

Análisis Experimental y Numérico del factor de Intensidad de Esfuerzo (KI) en modo de
esfuerzo mixto utilizando el Ensayo Arcan

Cristian Alfonso Meza Ortega y Fabian Andrés Cudriz Obregón

Trabajo de Grado para Optar por el Título de Ingeniero Mecánico

Director

William Pinto Hernández

Doctor en Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas

Escuela De Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2022

Tabla de Contenido

| | Pág. |
|--|-------------|
| 1. Descripción Del Problema..... | 9 |
| 2. Justificación | 11 |
| 3. Objetivos..... | 12 |
| 3.1 Objetivo General..... | 12 |
| 3.2 Objetivos Específicos..... | 12 |
| 4. Marco Teórico | 13 |
| 4.1 Ensayo Arcan | 13 |
| 4.1.1 Sujetador | 13 |
| 4.1.2 Semi – discos | 14 |
| 4.1.3 Probetas..... | 14 |
| 4.3 Fractura | 16 |
| 4.4 Clases de fracturas | 16 |
| 4.4.1 Fractura lineal elástica | 16 |
| 4.4.2 Fractura elastoplástica..... | 16 |
| 4.4.3 Colapso plástico..... | 16 |
| 4.5 Modos de fractura | 18 |
| 4.6 Grieta..... | 18 |
| 4.7 Medida de la tenacidad a fractura en régimen elástico lineal y condiciones de deformación plana y carga estática (KIC) | 18 |
| 4.7.1 Probeta compacta | 20 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.7.2 | Probeta flexión | 20 |
| 4.8 | Método de elementos finitos (MEF) | 20 |
| 5. | Análisis de la Información Recopilada..... | 21 |
| 6. | Metodología..... | 22 |
| 6.1 | Metodología Ensayo Arcan..... | 22 |
| 6.2 | Resultados | 25 |
| 6.2.1 | Modo I (90°) | 26 |
| 6.2.2 | Modo II (0°) | 27 |
| 6.2.3 | Modo Mixto (45°)..... | 28 |
| 7. | Metodología Parte Computacional | 31 |
| 7.1 | Geometría..... | 31 |
| 7.2 | Propiedades del Material..... | 33 |
| 7.3 | Mallado | 33 |
| 7.4 | Condiciones de Contorno y Análisis..... | 35 |
| 7.5 | Resultados Análisis 3D | 35 |
| 7.5.1 | Esfuerzos..... | 36 |
| 7.6 | Procedimiento Simulación 2D | 37 |
| 7.7 | Resultados Finales | 39 |
| 8. | Comparación de Resultados Numérica y Experimentalmente Para Modo L Y Modo LI de Falla..... | 42 |
| 9. | Conclusiones..... | 44 |
| | Referencias Bibliográficas | 45 |

Lista de Tablas

| | Pág. |
|---|-------------|
| Tabla 1. Resultados experimentales..... | 29 |
| Tabla 2. Resultados experimentales Ki..... | 31 |
| Tabla 3. Resultados KI y KII para los diferentes modos de falla. | 40 |
| Tabla 4. Relación porcentual entre KI y KII..... | 42 |
| Tabla 5. Resultados de Ki (Arcan) y Ki (Ansys)..... | 42 |
| Tabla 6. Porcentajes de error entre Ki (Arcan) y Ki (Ansys). | 44 |

Lista de Figuras

| | Pág. |
|--|-------------|
| Figura 1. Materiales usados en un avión..... | 10 |
| Figura 2. Chasis de automóvil. | 10 |
| Figura 3. Herramienta (Sujetador). | 13 |
| Figura 4. Herramienta (Semi - discos). | 14 |
| Figura 5. Probeta ensayo Arcan. | 15 |
| Figura 6. Categoría de fracturas de acuerdo con la extensión de la zona plástica. | 17 |
| Figura 7. Modos de fractura. | 18 |
| Figura 8. Probeta flexión y probeta compacta. | 19 |
| Figura 9. Ecuación para cálculo de KI para probetas de tracción compacta. | 20 |
| Figura 10. Ecuación para cálculo de KI para probetas de flexión. | 20 |
| Figura 11. Ensamble probeta y semidiscos. | 23 |
| Figura 12. Ubicación de sujetadores según el ángulo en análisis. | 24 |
| Figura 13. Acople ensayo arcan con maquina tracción. | 25 |
| Figura 14. Probeta fracturada (Modo I). | 26 |
| Figura 15. Gráfica F vs D (Modo I). | 26 |
| Figura 16. Probeta fracturada (Modo II). | 27 |
| Figura 17. Gráfica F vs D (Modo II). | 27 |
| Figura 18. Probeta fracturada (Modo mixto). | 28 |
| Figura 19. Gráfica F vs D (Modo mixto). | 28 |
| Figura 20. Grafica F vs D de todo el ensayo. | 29 |

| | |
|--|----|
| Figura 21. Modelo de Probeta..... | 32 |
| Figura 22. Modelo ensayo Arcan 3D..... | 32 |
| Figura 23. Propiedades del material de la probeta..... | 33 |
| Figura 24. Modelo 3D con malla..... | 34 |
| Figura 25. Detalle de refinamiento de la malla en la punta de la grieta..... | 34 |
| Figura 26. Condiciones de contorno sobre el modelo..... | 35 |
| Figura 27. Esfuerzos sobre la probeta en la dirección Z..... | 36 |
| Figura 28. Probeta 2D con malla..... | 37 |
| Figura 29. Selección del sistema de coordenadas en la probeta..... | 38 |
| Figura 30. Condiciones de contorno sobre superficie de la probeta..... | 39 |
| Figura 31. Resultado KII modelo 0°..... | 40 |
| Figura 32. Gráfico KI vs KII..... | 41 |
| Figura 33. Ki teórico Vs Ki Experimental..... | 43 |

Resumen

Título: Análisis Experimental y Numérico del factor de Intensidad de Esfuerzo (KI) en modo de esfuerzo mixto utilizando el Ensayo Arcan.*

Autor: Cristian Alfonso Meza Ortega y Fabian Andrés Cudriz Obregón.**

Palabras Clave: Fractura, intensidad, esfuerzo, Arcan, software, cizallamiento.

Descripción:

En este proyecto de grado se desarrolla una propuesta que permite definir factores de intensidad de esfuerzos para diferentes modos de falla basado en la implementación de un ensayo arcán a partir de modelos experimentales y modelos computacionales, se estudia el comportamiento de los factores de intensidad de esfuerzos K_I para materiales metálicos, en este caso el material utilizado fue una aleación de Aluminio Al 1100 H14 la cual es muy utilizada en las industrias automovilísticas y aeronáuticas.

En este proyecto se desarrollaron pruebas para diferentes modos de falla, 0° (modo 2 – cortante puro), 45° (modo mixto) y 90° (modo 1 – axial puro), dichas pruebas fueron realizadas de manera experimental y computacionalmente. En la parte experimental se utilizó un ensayo ARCAN, dicho modo de implementación y características se muestran en este documento, a partir del cual se obtuvieron valores de fuerzas y desplazamiento aplicados a la probeta en estudio, con los cuales se calcularon los factores de intensidad de esfuerzos K_I para cada uno de los modos de falla; para el desarrollo computacional de este proyecto se utilizó el software Ansys Workbench en el cual se desarrolló un modelo en elementos finitos que permitió estimar los factores de intensidad de esfuerzo para los diferentes modos de falla estudiados. Una vez se obtuvieron los resultados experimentales y computacionales se buscó realizar una comparación mediante la determinación de porcentajes de errores entre estos resultados. Con este estudio se pudo demostrar que la utilización del software Ansys Workbench es viable en la determinación de factores de intensidad de esfuerzo para diferentes modos de falla en ensayos tipo ARCAN aplicado a materiales metálicos.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Ingeniería mecánica. Director: William Pinto Hernández. Doctor en Ingeniería Mecánica.

Abstract

Title: Experimental and Numerical Analysis of the Stress Intensity (KI) factor in mixed stress mode using the Arcan Assay.*

Author(s): Cristian Alfonso Meza Ortega y Fabian Andrés Cudriz Obregón.**

Key Words: Fracture, intensity, effort, Arcan, software, shearing.

Description:

In this degree project, a proposal is developed that allows defining stress intensity factors for different failure modes based on the implementation of an Arcan test from experimental models and computational models, the behavior of stress intensity factors is studied. K_I for metallic materials, in this case the material used was a sheet of Aluminum Al 1100 H14 which is widely used in the automotive and aeronautical industries.

In this project, tests were developed for different failure modes, 0° (mode 2 – pure shear), 45° (mixed mode) and 90° (mode 1 – pure axial), these tests were carried out experimentally and computationally. In the experimental part, an ARCAN test was obtained, said implementation mode and characteristics are shown in this document, from which the values of forces and displacements applied to the specimen under study were changed, with which the intensity factors were calculated. K_I stresses for each of the failure modes; For the computational development of this project, the Ansys Workbench software was obtained in which a finite element model was developed that demonstrated the stress intensity factors for the different failure modes studied. Once the experimental and computational results were obtained, a comparison was sought by determining the error percentages between these results. With this study it was possible to demonstrate that the use of the AnsysWorkbench software is viable in the determination of stress intensity factors for different failure modes in ARCAN-type tests applied to metallic materials.

* Degree Work

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. Mechanical Engineering. Director: William Pinto Hernández. Doctor in Mechanical Engineering.

1. Descripción del problema

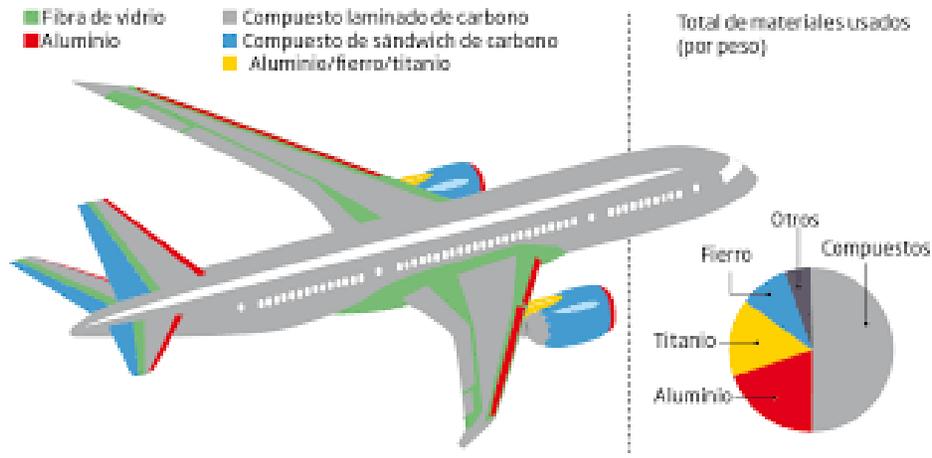
A lo largo de la historia de los metales, se han presentado numerosos estudios relacionados con las propiedades o características de comportamientos a condiciones específicas de uso a las cuales son sometidos. Estos estudios han conllevado a obtener o mejorar las propiedades mecánicas como la tenacidad, dureza, resistencia, elasticidad, maleabilidad, etc.

Dentro del grupo de aleaciones ligeras se encuentra el Aluminio, un metal que se caracteriza por su alta resistencia en relación a su peso y su resistencia a la corrosión. En la actualidad, el aluminio es utilizado industrialmente y dentro de sus usos se destaca la implementación de éste en sistemas de transportes, en la construcción de fuselajes de aeronaves se utiliza alrededor de un 20% de aluminio (Figura 1), embarcaciones, chasis de motocicletas y automóviles donde la gran parte de ellos se elabora en aluminio (Figura 2). En general, se utiliza para todos aquellos sistemas en los que se necesiten metales resistentes y ligeros.

Este material puede estar sometido a la acción de diferentes tipos de carga, donde los esfuerzos generados mantienen el riesgo de falla por fractura. Esta fractura puede ocasionar la falla o disminución de la vida útil de la pieza debido a la propagación de grietas.

Figura 1.

Materiales usados en la industria aeronáutica.



Nota. Tomado de Valdez Melgoza, L. A., Garay Reyes, C. G., Esparza Rodríguez, M. R., Maldonado Orozco, M. C., & Martínez Sánchez, R. (2019). *Aleaciones de aluminio - Calidad en la industria aeroespacial.* *Ciencia y desarrollo.* <https://www.cyd.conacyt.gob.mx/?p=articulo&id=370>

Figura 2.

Chasis de automóvil.



Nota. Tomado de (ALMEXA, s.f.). *Conozca los 10 principales usos del aluminio y detecte oportunidades para su industria.* <https://www.almexa.com.mx/blog/conozca-los-10-principales-usos-del-aluminio-y-detecte-oportunidades-para-su-industria/>

2. Justificación

La ingeniería aeronáutica se enfoca en el estudio, diseño y manufactura de aeronaves y cada día son más los retos a los que se enfrentan los ingenieros y el personal encargado de su diseño y fabricación. Como todo proceso donde se encuentra presente la ingeniería es necesaria la búsqueda de mejoras e innovación. Uno de los aspectos de mayor relevancia en todo este proceso de diseño y fabricación es sin duda el material. El aluminio y sus aleaciones es el material que juega un papel importante en el desarrollo de la aeronáutica gracias a sus propiedades como buena relación peso/costo, resistencia y alta conductibilidad eléctrica y térmica. Para las empresas encargadas del proceso de fabricación de aeronaves se hace de vital importancia estudiar y conocer todas sus características y comportamientos para preservar siempre la seguridad del personal. Los materiales usados en las estructuras o componentes presentan defectos físicos o imperfecciones, que con el paso de ciclos de cargas se convierten en grietas que se propagan disminuyendo la vida útil de los elementos mecánicos.

Según Castillo (2019):

En 2019 la FAA (Administración Federal de Aviación) de Estados Unidos, emitió una directiva de aeronavegabilidad, sobre unas grietas descubiertas en aviones Boeing B737NG. Para este mismo año Decenas de aviones Boeing 737 se han quedado en tierra para ser reparados, tras el hallazgo de grietas en la parte que conecta las alas con el fuselaje.

Lo anteriormente mencionado brinda un campo de estudio a desarrollar, debido a la necesidad de conocer sobre estas fallas que se presentan frecuentemente en aviones. Por tanto, nace la necesidad de desarrollar este proyecto con el fin de estudiar y evaluar el factor de intensidad de esfuerzos (Ki) ante esfuerzos mixtos, mediante el método de elementos finitos utilizando el

software ANSYS. Con la intención de conocer de manera real sobre el comportamiento del factor de intensidad de esfuerzos que se presentan en este material, se desea someter el aluminio a un ensayo tipo ARCAN que permita obtener valores de fuerza y desplazamiento cuando el material se encuentra sometido a diferentes estados de carga.

3. Objetivos

3.1 Objetivo General

Contribuir con la misión de la Universidad industrial de Santander, en la construcción de soluciones a necesidades propias y del entorno analizando experimental y numéricamente el factor de intensidad de esfuerzos (K_I) en modo de esfuerzo mixto a partir del ensayo ARCAN en placas de aluminio.

3.2 Objetivos Específicos

- Calcular la medida de la tenacidad a fractura en régimen elástico lineal, condiciones de deformación plana y carga estática (K_I), con los valores obtenidos a partir de la implementación del ensayo ARCAN para los ángulos 0° (modo 1 – cortante puro), 45° (modo mixto) y 90° (modo 2 – axial puro) en placas planas de aluminio, utilizando la ecuación aplicada a probetas de tracción compacta.
- Implementar un modelo en elementos finitos que permita calcular los factores de intensidad de esfuerzos (K_I) para Modo I, Modo II y Modo mixto, utilizando el ensayo ARCAN bajo condiciones de carga estática y régimen elástico lineal.
- Comparar los resultados obtenidos numérica y experimentalmente para el Modo I y Modo II de falla.

4. Marco Teórico

4.1 Ensayo Arcan

Un ensayo ARCAN es básicamente un ensayo de tracción al cual se le adiciona una herramienta que permite modificar los esfuerzos aplicados a la probeta en estudio. El sistema se compone principalmente de dos semidiscos y cada uno de estos cuenta con 8 orificios repartidos equidistantemente (15° entre orificio) entre 0° y 105° permitiendo someter el sistema al modo de falla que se desee analizar. Donde en 0° el sistema se encontraría en modo I (cortante pura) hasta llegar al modo II (axial puro) pasando por los diferentes Modos mixtos de falla.

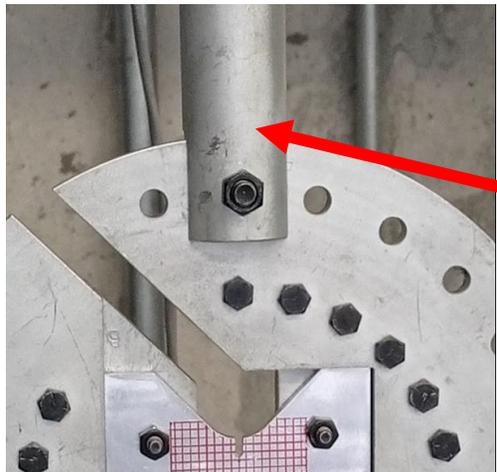
El sistema Arcan está compuesto de tres piezas principales y esenciales que al ensamblarse constituyen lo que llamamos ensayo Arcan y se describirán a continuación.

4.1.1 Sujetador

Es la pieza del sistema mediante el cual se une, el ensayo Arcan con la máquina de tracción actuando como medio para transmitir la fuerza que generara la fractura de la probeta a utilizar.

Figura 3.

Herramienta (Sujetador).

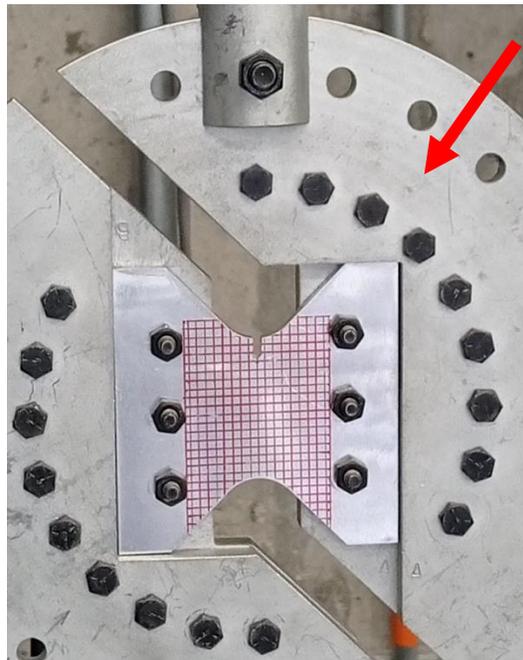


4.1.2 *Semi – discos*

Esta pieza está conformada por dos semidiscos que al unirse forman un disco y constituyen la parte principal del ensayo debido que es la pieza que se encarga de transmitir la fuerza de fractura a la probeta y la que permite la configuración del sistema para ejercer los diferentes modos de falla que se desean estudiar sobre la probeta (modo I, Modo II, Modo mixto).

Figura 4.

Herramienta (Semi - discos).

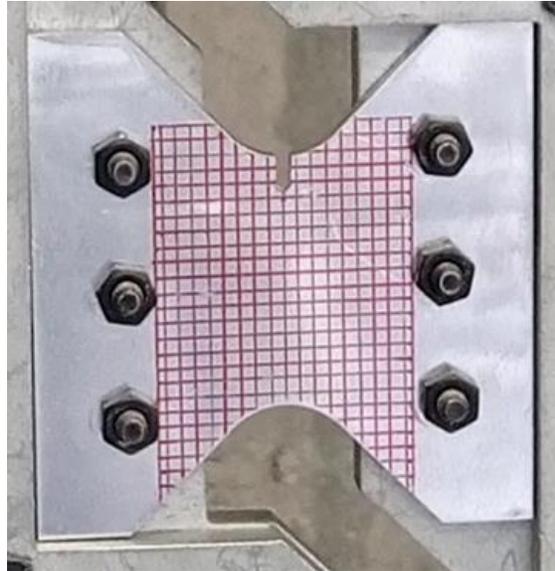


4.1.3 *Probetas*

Es la pieza que se desea estudiar, la cual está hecha de aluminio 1100-h14 y se une con todo el sistema por medio de 3 pernos a cada uno de los semidiscos. La probeta utilizada tiene unas dimensiones de 100 mm X 100 mm y un espesor de 5mm, también fue diseñada con una entalla o iniciación de grieta de 12 mm de longitud.

Figura 5.

Probeta ensayo Arcan.

**4.2 Mecánica de fractura**

La mecánica de fractura es la disciplina que actualmente se desarrolla como una herramienta muy importante en el análisis diseño y evaluación de componentes mecánicos y estructurales cuya finalidad es desarrollar estructuras más resistentes a defectos. Sus principales aplicaciones prácticas se enfocan en una mayor seguridad y economía en la operación, inspección y mantenimiento de estructuras y componentes en servicio y a reducir el problema de fallas inesperadas y catastróficas (Jaramillo,2008).

4.3 Fractura

Es definida como la separación o fragmentación de un sólido bajo la acción de una carga externa. Usualmente, para fracturar un material se requiere incrementar la carga progresivamente hasta cuando ocurre un proceso de nucleación (formación de pequeña fisura de tamaño inferior a la micra) y propagación de grietas (Jaramillo,2008). En los materiales de ingeniería, existen dos tipos de fractura: dúctil y frágil. La clasificación está basada en la capacidad del material para experimentar deformación plástica (Callister, 1995, p.194).

4.4 Clases de fracturas

Dependiendo de la deformación plástica la fractura se define como:

4.4.1 Fractura lineal elástica

Se presenta cuando la extensión de la zona plástica comprende una pequeña región en frente de la punta de la grieta y la deformación en el resto del cuerpo es elástica.

4.4.2 Fractura elastoplástica

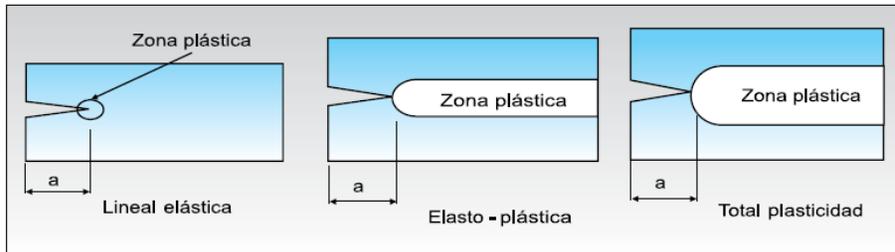
En este caso la zona plástica se extiende por todo el ancho de la pieza y el resto de la pieza permanece con deformación elástica.

4.4.3 Colapso plástico

Ocurre cuando la totalidad del cuerpo, o de la pieza presenta deformación plástica (Jaramillo, 2008, p.31).

Figura 6.

Clasificación de las fracturas según la extensión de la zona plástica.



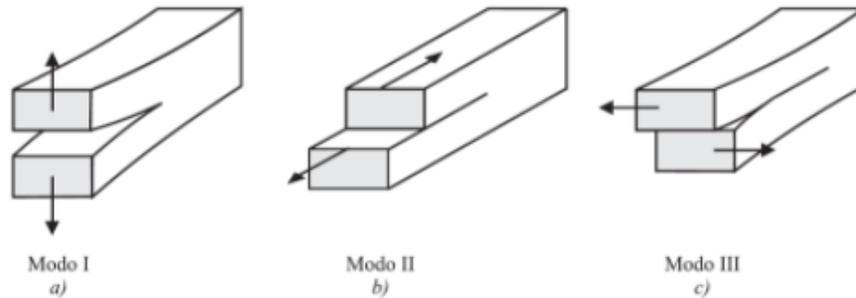
Nota. Tomado de Jaramillo, H. E. (2008). *Introducción a la mecánica de fractura y análisis de fallas*, p. 32.

4.5 Modos de falla

En fractura existen tres modos básicos para desplazamiento de las caras de una fisura cuando se encuentra sometida a tensión. El modo I de fractura llamado “modo de abertura” corresponde a la forma normal de separación de las caras de la grieta bajo tensión normal. El modo II, llamado “modo de deslizamiento” hace referencia al desplazamiento de las caras bajo la acción de tensiones de corte perpendiculares al frente de la grieta, y el modo III (modo de desgarre) también es producido por deslizamiento y cizalladura de los labios de la fisura en dirección paralela al frente la grieta. (Anglada et al., 2002, p.81)

Figura 7.

Modos de falla.



Nota. Tomado de Anglada. E., Alcalá. J., Llanes. L., Mateo. A. y Salan. M. (2002). *Fractura de materiales*. Universidad politécnica de Catalunya. p. 82.

4.6 Grieta

La grieta es una fisura o discontinuidad en la superficie externa o en la parte interna de una pieza mecánica que produce efectos como la reducción en la capacidad para soportar cargas, mayores desplazamientos y distorsiones, desempeño inadecuado y riesgo de falla, reducción de la vida útil del componente (Jaramillo,2008). Una grieta es toda aquella abertura incontrolada de un elemento superficial que afecta a todo su espesor (Bazaga, 2012).

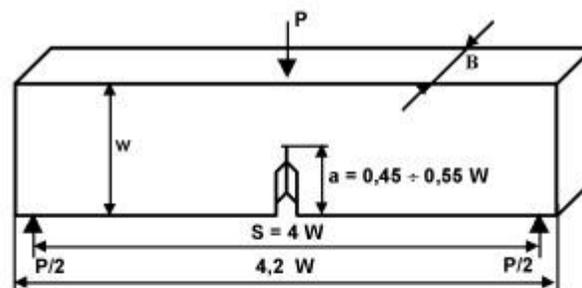
4.7 Medida de la tenacidad a fractura en régimen elástico lineal y condiciones de deformación plana y carga estática (KIC)

En principio, cualquier probeta agrietada para la que pudiera calcularse un único valor del factor de intensidad de tensiones en función de la carga externa aplicada, sería apropiada para la determinación experimental de KIC siempre que al alcanzarse la carga crítica de propagación de la grieta se cumplieran las condiciones de deformación plana y que el análisis elástico lineal de tensiones siguiera siendo aplicable. La experiencia acumulada, como consecuencia de la aplicación

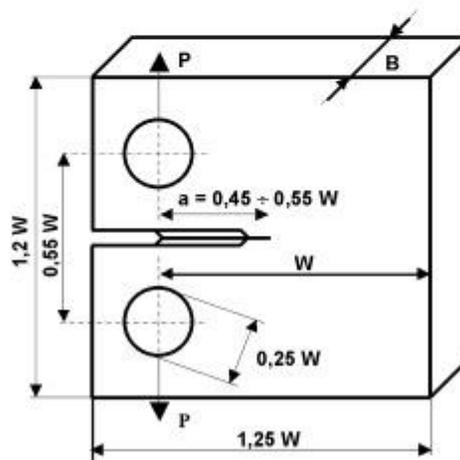
de la Norma ASTM, permite asegurar que si se siguen sus recomendaciones, que pueden parecer muy tediosas, esas condiciones se dan en el ensayo y el valor de KIC obtenido es verdaderamente una propiedad del material. Las Normas indicadas sugieren distintos tipos de probetas, siendo las más utilizadas las probetas de flexión y la probeta compacta, (Arana, 2002, p.83-84).

Figura 8.

Probeta flexión y probeta compacta.



Probeta para ensayo de flexión



Probeta compacta

Nota. Tomado de Arana, J. L. (2002). *Mecánica de fractura*. Universidad del país Vasco. p.86.

Las ecuaciones matemáticas utilizadas para el cálculo de factores de intensidad de esfuerzos para probetas de flexión y probetas compactas son las siguientes.

4.7.1 Probeta compacta

Figura 9.

Ecuación para cálculo de KI para probetas de tracción compacta.

$$K_I = \frac{P}{B\sqrt{W}} \cdot \frac{2 + \frac{a}{W}}{\left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \left[0,886 + 4,64 \frac{a}{W} - 13,32 \frac{a^2}{W^2} + 14,72 \frac{a^3}{W^3} - 5,60 \frac{a^4}{W^4} \right]$$

Nota. Tomado de Arana, J. L. (2002). *Mecánica de fractura*. Universidad del país Vasco.

Donde, a = longitud de la grieta, W = ancho de la probeta, B = espesor de la probeta y P = Fuerza.

4.7.2 Probeta flexión

Figura 10.

Ecuación para cálculo de KI para probetas de flexión.

$$K_I = \frac{P}{B\sqrt{W}} \cdot \frac{3}{2} \frac{S}{W} \sqrt{\frac{a}{W}} \left[\frac{1,99 - \frac{a}{W} \left(1 - \frac{a}{W}\right) \left(2,15 - 3,93 \frac{a}{W} + 2,7 \frac{a^2}{W^2}\right)}{\left(1 + 2 \frac{a}{W}\right) \left(1 - \frac{a}{W}\right)^{3/2}} \right]$$

Nota. Tomado de Arana, J. L. (2002). *Mecánica de fractura*. Universidad del país Vasco.

4.8 Método de elementos finitos (MEF)

El MEF, se basa en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto aproximado, esta transformación se denomina discretización del modelo. (Valero, 2004) . El

conocimiento de lo que sucede al interior de este modelo del cuerpo aproximado, se obtiene mediante la interpolación de los valores conocidos en los nodos. Es por tanto la aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos que discretizan el dominio del elemento (Valero, 2004).

5. Análisis de la información recopilada

En la búsqueda de estudiar el comportamiento de los factores de intensidad de esfuerzo K_I bajo diferentes modos de falla se puede implementar el ensayo ARCAN el cual permite una variación en la dirección de los esfuerzos aplicados.

Cognard et al. (2011). En su artículo **A modified Arcan test to analyze the behavior of composites and their assemblies under out-of-plane loadings** muestran el uso de una prueba Arcan modificada utilizada para determinar las características o comportamiento de materiales compuestos cuando son sometidos a diferentes modos de esfuerzos cortantes o esfuerzos mixtos fuera del plano. Además, se realiza una estimación del comportamiento de grietas en estos materiales, con la ayuda de simulaciones de elementos finitos, lo cual permite conocer cómo aplicar de manera correcta la prueba arcan y la estimación numérica basada en software para simulaciones.

Por otro lado, Langrand et al. (2002) en el artículo **An alternative numerical approach for full scale characterization for riveted joint design. Aerospace Science and Technology, 6, 343-354**, describen modelos constitutivos de materiales y criterios de fallas en simulaciones precisas. Donde se utiliza el Método de Elementos Finitos (MEF), cuyo interés es definir la resistencia dinámica en una gran variedad de uniones remachadas con un bajo costo en comparación con un método experimental puro. El método de elementos finitos es aplicado en

uniones remachada para analizar: primero el estado de tensión y tensión inicial posterior al remachado, y segundo, varios tipos de fallas de uniones (por ejemplo, propagación de grietas, cizallamiento o desprendimiento del remache), este documento aporta un importante conocimiento acerca de la utilización del método de elementos finitos para el análisis del comportamiento de materiales el cual es de interés en el desarrollo de este proyecto.

Por su parte, pero no menos importante Andrade et al. (2015) en su artículo **Models of fatigue crack growth** describe los procesos de crecimiento de grietas por fatiga mostrando las principales leyes y modelos de crecimiento de grietas, expone de forma detallada los modelos basados en la ley de Paris, modelos basados en elementos finitos, modelos basados en ensayos no destructivos y modelos basados en zona cohesiva, que aunque no es el eje principal de este proyecto, permite tener conocimiento de los diferentes modelos que se presentan en la propagación de grietas y así poder entender de forma más clara el comportamiento de la probeta cuando es sometida al ensayo de tracción

6. Metodología

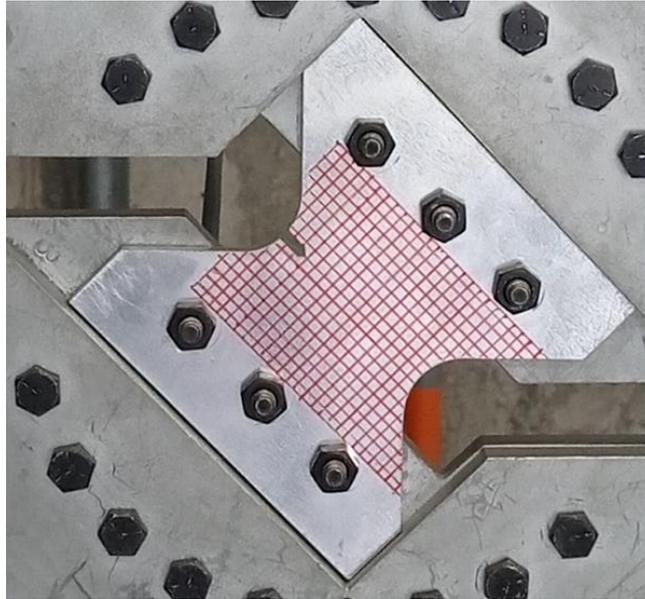
6.1 Metodología Ensayo Arcan

El ensayo se lleva a cabo con 3 probetas y a una velocidad de 1 mm/s, se ejecuta para 3 modos de falla, MODO I (90° esfuerzo normal), MODO II (0° cortante puro) y MODO MIXTO (45°). Para llevar a cabo el ensayo son necesarios los siguientes pasos:

1. Se realiza el montaje de la probeta en la herramienta, se acomoda la probeta de tal manera que los orificios de la probeta y los semidiscos queden relacionados concéntricamente, la fijación se realiza por medio de tres pernos a cada Semidisco, como se observa en la figura 11.

Figura 11.

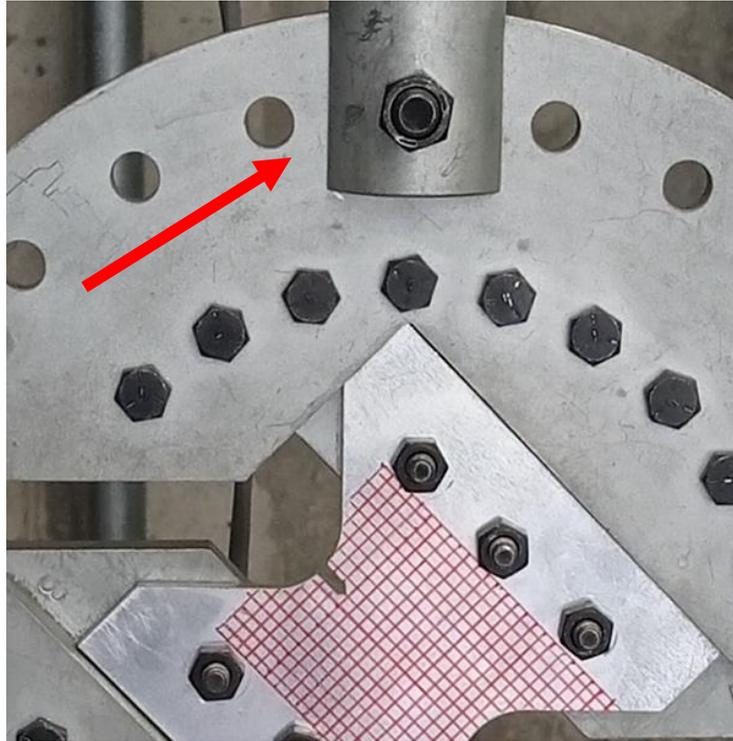
Ensamble probeta y semidiscos.



2. Una vez fijada la probeta en los semidiscos, se procede a ubicar los sujetadores según el ángulo en el que se desea aplicar la fuerza-. (Ver figura 12).

Figura 12.

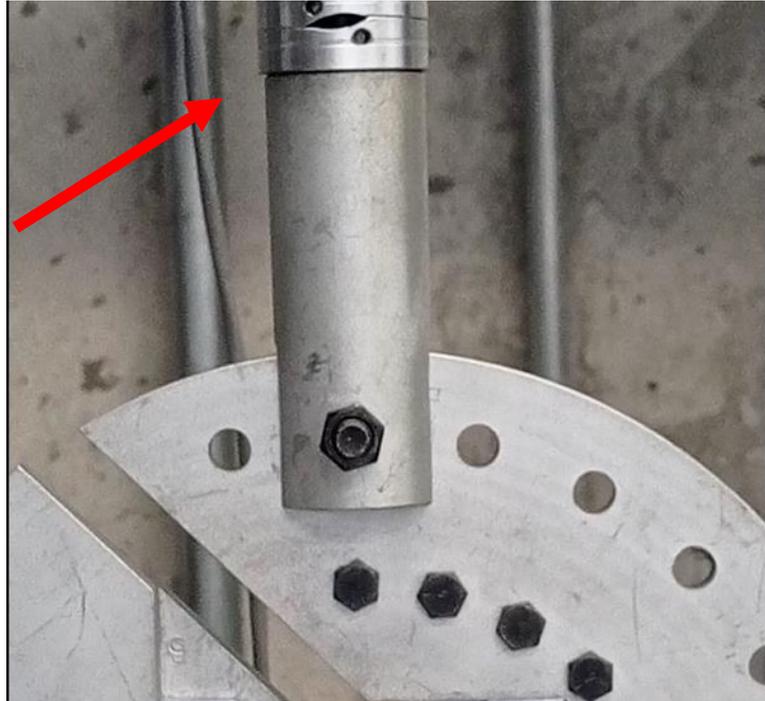
Ubicación de sujetadores según el ángulo en análisis.



3. Luego de finalizar el montaje completo del ensayo Arcan, es necesario acoplarlo a una máquina de tracción por medio de los sujetadores para luego dar inicio a la prueba (Ver figura 13).

Figura 13.

Acople ensayo arcan con máquina para ensayos de tracción.



El procedimiento enunciado anteriormente deberá ser realizado para cada una de las probetas a diferentes ángulos (diferentes modos de falla). De este ensayo se desea obtener valores de fuerzas y desplazamiento a los que son sometidas las probetas hasta el momento del fallo por carga estática.

6.2 Resultados

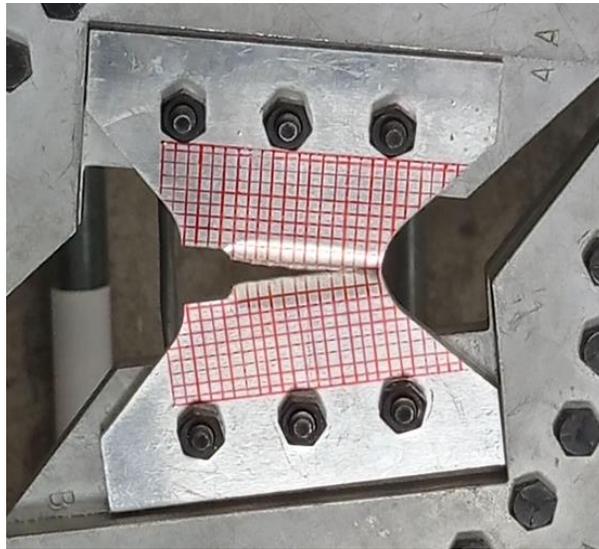
A continuación, presentaremos los resultados obtenidos en la parte experimental del proyecto, donde se mostrará una evidencia fotográfica de la probeta luego de ser sometida al ensayo ARCAN y de forma gráfica la fuerza vs desplazamiento que se presenta en el ensayo para cada probeta en cada modo de falla.

6.2.1 Modo I (90°)

Probeta:

Figura 14.

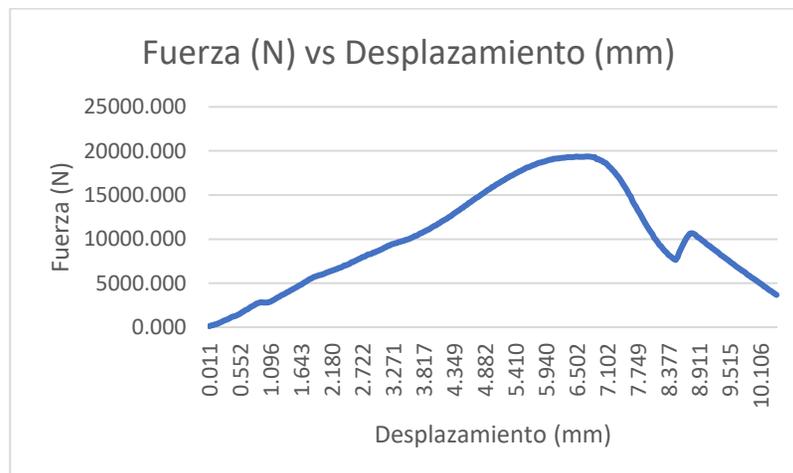
Probeta fracturada (Modo I).



Gráficas De Fuerza Vs Deformación:

Figura 15.

Gráfica F vs D (Modo I).

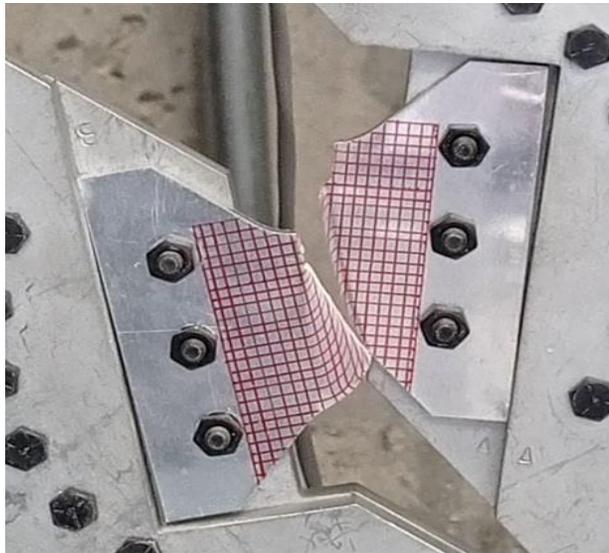


6.2.2 Modo II (0°)

Probeta:

Figura 16.

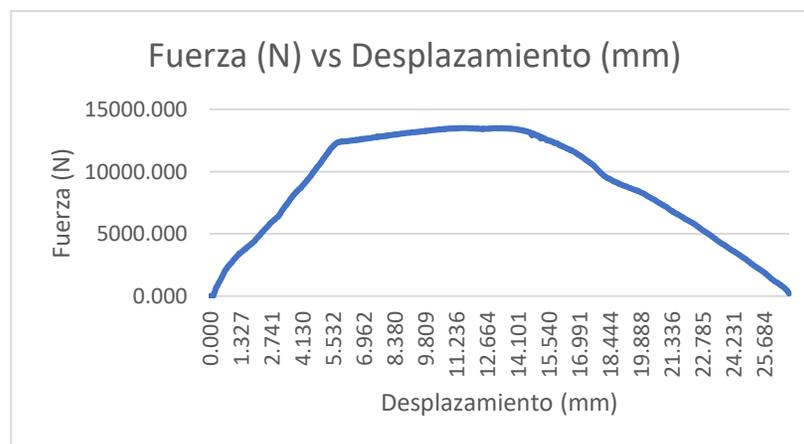
Probeta fracturada (Modo II).



Gráficas De Fuerza Vs Deformación:

Figura 17.

Gráfica F vs D (Modo II).

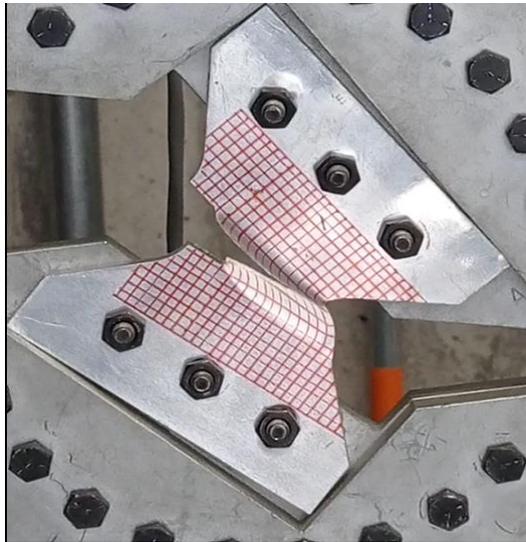


6.2.3 Modo Mixto (45°)

Probeta:

Figura 18.

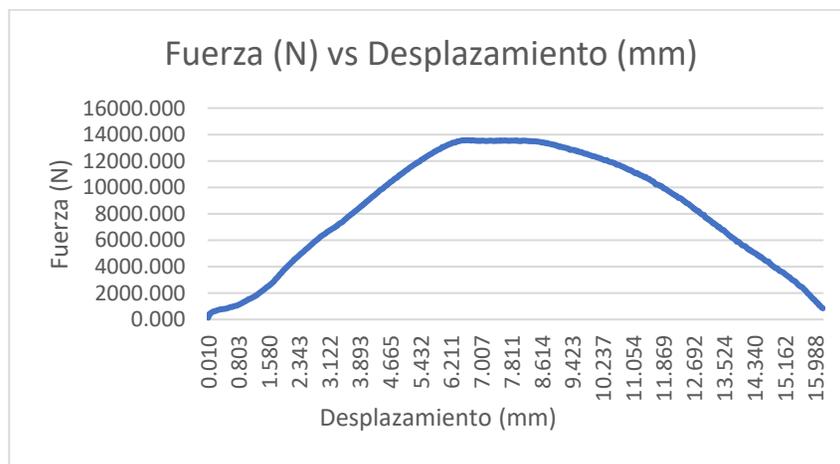
Probeta fracturada (Modo mixto).



Gráficas De Fuerza Vs Deformación:

Figura 19.

Gráfica F vs D (Modo mixto).



La siguiente tabla presenta un consolidados de los valores máximos obtenidos tanto para fuerza como para desplazamiento en cada uno de los modos de falla.

Tabla 1.

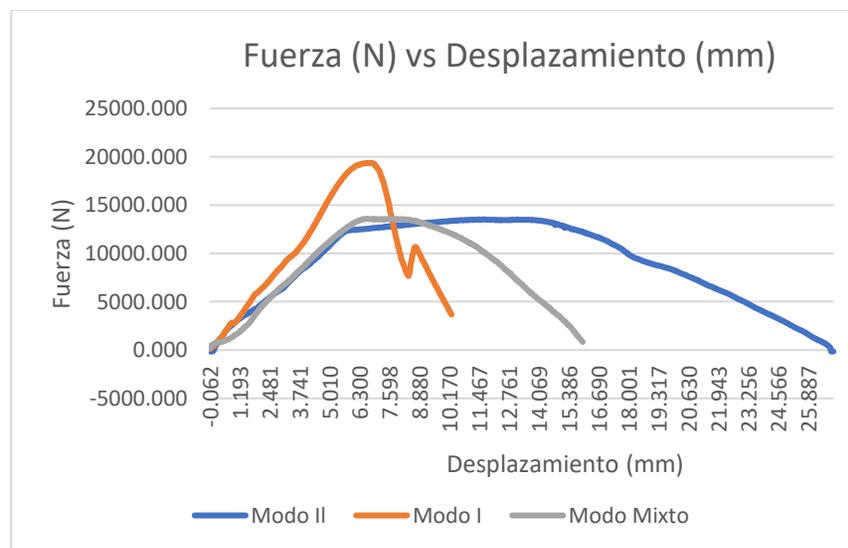
Resultados experimentales.

| Modo | Fuerza máxima [N] | Desplazamiento máximo [mm] |
|-------------|-------------------|----------------------------|
| I [90°] | 19362,20 | 10,42 |
| II [0°] | 13501,10 | 27,00 |
| Mixto [45°] | 13577,10 | 13,19 |

Para realizar una comparación de manera más visual de los resultados se presenta una gráfica con la superposición de las gráficas obtenidas para cada modo de falla.

Figura 20.

Gráfica F vs D de todo el ensayo.



Determinación del factor de intensidad de esfuerzos:

1. A partir del ensayo arcan realizado y los datos obtenidos en la práctica se procede a calcular el factor de intensidad de esfuerzo (K_i) utilizando la fórmula para probetas compactas debido a que estas se utilizan en ensayos de tracción y su geometría es la más similar a la utilizada en este proyecto

$$k_i = \left[\frac{F}{t \cdot \sqrt{W}} \right] \cdot \left[0,886 + 4,64 \cdot \frac{a}{w} - 13,32 \cdot \left(\frac{a}{w} \right)^2 + 14,72 \cdot \left(\frac{a}{w} \right)^3 - 5,6 \cdot \left(\frac{a}{w} \right)^4 \right] \quad (1)$$

Donde:

F: Fuerza

t: Espesor

W: Ancho de la probeta

a: Longitud de la grieta.

Este proyecto se desarrolló con una probeta con las siguientes dimensiones:

W= 100 mm

t=5mm

Basados en los resultados de la tabla 1 se realizarán los cálculos de los K_i , se realiza el cálculo de un valor a modo de ejemplo y los siguientes serán plasmados en una tabla resumen.

Cálculo de K_i para:

a=12mm

t=5mm

W=100 mm

F=13501 N

$$ki = \left[\frac{13501}{5 \cdot \sqrt{100}} \right] \cdot \left[0,886 + 4,64 \cdot \frac{5}{100} - 13,32 \cdot \left(\frac{5}{100} \right)^2 + 14,72 \cdot \left(\frac{5}{100} \right)^3 - 5,6 \cdot \left(\frac{5}{w} \right)^4 \right] \quad (2)$$

$$Ki = 884,3 \text{ [MPa} \cdot \text{mm}^{(0.5)} \text{]}$$

Tabla 2.

Resultados experimentales Ki.

| Modo de falla | Fuerza [N] | Ki [MPa·mm^(0.5)] |
|----------------------|-------------------|------------------------------------|
| II [0°] | 13501,10 | 884,30 |
| Mixto [45°] | 13577,10 | 889,30 |
| I [90°] | 19362,20 | 1268,00 |

7. Metodología Parte Computacional

Para llevar a cabo la simulación del ensayo se debe realizar una serie de pasos que permitirán desarrollar el modelo con el cual se desea determinar los parámetros de fractura asociados a las cargas estáticas como SIFS (Ki).

7.1 Geometría

La geometría fue proporcionada, se trata de un modelo de probeta Arcan. Este modelo se usará para metales. La probeta junto con el ensamble se muestra en las figuras posteriores. Se resalta que debido a la complejidad del sistema se optó por realizar una simplificación al problema mediante el reemplazo de las juntas apernadas por conexiones tipo Beam Connection. Además,

dentro del modelo, los agarres superior e inferior que se unen a los platos se han considerado como cuerpos rígidos.

Figura 21.

Modelo de Probeta.

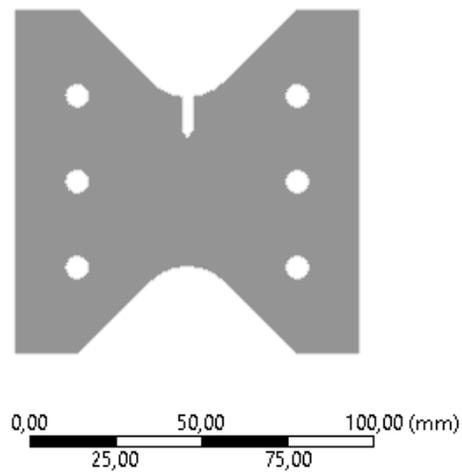
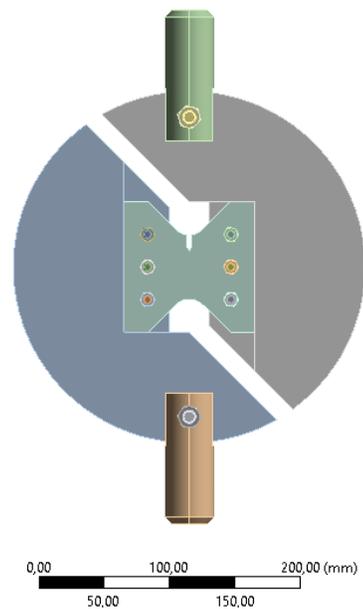


Figura 22.

Modelo ensayo Arcan 3D.



7.2 Propiedades del Material

El material de la probeta es un aluminio Al 1100 H14 y los platos de sujeción son de acero estructural. La siguiente tabla muestra las propiedades mecánicas usadas.

Figura 23.

Propiedades del material de la probeta.

| Material | Aluminio Al 1100 H14 | Acero estructural |
|------------------------|---------------------------------------|-------------------|
| Propiedad | | |
| Modulo elastico | 68,9 [GPa] | 200[GPa] |
| Coeficiente de Poisson | 0,33 | 0,3 |
| Esfuerzo de fluencia | 280 [MPa] | 250 [MPa] |
| Esfuerzo ultimo | 310 [MPa] | 460 [MPa] |
| Kic | Variable [MPmm ^{0.5}] (632) | NA |

Ambos materiales son considerados como isótropo elástico lineales, el aluminio presenta una grieta.

7.3 Mallado

Es necesario realizar un mallado general en el modelo que se desea estudiar (ver figura 20). En el mallado de la pieza se debe tener presente 2 aspectos: en primer lugar, para un estudio de fractura en el frente de grieta debe existir una malla fina (ver figura 21) para capturar los gradientes de esfuerzo que se presentan en la zona, para lo cual se utilizan métodos de body sizing y Edge sizing. Otro punto por considerar es que debido a que se trabajará con la herramienta fractura SMART que viene del acrónimo inglés (separating morphing adapting remeshing technologies), ello significa que la malla va cambiando conforme se crea una nueva superficie de grieta producto

del crecimiento por carga estática. La herramienta SMART funciona para malla únicamente de tetraedros, teniendo presente estas dos restricciones la malla generada se muestra a continuación.

Figura 24.

Modelo 3D con malla.

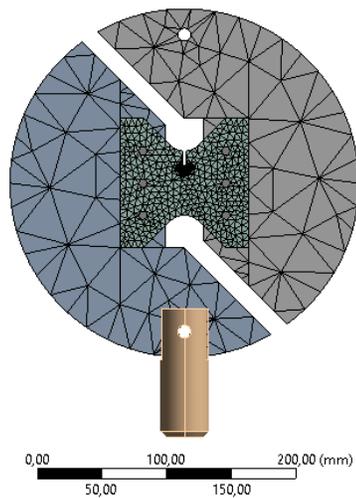
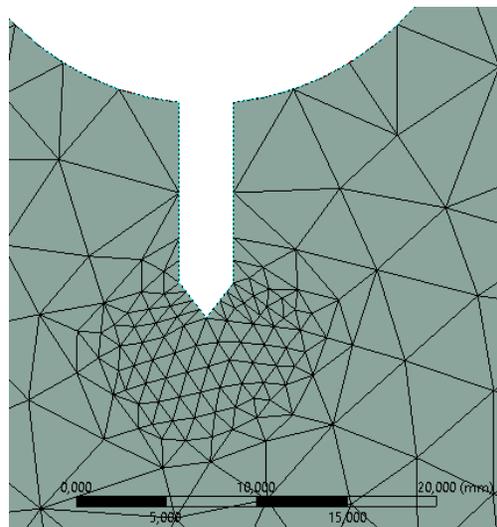


Figura 25.

Refinamiento de la malla en la punta de la grieta.



7.4 Condiciones de Contorno y Análisis

Las condiciones se muestran en la siguiente figura. Se estableció una condición de soporte fijo en el perno de la mordaza inferior y una condición de desplazamiento remoto en el perno de la mordaza superior. El desplazamiento remoto fue en la dirección Y, y limitaba el desplazamiento en los demás ejes.

Figura 26.

Condiciones de contorno sobre el modelo.

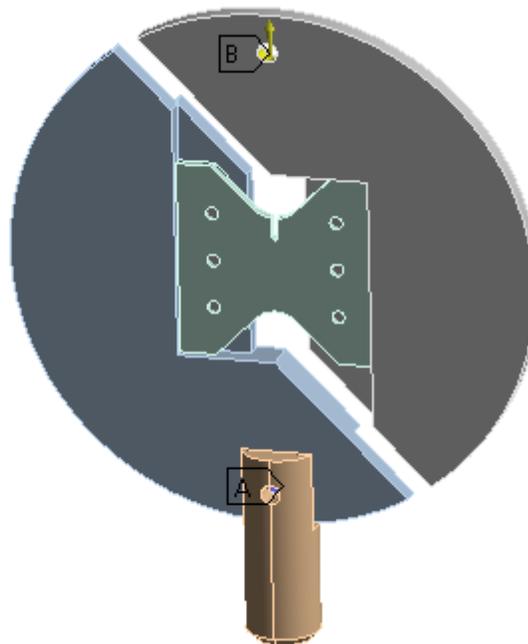
B: Ensemble con fractura 0° Mod 2

Static Structural

Time: 1, s

9/03/2022 3:05 p. m.

- A** Fixed Support
- B** Remote Displacement



7.5 Resultados Análisis 3D

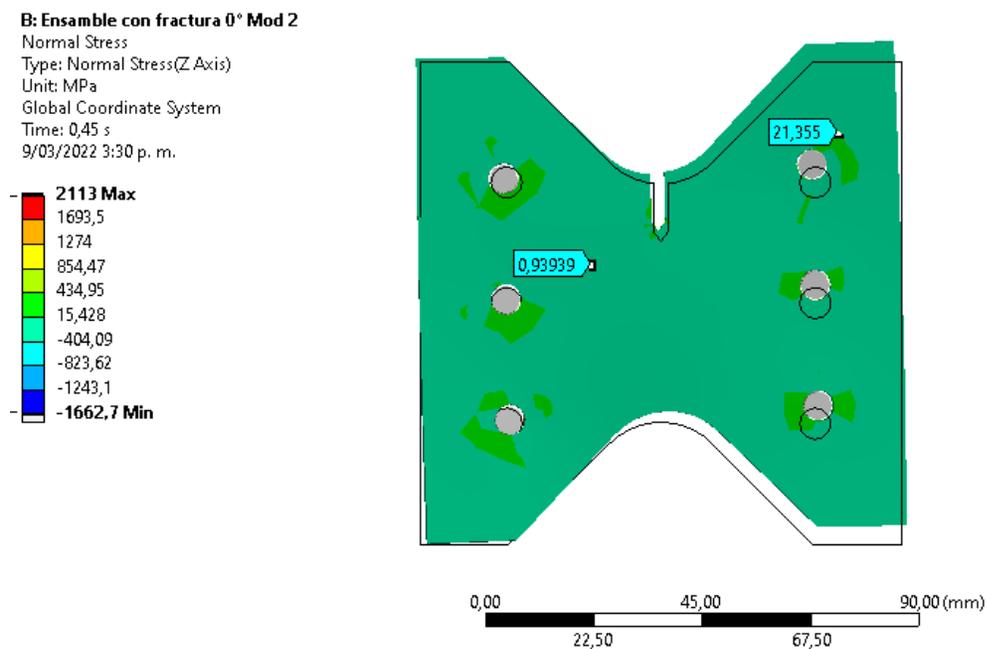
Los siguientes resultados corresponden al modelo de 0°, como el de la primera figura. Y a un desplazamiento de 4,5 mm en dirección vertical y un KIC de 632,46 MPa.mm^{0.5}.

7.5.1 Esfuerzos

La figura 26, muestra los esfuerzos normales en la dirección Z de la probeta, este eje está en sentido del espesor de la probeta, se evidencia que su valor es cercano a cero, este procedimiento fue realizado para los otros modos de falla que se encuentran en estudio y se obtuvieron resultados similares. De esta forma, el modelo podría simplificarse aún más considerando la simplificación 2D de esfuerzo plano.

Figura 27.

Esfuerzos sobre la probeta en la dirección Z.



Considerando lo expuesto anteriormente y búsqueda de mejores resultados, se procede a desarrollar un modelo 2D con el fin de obtener los factores de intensidad de esfuerzos.

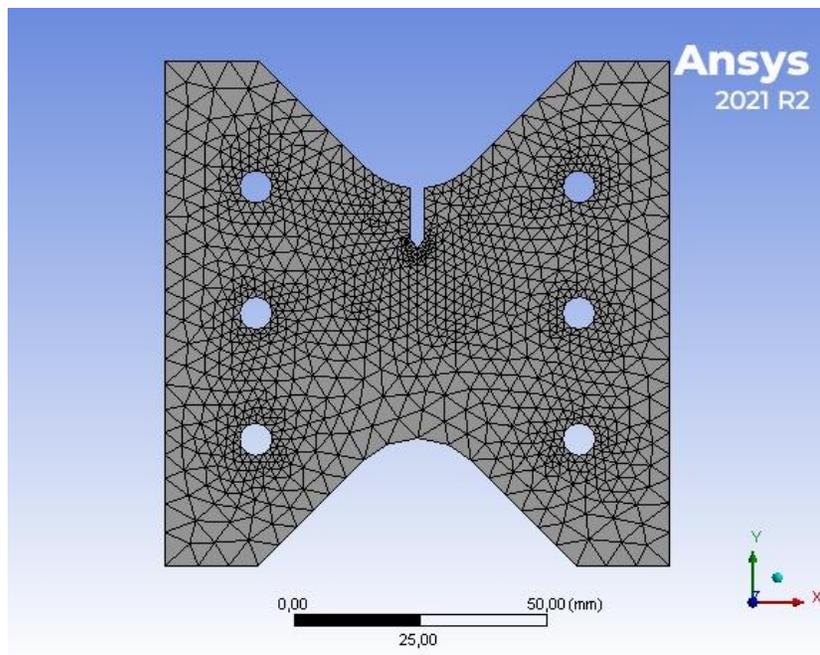
7.6 Procedimiento Simulación 2D

En el desarrollo del modelo 2D se trabajó únicamente con la superficie de la probeta teniendo en cuenta que la herramienta no sufre deformaciones y solo es el medio por donde se le transmite la fuerza a la probeta, esto con el fin de simplificar el modelo.

El procedimiento para un modelo 2D es muy similar al utilizado en la simulación 3D, se utilizan las mismas propiedades del material, se crea la superficie de la probeta en análisis y se procede a implementar el mallado con un método global de definición triangular (ver figura 2), método vertex sizing y se aplica un refinamiento en el vértice de la grieta.

Figura 28.

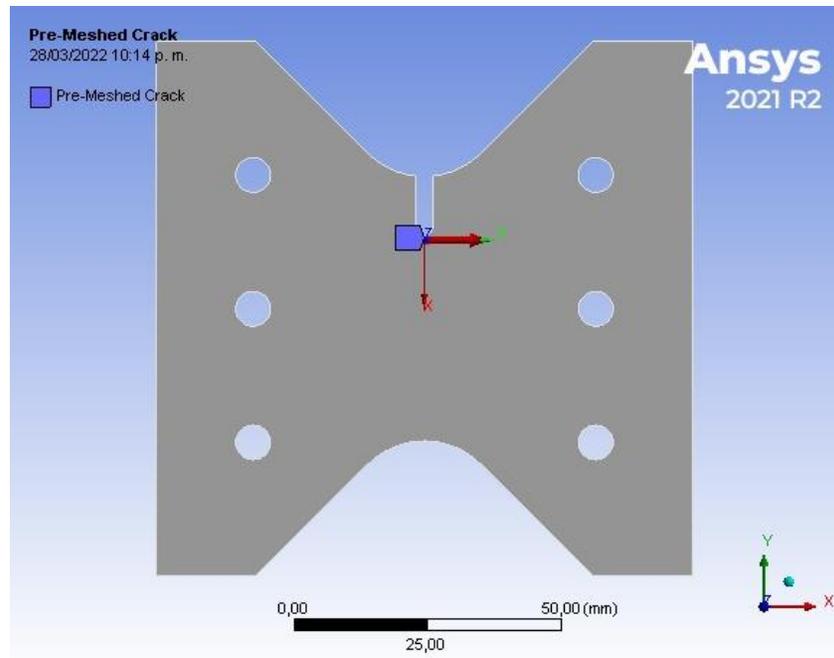
Probeta 2D con malla.



La herramienta utilizada dentro del programa Ansys Workbench, llamada Pre-Meshed Crack, se implementa definiendo un nodo llamado “Selección” como punta de la grieta; definiendo también en ese lugar el sistema de coordenadas (Ver figura 28).

Figura 29.

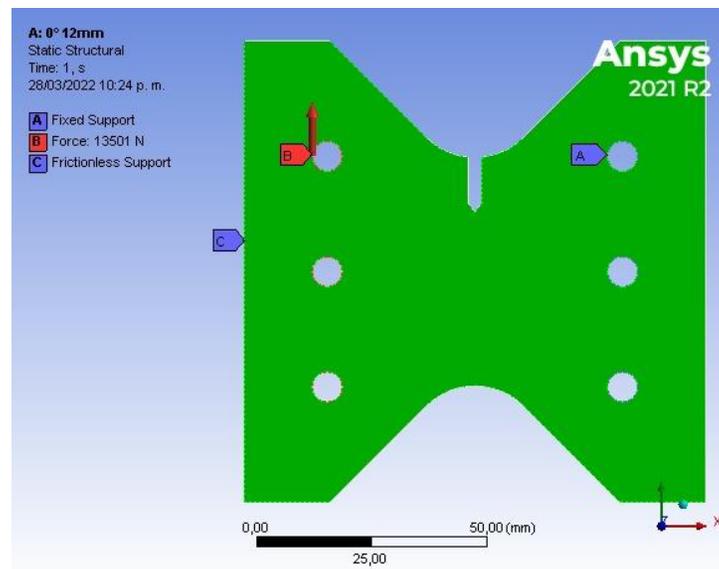
Selección del sistema de coordenadas en la probeta.



Después de realizar el modelo con su respectivo mallado y las condiciones mencionadas anteriormente (ver figura 26), se procede a aplicar la fuerza máxima correspondiente al modo de falla en análisis y el ángulo de giro en la superficie de la probeta, utilizando los valores de 0° , 45° y 90° .

Figura 30.

Condiciones de contorno en la probeta.



Con este procedimiento se pudo obtener los resultados finales de K_i para los diferentes modos de falla

7.7 Resultados Finales

Luego de ejecutar la simulación se obtienen los siguientes resultados para cada uno de los modos de falla.

Tabla 3.

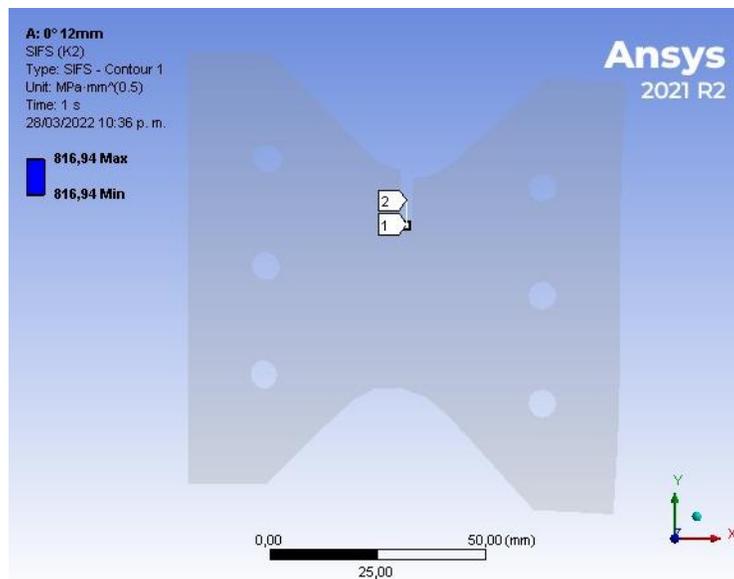
Resultados de KI y KII para los diferentes modos de falla.

| Modo | KI [MPa·mm ^(0.5)] | KII [MPa·mm ^(0.5)] |
|-------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| Modo I (90°) | 1160,8 | -24,744 |
| Modo II (0°) | -127,14 | 816,94 |
| Modo mixto (45°) | 1247,2 | -409,95 |

Para cada modo de falla se obtienen un valor KI y un valor KII donde para el modo I de falla corresponde el KI y para el modo II de falla corresponde el valor KII, el modo mixto será una combinación de estos valores según se presenten los esfuerzos en la probeta.

Figura 31.

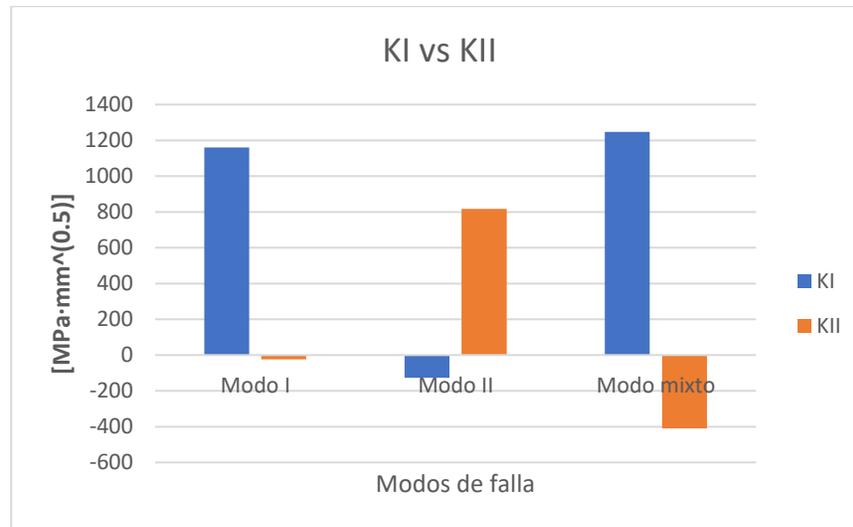
Resultado KII modelo 0°.



Para un mejor análisis de los resultados se presenta el siguiente gráfico:

Figura 32.

Gráfico KI vs KII.



En la gráfica 32 se puede observar la influencia del K_I en cada modo de falla, para el modo I se evidencia un valor positivo para K_I bastante considerable en relación con K_{II} , esto debido a que en este modo de falla se aplica un esfuerzo normal puro y se espera que los esfuerzos cortantes tiendan a ser mínimos, logrando así una apertura de la grieta; para el modo II se evidencia un comportamiento contrario al anteriormente mencionado donde se puede observar que el valor predominante es el K_{II} , debido a que se aplica un esfuerzo cortante y la grieta tienen al cizallamiento.

Para el modo mixto se observa un comportamiento en el cual se evidencia la influencia del modo I y modo II de falla, siendo predominante el modo I, esto se debe a que la grieta inicia con un cizallamiento para luego dar paso a una apertura considerable de la grieta.

Para un mejor análisis de la influencia de cada modo de falla se determina una relación porcentual entre el valor más bajo (K_I o K_{II}) con relación al valor mayor (K_I o K_{II}) dependiendo de cada modo, cuyos resultados se mostrarán a continuación:

Tabla 4.*Relación porcentual entre KI y KII.*

| Modo | KI [MPa·mm^{^(0.5)}] | KII [MPa·mm^{^(0.5)}] | % KI/KII |
|-------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-----------------|
| Modo I | 1160,8 | -24,744 | 2,13 |
| Modo II | -127,14 | 816,94 | 15,6 |
| Modo mixto | 1247,2 | -409,95 | 32,9 |

8. Comparación de Resultados Numérica y Experimentalmente Para Modo I Y Modo II de**Falla**

Para esta comparación se utilizarán los valores de Ki correspondientes a cada modo de falla, obtenidos tanto experimental como numéricamente para los modos I y II. Es importante tener en cuenta que los resultados obtenidos son de manera aproximada, esto debido a que la geometría de la probeta utiliza en este proyecto difiere un poco en su forma y dimensiones de la probeta tipo compacta para la cual está diseñada la ecuación, sin embargo, es la probeta normalizada a la cual se ajusta más la probeta del proyecto.

En la siguiente tabla se mostrarán los resultados anteriormente mencionados:

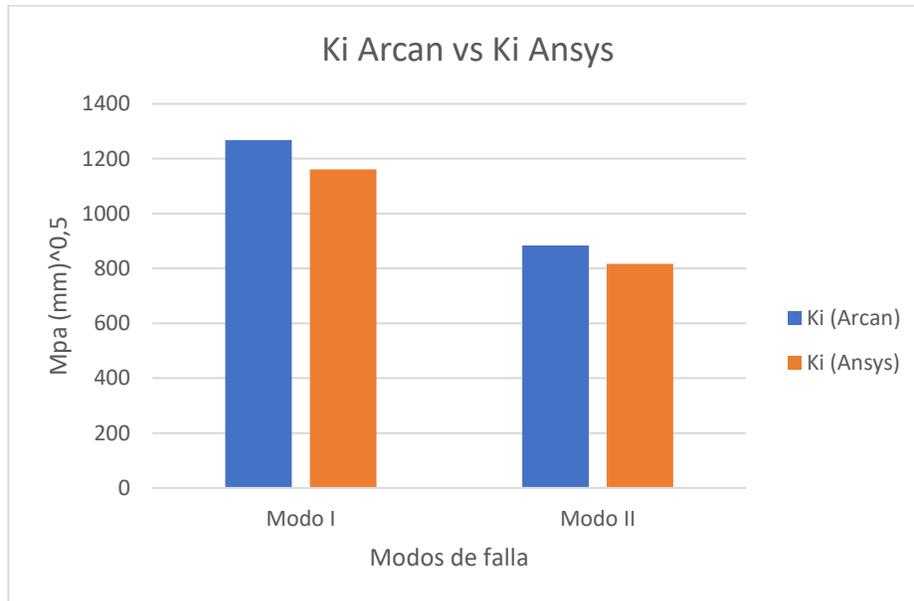
Tabla 5.*Resultados de Ki (Arcan) y Ki (Ansys).*

| Modo | Ki (Arcan) | Ki (Ansys) |
|----------------|-------------------|-------------------|
| Modo I | 1268 | 1160,8 |
| Modo II | 884,3 | 816,94 |

Estos resultados se pueden apreciar de forma visual en el siguiente gráfico:

Figura 33.

Ki teórico Vs Ki Experimental.



Se puede observar en la gráfica (Figura 33) que los valores experimentales no se encuentran muy lejanos de los teóricos, obteniendo unos porcentajes de errores que podrían considerarse aceptables, los cuales se mostraran a continuación.

Tabla 6.

Porcentajes de error entre K_i (Arcan) y K_i (Ansys).

| Modo | Ki (Arcan) | Ki (Ansys) | % Error |
|----------------|-------------------|-------------------|----------------|
| I (90°) | 1268 | 1160,8 | 8,5 |
| II (0°) | 884,3 | 816,94 | 7,6 |

9. Conclusiones

De los resultados obtenidos experimentalmente se puede concluir que el ensayo Arcan requiere de mayor fuerza durante el análisis de carga axial (Modo I - 90°) que en el análisis de cortante puro (Modo II - 0°) y a partir de la fuerza y la geometría de la probeta es posible determinar los factores de intensidad de esfuerzo utilizando la fórmula para probetas compactas.

Del análisis computacional y a partir de observar los resultados se puede concluir que el valor de K_i obtenido mediante el software Ansys Workbench para cada Modo de falla implementado, tendrá un valor predominante, el cual dependerá del modo de falla que se esté aplicando, es decir, para Modo I el valor de K_i predominante será KI y para modo II será KII.

Para los resultados obtenidos de forma computacional con ayuda del software Ansys Workbench, se obtuvieron porcentaje de error menores a 10% en relación con los resultados experimentales los cuales se consideran aceptables, de manera que la utilización del software es viable en la determinación de factores de intensidad de esfuerzo para diferentes modos de falla en ensayos tipo ARCAN aplicado a materiales metálicos.

Referencias

- Almexa. (s.f.). *Conozca los 10 principales usos del aluminio y detecte oportunidades para su industria*. <https://www.almexa.com.mx/blog/conozca-los-10-principales-usos-del-aluminio-y-detecte-oportunidades-para-su-industria/>
- Andrade, A. A., Mosquera, W. A., & Vanegas, L. V. (2015). Models of fatigue crack growth. *Entre Ciencia e Ingeniería*, 9(18), 39-48.
- Arana, J. L. (2002). *Mecánica de fractura*. Bilbao: Universidad del País Vasco.
- Bazaga, V. C. (5 de Julio de 2012). *Sabemos Construir*. <https://sabemosconstruir.com/2012/07/05/diferencia-entre-grieta-y-fisura/#:~:text=Grietas%3A%20Todas%20aquellas%20aberturas%20incontroladas,afectan%20a%20todo%20su%20espesor.>
- Callister, W. D. (1995). *Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales*. reverté, s.a.
- Castillo, J. D. (31 de octubre de 2019). *La Vanguardia*. Decenas de Boeing 737 se quedan en tierra por grietas en el fuselaje. <https://www.lavanguardia.com/economia/20191101/471314860453/decenas-boeing-737-grietas-fuselaje.html>
- Castillo, J. D. (01 de noviembre de 2019). *TORRE EL DORADO*. Aerolíneas Preocupadas por Grietas en Aviones Boeing B737NG: <https://torreeldorado.co/aerolineas-preocupadas-por-grietas-en-aviones-boeing-b737ng/>
- Cognard, J. Y., Sohier, L., & Davies, P. (2011). A modified Arcan test to analyze the behavior of composites and their assemblies under out-of-plane loadings. *Composites Part A: Applied science and manufacturing*. 42(1), 111-121.
- Jaramillo, H. (2008). *Introducción a la mecánica de fractura y analisis de falla*. Bogotá: Universidad Autónoma de Occidente

Langrand, B., Patronelli, L., Deletombe, E., Markiewicz, E., & Drazétic, P. (2002). An alternative numerical approach for full scale characterisation for riveted joint design. *Aerospace Science and Technology*. 6(5), 343-354.

Valdez Melgoza, L. A., Garay Reyes, C. G., Esparza Rodríguez, M. R., Maldonado Orozco, M. C., & Martínez Sánchez, R. (2019). Aleaciones de aluminio - Calidad en la industria aeroespacial. *Ciencia y desarrollo*. <https://www.cyd.conacyt.gob.mx/?p=articulo&id=370>

Valero, E. F. (2004). *Aportaciones al estudio de las máquinas eléctricas de flujo axial mediante la aplicación del método de los elementos finitos*. <https://www.tdx.cat/bitstream/handle/10803/6294/06Efv06de23.pdf>