

Evaluación de la tenacidad a la fractura mediante CTOD (crack tip open displacement) de muestras de Inconel 718 fabricadas tanto por deposición de energía dirigida con láser (DED-LB), como por forjado

Diego Andrés Ospino Julio y Mayra Alejandra Rueda Pedraza

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingenieros Mecánicos

Director

Alberto David Pertuz Comas

Doctor en Ingeniería Mecánica

Codirector

Miguel Ángel Poblador Tunarozza

Ingeniero Mecánico

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2026

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	10
1. Planteamiento del problema.....	11
2. Justificación	13
3. Objetivos	15
3.1. Objetivo General.....	15
3.2. Objetivos Específicos.....	15
4. Marco Conceptual.....	16
4.1. Fatiga.....	16
4.1.1. Mecánica de la fractura.....	16
4.1.1.1. Inicio y propagación de la grieta.....	18
4.1.1.2. Factor de intensidad de esfuerzos.	18
4.1.1.3. Plasticidad en la punta de la grieta.....	21
4.2. Propiedades Mecánicas.....	22
4.2.1. Materiales Ortotrópicos	22
4.2.2. Propiedades mecánicas relacionadas con la propagación de grietas	23

4.3.	CTOD.....	24
4.3.1.	CMOD.....	25
4.3.2.	Prueba de tres puntos	27
4.4.	Correlación Digital de Imágenes	27
4.5.	Fabricación Aditiva.....	28
4.6.	Estudios Previos.....	29
5.	Metodología	31
5.1.	Tracción Uniaxial.....	31
5.2.	Ensayo CTOD.....	32
	b) Dimensiones de la muestra	34
	b) Programa de adquisición de datos.	39
5.2.1.	Definición de parámetros.....	40
5.3.	Técnica de caracterización microestructural.....	41
5.4.	Ensayo de microdureza.....	42
6.	Resultado.....	43
6.1.	Determinación de propiedades estáticas	44
6.1.1.	Material Forjado.....	44

6.1.2. Material fabricado por manufactura aditiva.....	47
6.1.3. Comparación general	51
6.2. Determinación experimental del CTOD	52
6.2.1. Material Forjado.....	53
6.2.2. Material fabricado por manufactura aditiva (MA).....	55
6.2.3. Comparación de resultados CTOD	57
6.3. Caracterización de la microestructura.....	58
6.3.1. Material forjado	59
6.3.2. Material fabricado por manufactura aditiva.....	60
6.3.3. <i>Análisis de microdureza</i>	61
6.3.4. Comparación entre materiales.....	62
6.4. Análisis de resultados General.....	64
6.4.1. Comportamiento mecánico global	64
6.4.2. Tenacidad a la fractura (CTOD)	65
6.4.3. Análisis microestructural comparativo	65
6.4.4. Análisis microdureza comparativa.....	66
6.4.5. Análisis de resultados	67

7. Conclusión General..... 67

Referencias Bibliográficas 71

Lista de Tablas

Tabla 1 <i>Propiedades mecánicas estáticas del forjado</i>	47
Tabla 2 <i>Propiedades mecánicas estáticas del material MA</i>	50
Tabla 3 <i>Propiedades obtenidas en los ensayos CTOD para el Inconel 718 forjado</i>	54
Tabla 4 <i>Propiedades obtenidas en los ensayos CTOD para el Inconel 718 fabricado por MA</i>	56
Tabla 5 <i>Comparación de parámetros CTOD entre material forjado y MA</i>	57

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Propagación de grieta</i>	17
Figura 2 <i>Modos de falla</i>	19
Figura 3 <i>Plasticidad en la punta de la grieta</i>	21
Figura 4 <i>Ensayo de CTOD</i>	25
Figura 5 <i>Probeta ensayo tracción</i>	32
Figura 6 a) <i>Criterios geométricos según la norma</i>	33
Figura 7 <i>Soporte</i>	34
Figura 8 <i>Configuración experimental pre agrietado</i>	36
Figura 9 a) <i>Montaje</i>	38
Figura 10 <i>Probetas del ensayo CTOD</i>	40
Figura 11 <i>Curva esfuerzo-deformación de ingeniería material forjado</i>	44
Figura 12 <i>Curva esfuerzo-deformación real material forjado</i>	46
Figura 13 <i>Curva esfuerzo-deformación de ingeniería material aditivo</i>	48
Figura 14 <i>Curva esfuerzo-deformación real material aditivo</i>	50
Figura 15 <i>Curva promedio carga–desplazamiento del material forjado</i>	53
Figura 16 <i>Curvas promedio carga–desplazamiento del material fabricado por MA</i>	55
Figura 17 <i>Microscopia Material forjado</i>	59
Figura 18 <i>Microscopia material fabricado por manufactura aditiva</i>	60
Figura 19 <i>Microdureza Inconel forjado 718 forjado y DED-LB</i>	61
Figura 20 <i>Comparación Microestructura entre el material forjado y el fabricado por MA</i>	62

Resumen

Título: Evaluación de la tenacidad a la fractura mediante CTOD (crack tip open displacement) de muestras de Inconel 718 fabricadas tanto por deposición de energía dirigida con láser (DED-LB), como por forjado*

Autor: Diego Andrés Ospino Julio, Mayra Alejandra Rueda Pedraza**

Palabras Clave: Inconel 718, CTOD, tenacidad a la fractura, DED-LB, fabricación aditiva, forjado, mecánica de fractura, microestructura.

Descripción: El presente trabajo tiene como objetivo evaluar la tenacidad a la fractura del Inconel 718 fabricado mediante dos procesos de manufactura: deposición de energía dirigida con láser (DED-LB) y forjado convencional. Para ello, se aplicó el ensayo de desplazamiento de apertura de la punta de la grieta (CTOD, *Crack Tip Opening Displacement*), conforme a la norma ASTM E1820-24, junto con pruebas de tracción uniaxial y análisis microestructural. Los resultados experimentales permitieron comparar las propiedades mecánicas, la ductilidad y el comportamiento frente a la propagación de grietas de ambas condiciones de fabricación. El material forjado presentó una mayor tenacidad a la fractura, con un CTOD crítico promedio de 0.282 mm, y una respuesta dúctil con propagación estable de la grieta. En contraste, el Inconel 718 fabricado por DED-LB mostró un CTOD promedio de 0.198 mm, caracterizado por una menor ductilidad y mayor dispersión en los resultados, atribuida a heterogeneidades microestructurales, tensiones residuales y porosidad propia del proceso aditivo. El análisis microestructural evidenció una fractura predominantemente dúctil en el material forjado, mientras que el material fabricado aditivamente presentó fracturas mixtas con zonas de falta de fusión. En conjunto, los resultados demuestran que el método de fabricación influye significativamente en la mecánica de fractura del Inconel 718 y que el proceso DED-LB requiere optimización de parámetros y tratamientos térmicos posteriores para mejorar su desempeño estructural.

* Trabajo de Grado

**Facultad de Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Alberto David Pertuz Comas. Doctor en Ingeniería Mecánica

Abstract

Title: Evaluation of Fracture Toughness by CTOD (Crack Tip Opening Displacement) of Inconel 718 Samples Manufactured by Laser-Directed Energy Deposition (DED-LB) and Forging*

Author: Diego Andres Ospino Julio, Mayra Alejandra Rueda Pedraza^{††}

Key Words: Inconel 718, CTOD, fracture toughness, DED-LB, additive manufacturing, forging, fracture mechanics, microstructure.

Description: This study aims to evaluate the fracture toughness of Inconel 718 manufactured by two different processes: laser-directed energy deposition (DED-LB) and conventional forging. The *Crack Tip Opening Displacement* (CTOD) test, following the ASTM E1820-24 standard, was conducted together with uniaxial tensile tests and microstructural characterization. Experimental results allowed the comparison of mechanical properties, ductility, and crack propagation behavior for both manufacturing routes. The forged material exhibited higher fracture toughness, with an average critical CTOD of 0.282 mm, showing a ductile response and stable crack propagation. In contrast, the DED-LB fabricated Inconel 718 showed an average CTOD of 0.198 mm, characterized by lower ductility and greater variability in results due to microstructural heterogeneity, residual stresses, and porosity typical of additive processes. Microstructural analysis revealed a predominantly ductile fracture in the forged specimens, whereas the additively manufactured samples presented mixed fractures with lack-of-fusion regions. Overall, the findings demonstrate that the manufacturing method strongly influences the fracture mechanics of Inconel 718 and that the DED-LB process requires further optimization and post-processing to enhance its structural performance.

* Degree Work

^{††}Faculty of Physicomechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Advisor: Alberto David Pertuz Comas, PhD. in Mechanical Engineering.

Introducción

Durante el siglo XIX, el creciente uso de metales en aplicaciones industriales, particularmente en el transporte ferroviario y marítimo, evidenció su vulnerabilidad a fenómenos como la fatiga y la fractura. En Gran Bretaña, entre 1860 y 1870, más de 200 personas fallecían anualmente en accidentes ferroviarios causados por fracturas en las ruedas de los trenes. De manera similar, durante la Segunda Guerra Mundial, los barcos Liberty, fabricados en Estados Unidos, sufrieron más de 1,500 casos de fractura frágil, algunos de ellos con fallas tan severas que las embarcaciones llegaron a partirse en dos. Estos eventos subrayan la necesidad de desarrollar métodos de análisis más precisos para predecir y prevenir fallas estructurales en materiales sometidos a condiciones extremas.

El estudio de la fatiga, definida como el debilitamiento progresivo de un material bajo cargas cíclicas, ha sido fundamental en la evolución de la ingeniería de materiales. Este fenómeno, que afecta la microestructura a través de la formación y propagación de grietas, es responsable de la mayoría de las fallas en componentes estructurales. Para abordar este problema, se han desarrollado modelos de laboratorio como lo son el Crack Tip Opening Displacement (en adelante CTOD), los cuales han permitido evaluar la propagación de grietas y optimizar el diseño de materiales con mayor resistencia a la fractura.

En las últimas décadas, la fabricación aditiva ha revolucionado la producción de materiales metálicos al permitir la construcción capa por capa de componentes con geometrías complejas. Entre sus diversas técnicas, la deposición de energía dirigida con láser (DED-LB) se ha consolidado como una alternativa eficiente para la fabricación de metales como el inconel 718, ofreciendo ventajas como una reducción significativa del desperdicio de material y la

capacidad para generar geometrías complejas en comparación con los métodos convencionales como puede ser el forjado. No obstante, los materiales obtenidos mediante este proceso pueden presentar microestructuras heterogéneas y tensiones residuales que afectan su desempeño mecánico y su resistencia a la fractura.

En este contexto, es fundamental evaluar las propiedades mecánicas del material para comprender su desempeño en aplicaciones industriales; analizar sus características permiten comparar con métodos de fabricación tradicionales (forjado) para así determinar cómo afecta esta técnica la microestructura del material, su homogeneidad y su resistencia a la propagación de grietas.

Este documento está dividido en las siguientes secciones. Primeramente, se presenta el planteamiento del problema, donde se establecen las necesidades de abordar el tema en cuestión, destacando la importancia del fenómeno de fatiga y cómo se comporta está en diferentes técnicas de fabricación. Seguidamente se desarrolló un marco teórico, destinado a contextualizar al lector sobre temas relevantes en el trabajo.

La sección materiales y metodología describe de manera detallada el proceso llevado a cabo para la realización de los ensayos CTOD y tracción, abarcando la recolección de datos e implementación utilizada para su ejecución. Posteriormente se encuentran los resultados y discusiones obtenidos. Finalmente, se plantean las conclusiones resaltando los hallazgos y recomendaciones.

1. Planteamiento del problema

El Inconel 718 es una aleación de níquel reconocida por su resistencia mecánica, estabilidad térmica y durabilidad frente a la corrosión, lo que la hace ideal para aplicaciones en sectores como el aeroespacial, automotriz y de generación de energía. Debido a aplicaciones en

condiciones críticas y de alto rendimiento, existe una necesidad de mejora continua, especialmente en condiciones de cargas cíclicas. En este contexto, una de la técnica más utilizada para la fabricación de componentes en inconel 718 es el forjado, el cual es un proceso de fabricación que consiste en dar forma al material mediante la aplicación de fuerzas de compresión; no obstante, esta técnica presenta ciertas limitaciones, como la dificultad en la fabricación de piezas con alta precisión dimensional, geometrías complejas o de tamaños reducidos y desperdicio de material.

Las técnicas de manufactura aditiva como el DED-LB, nos ofrece ventajas sobre los métodos de manufactura tradicionales (forja, fundición, mecanizado y soldadura, entre otros) como la eficiencia en el uso del material, precisión dimensional y facilidad para la producción de geometrías complejas, sin embargo, aún no se ha estudiado a fondo cómo influyen estos métodos de fabricación en la tenacidad a la fractura y el comportamiento mecánico del Inconel 718, lo que genera dudas sobre su idoneidad en aplicaciones críticas.

El ensayo de CTOD es una técnica utilizada para evaluar la resistencia a la fractura de materiales estructurales. Este método mide la apertura de la punta de una grieta sometida a una carga mecánica, proporcionando una medida directa de la tenacidad del material ante la propagación de fisuras. Es particularmente útil en materiales empleados en entornos críticos, donde la fractura puede comprometer la seguridad y el rendimiento estructural. Dado que la fabricación mediante deposición directa DED-LB es un método novedoso, es fundamental caracterizar sus propiedades mecánicas y su microestructura con el fin de contrastarlas con técnicas de fabricación convencionales como puede ser el forjado.

2. Justificación

La fabricación aditiva, en particular la deposición de energía dirigida con láser (DED-LB), ha surgido como una tecnología innovadora en la manufactura de materiales metálicos debido a sus ventajas en la producción de componentes con geometrías complejas y la reducción de desperdicio de material. No obstante, la microestructura resultante de este proceso, caracterizada por ciclos térmicos repetitivos y rápidos enfriamientos, puede inducir heterogeneidades y tensiones residuales que afectan la integridad del material y su resistencia a la fractura. En comparación, el forjado es un método tradicional que proporciona una microestructura homogénea y generalmente mejores propiedades mecánicas.

Dada la creciente aplicación del Inconel 718 en sectores donde la resistencia a la fractura es crítica, es crucial comprender cómo el método de fabricación influye en su comportamiento mecánico. En particular, la evaluación de la tenacidad a la fractura mediante el ensayo CTOD permitirá determinar la capacidad del material para resistir la propagación de grietas bajo carga. Adicionalmente, correlacionar estos resultados con otras propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción y la microdureza proporcionará una visión integral del desempeño estructural del Inconel 718 fabricado por DED-LB y forjado.

Este estudio contribuirá al avance del conocimiento en el campo de la fabricación aditiva y la mecánica de fractura, facilitando la selección del método de manufactura adecuado para aplicaciones industriales exigentes. Los resultados podrán ser utilizados como referencia para optimizar procesos de fabricación, mejorar normativas y desarrollar estrategias que garanticen la fiabilidad y durabilidad de los componentes de Inconel 718 en condiciones operativas críticas.

A partir de este planteamiento, surge la siguiente pregunta de investigación: ¿Cómo influye el método de fabricación (DED-LB o forjado) en la tenacidad a la fractura del Inconel

718, evaluada mediante el ensayo CTOD, ¿y su relación con otras propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción y la microdureza?

3. Objetivos

3.1. Objetivo General

Determinar la mecánica a la fractura en las muestras de Inconel 718 fabricado tanto por deposición de Energía Dirigida con Láser (DED-LB) como por forjado, utilizando el ensayo CTOD.

3.2. Objetivos Específicos

Determinar las propiedades estáticas de las muestras de aleación inconel 718 obtenidas tanto por DED-LB como por forjado, utilizando probetas escaladas adaptadas de la norma ASTM E8 -22.

Determinar las propiedades dinámicas de la mecánica de la fractura, conforme a la norma ASTM E1820-24, de las muestras de aleación Inconel 718 obtenidas tanto por DED-LB como por forjado, mediante el ensayo CTOD y utilizando probetas escaladas adaptadas a dicha norma

Caracterizar la microestructura de las muestras fracturadas del ensayo CTOD, analizando la influencia del tamaño de grano, las fases secundarias y la presencia de defectos típicos de la fabricación aditiva en la resistencia a la fractura.

Correlacionar los resultados del ensayo CTOD con otras propiedades mecánicas como la resistencia a la tracción y la microdureza, para evaluar el efecto de la deposición láser en el comportamiento mecánico del material.

4. Marco Conceptual

El presente marco conceptual tiene como objetivo proporcionar una base teórica que sustente el estudio sobre las propiedades mecánicas y la propagación de grietas con el propósito de brindar al lector las herramientas conceptuales necesarias para comprender plenamente los resultados del estudio.

4.1. Fatiga

Es el debilitamiento de un material causado por una carga cíclica que da como resultado un daño estructural progresivo, plástico, aleatorio y localizado. La fatiga se manifiesta a través de una deformación plástica, denominada deformación micro plástica en su expresión más pequeña, esto se conoce como fenómeno de iniciación, posteriormente dicho fenómeno inicial presenta una etapa de crecimiento conocido comúnmente como propagación de la grieta, que finalmente conducen a la falla completa de ese material.

La vida útil por fatiga de un material compuesto es el número de ciclos de carga (tensión) que soporta antes de fallar y debe calcularse antes de su uso en aplicaciones estructurales. La microestructura, la interacción entre la matriz y el material de refuerzo, el tamaño, la forma, la fracción de volumen y la distribución del refuerzo y la ruta de procesamiento afectan el comportamiento de fatiga de un compuesto.

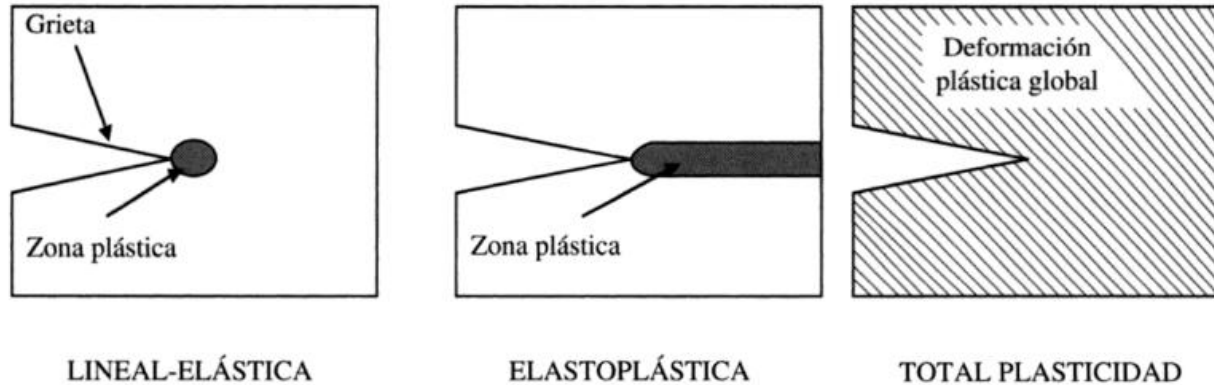
4.1.1. *Mecánica de la fractura*

La mecánica de la fractura es la parte de la mecánica de sólidos que se centra en el estudio del tamaño y forma de grieta y las fuerzas o cargas que conducen a la fractura de un espécimen de dimensiones definidas. Utilizando para esto cálculos de distribución de esfuerzos,

deformaciones, desplazamientos alrededor de una grieta (Parker, 1972). Hay varios métodos para analizar la fractura de acuerdo con la extensión de la deformación plástica.

Figura 1

Propagación de grieta



Nota. Tomado de Parker, 1972

La mecánica de fractura también clasifica la fractura en función de su dependencia del tiempo. Existen dos tipos principales: la fractura estática y la fractura lenta o retardada.

La fractura estática ocurre cuando una grieta inicialmente estable comienza a propagarse rápidamente bajo una sola aplicación de carga en condiciones de inestabilidad. Este tipo de fractura incluye la fractura frágil, la fractura dúctil y el colapso plástico (Anderson, 1995)

Por otro lado, la fractura lenta o retardada se caracteriza por la propagación progresiva de una grieta a lo largo del tiempo debido a cargas repetitivas o fluctuantes. Dentro de esta categoría se incluyen la fatiga, la propagación de grietas por termofluencia y el agrietamiento por corrosión y esfuerzos mecánicos (Broek, 1982).

Dado que la mayoría de los componentes estructurales y mecánicos operan sin exceder el límite elástico del material, la mecánica de fractura lineal-elástica (MFLE) es la aproximación más utilizada para evaluar la resistencia a la fractura (Rice, 1968).

4.1.1.1. Inicio y propagación de la grieta. El proceso de Fractura se desarrolla a partir del inicio de la grieta y se continúa con su propagación y la rotura final. Las grietas que originan la rotura o fractura casi siempre se nuclean sobre la superficie en un punto donde existen concentraciones de tensión (originadas por diseño o acabados).

Las cargas cíclicas pueden generar discontinuidades superficiales microscópicas debido a los escalones formados por deslizamiento de dislocaciones, los cuales actuarán como concentradores de la tensión y, por tanto, como lugares de nucleación de grietas. Una vez nucleada una grieta, entonces se propaga muy lentamente y, en metales policristalinos, a lo largo de planos cristalográficos de tensión de cizalladura alta; las grietas normalmente se extienden en pocos granos en esta fase.

La velocidad de extensión de la grieta aumenta de manera vertiginosa y en este punto la grieta deja de crecer en el eje del esfuerzo aplicado para comenzar a crecer en dirección perpendicular al esfuerzo aplicado. La grieta crece por un proceso de enrolamiento y agudización de la punta a causa de los ciclos de tensión. Al mismo tiempo que la grieta aumenta en anchura, el extremo avanza por continua deformación por cizalladura hasta que alcanza una configuración enrollada. Se alcanza una dimensión crítica de la grieta y se produce la rotura (Revenga, 2015).

4.1.1.2. Factor de intensidad de esfuerzos. El factor de intensidad de esfuerzo (ΔK) es un parámetro esencial en la mecánica de la fractura que describe el campo de esfuerzo cerca de la punta de una grieta en un material. Se define como la diferencia entre el factor de intensidad de esfuerzo máximo y el mínimo durante un ciclo de carga:

Ecuación 1

$$\Delta K = K_{\max} - K_{\min} \quad (1)$$

Donde:

ΔK = Rango del factor de intensidad de esfuerzos

K_{max} = Valor máximo del factor de intensidad de esfuerzos durante el ciclo de carga

K_{min} = Valor mínimo del factor de intensidad de esfuerzos durante el ciclo de carga

Este factor es clave para evaluar el comportamiento de las grietas, ya que un mayor ΔK implica una mayor probabilidad de crecimiento de la grieta. En la investigación sobre la propagación de grietas en acero HSLA, el ΔK es un parámetro crítico para predecir la vida útil del material (Roylance, 2001).

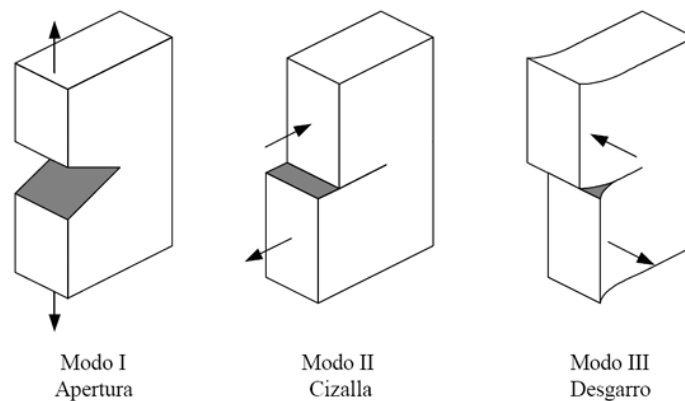
Este criterio es clave en el diseño de componentes estructurales para evitar la propagación catastrófica de grietas.

Los modos de falla incluyen:

1. **Modo I:** Carga perpendicular a la grieta, causando su apertura (Anderson, 1995)
2. **Modo II:** Carga tangencial, desplazando las caras de la grieta en el mismo plano (Broek, 1982)
3. **Modo III:** Carga paralela al borde de la grieta, generando esfuerzo cortante (Rice, 1968)

Figura 2

Modos de falla



Nota. Tomado de Kui Zhu & Joyce, 2012

En el modo I, el criterio tensional de fractura establece que la propagación de la grieta ocurre cuando el parámetro **K**, al representar completamente el estado de tensiones en su entorno, alcanza un valor crítico.

Ecuación 2

$$K_i \geq K_c \quad (2)$$

Donde:

K_i = Factor de intensidad de esfuerzos aplicado

K_c = Tenacidad a la fractura o factor de intensidad de esfuerzos crítico del material

La tenacidad a la fractura (K_c) es una propiedad intrínseca del material que representa su capacidad para resistir la propagación de una grieta bajo condiciones de carga crítica. Esta relación se expresa mediante la

Ecuación 3

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

Ecuación 4

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

Donde:

K = Factor de intensidad de esfuerzos

P = Carga aplicada durante el ensayo

S = Distancia entre apoyos en la prueba de flexión de tres puntos

B = Espesor total de la probeta

B_N = Espesor neto (después del entalle o grieta) – a veces $\approx B$

W = Altura total de la probeta

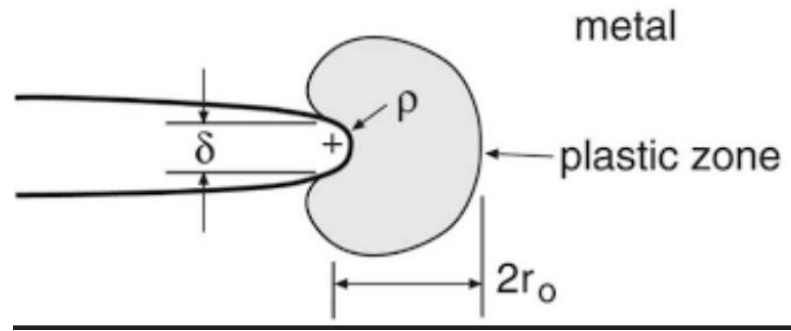
a = Longitud de la grieta

$f(a/W)$ = Factor geométrico adimensional

4.1.1.3. Plasticidad en la punta de la grieta. En la punta de la grieta, se desarrolla una zona plástica debido a la concentración de tensiones. Esta deformación plástica se forma de modo circular (esférica) sobre la punta de la grieta y el tamaño de esta zona plástica depende de las propiedades del material y de la forma de aplicación del esfuerzo, monotónico y cíclico. También depende del tamaño de la probeta, es decir si se está en una situación de estado plano de deformación o de estado plano de esfuerzo.

Figura 3

Plasticidad en la punta de la grieta



Nota. Tomado de Sun & Jin, 2012

4.2. Propiedades Mecánicas

Determinan el comportamiento de los materiales cuando se ven sometidos a la acción de fuerzas exteriores, cada propiedad aporta información clave para predecir el rendimiento del material bajo condiciones reales de uso.

Las propiedades mecánicas de un material son aquellas que describen su comportamiento cuando se le aplican cargas externas. Estas propiedades incluyen la resistencia (capacidad para soportar esfuerzos sin fractura), ductilidad (capacidad de deformarse plásticamente sin romperse), tenacidad (resistencia a la fractura), rigidez (resistencia a la deformación) y fatiga (resistencia a la fractura bajo cargas cíclicas). Para materiales como el inconel 718, estas propiedades son fundamentales en aplicaciones industriales donde los componentes están sujetos a esfuerzos repetitivos. La tenacidad y la resistencia a la fatiga son de particular relevancia cuando se evalúa la propagación de grietas bajo condiciones de carga cíclica (Boresi & Schmidt, 1993)

4.2.1. Materiales Ortotrópicos

Los materiales ortotrópicos son aquellos que presentan tres direcciones de simetría en sus propiedades mecánicas. Cada dirección tiene propiedades diferentes, lo que significa que el material tiene un comportamiento anisotrópico. En la fabricación aditiva, los materiales

ortotrópicos pueden formarse debido a la orientación de la impresión capa por capa. Esta anisotropía puede afectar las propiedades mecánicas del material, especialmente en lo que respecta a la resistencia a la propagación de grietas y la fatiga (Broek, 1982)

4.2.2. Propiedades mecánicas relacionadas con la propagación de grietas

Las propiedades mecánicas relacionadas con la propagación de grietas son esenciales para entender cómo los materiales se comportan bajo cargas cíclicas. La resistencia a la fractura, la tenacidad y la fatiga son propiedades clave que determinan la capacidad de un material para resistir el crecimiento de grietas. En particular, la resistencia a la propagación de grietas es una propiedad crítica para predecir la vida útil de los componentes en condiciones de fatiga. El inconel 718 fabricado por DED-LB debe mostrar un buen equilibrio entre resistencia y ductilidad para resistir la propagación de grietas (Bertram, 1999).

La evaluación de las propiedades mecánicas y la propagación de grietas en materiales metálicos ha sido un área fundamental de estudio en la ingeniería mecánica, dado el impacto directo que tienen en la seguridad, fiabilidad y vida útil de los componentes estructurales. En este contexto, la mecánica de la fractura juega un papel crucial, proporcionando las herramientas necesarias para predecir el comportamiento de los materiales frente a cargas cíclicas, especialmente en condiciones extremas donde la fatiga y la fractura pueden llevar al colapso de los componentes.

La propagación de grietas es un fenómeno clave, particularmente en el inconel 718, el cual es ampliamente utilizado en aplicaciones estructurales exigentes, como en la automoción, aeronáutica y construcción. Este material combina una alta resistencia mecánica con una excelente resistencia a la corrosión y estabilidad térmica, lo que lo convierte en una opción ideal para estas aplicaciones, especialmente en entornos de alta temperatura y carga cíclica. Las

propiedades mecánicas de los materiales, como la resistencia a la tracción, la ductilidad, tenacidad y resistencia a la fatiga son fundamentales para comprender su comportamiento bajo carga cíclica y, por ende, cómo se propagan las grietas.

En particular, la resistencia a la propagación de grietas es uno de los aspectos más críticos en la ingeniería de materiales, ya que las grietas pueden llevar a la fractura prematura de los componentes. La combinación de análisis metalográfico y pruebas de fractura, permiten evaluar de manera precisa las propiedades de los materiales y predecir su comportamiento bajo condiciones de carga cíclica.

4.3. CTOD

En el estudio de la propagación de grieta el ensayo de desplazamiento de apertura de la punta de la grieta (CTOD, por sus siglas en inglés). Es un estudio fundamental ya que nos permite evaluar la tenacidad a la fractura de un material midiendo la deformación plástica en la punta de una grieta inducida de manera intencional antes de la fractura. Este ensayo nos muestra de manera fidedigna el comportamiento de un material sometido a carga cíclica, permitiendo predecir la resistencia a la propagación de grietas y a optimizar los diseños estructurales.

Todo esto es conocido para procesos de manufactura convencionales, pero para la fabricación aditiva aún no se conoce suficiente sobre este ensayo. El proceso de deposición directa de energía con láser (DED-LB), ha demostrado un desempeño prometedor en la fabricación de piezas fabricadas con la aleación inconel 718 por lo que es imperativo estudiar su comportamiento frente a la fractura.

Los fundamentos de la prueba CTOD se basan en romper una muestra con un grosor completo del material, sujeto a verificación. El espécimen tiene una muesca preliminar y mecánicamente cortada, que luego se desarrolla (a través de los procesos de fatiga) a tal tamaño

que los efectos del tratamiento mecánico permanecen lejos de la parte delantera de la muesca de fatiga y la forma del frente de muesca es repetible para cada muestra. Para verificar esta repetibilidad, los resultados de la prueba se verifican después de que la muestra está completamente fracturada y solo se acepta si la proporción del frente de fractura por fatiga se verifica correctamente

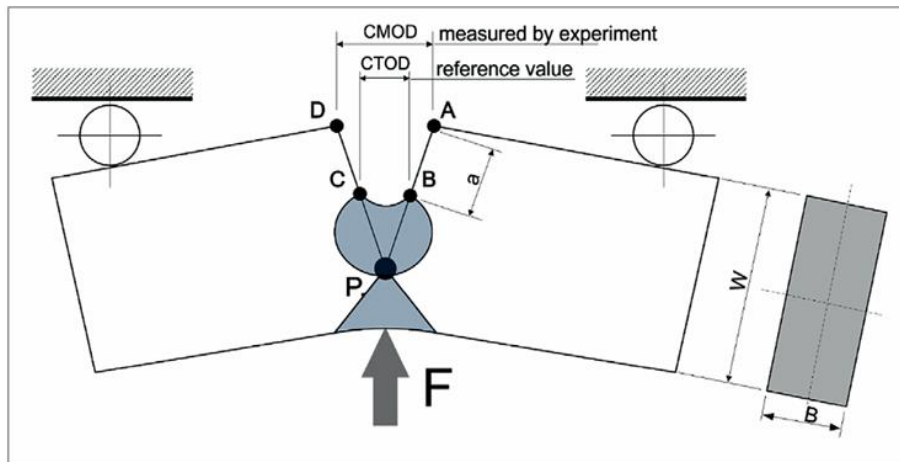
4.3.1. *CMOD*

Desplazamiento de la apertura de la boca de la grieta (*CMOD*, por sus siglas en inglés) es la medida del desplazamiento de la boca de la grieta, es decir, cuánto se separan los bordes de la grieta en la zona de la muesca debido a la carga aplicada. Aunque no representa directamente la apertura en la punta de la grieta, está relacionado con ella a través de ecuaciones empíricas. Durante el ensayo, la probeta se somete a flexión en tres puntos y se registra el *CMOD* en función de la carga aplicada, lo que permite calcular el *CTOD* considerando la geometría de la probeta y el comportamiento elastoplástico del material.

Esta medición es crucial para evaluar la tenacidad a la fractura en materiales dúctiles, ya que proporciona una forma indirecta pero más sencilla de analizar la resistencia a la propagación de grietas en estructuras sometidas a carga estática o cíclica, como tuberías, componentes aeronáuticos y estructuras navales.

Geoméricamente el *CTOD* se define como se muestra a continuación.

Figura 4

Ensayo de CTOD

El CTOD se expresa con la letra δ_T

Ecuación 4

$$\delta_T = \frac{r_y (W - a) AD}{r_y (W - a) + a} = \frac{r_y (W - a) \delta_M}{r_y (W - a) + a} \quad (4)$$

Donde:

δ_T = CTOD total

r_y = Coeficiente geométrico

W = Altura total de la probeta

a = Longitud de la grieta

AD o δ_M = Desplazamiento medido en el punto D

Ecuación 5

$$r_y = \frac{CBa}{(W - a)(AD - CB)} \quad (5)$$

Donde

r_y = Coeficiente geométrico

W = Altura total de la probeta

a = Longitud de la grieta

C, B, A, D = Puntos de referencia geométricos de la probeta

El coeficiente r_y suele tomar valores en el rango 0,38-0,46.

4.3.2. Prueba de tres puntos

La prueba de tres puntos es un ensayo utilizado para medir la flexión y la resistencia a la fractura de materiales. En este ensayo, una probeta rectangular se apoya en dos puntos fijos, y se aplica una carga en el centro. La prueba de tres puntos es esencial para determinar la resistencia a la fractura de los materiales metálicos, incluidos los fabricados por DED-LB, y permite obtener datos sobre su módulo de elasticidad y la resistencia a la flexión (Kanninen & Popelar, 1985).

4.4. Correlación Digital de Imágenes

La correlación digital de imágenes (DIC, por sus siglas en inglés) es una técnica óptica sin contacto utilizada para medir desplazamientos, deformaciones y tensiones en materiales sometidos a carga. Se basa en la captura y comparación de imágenes de la superficie del material antes y después de la deformación, aplicando algoritmos de correlación para rastrear los patrones de textura en las imágenes digitales (Sutton, et al., 2009)

El proceso de la DIC implica dividir las imágenes en pequeñas regiones llamadas subconjuntos, cuyo movimiento es rastreado en diferentes etapas de carga. A través de estos

desplazamientos, se pueden determinar campos de deformación con alta resolución espacial y precisión. Esta técnica puede aplicarse en dos dimensiones (2D) cuando se usa una sola cámara o en tres dimensiones (3D) con un sistema de cámaras estereoscópicas (Pan, et al., 2009)

Algunos de los programas más usados para la correlación de imágenes en ensayos CTOD y el análisis de propagación de la grieta son VIC-2D y VIC- 3D, ampliamente empleado en análisis de fractura, DAVIS especialista en captar la evolución de grieta en tiempo real y ARAMIS que ofrece mediciones precisas. Aunque en el mercado se pueden encontrar muy buenas opciones por cuestiones de costos y licencias, se usarán NCRR.

Es importante destacar que NCRR ha sido evaluado en estudios comparativos con los programas mencionados anteriormente, demostrando su precisión y eficiencia (Harilal & Ramji, 2014). Este software permite generar gráficos de desplazamiento en las direcciones U y V , además de calcular las deformaciones exx , eyy y exy para cada imagen analizada.

4.5. Fabricación Aditiva

En los últimos años, la fabricación aditiva ha emergido como una tecnología disruptiva en la ingeniería de materiales y manufactura. Uno de los procesos más avanzados en esta área es la Deposición Directa de Energía con Láser (DED-LB, por sus siglas en inglés), el cual permite la fabricación y reparación de componentes metálicos mediante la deposición controlada de material fundido capa por capa. A diferencia de otros métodos como la fusión selectiva por láser (SLM), DED-LB ofrece mayor flexibilidad en la construcción de piezas de gran tamaño y en la adición de material sobre sustratos preexistentes, lo que lo hace ideal para aplicaciones aeroespaciales, automotrices y biomédicas. (Boresi et al., 1993; Roylance, 2001).

Sin embargo, las condiciones térmicas involucradas en el proceso, como el enfriamiento rápido y la generación de tensiones residuales, pueden afectar significativamente las propiedades

mecánicas del material, particularmente su resistencia a la propagación de grietas. Investigaciones recientes han encontrado que los materiales fabricados aditivamente, incluido el Inconel 718, pueden exhibir diferencias microestructurales y mecánicas en comparación con aquellos producidos mediante métodos convencionales.

En particular, los ciclos térmicos repetitivos durante la fabricación aditiva pueden inducir la formación de zonas de fusión heterogéneas y fases intermetálicas, como la fase Laves, lo que puede influir en la resistencia, la ductilidad y el comportamiento frente a cargas cíclicas. Estudios recientes han analizado el efecto de estos factores en la anisotropía mecánica y la resistencia a la fatiga, destacando la importancia de optimizar los parámetros del proceso para mejorar la integridad estructural de las piezas fabricadas (Thijs, et al., 2013)

4.6. Estudios Previos

Para el desarrollo del documento fue necesario realizar un amplio estudio e investigación sobre el tema y conceptos relacionados los cuales se han incluido y presentado debidamente a lo largo del informe. No obstante, algunos artículos han destacado en el aporte de información utilizada y esencial debido a su relación y relevancia con el tema.

- (Gómez, 2023) Esta tesis de grado describe de manera detallada el proceso para determinar el factor de intensidad de esfuerzos equivalente por medio de ensayos de tensión y propagación en la punta de la grieta por fatiga. El paso a paso de la metodología se utilizó como un punto de guía y referencia para la toma de datos y procesamiento de estos.
- (Cervantes, et al., 2018). Explora la integración de procesos de manufactura aditiva con tecnología de arco metálico (MIG) y un sistema CNC para la fabricación de piezas metálicas. Se analiza la influencia de este método en la calidad del material, evaluando

propiedades mecánicas mediante ensayos de tensión, impacto y microdureza. Estos hallazgos son útiles ya que permite tener una referencia de cómo la técnica de fabricación aditiva afecta de manera microestructural al material dando una idea muy cercana de cómo se comportará en contraste con otras técnicas.

- (Ersan, 2023) investigó la tenacidad a la fractura del acero inoxidable dúplex grado 2509 fabricado mediante manufactura aditiva por arco de alambre (WAAM, por sus siglas en inglés). En su estudio, se analizaron los efectos de los ciclos térmicos y del gas de protección en la microestructura y en las propiedades mecánicas del material, concluyendo que la composición del gas tiene un impacto significativo en la resistencia a la propagación de grietas.
- (Fang, et al.,2021) realizaron un análisis basado en datos sobre las simulaciones térmicas, la microestructura y las propiedades mecánicas de paredes delgadas de Inconel 718 fabricadas mediante manufactura aditiva metálica. En su estudio, emplearon un modelo de elementos finitos para simular el proceso de Deposición de Energía Dirigida (DED) y predecir el campo de temperatura dependiente del tiempo y el espacio durante la construcción en múltiples capas. Validaron su modelo térmico con imágenes infrarrojas captadas en tiempo real y emplearon redes neuronales convolucionales (CNN) para extraer características relevantes de la historia térmica simulada. Sus hallazgos demostraron que la relación entre la tasa de enfriamiento y las propiedades mecánicas es compleja, y que el uso de CNN permitió identificar características dominantes que influyen en la evolución microestructural y en la resistencia mecánica del material.

5. Metodología

Este capítulo presenta los materiales, equipos y procedimientos utilizados para desarrollar la investigación sobre el comportamiento del desplazamiento en la apertura de la punta de la grieta (CTOD) en el material Inconel 718, tanto en su forma forjada como en su forma depositada por láser. Se describen los métodos empleados para la preparación de las probetas, la realización de los ensayos mecánicos y el análisis de los datos obtenidos. La elección de estos enfoques metodológicos se fundamenta en la necesidad de obtener resultados precisos, comparables y representativos del comportamiento mecánico del material bajo condiciones controladas.

Los ensayos experimentales se realizaron en una máquina universal de ensayos MTS Bionix, con una capacidad máxima de 25kN, la cual permitió aplicar cargas con alta precisión y registrar el comportamiento de las muestras en tiempo real. Las probetas se fabricaron a partir de Inconel 718 en dos condiciones distintas: una mediante proceso de forja convencional y otra mediante deposición láser (Laser Metal Deposition, LMD).

La metodología fue diseñada para permitir una comparación directa entre ambos métodos de fabricación. En las siguientes secciones se describen detalladamente los materiales, el proceso de fabricación de las probetas, las condiciones de ensayo y los criterios empleados para el análisis y validación de los datos.

5.1. Tracción Uniaxial.

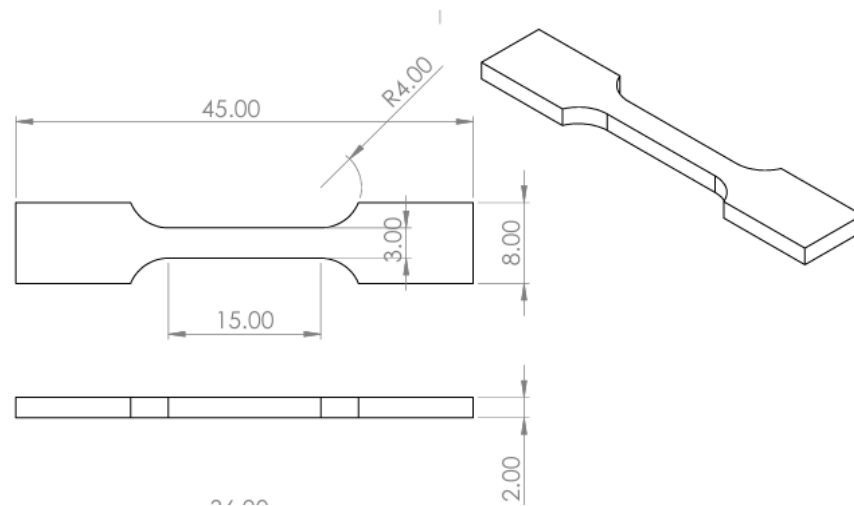
Los ensayos se realizaron conforme a la norma ASTM E8 -22 y fueron fabricados utilizando una cortadora de hilo, presentando su geometría en la figura 6. La recolección de datos se efectuó empleando un extensómetro láser.

A partir de los datos obtenidos en las pruebas de tracción, se efectuó un proceso de filtrado y depuración con el propósito de reducir el ruido y evitar resultados inconsistentes. El esfuerzo se calculó dividiendo la fuerza aplicada entre el área transversal inicial de la probeta (A_0), mientras que la deformación se determinó como el cociente entre el cambio de longitud registrado por el extensómetro y su longitud de calibración. Con esta información, se construyeron las correspondientes curvas esfuerzo–deformación.

El módulo de Young (E) se obtuvo a partir de la pendiente de la curva esfuerzo–deformación en el intervalo comprendido entre 0 y el límite proporcional, correspondiente a la región elástica del material.

Figura 5

Probeta ensayo tracción



Nota. Dimensiones y diseño de la probeta para el ensayo de tracción.

5.2. Ensayo CTOD

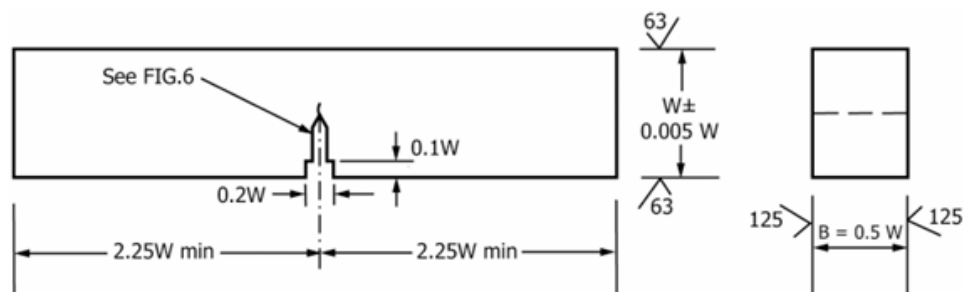
Cada muestra se preparó siguiendo los lineamientos establecidos en la norma ASTM E1820-24, la cual regula los ensayos de fractura empleados para determinar parámetros como el

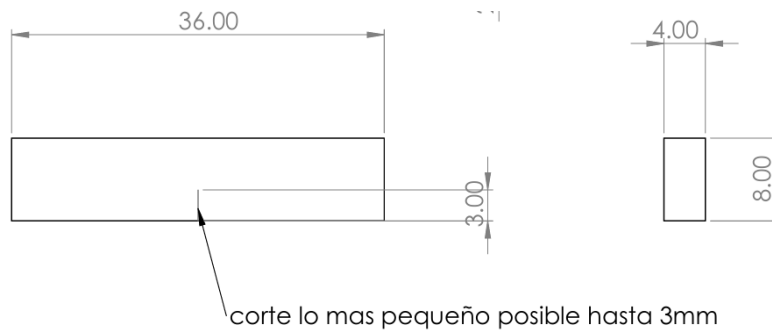
CTOD. Esta norma define los criterios geométricos en función del espesor de la muestra (Figura 7a), obteniéndose así la geometría ilustrada en la Figura 7b utilizada para el ensayo.

Aunque las dimensiones de las probetas empleadas en este estudio corresponden a una configuración sub-tamaño respecto a las geometrías de referencia comúnmente utilizadas, la selección dimensional se realizó conforme a los lineamientos de la misma norma y en el contexto de una investigación científica, donde la disponibilidad de material y las condiciones de fabricación pueden requerir geometrías reducidas. La ASTM E1820 establece que la validez de los parámetros de tenacidad a la fractura no depende de un tamaño absoluto de probeta, sino del cumplimiento de criterios de restricción plástica y estado de deformación plana, expresados mediante relaciones entre el espesor (B), el ligamento remanente (b) y la tenacidad medida. En particular, la norma indica que B y b deben ser mayores o iguales a $25 JQ/\sigma Y$, condición que fue verificada para las probetas utilizadas. Por tanto, los resultados obtenidos pueden considerarse técnicamente válidos dentro del marco establecido por la norma ASTM E1820, siendo además coherentes con prácticas experimentales aceptadas en estudios de investigación de materiales.

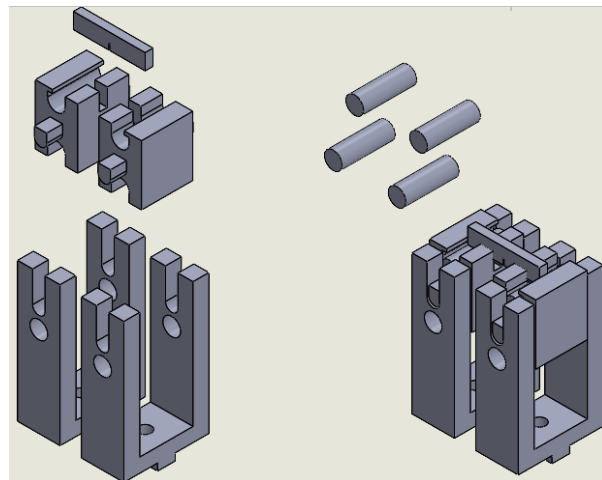
Figura 6

a) Criterios geométricos según la norma



b) Dimensiones de la muestra

Previo al ensayo CTOD, se efectuó un proceso de pre agrietado controlado con el propósito de reducir la elasticidad en la punta de la grieta y asegurar una propagación estable y representativa durante el ensayo principal. Debido a las reducidas dimensiones de las muestras, fue necesario diseñar y fabricar soportes a medida que garantizaran la correcta alineación y sujeción del espécimen durante el proceso de pre agrietado (Figura 8).

Figura 7*Soporte*

El proceso de pre agrietado se llevó a cabo siguiendo la sección 7.4.5 de la norma ASTM E1820-24 (Fatigue Precracking Procedure), la cual establece el límite superior para la intensidad de esfuerzos en el inicio del pre agrietado mediante la siguiente expresión:

Ecuación 6

$$K_{MAX} = \sqrt{\frac{\sigma_{YS,f}}{\sigma_{YS,T}}} 0.063 * \sigma_{YS} \quad [MPa \cdot \sqrt{m}] \quad (6)$$

Donde:

K_{max} = Valor máximo del factor de intensidad de esfuerzos (MPa·√m)

$\sigma_{ys,f}$ = Límite de fluencia del material a la temperatura de pre agrietado (MPa)

$\sigma_{ys,t}$ = Límite de fluencia del material a la temperatura del ensayo principal (MPa) (para este caso, iguales ya que ambos se realizaron a temperatura ambiente).

σ_{ys} = Límite de fluencia del material (MPa)

El valor de σ_{YS} se obtiene por medio de ensayos de tracción. La norma además sugiere iniciar el pre agrietado a aproximadamente $0.7 \times K_{MAX}$ y ajustar según el comportamiento del material. Dado que el material nunca había sido ensayado previamente, se decidió iniciar a un valor inferior $0.4 \times X_{max}$. Con base a este valor de K se estimó la fuerza máxima mediante la expresión:

Ecuación 7

$$P_{MAX} = \frac{0.4 * K_{max} * (B * B_N)^{0.5} W^{1.5}}{(S * f)} \quad [N] \quad (7)$$

Donde:

- B: espesor de la probeta.
- BN: ancho neto en la base de la grieta ($\approx B$).
- W: altura de la probeta.
- S: distancia entre apoyos.
- a/W: relación de longitud de grieta.
- f(a/W): Factor geométrico según ASTM E1820-24.

Según la norma ASTM E1820-24 (§7.4.5.2), valores de R comprendidos entre 0.1 y 0.2 son los más efectivos para obtener pre agrietados estables y reproducibles. Por lo tanto, se estableció R=0.2 para mantener una amplitud de la fuerza más controlada y determinar el valor de la fuerza mínima.

Ecuación 8

$$P_{min} = 0.2 * P_{max} \quad [N] \quad (8)$$

Donde

P_{min} = Carga mínima aplicada durante el ciclo de pre agrietado

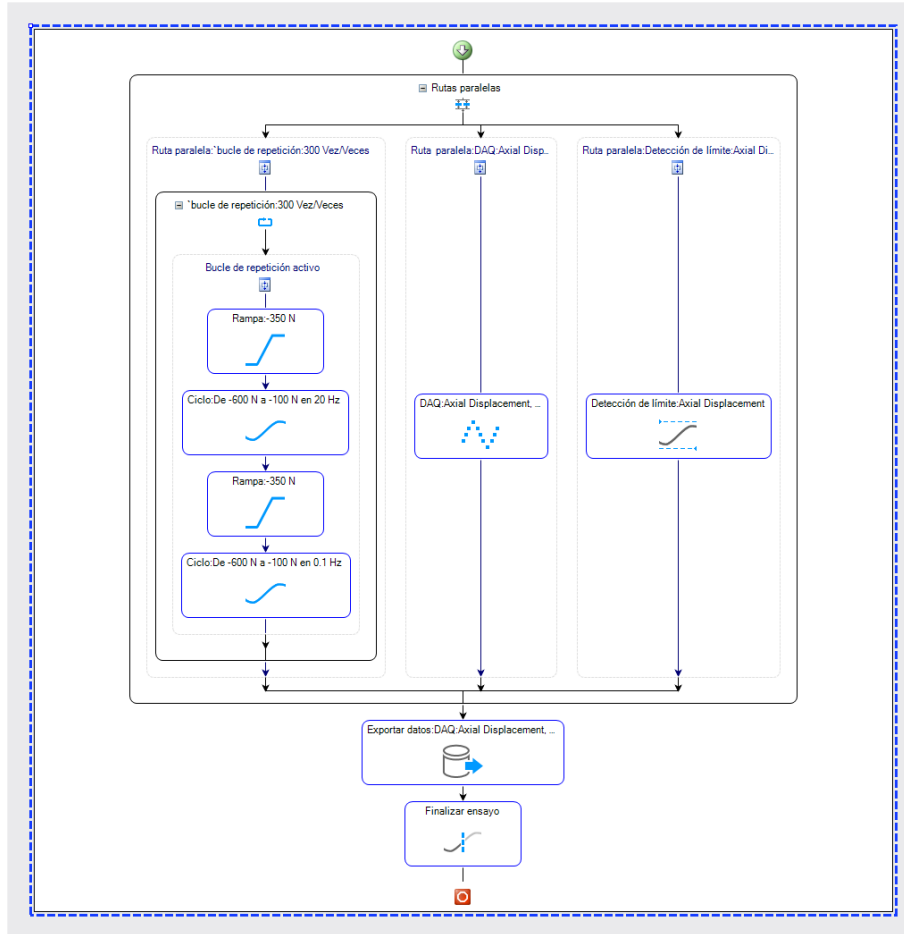
P_{max} = Carga máxima aplicada durante el ciclo de pre agrietado

0.2 = Relación R entre cargas mínimas y máximas

Con estos valores establecidos se inició la configuración experimental del pre agrietado.

Figura 8

Configuración experimental pre agrietado



Nota. Sujeción del espécimen durante el proceso de pre agrietado

La rampa de carga se definió de forma lineal como la suma de la fuerza mínima (F_{\min}) más la amplitud del ciclo, de modo que la carga instantánea se calculó según:

Ecuación 9

$$Rampa = P_{\min} + \frac{(P_{\max} - P_{\min})}{2} [N] \quad (9)$$

Donde

Rampa = Valor instantáneo o promedio de carga durante la rampa de aplicación de fuerza en el pre agrietado

P_{\min} = Carga mínima aplicada durante el ciclo de carga

P_{\max} = Carga máxima aplicada durante el ciclo de carga

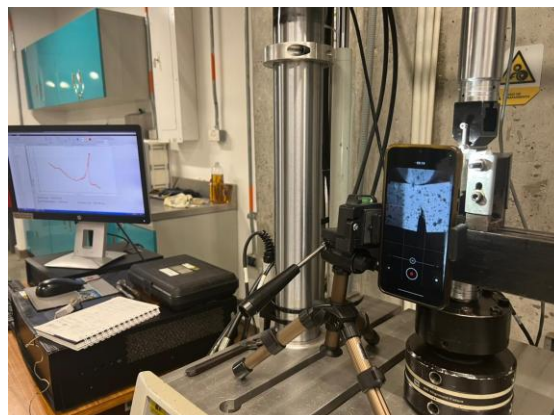
Con todos los parámetros definidos, se procedió a realizar el ensayo de pre agrietado, desarrollado en dos etapas secuenciales de carga. En ambas fases se aplicó una rampa de 350 N, diseñada para asegurar una transición progresiva y evitar impactos en el sistema.

En la primera etapa, se ejecutó un ciclo dinámico en el que la carga osciló entre 600 N y 100 N con una frecuencia de 20 Hz, con el propósito de favorecer la nucleación inicial de la grieta en la raíz de la entalla de la probeta de Inconel 718. Posteriormente, en la segunda etapa, se mantuvo el mismo rango de carga, pero con una frecuencia reducida de 0.1 Hz, con el fin de controlar la propagación estable y el avance final de la grieta pre agrietada, condición que se estableció como punto inicial para el ensayo de fractura posterior.

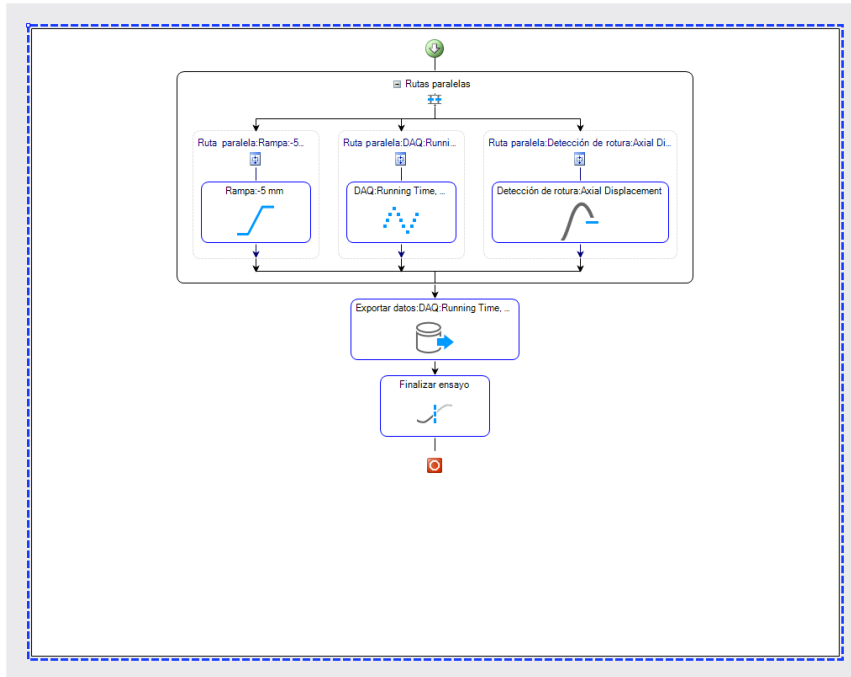
Posteriormente, se llevó a cabo el ensayo CTOD, cuyo montaje experimental se presenta en la Figura 10a. La adquisición de datos se realizó mediante captura de imágenes a una frecuencia de 0.076 fps, utilizando una cámara de 12 megapíxeles equipada con un lente gran angular de 26 mm de distancia focal equivalente, apertura f/1.5 y sistema de estabilización óptica por desplazamiento del sensor. El procedimiento de adquisición de datos se ilustra en la Figura 10b.

Figura 9

a) Montaje



b) Programa de adquisición de datos.



Para el desarrollo del estudio, se emplearon probetas de acero inoxidable AISI 316L con el propósito de realizar la calibración y modelado de las curvas experimentales, así como la interpretación del comportamiento mecánico del material. Esta fase tuvo como objetivo verificar la precisión del procedimiento y minimizar posibles errores antes de su aplicación al material de interés, el Inconel 718. Esta etapa se apoyó a partir de datos experimentales reportados en un estudio previo (Gómez, 2023), en la cual se había caracterizado el comportamiento a tracción del acero 316L, proporcionando una base confiable para el análisis comparativo y la validación de resultados.

Posteriormente, se aplicó el mismo procedimiento experimental al Inconel 718, incorporando sus propiedades mecánicas específicas derivadas de los ensayos de tracción, con el objetivo de determinar las ecuaciones necesarias para el cálculo del factor de intensidad de esfuerzos (K) y, en consecuencia, de la fuerza aplicada durante los ensayos de fractura. El

material se evaluó en dos condiciones de fabricación: por forjado y por fabricación aditiva, preparando un total de siete especímenes, de los cuales cuatro corresponden al material fabricado por adición y tres al material forjado; este número reducido de probetas forjadas se debió a la limitada disponibilidad de material.

Durante la adquisición de datos, basada en el procesamiento de imágenes, las superficies de los especímenes fueron pintadas de blanco y se añadieron pequeñas manchas negras de forma aleatoria con un cepillo, con el propósito de aumentar el contraste visual y facilitar la detección de desplazamientos durante el análisis de imágenes. Los ocho especímenes finales utilizados en los ensayos principales se muestran en la Figura 10.

Figura 10

Probetas del ensayo CTOD



5.2.1. Definición de parámetros

El cálculo del factor de intensidad de esfuerzos (K) se realizó teniendo en cuenta la geometría del espécimen y los parámetros obtenidos experimentalmente. Para ello, se empleó la

Ecuación 6, la cual relaciona la carga aplicada, las dimensiones de la probeta y la razón entre la longitud de grieta y el ancho del espécimen (a/W), a través de la función geométrica $f(a/W)$. Este procedimiento permitió determinar el valor de K correspondiente a la Ecuación 3 y 4, siguiendo las directrices establecidas en la norma ASTM E1820.

Para el análisis de los datos correspondientes al ensayo CTOD, se grabó un video sincronizado con el funcionamiento de la máquina de ensayo, iniciando la filmación exactamente en el mismo instante en que comenzó la aplicación de la carga. Esto permitió asociar los tiempos registrados en el video con los datos generados por la máquina, estableciendo una correspondencia directa entre los eventos observados en la probeta y los valores de fuerza aplicados durante el ensayo.

La apertura de la boca de la grieta se determinó utilizando el programa ImageJ, una aplicación que permite obtener mediciones precisas a partir de fotografías o fotogramas de videos, mediante la definición de una escala de referencia. A partir del video registrado durante el ensayo, se extrajeron aproximadamente 100 fotogramas por video, los cuales se emplearon para medir la apertura progresiva de la grieta.

Gracias a esta correlación temporal entre los datos experimentales y las mediciones obtenidas en ImageJ, fue posible relacionar la apertura de la boca de la probeta con la carga aplicada, generando la curva fuerza–apertura, a partir de la cual se determinó la apertura de la Grieta (CTOD)

5.3. Técnica de caracterización microestructural

El análisis de las superficies de fractura se realizó mediante microscopía electrónica de barrido (SEM) en el Laboratorio de Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) de

los Laboratorios Centrales de la Universidad Industrial de Santander (UIS), ubicado en el Parque Tecnológico Guatiguará. Para ello se utilizó un microscopio electrónico de barrido QUANTA FEG 650 (Thermo Fisher Scientific), equipado con una fuente de emisión de campo (FEG), que permite obtener imágenes de alta resolución y gran profundidad de campo, adecuadas para el estudio de morfologías de fractura.

Las probetas correspondientes al material forjado fueron fracturadas mediante sobrecarga mecánica previa fragilización criogénica, con el fin de exponer superficies representativas del comportamiento del material. Las superficies fracturadas no fueron sometidas a procesos de desbaste ni pulido, ya que el objetivo fue preservar las características morfológicas originales de la fractura. Posteriormente, las muestras fueron limpiadas con alcohol para remover residuos superficiales y evitar contaminación, y luego fueron llevadas directamente al análisis microscópico.

Las observaciones se realizaron principalmente en modo de electrones secundarios (SE), lo que permitió examinar la topografía de las superficies de fractura e identificar mecanismos de falla tales como fractura dúctil, frágil o mixta. Cuando fue necesario, se empleó el modo de electrones retrodispersados (BSE) para resaltar contrastes composicionales, así como microanálisis por espectroscopía de dispersión de energía de rayos X (EDS) para la identificación cualitativa de elementos presentes en zonas de interés.

Esta caracterización permitió relacionar la morfología de fractura con las propiedades mecánicas evaluadas en los ensayos realizados.

5.4. Ensayo de microdureza

La caracterización de la dureza local del material se realizó mediante microindentación Vickers, de acuerdo con los lineamientos de la norma **ASTM E384**. Este

ensayo se utilizó para comparar la respuesta del material en las distintas condiciones de fabricación del Inconel 718 evaluadas en el presente estudio.

Las mediciones se llevaron a cabo utilizando un micro durómetro equipado con un indentador piramidal de diamante tipo Vickers, con un ángulo de **136°** entre caras opuestas.

Para cada muestra se aplicó una carga de 0,3 kgf ($\approx 2,94$ N) durante un tiempo de permanencia de **15 s**, realizándose **siete (7) indentaciones por muestra** sobre la superficie analizada. La separación entre huellas fue suficiente para evitar la interacción entre las zonas plásticamente deformadas.

Las diagonales de cada huella se midieron mediante el sistema óptico del equipo y la dureza Vickers (HV) se calculó a partir de la carga aplicada y el área de la indentación. Los valores reportados corresponden al promedio de las siete mediciones realizadas para cada condición.

6. Resultado

En este capítulo se presentan los resultados experimentales obtenidos a partir de los ensayos realizados sobre los especímenes de Inconel 718 en sus dos condiciones de fabricación: forjado y por adición. Se incluyen los datos derivados de los ensayos de tracción y de fractura (CTOD), así como el procesamiento y análisis de la información obtenida mediante las herramientas experimentales y digitales utilizadas.

Los resultados permiten evaluar el comportamiento mecánico y la tenacidad del material, identificando las diferencias entre las dos rutas de fabricación y analizando los parámetros que influyen en la iniciación y propagación de la grieta.

6.1. Determinación de propiedades estáticas

En esta sección se presentan los resultados de los ensayos de tracción realizados sobre el Inconel 718 en sus dos condiciones de fabricación: forjado y por manufactura aditiva (MA). A partir de las curvas esfuerzo–deformación obtenidas se determinaron las propiedades mecánicas más representativas, como el módulo de Young, el límite elástico, la resistencia última a la tracción y la elongación a la fractura.

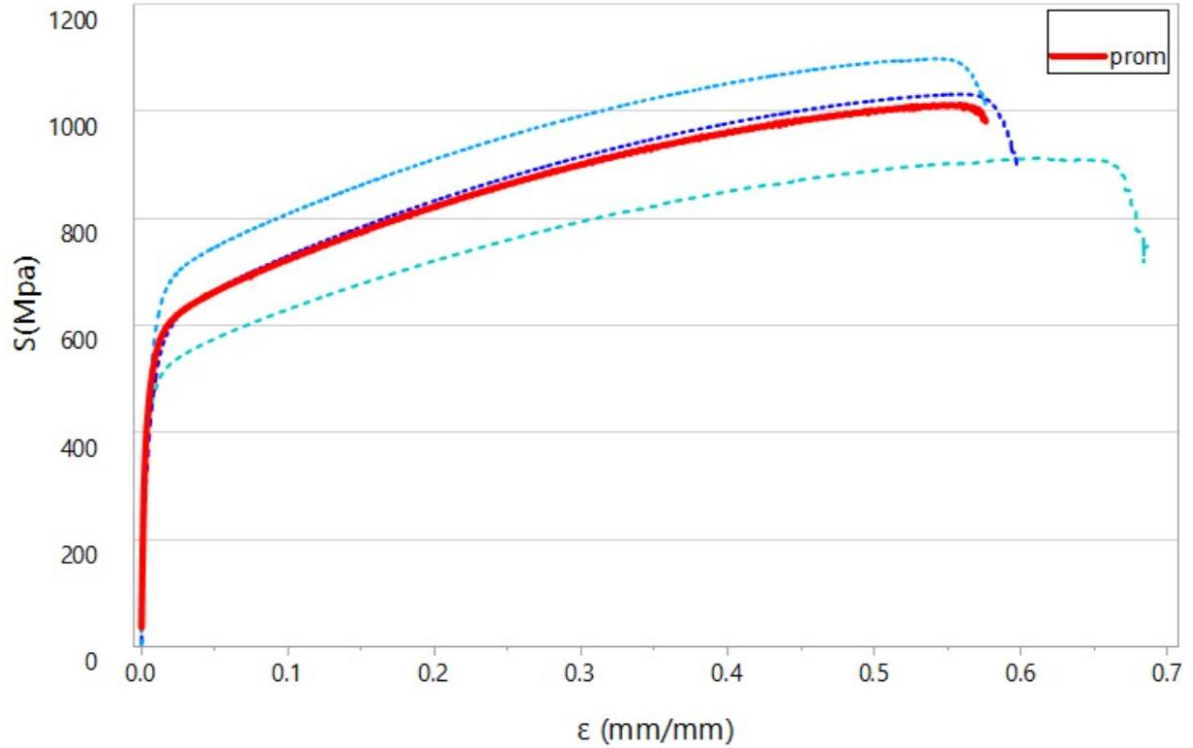
Estas curvas permiten analizar el comportamiento mecánico del material bajo carga uniaxial y comprender la influencia del método de fabricación en su respuesta ante esfuerzos aplicados. Adicionalmente, se incluyeron las curvas de esfuerzo real–deformación real, con el fin de representar de manera más precisa la evolución del material durante la deformación plástica y obtener parámetros útiles para el análisis del endurecimiento por deformación.

6.1.1. Material Forjado.

La gráfica promedio obtenida del ensayo de tracción sobre el Inconel 718 forjado evidencia un comportamiento claramente dúctil, con una región elástica lineal seguida de una fase plástica extensa antes de la fractura. En la zona elástica, la pendiente de la curva corresponde a un módulo de Young aproximado de 201 GPa, valor típico para esta aleación. El límite de fluencia se encuentra en torno a 520 MPa, tras lo cual el material presenta un endurecimiento progresivo que alcanza un esfuerzo máximo cercano a 1020 MPa. La elongación a la rotura, de 0.63 mm/mm, confirma su alta ductilidad y capacidad de deformación antes del fallo.

Figura 11

Curva esfuerzo-deformación de ingeniería material forjado



Modelo de endurecimiento — Ley de Hollomon

La relación entre el esfuerzo y la deformación plástica en régimen plástico se ajustó al modelo empírico de Hollomon:

Ecuación 10

$$\sigma = K * \epsilon_p^n$$

Donde:

σ → Tensión verdadera (MPa)

K → Coeficiente de resistencia (MPa)

ϵ_p → Deformación plástica verdadera (adimensional)

n → Exponente de endurecimiento por deformación (adimensional)

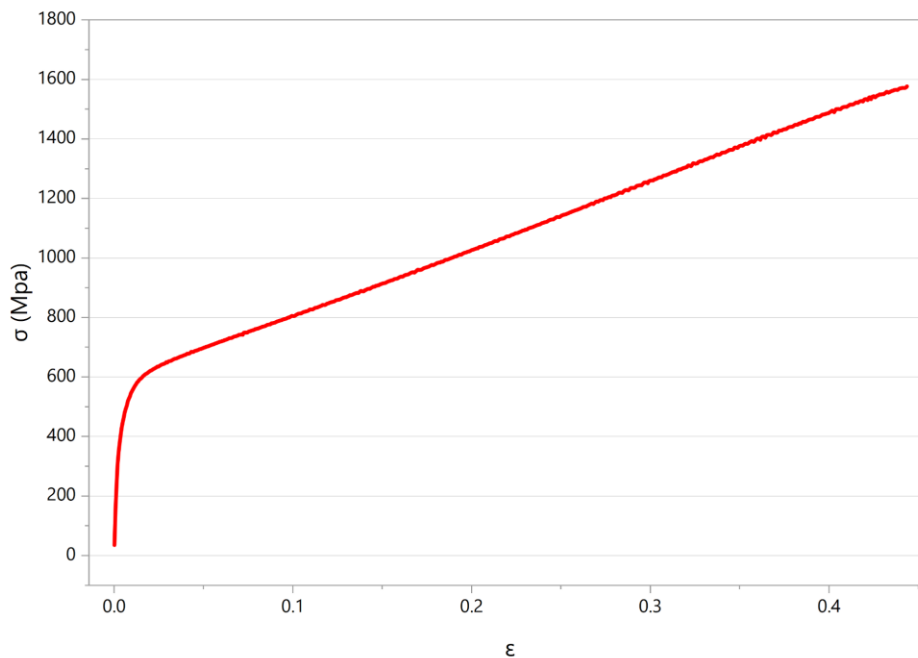
Ecuación 11

$$\sigma = 2426 * \varepsilon_p^{0.528}$$

La curva real del forjado muestra un comportamiento elasto-plástico clásico con endurecimiento pronunciado: parte elástica rígida (E alto), fluencia nítida, incremento sostenido del esfuerzo con la deformación plástica (Hollomon con K elevado y n alto) y gran capacidad de deformación verdadera antes de alcanzar la resistencia máxima.

Figura 12

Curva esfuerzo-deformación real material forjado



Los valores promedio de las propiedades obtenidas se presentan en la siguiente tabla, donde se resumen los parámetros característicos del comportamiento a tracción del material forjado.

Tabla 1

Propiedades mecánicas estáticas del forjado

Propiedades	Valores	Coefficiente de variación (%)
Módulo de Young E (GPa)	201±2.18	1%
UTS(Mpa)	1019±92.03	9%
SY(Mpa)	521±46.65	9%
ef(mm/mm)	0.63±0.05	8%
K(Mpa)	2425.7 ±4.6	6%
n	0.528±0.002	5%

Nota. Valores promedio de las propiedades y los parámetros característicos del comportamiento a tracción del material forjado.

Los resultados del Inconel 718 forjado evidencian un comportamiento típicamente dúctil, con una clara etapa de endurecimiento por deformación y una alta tenacidad antes del fallo.

En el siguiente apartado se presentan los resultados del material obtenido por manufactura aditiva, cuya microestructura y proceso de solidificación pueden modificar significativamente su respuesta mecánica frente a la del material forjado.

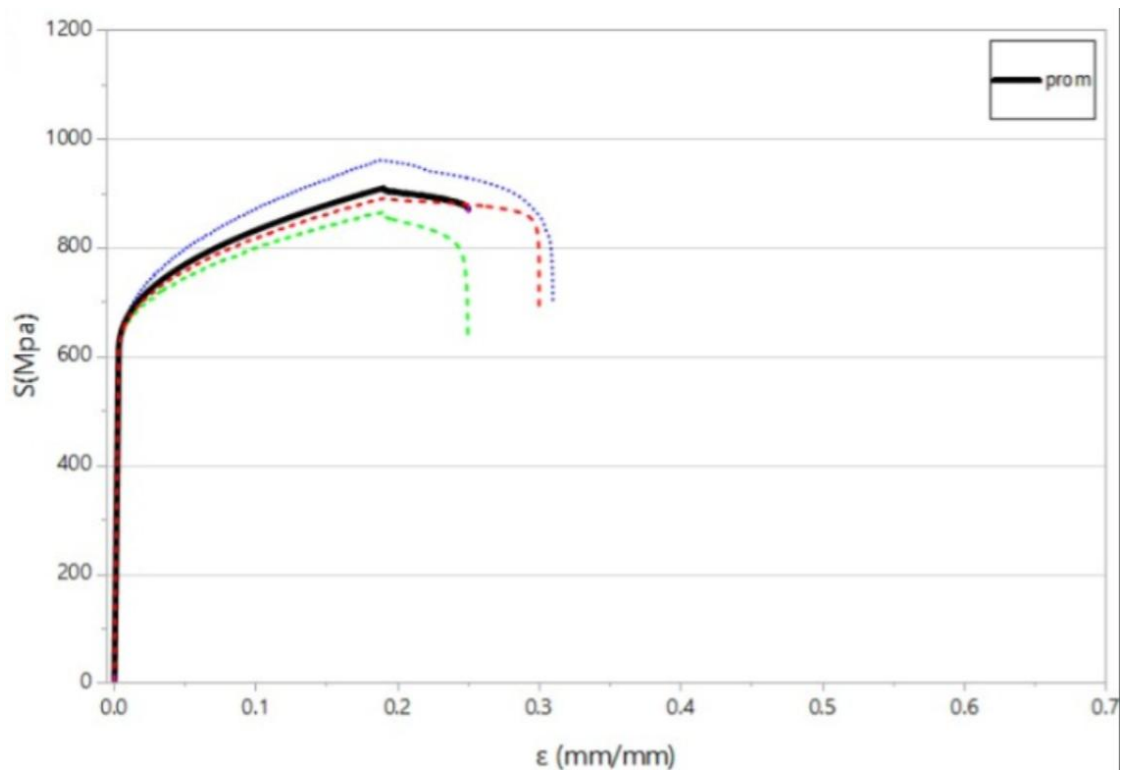
6.1.2. Material fabricado por manufactura aditiva.

La figura promedio correspondiente al Inconel 718 fabricado por MA muestra un comportamiento general dúctil, aunque con una región plástica más corta que la observada en el

material forjado. En la parte elástica, la pendiente inicial arroja un módulo de Young de 210 GPa, valor coherente con los reportados para esta aleación. El límite de fluencia se alcanza alrededor de 616 MPa, seguido de un incremento gradual del esfuerzo hasta un máximo de 910 MPa. La deformación total a la fractura, cercana a 0.28 mm/mm, indica una ductilidad moderada influenciada por la presencia de porosidad y heterogeneidades microestructurales típicas del proceso aditivo.

Figura 13

Curva esfuerzo-deformación de ingeniería material aditivo



Modelo de endurecimiento — Ley de Hollomon

La relación entre el esfuerzo y la deformación plástica en régimen plástico se ajustó al modelo empírico de Hollomon:

Ecuación 12

$$\sigma = K * \epsilon_p^n$$

Donde:

σ = Tensión verdadera (MPa)

K = Coeficiente de resistencia (MPa)

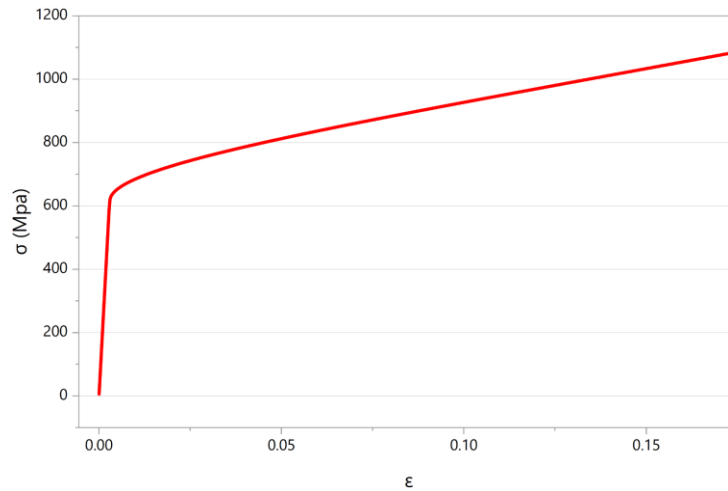
ϵ_p = Deformación plástica verdadera (adimensional)

n = Exponente de endurecimiento por deformación (adimensional)

$$\sigma = 12196.6 * \epsilon_p^{0.114}$$

El análisis de la curva esfuerzo–deformación real muestra que el Inconel 718 fabricado por manufactura aditiva DED-LB presenta un comportamiento elasto-plástico de alta rigidez y baja capacidad de endurecimiento. Su curva es pronunciadamente rígida en el tramo inicial, con un límite elástico elevado y un rápido paso hacia la zona plástica, donde la pendiente disminuye de forma notable.

La baja tasa de endurecimiento ($n=0.114$) sugiere una menor ductilidad y una propagación más temprana de la estricción, coherente con la microestructura observada: presencia de porosidad interlaminar, interfaces de baja fusión y heterogeneidad entre cordones de deposición.

Figura 14*Curva esfuerzo-deformación real material aditivo*

Los resultados promedios se presentan a continuación, donde se resumen las propiedades estáticas del material fabricado por manufactura aditiva.

Tabla 2*Propiedades mecánicas estáticas del material MA*

Propiedades	Valores	Coefficiente de variación (%)
Módulo de Young E (GPa)	210 ± 7.6	4%
UTS(Mpa)	$911. \pm 50.02$	5%
SY(Mpa)	$616. \pm 28.63$	5%
ef(mm/mm)	0.28 ± 0.03	10%
K(Mpa)	1219.6 ± 11.2	8%
n	0.114 ± 0.003	6%

Nota. Resultados promedio que resumen las propiedades estáticas del material fabricado por manufactura aditiva.

En conjunto, los resultados del Inconel 718 fabricado mediante manufactura aditiva evidencian una menor ductilidad y resistencia a la tracción, influenciadas por la naturaleza del proceso de deposición láser y las variaciones microestructurales asociadas.

Estos comportamientos servirán como base para el análisis comparativo con el material forjado, presentado en el siguiente apartado.

6.1.3. Comparación general

Al comparar las curvas de esfuerzo–deformación de ingeniería y verdaderas, ambos materiales muestran una rigidez inicial similar, con diferencias en el módulo de elasticidad de apenas un 4–5%. Sin embargo, a partir del límite elástico, sus respuestas se separan: el Inconel 718 forjado sostiene mejor el endurecimiento por deformación, alcanzando una resistencia última ~11% mayor y una elongación a rotura aproximadamente 2.3 veces superior a la del material fabricado por manufactura aditiva (MA). El material aditivo puede presentar un límite de fluencia ligeramente superior, debido a su tamaño de grano fino o tensiones residuales, pero endurece menos y entra en estricción antes, lo que limita su ductilidad total.

El exponente de endurecimiento del forjado ($n \approx 0.53$) indica una fuerte capacidad de endurecerse durante la deformación, mientras que el valor mucho menor del MA ($n \approx 0.11$) demuestra que su resistencia apenas aumenta tras la fluencia. En la práctica, esto significa que el material forjado resiste mejor el avance plástico y retrasa la aparición del cuello, mientras que el MA tiende a concentrar la deformación de forma prematura.

En términos de resistencia última y ductilidad, el forjado alcanza una tensión verdadera máxima cercana a 1577 MPa y una deformación real uniforme extensa (≈ 0.44), lo que confirma

su mayor capacidad de deformación antes de la estricción. Por el contrario, el material MA alcanza tensiones similares a menores deformaciones y falla antes, evidenciando una menor reserva plástica. El comportamiento observado concuerda con la diferencia en los parámetros del modelo: el alto K (2425 MPa) del forjado refleja una mayor escala de resistencia plástica, mientras que el K más bajo (1219 MPa) del MA está asociado a una resistencia efectiva reducida en grandes deformaciones.

En conjunto, los resultados de tracción muestran que, aunque ambos materiales poseen módulos elásticos equivalentes y un comportamiento elástico similar, el Inconel 718 forjado ofrece una respuesta plástica superior, con mayor capacidad de endurecimiento, ductilidad y resistencia última, mientras que el material aditivo exhibe una menor estabilidad plástica y una estricción temprana. Estos resultados demuestran que el proceso de fabricación influye de manera determinante en la respuesta mecánica estática del Inconel 718, siendo el material forjado el que presenta mejor desempeño global en términos de resistencia, deformabilidad y estabilidad durante la tracción.

6.2. Determinación experimental del CTOD

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de los ensayos de fractura por apertura de fisura (CTOD, Crack Tip Opening Displacement) realizados sobre las probetas de Inconel 718 en sus dos condiciones de fabricación: forjado y por manufactura aditiva (MA). El objetivo principal de este análisis es determinar la tenacidad a la fractura del material,

expresada mediante el parámetro δ (CTOD), el cual representa la capacidad del material para resistir la propagación de una grieta bajo carga aplicada.

Los resultados experimentales se obtuvieron a partir de los registros de carga y desplazamiento de la máquina de ensayo, lo que permitió identificar el punto de inicio de propagación de la grieta y calcular el valor crítico de desplazamiento en la punta (δ_s).

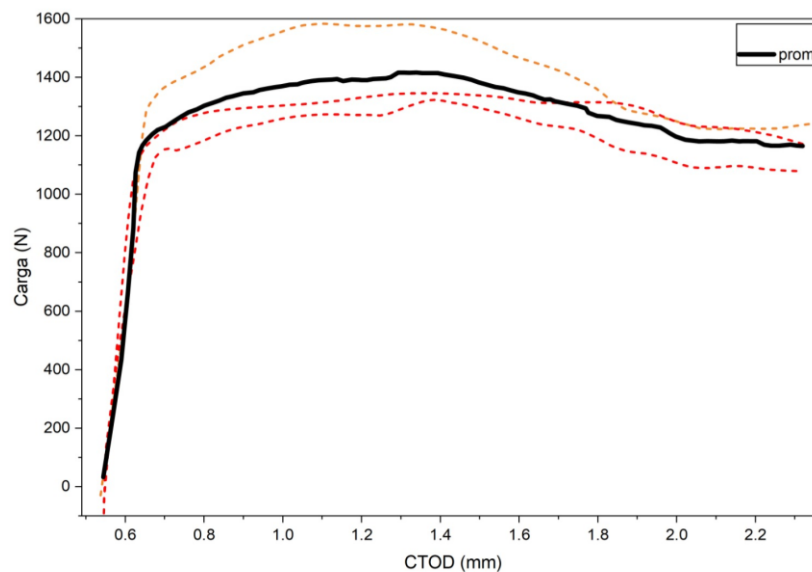
6.2.1. Material Forjado.

La Figura 15, muestra la curva de carga–desplazamiento obtenido en el ensayo CTOD para el Inconel 718 forjado. La respuesta del material presenta una etapa inicial lineal asociada al comportamiento elástico, seguida por una zona no lineal que refleja el inicio de la plastificación en la punta de la grieta.

Posteriormente, la carga alcanza un valor máximo, con picos alrededor de 1.3–1.5 mm, y una meseta amplia en el intervalo CTOD ≈ 0.8 –1.6 mm, manteniendo la carga casi constante. Después de esta región, se observa un descenso gradual, conservando valores próximos a 1.2–1.3 mm incluso a CTOD ≈ 2.2 mm.

Figura 15

Curva promedio carga–desplazamiento del material forjado



Durante los ensayos se observó que la longitud inicial de la pre-grieta influía directamente en la duración del ensayo y en la forma de la curva, ya que una pre-grieta más corta tendía a generar un tramo elástico más prolongado y una mayor carga máxima antes del inicio de la propagación. Por el contrario, una pre-grieta más desarrollada reducía el tiempo total del ensayo y adelantaba el inicio del crecimiento estable de la fisura.

Esto demuestra que la preparación de la grieta ejerce una influencia significativa en el comportamiento mecánico del material durante el CTOD. La baja dispersión entre las probetas indica un comportamiento repetible y estable, lo que refleja una mayor resistencia al desgarro y una propagación de grieta más prolongada.

El valor promedio del CTOD crítico obtenido para las probetas forjadas fue de aproximadamente 0.282 mm, lo que evidencia una alta capacidad de deformación localizada antes del fallo. Estos resultados confirman la elevada tenacidad del Inconel 718 forjado, coherente con el comportamiento dúctil observado en los ensayos de tracción.

Tabla 3

Propiedades obtenidas en los ensayos CTOD para el Inconel 718 forjado

Ensayo	P _{max} (N)	CTOD@P _{max} (mm)	a ₀ (mm)	a ₀ /W (-)	b ₀ =W-a ₀ (mm)	P _{max} /(B·b ₀) (MPa)
1	1589.7	1.1	4.2	0.52	3.8	104.2
2	1348.4	1.3	4.5	0.56	3.5	96.5
3	1329.8	1.3	4.3	0.54	3.6	91

En conjunto, los resultados del Inconel 718 forjado evidencian una propagación estable de la grieta y una alta tenacidad a la fractura, atribuida a la microestructura homogénea del

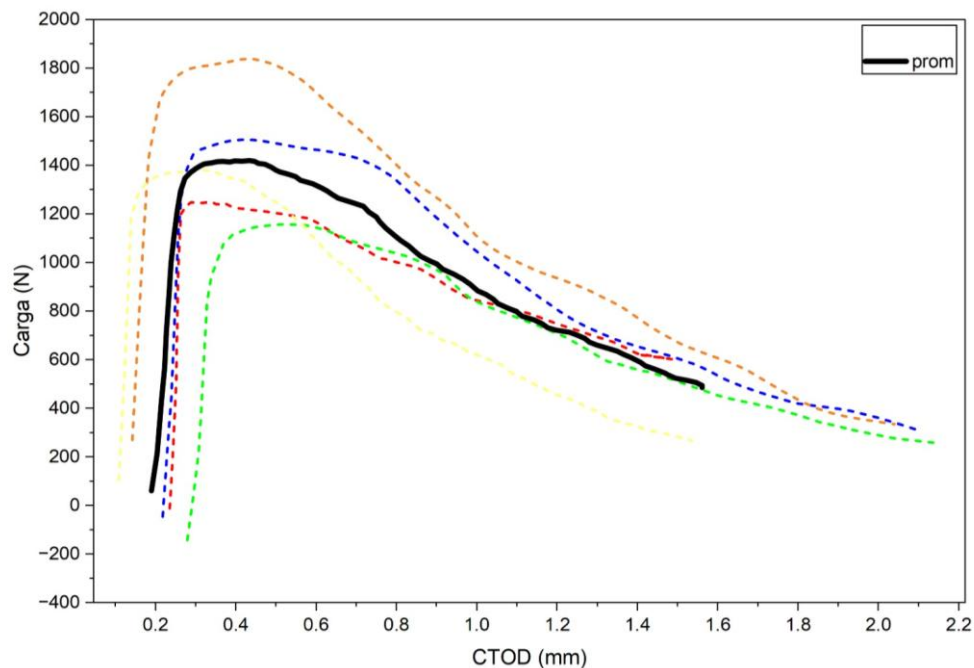
material. Estos valores se tomarán como referencia para comparar el comportamiento del material fabricado mediante manufactura aditiva, analizado en el siguiente apartado.

6.2.2. Material fabricado por manufactura aditiva (MA)

La Figura 16 presenta las curvas carga–desplazamiento obtenidas en los ensayos CTOD realizados sobre el Inconel 718 fabricado por manufactura aditiva (DED-LB). Las cinco curvas (Carga 1–5) muestran el típico aumento rápido de carga asociado al embotamiento inicial del frente de grieta (blunting), seguido por un pico de carga y una pérdida progresiva de capacidad resistente con el incremento del CTOD, reflejando el ablandamiento posterior del material (softening).

Figura 16

Curvas promedio carga–desplazamiento del material fabricado por MA



Los picos de carga presentan alta dispersión, con valores comprendidos entre 1.2 y 1.75 kN. La curva con el mayor pico (~1.75 kN) muestra una pérdida de carga más rápida, aunque en

general todas las probetas exhiben una caída pronunciada de carga posterior al máximo, lo que evidencia una resistencia al desgarro limitada.

La causa principal de esta variabilidad se atribuye a las diferencias en la longitud de la grieta inicial (a_0) generada durante el pre agrietado, lo que afecta la duración del ensayo y la forma de las curvas de carga-CTOD. Así, probetas con pre-grietas más cortas tienden a desarrollar curvas más extendidas, mientras que aquellas con fisuras iniciales más largas presentan una caída temprana de carga y menor estabilidad durante la propagación.

El valor promedio del CTOD crítico (δ_s) obtenido fue de aproximadamente 0.198 mm, lo que indica una deformación localizada moderada antes de la fractura.

Tabla 4

Propiedades obtenidas en los ensayos CTOD para el Inconel 718 fabricado por MA

Ensayo	P_{max} (N)	CTOD@P_m a_x (mm)	a₀ (mm)	a₀/W (-)	b₀=W-a₀ (mm)	P_{max}/(B·b₀) (MPa)
1	1380	0.32	4.2	0.53	3.8	90.4
2	1253.6	0.32	3.2	0.41	4.7	65.9
3	1513.2	0.40	3.5	0.44	4.5	84.4
4	1847.7	0.44	3.9	0.49	4.1	112.6
5	1159.1	0.55	4.2	0.53	3.8	76.7

Nota. Propiedades promedio de CTOD para Inconel 718 por MA, con variabilidad atribuida a la pre-grieta y al proceso DED-LB.

Los resultados obtenidos muestran una variabilidad significativa entre probetas, atribuida principalmente a la longitud inicial de la pre-grieta y a las características propias del proceso DED-LB.

En la siguiente sección se presenta una comparación directa entre ambas condiciones de fabricación con el fin de analizar su influencia sobre la tenacidad a la fractura.

6.2.3. Comparación de resultados CTOD

En la Tabla 5 se resumen los valores promedio obtenidos en los ensayos CTOD para el Inconel 718 forjado y el fabricado por manufactura aditiva (MA). Estos resultados permiten establecer una comparación directa del comportamiento a la fractura entre ambos métodos de fabricación.

Tabla 5

Comparación de parámetros CTOD entre material forjado y MA

Condición	P _{max} (N)	δ_s (mm)	P _{max} /(B·b ₀) (MPa)	Comportamiento
Forjado	1422.61	0.28	97.2	Propagación estable, alta tenacidad
MA	1155.41	0.2	81.7	Propagación menos estable, softening marcado

Nota. Valores promedio de CTOD para el Inconel 718 forjado y fabricado por MA, permitiendo la comparación de su comportamiento a la fractura.

Al comparar las curvas carga–CTOD de ambos materiales, se observa que el Inconel 718 forjado presenta una mayor capacidad sostenida de carga: para una misma apertura de grieta (por ejemplo, CTOD \approx 1.5 mm), el forjado soporta entre 300 y 500 N más que el material fabricado por manufactura aditiva (MA), manteniendo además la carga constante por un intervalo de CTOD más amplio, lo que se refleja en una meseta más prolongada.

Aunque una de las probetas MA alcanza el pico máximo de carga (~ 1.75 kN), el material forjado exhibe una mayor estabilidad posterior al pico, con una pendiente descendente menos pronunciada, lo que indica una propagación de grieta más controlada y una mejor capacidad de disipar energía. En contraste, el material MA presenta una mayor dispersión entre curvas y una pérdida de carga más temprana, asociadas a su heterogeneidad microestructural, la presencia de porosidad residual y las diferencias en la longitud inicial del pre agrietado.

Estas variaciones confirman que el material MA es más sensible a defectos internos y a la calidad del depósito láser, lo que afecta la repetibilidad de los ensayos. Por su parte, el material forjado muestra un comportamiento más homogéneo y consistente, resultado de su microestructura densa y libre de discontinuidades.

En conjunto, los resultados demuestran que el proceso de fabricación influye directamente en la tenacidad a la fractura del Inconel 718: el material forjado ofrece una mayor resistencia al desgarro, mejor estabilidad en la propagación de grieta y mayor energía de fractura efectiva, mientras que el material fabricado por MA presenta una respuesta menos estable y más afectada por defectos internos.

6.3. Caracterización de la microestructura

En esta sección se presentan los resultados obtenidos a partir de la caracterización microestructural de las probetas de Inconel 718 en sus dos condiciones de fabricación: forjada y por manufactura aditiva (MA).

El análisis microestructural se realizó mediante observaciones en microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido (MEB), con el fin de identificar la morfología de los granos,

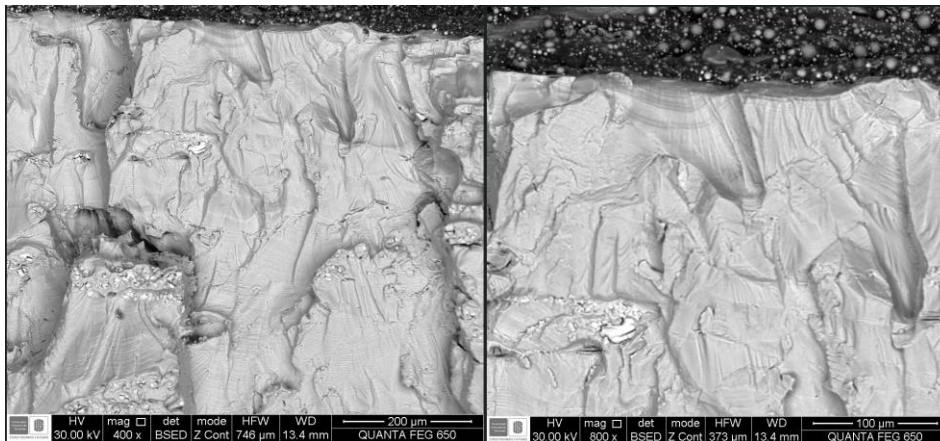
la presencia de fases secundarias y posibles defectos internos que expliquen las diferencias observadas en el comportamiento mecánico.

6.3.1. Material forjado

La Figura 17 muestra la superficie de fractura correspondiente al Inconel 718 forjado. La grieta inicia en un plano definido, sin escalones marcados, y a partir de allí los surcos se abren en forma de abanico, indicando la dirección de propagación.

Figura 17

Microscopia Material forjado



Nota. Superficie de fractura del Inconel 718 forjado, mostrando la dirección de propagación desde la grieta inicial.

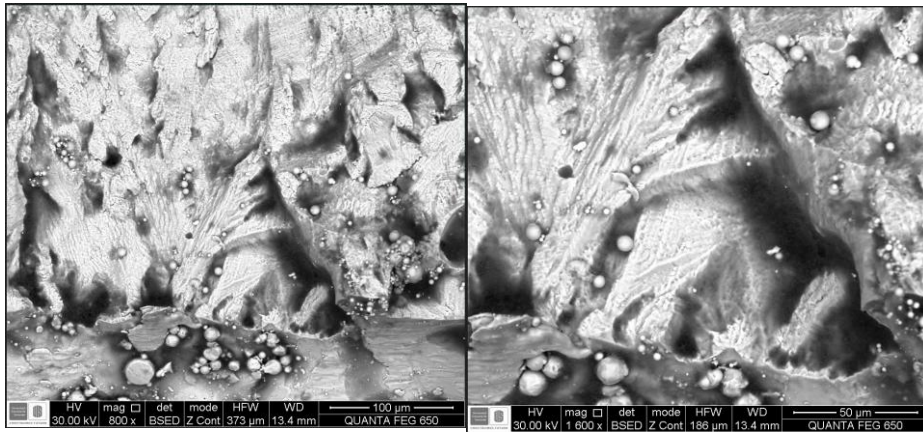
Cerca del origen se observan pequeñas cavidades que pudieron facilitar la iniciación de la grieta, aunque no se aprecian partículas sueltas ni poros abiertos. Esto sugiere un avance limpio y controlado de la fractura, característico de materiales con buena cohesión y comportamiento dúctil.

6.3.2. *Material fabricado por manufactura aditiva*

La Figura 18 muestra la superficie de fractura del Inconel 718 fabricado por manufactura aditiva (DED-LB). Se observan surcos y escalones pronunciados, lo que indica que la grieta no avanzó al azar, sino siguiendo rutas más débiles del material, como planos mal fusionados entre cordones.

Figura 18

Microscopia material fabricado por manufactura aditiva



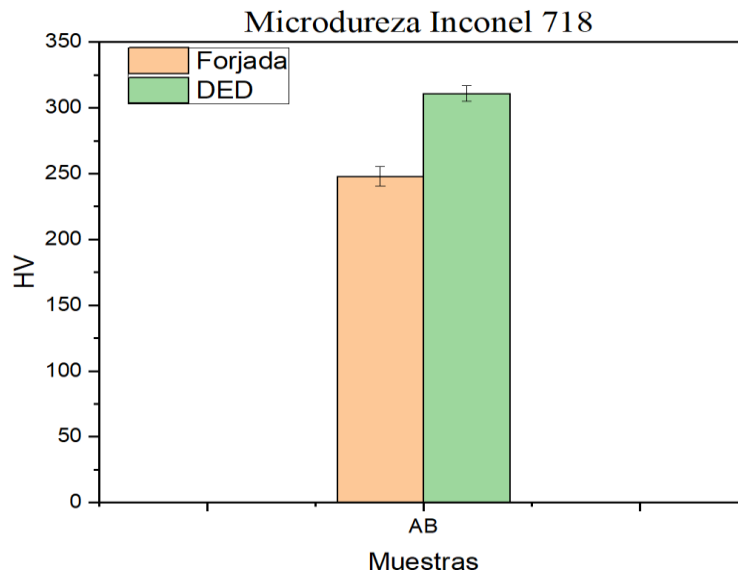
Nota. Superficie de fractura del Inconel 718 por MA (DED-LB), con surcos y escalones que indican propagación por planos débiles del material.

También se aprecian pequeñas esferas adheridas, que al desprenderse dejan hoyos o cavidades; la unión de varios de estos vacíos facilita el crecimiento de la grieta. Esta morfología refleja una fractura menos estable y más sensible a defectos internos, propia del proceso de deposición capa a capa.

6.3.3. Análisis de microdureza

Figura 19

Microdureza Inconel forjado 718 forjado y DED-LB



La Figura 19 presenta la comparación de la microdureza Vickers en condición *as-built* (AB) para el Inconel 718 fabricado por forjado y por deposición de energía dirigida con láser (DED-LB) el material DED-LB exhibe una microdureza promedio del orden de 300–320 HV, mientras que el material forjado presenta valores cercanos a 240–260 HV.

El mayor valor de microdureza observado en el material DED-LB puede atribuirse a las características microestructurales inducidas por el proceso de fabricación aditiva. Las elevadas tasas de solidificación y los pronunciados gradientes térmicos propios del proceso DED-LB favorecen la formación de microestructuras de grano más fino, así como una alta densidad de dislocaciones residuales. Ambos factores contribuyen al incremento de la resistencia local a la deformación plástica, reflejada en valores superiores de microdureza.

6.3.4. Comparación entre materiales

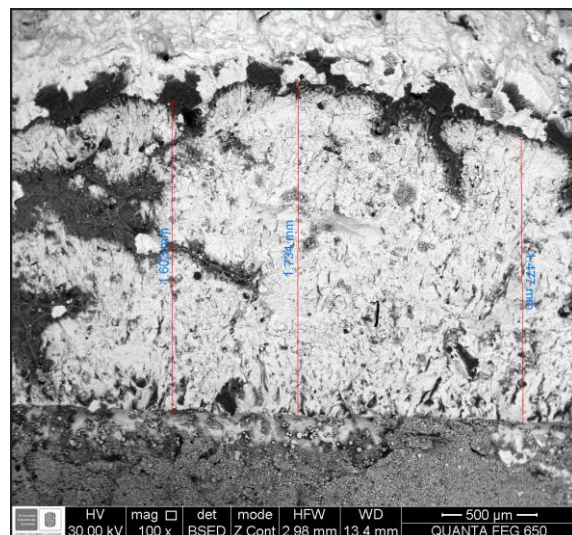
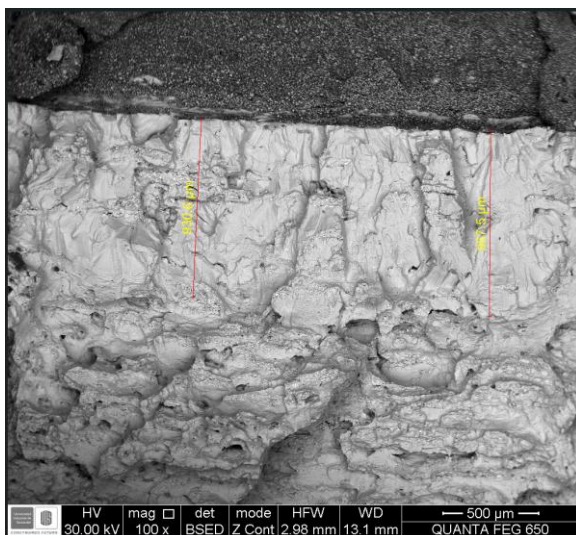
En la Figura 20 se presenta una comparación directa entre las superficies de fractura del material forjado y el fabricado por MA.

Figura 20

Comparación Microestructura entre el material forjado y el fabricado por MA

Forjado

MA



La superficie de fractura en el material forjado muestra surcos y terrazas relativamente continuas y ordenadas, con poca presencia de hoyos redondos o partículas sueltas. Las marcas tienden a converger y marcan la dirección de avance, pero la textura global se mantiene homogénea, lo que indica que la grieta avanzó de forma más “limpia”, sin depender de defectos abiertos.

Por otro lado, la superficie en el material aditivo es más rugosa y presenta numerosos escalones y relieves abruptos. Se observan con frecuencia partículas esféricas y huellas circulares de partículas desprendidas, además de grandes vacíos y conjuntos de surcos que se unen como “líneas de río”. Estos rasgos muestran que la grieta siguió caminos más débiles del material y se apoyó en el desprendimiento de partículas para formar micro hoyos que luego se unieron. En conjunto, la propagación fue más fácil en el aditivo que en el forjado.

El material forjado muestra un comportamiento más plástico a igual apertura de grieta (CMOD), la longitud de propagación estable observada es menor que en el material aditivo. Esto significa que, en el forjado, más parte de la energía aplicada se gasta en deformar plásticamente el ligamento antes de que la grieta avance, y menos en crear nueva superficie de grieta. Esto debido a interfaces de baja cohesión (falta de fusión) y partículas que actúan como atajos en el material aditivo, por lo que propaga más para el mismo desplazamiento, lo que indica menor capacidad de disipar energía por deformación y, en términos prácticos, menor resistencia al crecimiento de grieta bajo estas condiciones.

En la zona de sobrecarga, el material aditivo muestra un patrón mixto con menor aporte de deformación plástica (tendencia más frágil), mientras que el material forjado presenta un desgarro predominantemente dúctil con hoyuelos bien definidos. En términos prácticos, el forjado requiere mayor deformación para romperse en sobrecarga, mientras que el aditivo

finaliza la fractura con menor demanda plástica debido a la influencia de partículas e interfaces débiles.

6.4. Análisis de resultados General

La presente sección integra y compara los resultados obtenidos a lo largo de los ensayos de tracción, fractura (CTOD) y caracterización microestructural realizados sobre las probetas de Inconel 718 en sus dos condiciones de fabricación: forjado y por manufactura aditiva (DED-LB). El objetivo es establecer una visión global del comportamiento mecánico del material y analizar cómo las diferencias microestructurales derivadas del proceso de fabricación influyen en su tenacidad a la fractura.

6.4.1. Comportamiento mecánico global

Los ensayos de tracción evidenciaron que el Inconel 718 forjado presenta una respuesta más dúctil y homogénea, con un módulo de Young promedio de 201 GPa, una resistencia última a la tracción (UTS) de aproximadamente 1020 MPa y una elongación a la rotura de 0.63 mm/mm. En contraste, el material fabricado por manufactura aditiva (MA) mostró una ductilidad reducida, con una elongación cercana a 0.28 mm/mm, aunque conservando un módulo de Young similar (210 GPa) y un límite elástico levemente superior (616 MPa frente a 520 MPa del forjado).

Estos resultados confirman que el proceso DED-LB genera materiales con mayor rigidez inicial, pero con menor capacidad de deformación plástica, atribuida a la presencia de poros, heterogeneidades de solidificación y tensiones residuales típicas del proceso capa por capa. Por su parte, la microestructura del material forjado, más compacta y uniforme, favorece un endurecimiento por deformación más sostenido y una disipación de energía más eficiente antes del fallo.

6.4.2. Tenacidad a la fractura (CTOD)

Los ensayos CTOD revelaron diferencias notables entre ambas condiciones. El material forjado mostró un CTOD crítico promedio de 0.282 mm, con curvas carga–desplazamiento caracterizadas por una meseta amplia y estable posterior al pico máximo de carga (≈ 1.4 kN). Este comportamiento indica una propagación de grieta controlada, coherente con la microestructura densa y la alta cohesión interna del material.

Por el contrario, el material fabricado por manufactura aditiva alcanzó un CTOD promedio de 0.198 mm, con curvas más dispersas y una pérdida rápida de carga después del máximo, evidenciando una disminución de la resistencia más pronunciada y una propagación menos estable de la grieta. Esta respuesta se relaciona directamente con las discontinuidades internas, la falta de fusión entre cordones y la presencia de porosidad residual observada durante la caracterización microestructural.

6.4.3. Análisis microestructural comparativo

Las observaciones en microscopía óptica y electrónica mostraron que el material forjado presenta una fractura predominantemente dúctil, con hoyuelos profundos y uniformes, surcos continuos y ausencia de defectos abiertos. La propagación de la grieta se produce de manera estable, con un frente limpio y bien definido.

En contraste, el material MA exhibe una superficie de fractura rugosa e irregular, con partículas esféricas adheridas, poros abiertos y escalones de fusión parcial. Estos rasgos evidencian un avance de grieta por coalescencia de vacíos y desprendimiento de partículas, asociado a una menor cohesión intercordón y a la anisotropía microestructural inducida por la deposición capa por capa.

De esta forma, la morfología de fractura observada coincide con los resultados mecánicos: una mayor energía disipada por deformación plástica en el forjado, frente a una propagación más frágil y discontinua en el aditivo.

6.4.4. Análisis microdureza comparativa

La Figura 19 presenta la comparación de la micro dureza Vickers en condición *as-built* (AB) para el Inconel 718 fabricado por forjado y por deposición de energía dirigida con láser (DED-LB). El material DED-LB exhibe una micro dureza promedio del orden de **300–320 HV**, mientras que el material forjado presenta valores cercanos a **240–260 HV**, evidenciando una diferencia significativa en la respuesta mecánica local entre ambos procesos de fabricación.

El mayor valor de micro dureza observado en el material DED-LB puede atribuirse a las características microestructurales inducidas por el proceso de manufactura aditiva. Las elevadas tasas de solidificación y los pronunciados gradientes térmicos propios del proceso DED-LB favorecen la formación de microestructuras más refinadas, junto con una mayor densidad de dislocaciones y microsegregaciones inter dendríticas. Estos factores generan un incremento en la resistencia local al movimiento de dislocaciones, lo que se refleja directamente en valores superiores de micro dureza.

En contraste, el material forjado presenta una microestructura más homogénea y con granos de mayor tamaño debido al trabajo termomecánico y a los ciclos térmicos posteriores, lo cual reduce la densidad de defectos cristalinos y favorece una respuesta menos resistente a la deformación localizada, coherente con los menores valores de micro dureza medidos.

Estos resultados son consistentes con el comportamiento observado en los ensayos macroscópicos realizados en esta investigación. El incremento de dureza en el material DED-LB se relaciona con los mayores niveles de resistencia mecánica obtenidos en los ensayos de

tracción, donde las microestructuras refinadas tienden a incrementar el límite elástico y la resistencia última. Sin embargo, esta mayor resistencia local también puede influir en la respuesta a la fractura, ya que microestructuras más endurecidas suelen asociarse con una menor capacidad de deformación plástica localizada, aspecto que se analiza en conjunto con los resultados de tenacidad a la fractura (CTOD).

De esta manera, la micro dureza no solo confirma las diferencias microestructurales derivadas de los procesos de fabricación, sino que también sirve como un parámetro intermedio que ayuda a vincular la escala microestructural con el comportamiento mecánico global del material.

6.4.5. Análisis de resultados

En conjunto, los resultados demuestran que el método de fabricación ejerce una influencia directa y significativa sobre el comportamiento mecánico del Inconel 718. El material forjado ofrece una mayor tenacidad a la fractura, ductilidad y capacidad de disipación de energía, lo que se traduce en una propagación de grieta más estable y controlada. En contraste, el material fabricado por DED-LB muestra un comportamiento más variable y menos estable, condicionado por las heterogeneidades inherentes al proceso aditivo.

Estos hallazgos reafirman que, si bien la manufactura aditiva permite fabricar geometrías complejas y optimizar el uso de material, su desempeño estructural bajo cargas cíclicas y de fractura aún requiere optimización de parámetros de proceso y tratamientos térmicos posteriores, a fin de reducir la porosidad y mejorar la cohesión intercordón.

7. Conclusión General

- El Inconel 718 forjado presentó un comportamiento mecánico típicamente dúctil, con un módulo de Young promedio de 201 GPa, una resistencia última a la tracción cercana a

1020 MPa y una deformación a la fractura de 0.63 mm/mm, mostrando un endurecimiento sostenido con un exponente de Hollomon de aproximadamente 0.53. En contraste, el material fabricado mediante deposición de energía dirigida con láser (DED-LB) mostró mayor rigidez inicial (210 GPa) pero una ductilidad considerablemente menor (0.28 mm/mm) y un bajo exponente de endurecimiento (0.11), influenciado por la porosidad interlaminar y la heterogeneidad microestructural del proceso aditivo. En consecuencia, el proceso de forjado proporciona al Inconel 718 mejores propiedades estáticas, mayor estabilidad plástica y una capacidad superior de deformación antes del fallo.

- Los ensayos CTOD demostraron una diferencia notable en la tenacidad a la fractura de ambos materiales. El Inconel 718 forjado alcanzó un valor crítico promedio de 0.282 mm, caracterizado por una propagación de grieta estable y un comportamiento típicamente dúctil. Por otro lado, el material fabricado por DED-LB presentó un CTOD promedio de 0.198 mm, acompañado de una pérdida rápida de carga y una propagación de grieta inestable, atribuida a discontinuidades internas y zonas de falta de fusión. Estos resultados confirman que el método de fabricación influye directamente en la resistencia a la fractura del Inconel 718, siendo el material forjado más tenaz y capaz de absorber mayor energía antes del colapso.
- El análisis microestructural reveló que el material forjado presenta una estructura compacta y homogénea, con hoyuelos profundos y superficies de fractura uniformes, indicativas de un comportamiento dúctil. En contraste, el Inconel 718 fabricado por DED-LB mostró una superficie más rugosa, con presencia de porosidad, partículas esféricas adheridas y zonas de fusión parcial. Esta morfología refleja una fractura menos

estable, más sensible a defectos internos y dependiente de la calidad del depósito láser. La anisotropía y las irregularidades derivadas del proceso aditivo reducen la cohesión entre capas, lo que disminuye la capacidad de disipar energía durante la propagación de la grieta.

- La caracterización de la microdureza en las muestras fracturadas del ensayo CTOD evidenció que las variaciones en la dureza local están directamente relacionadas con las características microestructurales del material. El Inconel 718 fabricado por DED-LB presentó mayores valores de micro dureza, asociados a un refinamiento microestructural y a la presencia de heterogeneidades propias del proceso aditivo, mientras que el material forjado mostró una respuesta más homogénea. Estos factores influyen en la resistencia local a la deformación plástica y, por ende, en el comportamiento frente a la fractura, cumpliéndose así el objetivo de vincular la micro dureza con la microestructura y la resistencia a la fractura del material.
- La correlación entre los resultados del ensayo CTOD, la resistencia a la tracción y la observación microestructural evidenció que la ductilidad y el endurecimiento plástico son factores determinantes en la tenacidad a la fractura. El Inconel 718 forjado, al exhibir mayor elongación y capacidad de endurecimiento, mostró una propagación de grieta más controlada y una mejor disipación de energía antes de la fractura. En contraste, el material DED-LB, afectado por la porosidad y las interfaces débiles entre cordones, presentó una fractura más frágil y una menor resistencia al crecimiento de grieta. En conjunto, los resultados confirman una relación directa entre la homogeneidad microestructural y la resistencia a la fractura, estableciendo que el proceso DED-LB

requiere optimización de parámetros y tratamientos térmicos posteriores para alcanzar el desempeño del material forjado.

Referencias Bibliográficas

- Anderson, T. L. (1995). *Fracture mechanics: fundamentals and applications, Second Edition*. CRC Press.
- ASTM International. (2023). *Standard Test Method for Measurement of Fracture Toughness*. ASTM License Agreement.
- Bertram, K. (1999). *Cracks and fracture*. Ireland: Department of Mathematical Physics, University College Dublin.
- Boresi, A. P., & Schmidt, R. J. (1993). *Advanced mechanics of materials (5th ed.)*. John Wiley & Sons.
- Broek, D. (1982). *Elementary engineering fracture mechanics (3rd ed)*. Martinus Nijhoff.
- Buckley, C. P. (2005). *Material Failure*. University of Oxford: Lecture Notes.
- Cervantes, J. J., Ruiz, L., Balderas, A., Hernández, R., Martínez, F., Sánchez, A., . . . Espinoza, J. L. (2018). Integración de procesos de manufactura aditiva con tecnología de arco metálico (MIG) y un sistema CNC para la fabricación de piezas metálicas. *Revista de Ingeniería y Ciencia de Materiales*, 12(3), 45-59.
- Ersan, M. (2023). Tenacidad a la fractura del acero inoxidable dúplex grado 2509 fabricado mediante manufactura aditiva por arco de alambre (WAAM). *Journal of Materials Science & Engineering*, 45(6), 78-92.
- Fang, Y., Li, X., Wang, J., & Zhang, H. (2021). Análisis basado en datos de simulaciones térmicas, microestructura y propiedades mecánicas de Inconel 718 fabricado mediante DED. *Materials Science & Technology*, 39(2), 123-138.
- Gamboa, E. G. (2023). *Comparación de los modelos de factor de intensidad de esfuerzo equivalente para el modo mixto*. Bucaramanga: Repositorio Universitario UIS.

- Gómez, J. (2023). *Determinación del factor de intensidad de esfuerzos en materiales metálicos [Tesis de grado]*. Repositorio Institucional UNAL.
- Grajales Herrera, J. A., & Vanegas Useche, L. V. (2016). Métodos para determinar el factor de intensidad de esfuerzos. *Entre ciencia e ingeniería*, 10(19), 70-80.
- Harilal, R., & Ramji, M. (2014). *Adaptation of Open Source 2D DIC Software Ncorr for Solid Mechanics Applications*. New Delhi: 9th International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics.
- Kanninen, M. F., & Popelar, C. H. (1985). *Advanced Fracture Mechanics* (Vol. 15). Oxford University Press.
- Kui Zhu, X., & Joyce, J. A. (2012). *Review of fracture toughness (G , K , J , C toughness (G , K , J , $CTOD$, $CTOA$) testing and A testing and*. University of Nebraska - Lincoln .
- Pan, B., Qian, K., Xie, H., & Asundi, A. (2009). TOPICAL REVIEW: Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: a review. *Measurement Science and Technology*, 20(6), 17.
- Paris, P., & Erdogan, F. (1963). A Critical Analysis of Crack Propagation Laws. *ASME Digital Collection*, 85(4), 528-534.
- Parker, H. (1972). *Mecánica y Resistencia de Materiales*. México: Limusa Wiley.
- Revenge, J. (2015). *Estudio de la propagación de grietas*. Leganés: Universidad Carlos III de Madrid.
- Rice, J. R. (1968). A Path Independent Integral and the. *Journal of Applied Mechanics*, 35, 379-386.
- Roylance, D. (2001). *Introduction to Fracture Mechanics*. Massachusetts Institute of Technology: Department of Materials Science and Engineering.

Sun, C., & Jin, Z. (2012). Fracture Mechanics. *Academic Press*, 123-169.

Sutton, M. A., Orteu, J.-J., & Schreier, H. W. (2009). *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements: Basic Concepts, Theory and Applications*. New York: Springer.

Thijs, L., Kempen, K., Kruth, J.-P., & Humbeeck, J. V. (2013). Fine-structured aluminium products with controllable texture by selective laser melting of pre-alloyed AlSi10Mg powder. *Acta Materialia*, 61(5), 1809-1819.