5,78	82122	5,28	74110	4,79	76113
11	10,12	80900	38,35	0,30	38,358	5,94	84125	5,53	76113	5,02	78116
12	11,04	82828	41,49	-0,28	41,489	6,08	86128	5,66	78116	5,53	80119
13	11,96	84218	44,59	0,35	44,595	6,59	94140	5,70	80119	5,67	82122
14	12,88	85244	47,70	-0,10	47,703	7,52	96143	5,88	82122	5,74	84125
15	13,80	86014	50,87	-0,17	50,871	7,61	98146	6,22	84125	6,05	86129
16	14,72	86600	54,16	-0,39	54,166	9,92	102152	6,54	86128	6,56	88131
17	15,64	87047	57,60	0,31	57,600	10,89	102152	6,86	88131	6,76	90134
18	16,56	87390	61,23	-0,39	61,229	12,18	104155	7,50	90134	7,23	92137
19	17,48	87653	65,13	0,19	65,136	12,37	106158	8,02	92137	7,57	94140

20	18,40	87854	69,34	-0,41	69,345	16,52	108968	8,58	94140	8,28	96143
21	19,32	88007	73,89	-0,50	73,897	19,17	110164	9,03	96143	9,35	98146
22	20,24	88123	78,84	0,52	78,841			10,13	98146	9,97	100149
23	21,16	88210	84,29	-0,14	84,287			10,86	100149	10,67	102152
24	22,08	88275	90,28	-0,45	90,288			11,25	102152	11,74	104155
25	23,00	88323	96,99	-0,58	96,998			12,84	104155	12,77	106158
26	23,92	88358	104,48	-0,39	104,485			15,02	106158	14,72	108161
27	24,84	88384	112,92	-0,62	112,928			15,73	106614	17,09	110164
28	25,76	88402	122,50	-0,17	122,503			15,95	106931	20,91	111861
29	26,68	88414	133,48	-0,75	133,483			16,87	107325		
30	27,60	88423	146,10	-0,88	146,104			17,35	107623		
31	28,52	88428	160,84	-0,66	160,842			17,94	107786		
32	29,44	88432	178,28	-0,53	178,278			18,51	108073		
33	30,36	88435	198,94	-1,54	198,961			18,68	108162		
34								18,89	108297		
35								19,28	108554		
36								19,77	108723		
37								20,19	108834		

Apéndice F. Datos obtenidos para la geometría 21.

DBEM						Probeta 1	
I	Δa	N	KI	KII	Keq	Δa	N
0	0,00	0	22,49	1,20	22,583	0,00	0
1	0,92	18313	25,06	0,15	25,061	0,92	17778
2	1,84	30163	27,50	0,44	27,511	1,84	28768
3	2,76	38194	29,95	0,21	29,954	2,76	35779
4	3,68	43824	32,37	0,26	32,375	3,68	40332
5	4,60	47907	34,70	0,30	34,705	4,60	43340
6	5,52	50982	36,85	0,45	36,863	5,52	45370
7	6,44	53406	38,68	0,56	38,689	6,44	46788
8	7,36	55431	39,99	0,55	40,005	7,36	47826
9	8,28	57246	40,66	0,49	40,669	8,28	48653
10	9,20	58982	40,81	0,29	40,818	9,20	54619
11	10,12	60665	41,25	-0,66	41,261	10,12	60203
12	11,04	62145	43,42	-0,67	43,435		
13	11,96	63250	47,49	-0,78	47,514		
14	12,88	63978	52,82	-0,56	52,831		
15	13,80	64432	59,26	0,16	59,260		
16	14,72	64701	67,45	0,94	67,466		
17	15,64	64848	79,41	0,88	79,427		
18	16,56	64912	101,93	-1,13	101,949		

I= Número del incremento

Apéndice G. Datos obtenidos para la geometría 22.

DBEM						Probeta 1	
I	Δa	N	KI	KII	Keq	Δa	N
0	0,00	0	21,99	1,54	22,149	0,00	0
1	0,92	20360	24,30	0,27	24,302	2,09	58086
2	1,84	34169	26,37	0,13	26,374	2,28	60089
3	2,76	44000	28,39	0,29	28,397	2,36	62092
4	3,68	51221	30,39	0,39	30,393	2,49	64095
5	4,60	56656	32,36	0,37	32,362	2,71	66098
6	5,52	60831	34,31	0,32	34,314	3,62	68101
7	6,44	64090	36,26	0,37	36,270	4,91	70104
8	7,36	66668	38,23	0,24	38,234	5,14	72107
9	8,28	68726	40,24	0,23	40,244	5,23	74110
10	9,20	70375	42,34	0,23	42,346	5,67	76113
11	10,12	71697	44,60	-0,24	44,598	6,54	78116
12	11,04	72748	47,06	0,33	47,067	6,87	80119
13	11,96	73576	49,84	-0,34	49,839	6,96	82122

14	12,88	74219	52,93	0,10	52,927	7,19	84125
15	13,80	74711	56,41	0,16	56,406	9,47	86128
16	14,72	75084	60,20	0,30	60,203	9,54	88131
17	15,64	75365	64,29	0,35	64,293	10,63	90134
18	16,56	75576	68,60	0,74	68,607	11,46	92137
19	17,48	75737	73,00	0,68	73,007	13,37	94140
20	18,40	75861	77,36	0,93	77,377	16,95	95805
21	19,32	75958	81,59	0,82	81,603	17,50	96708
22	20,24	76036	85,68	0,42	85,680		
23	21,16	76099	89,85	-0,36	89,850		
24	22,08	76150	94,72	-1,27	94,745		
25	23,00	76189	101,29	-0,90	101,304		
26	23,92	76218	110,19	-1,15	110,206		
27	24,84	76237	121,71	-1,41	121,733		
28	25,76	76249	136,28	-0,42	136,281		
29	26,68	76257	154,73	1,32	154,749		
30	27,60	76261	178,80	1,87	178,828		
31	28,52	76263	211,80	2,56	211,843		
32	29,44	76264	264,32	-3,84	264,408		

I= Número del incremento

Apéndice H. Datos obtenidos para la geometría 24.

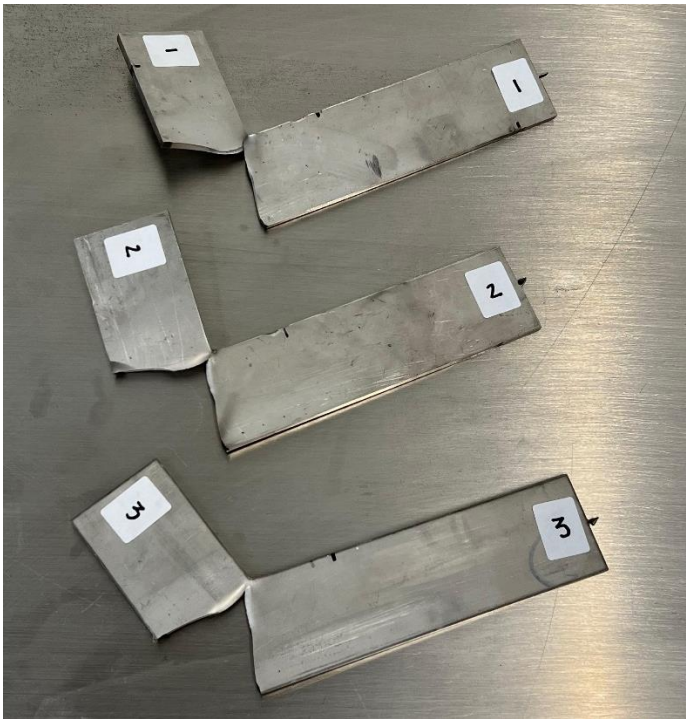
I	Δa	N	DBEM			Probeta 1	
			KI	KII	Keq	Δa	N
0	0,00	0	22,58	1,02	22,650	0,00	0
1	0,92	17778	25,38	0,07	25,376	0,21	20030
2	1,84	28768	28,20	0,21	28,204	0,23	22033
3	2,76	35779	31,21	0,27	31,209	0,26	24036
4	3,68	40332	34,40	0,38	34,407	0,29	26039
5	4,60	43340	37,76	0,60	37,772	0,31	28042
6	5,52	45370	41,21	0,40	41,217	0,47	32048
7	6,44	46788	44,48	0,62	44,495	0,85	34051
8	7,36	47826	47,53	-0,81	47,548	1,20	36053
9	8,28	48653	38,10	22,09	51,712	1,89	38057
10	9,20	54619	20,18	12,14	27,812	1,94	40059
11	10,12	60203	1475,32	12,78	1475,483	2,03	42063
12	11,04					2,62	44066
13	11,96					2,96	46068
14	12,88					3,90	48071
15	13,80					6,16	50075
16	14,72					7,64	52078

I= Número del incremento

Apéndice I. Probetas ensayadas de la geometría 1.



Apéndice J. *Probetas ensayadas de la geometría 6.*



Apéndice K. *Probetas ensayadas de la geometría 16.*



Apéndice L. *Probetas ensayadas de la geometría 27, configuración 1 y configuración 2.*



Apéndice M. *Probetas ensayadas de las geometrías 21, 22 y 24.*

