

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN DE DOS  
ALEACIONES METÁLICAS MEDIANTE EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS  
COMPARATIVE ANALYSIS OF THE TENSILE STRENGTH OF TWO METAL ALLOYS  
USING THE FINITE ELEMENT METHOD**

**Autores:** <sup>1</sup>Alberto Medardo Toaquiza Patango, <sup>2</sup>Yoandrys Morales Tamayo y <sup>3</sup>William Armando Hidalgo Osorio.

<sup>1</sup>ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0002-1166-0787>

<sup>2</sup>ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7456-1490>

<sup>3</sup>ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6783-0947>

<sup>1</sup>E-mail de contacto: [alberto.toaquiza8697@utc.edu.ec](mailto:alberto.toaquiza8697@utc.edu.ec)

<sup>2</sup>E-mail de contacto: [yoandrys.morales@utc.edu.ec](mailto:yoandrys.morales@utc.edu.ec)

<sup>3</sup>E-mail de contacto: [william.hidalgo7885@utc.edu.ec](mailto:william.hidalgo7885@utc.edu.ec)

Afiliación: <sup>1\*2\*3\*</sup>Universidad Técnica de Cotopaxi, (Ecuador).

Artículo recibido: 3 de Enero del 2026

Artículo revisado: 8 de Enero del 2026

Artículo aprobado: 14 de Enero del 2026

<sup>1</sup>Estudiante de Ingeniería en Mecánica Automotriz en la Universidad Técnica de Cotopaxi, (Ecuador).

<sup>2</sup>Ingeniero Mecánico en la Universidad de Holguín, (Cuba). Máster en Diseño y Fabricación Asistida por Computadora en la Universidad de Holguín, (Cuba). Doctor en Ciencias Técnicas en la Universidad Tecnológica de Madrid, (España).

<sup>3</sup>Ingeniero en Electromecánica en Universidad Técnica de Cotopaxi, (Ecuador). Magíster en Gestión de Energías en la Universidad Técnica de Cotopaxi, (Ecuador). Magíster en Matemática en la Universidad Nacional de Chimborazo, (Ecuador). Docente a tiempo completo en la Universidad Técnica de Cotopaxi Extensión La Maná, (Ecuador).

### Resumen

El artículo se desarrolló con el objetivo de analizar la resistencia a la tracción de las aleaciones Inconel 718 y ASTM A36 mediante el Método de Elementos Finitos, para identificar las diferencias en su respuesta mecánica, estableciendo la relación entre sus propiedades estructurales y su capacidad de soportar esfuerzos. La metodología mantuvo un enfoque experimental, descriptivo y comparativo, siguiendo las especificaciones de la norma ASTM E8/E8M para la preparación y ensayo de probetas metálicas. Los ensayos físicos se realizaron en una máquina universal de tracción, registrando la curva esfuerzo-deformación y determinando parámetros fundamentales. En paralelo, se efectuaron simulaciones mediante Autodesk Inventor Professional 2026, empleado para el modelado geométrico tridimensional de las probetas, y Autodesk Inventor Nastran Editor Utility 2026, utilizado para el análisis estructural por el método de elementos finitos, lo que permitió reproducir el comportamiento mecánico y la distribución interna de esfuerzos observada experimentalmente. El Inconel 718 alcanzó una resistencia última de 875 MPa y un límite

elástico de 772 MPa, con un alargamiento del 12 %. En contraste, el acero ASTM A36 presentó una resistencia última de 400 MPa, un límite elástico de 248 MPa y un alargamiento del 26 %, evidenciando mayor ductilidad. Se evidenció la superioridad del Inconel 718 en resistencia y estabilidad térmica, frente a la mayor capacidad de deformación del acero ASTM A36. La selección del material debe equilibrar resistencia, ductilidad y viabilidad económica, considerando las condiciones de operación y los requerimientos estructurales de cada aplicación industrial.

**Palabras clave:** Inconel 718, ASTM A36, Resistencia a la tracción, Simulación.

### Abstract

The article was developed with the objective of analyzing the tensile strength of Inconel 718 and ASTM A36 alloys using the Finite Element Method, to identify the differences in their mechanical response, establishing the relationship between their structural properties and their ability to withstand stresses. The methodology maintained an experimental, descriptive and comparative approach, following the specifications of the ASTM E8/E8M standard for the preparation and testing of metal specimens. The physical tests

were carried out on a universal traction machine, recording the stress-strain curve and determining fundamental parameters. In parallel, simulations were carried out using Autodesk Inventor Professional 2026, used for the three-dimensional geometric modeling of the specimens, and Autodesk Inventor Nastran Editor Utility 2026, used for structural analysis by the finite element method, which allowed to reproduce the mechanical behavior and the internal distribution of stresses observed experimentally. The Inconel 718 achieved an ultimate strength of 875 MPa and a yield strength of 772 MPa, with an elongation of 12%. In contrast, ASTM A36 steel presented an ultimate strength of 400 MPa, a yield strength of 248 MPa and an elongation of 26%, evidencing greater ductility. The superiority of Inconel 718 in resistance and thermal stability was evidenced, compared to the greater deformation capacity of ASTM A36 steel. The selection of the material must balance strength, ductility and economic feasibility, considering the operating conditions and structural requirements of each industrial application.

**Keywords: Inconel 718, ASTM A36, Tensile strength, Simulation.**

### **Resumo**

O artigo foi desenvolvido com o objetivo de analisar a resistência à tração das ligas Inconel 718 e ASTM A36 utilizando o Método dos Elementos Finitos, para identificar as diferenças em sua resposta mecânica, estabelecendo a relação entre suas propriedades estruturais e sua capacidade de suportar tensões. A metodologia manteve uma abordagem experimental, descritiva e comparativa, seguindo as especificações da norma ASTM E8/E8M para a preparação e ensaio de corpos de prova metálicos. Os ensaios físicos foram realizados em uma máquina de tração universal, registrando a curva tensão-deformação e determinando parâmetros fundamentais. Em paralelo, foram realizadas simulações utilizando o Autodesk Inventor Professional 2026, utilizado para a modelagem geométrica tridimensional dos corpos de prova, e o Autodesk Inventor Nastran

Editor Utility 2026, utilizado para análise estrutural pelo método dos elementos finitos, que permitiu reproduzir o comportamento mecânico e a distribuição interna das tensões observadas experimentalmente. O Inconel 718 atingiu uma resistência máxima de 875 MPa e um limite de escoamento de 772 MPa, com um alongamento de 12%. Em contrapartida, o aço ASTM A36 apresentou uma resistência máxima de 400 MPa, um limite de escoamento de 248 MPa e um alongamento de 26%, evidenciando maior ductilidade. Evidenciou-se a superioridade do Inconel 718 em resistência e estabilidade térmica, em comparação com a maior capacidade de deformação do aço ASTM A36. A seleção do material deve equilibrar resistência, ductilidade e viabilidade econômica, considerando as condições de operação e requisitos estruturais de cada aplicação industrial.

**Palavras-chave: Inconel 718, ASTM A36, Resistência à tração, Simulação.**

### **Introducción**

A escala global, el Inconel 718 ha consolidado su posición como una de las superaleaciones más empleadas en la industria aeroespacial y energética. Según Winowlin et al. (2022) presentó un crecimiento estimado de 6 % anual entre 2020 y 2024, impulsado por la demanda de componentes de alta resistencia térmica y mecánica. Tal como expone Moreno (2021) en América Latina, su uso se ha incrementado en Brasil, México y Chile, donde la expansión de los sectores aeronáutico y minero ha generado un aumento aproximado del 8 % en el consumo regional. Mientras que, el acero estructural ASTM A36 mantiene una participación significativa en la construcción e infraestructura, representando cerca del 8 % del mercado mundial de aceros laminados, lo que reafirma su vigencia como material base en estructuras convencionales y de gran escala. El análisis del comportamiento mecánico de los materiales metálicos representa uno de los pilares más sólidos de la ingeniería

contemporánea, según Kayan et al. (2019) permite anticipar la manera en que un componente responderá ante diferentes estados de carga, asegurando su desempeño, durabilidad y seguridad estructural. Serjouei et al. (2022) destacan que comprender la respuesta de los materiales frente a esfuerzos mecánicos es indispensable para garantizar la fiabilidad de sistemas industriales y estructurales. De manera complementaria, Shreshta et al. (2022) subrayan que la caracterización de las propiedades mecánicas a través del ensayo de tracción uniaxial proporciona información precisa sobre la resistencia, la ductilidad y la capacidad de deformación de los metales, aspectos decisivos para el diseño de elementos sometidos a esfuerzos. En el estudio, la variable resistencia a la tracción se entiende como la capacidad que posee determinado material para soportar esfuerzos axiales antes de alcanzar la ruptura, reflejando el punto máximo de tensión que puede resistir sin perder su integridad estructural (García y Maldonado, 2021).

Este parámetro no solo depende de la composición química del material, sino también de factores como el tratamiento térmico, el tamaño de grano y las condiciones de carga aplicadas (Verdesoto et al., 2023). Su determinación permite establecer la calidad y el desempeño esperado de una aleación bajo solicitaciones específicas, constituyendo un criterio esencial para el diseño de componentes sometidos a esfuerzos elevados. Las propiedades mecánicas de las aleaciones metálicas, según lo manifestado por Cotes et al. (2023) no pueden analizarse de manera aislada, ya que su desempeño está condicionado por factores como la temperatura de servicio, el tipo de carga y la frecuencia de sollicitación. A nivel microestructural, el incremento térmico produce fenómenos de recristalización, disolución de fases endurecedoras y variación

en la densidad de dislocaciones, lo que repercute en la ductilidad y la resistencia. En el caso del Inconel 718, su microestructura base níquel le permite conservar la resistencia incluso bajo cargas cíclicas a alta temperatura. El ASTM A36, según lo referido por Da Silva y Geno (2018) al ser un acero al carbono, experimenta una pérdida progresiva del límite elástico y una mayor susceptibilidad a la fluencia térmica, el entendimiento de estas variaciones resulta esencial para anticipar fallas por fatiga térmica o vibracional, particularmente en componentes sometidos a esfuerzos alternantes, donde la estabilidad microestructural y la disipación térmica determinan la vida útil efectiva del sistema.

Por otro lado, Tipan et al. (2020) señalan que la tendencia actual de la ingeniería de materiales se orienta hacia el desarrollo de estrategias sostenibles e inteligentes de diseño, en las que la simulación numérica y los sistemas de monitoreo digital (gemelos digitales) permiten predecir el comportamiento de los materiales durante toda su vida operativa. Este enfoque no solo optimiza la eficiencia energética y reduce los costos de manufactura, sino que también impulsa la transición hacia una ingeniería más ecológica, predictiva y resiliente (Pinzón, 2023). En este contexto, el análisis comparativo entre el Inconel 718 y el ASTM A36 adquiere relevancia al aportar información útil para los nuevos paradigmas de selección y gestión de materiales en la industria 4.0, donde la combinación de desempeño mecánico, sostenibilidad y digitalización se convierte en el eje fundamental para la innovación tecnológica y la seguridad estructural. Por su parte, la variable comportamiento mecánico abarca la respuesta integral del material ante la aplicación de cargas externas, considerando las fases de deformación elástica, plástica y el proceso de fractura. Este comportamiento puede expresarse

mediante la relación esfuerzo–deformación, la cual proporciona información cuantitativa sobre la rigidez, ductilidad y resistencia del material; por lo tanto, su análisis experimental como mediante simulación numérica, permite analizar con precisión cómo las propiedades estructurales influyen en la estabilidad y desempeño del material, ofreciendo una visión completa de su comportamiento bajo condiciones reales de servicio.

En este contexto, Ramírez et al. (2021) señalan que la resistencia a la tracción refleja el máximo esfuerzo que un material puede soportar antes de fracturarse, mientras que el comportamiento mecánico describe la relación entre esfuerzo y deformación, incluyendo tanto la respuesta elástica inicial como la plasticidad y la eventual ruptura. Estas variables permiten predecir el rendimiento de una pieza en servicio, definir criterios de diseño y establecer márgenes de seguridad frente a la fatiga o el fallo estructural. Sin embargo, hasta la actualidad, persiste la dificultad de comparar de forma integral el comportamiento de aleaciones con naturalezas químicas distintas, utilizando herramientas que integren los aspectos experimentales y computacionales. De acuerdo a lo expuesto por Alvear (2025), en la práctica, muchos estudios se concentran en la caracterización de un solo material o en condiciones de ensayo que no son equivalentes, lo que impide obtener resultados comparativos válidos. A ello se suman las limitaciones propias de los ensayos físicos, como el costo elevado de las probetas, el desgaste del equipo de tracción y la imposibilidad de observar directamente la distribución interna de los esfuerzos a lo largo del proceso.

Con base a tales consideraciones como uno de los parámetros más analizados en la ciencia de materiales, al proporcionar una visión detallada

de la transición del régimen elástico al plástico y de la capacidad del material para resistir cargas sin fallar. Catalin et al. (2024) indican que el estudio de la relación esfuerzo–deformación y los mecanismos de endurecimiento resulta determinante para definir la idoneidad de un metal en aplicaciones estructurales o de alta temperatura. Zhao et al. (2025) agregan que la resistencia última está estrechamente vinculada con los procesos de manufactura y selección de aleaciones, lo que la convierte en un criterio técnico decisivo en la ingeniería aplicada. Asimismo, Yohannes y Abebe (2021) enfatizan que el desempeño mecánico de las aleaciones está condicionado por factores microestructurales, como el tamaño de grano, la disolución sólida y la precipitación de fases reforzantes.

El avance de la modelación computacional ha transformado el estudio de los materiales, permitiendo replicar con precisión los ensayos de laboratorio y visualizar la evolución interna de los esfuerzos. Sanhueza et al. (2021) sostienen que el Método de Elementos Finitos se ha consolidado como una herramienta esencial para el análisis estructural, al posibilitar la representación tridimensional del comportamiento de un material bajo condiciones de carga controladas. De acuerdo con Pacheco et al. (2025) su aplicación reduce los costos experimentales y amplía la capacidad de predicción, al ofrecer datos sobre la distribución de esfuerzos, la deformación equivalente y el punto de inicio de la falla. Serrano et al. (2021) argumenta que esta integración entre la simulación y la experimentación abre nuevas perspectivas para comprender el desempeño de materiales con características contrastantes, como el acero estructural ASTM A36 y la superaleación Inconel 718. La comparación entre ambas aleaciones reviste particular interés técnico, en

vista que el acero ASTM A36, por su bajo contenido de carbono, es ampliamente utilizado en estructuras metálicas gracias a su ductilidad, facilidad de conformado y bajo costo (Hosseini y Popovich, 2019). En contraste, el Inconel 718, una superaleación base níquel reforzada por precipitación, destaca por su elevada resistencia y estabilidad térmica. Por eso es recurrente en aplicaciones que demandan desempeño extremo, como turbinas o sistemas aeroespaciales (Castillo et al., 2001). El análisis y contraste de su respuesta ante esfuerzos de tracción permite comprender cómo la microestructura, la composición y los mecanismos de endurecimiento inciden en su resistencia y deformación.

Este estudio se justifica por la necesidad de disponer de información comparativa que oriente la selección adecuada de materiales en función de su desempeño mecánico y su comportamiento bajo condiciones de carga reales. Comprender las diferencias entre una aleación de alta resistencia y un acero estructural convencional permite establecer criterios técnicos para el diseño de componentes más seguros y eficientes. Según Alvear (2025) la innovación en materiales metálicos y la optimización de procesos de manufactura. Al integrar ensayos de tracción con simulaciones avanzadas, es posible no solo comparar aleaciones existentes, sino también generar información que sirva de base para el desarrollo de nuevos materiales con propiedades adaptadas a requerimientos específicos de resistencia, ductilidad y comportamiento frente a cargas extremas. Este enfoque, tal como argumentan Cotes et al. (2023) fortalece la capacidad de ingeniería para anticipar fallas, mejorar la eficiencia de los diseños y reducir costos asociados a prototipos y pruebas físicas, consolidando un puente entre investigación y aplicación industrial. Además, la combinación

de ensayo experimental y análisis numérico contribuye al desarrollo de metodologías integradas que optimizan la evaluación y aplicación de los materiales metálicos. El artículo tiene como objetivo analizar la resistencia a la tracción de las aleaciones Inconel 718 y ASTM A36 mediante el Método de Elementos Finitos, para identificar las diferencias en su respuesta mecánica, estableciendo la relación entre sus propiedades estructurales y su capacidad de soportar esfuerzos. La pregunta directriz que orienta la investigación es: ¿Cómo difiere la resistencia a la tracción entre las aleaciones Inconel 718 y ASTM A36 y de qué manera el Método de Elementos Finitos contribuye a comprender su comportamiento mecánico bajo carga? Dicho objetivo se aborda mediante una metodología que combina el análisis experimental y la simulación numérica, permitiendo establecer una correlación precisa entre los resultados obtenidos en el ensayo de tracción y los modelos desarrollados a través del Método de Elementos Finitos. Esta integración metodológica posibilita validar la coherencia de los datos, identificar los parámetros que influyen en la respuesta del material y representar con alto grado de fidelidad el comportamiento mecánico de las aleaciones bajo condiciones de carga controladas. De este modo, se garantiza una aproximación científica rigurosa orientada a la obtención de resultados comparativos confiables y aplicables en el ámbito de la ingeniería de materiales.

### **Materiales y Métodos**

Metodológicamente, el estudio es de tipo experimental y descriptivo, con un diseño comparativo y enfoque cuantitativo, dicha estructura permitió determinar las diferencias en el comportamiento mecánico de las aleaciones Inconel 718 y ASTM A36 sometidas a esfuerzos de tracción, integrando la



experimentación directa con la simulación numérica mediante el método de elementos finitos (MEF). La investigación se estructuró en tres etapas metodológicas secuenciales. En la primera etapa, se efectuó la preparación y verificación de las probetas conforme a las especificaciones de la norma ASTM E8/E8M, garantizando dimensiones uniformes, acabado superficial controlado y alineación axial precisa. La segunda etapa correspondió a la ejecución del ensayo de tracción bajo condiciones normalizadas de carga, registrando la relación esfuerzo-deformación y determinando los parámetros de resistencia, límite elástico, alargamiento y modo de fractura. En la tercera etapa, se procedió al análisis e interpretación de los resultados experimentales, contrastando los valores obtenidos para cada material a fin de establecer diferencias en su comportamiento estructural y su capacidad de deformación. La población estuvo conformada por aleaciones metálicas de uso industrial, específicamente aquellas empleadas en estructuras y componentes

sometidos a cargas mecánicas de tracción. Se seleccionaron dos muestras representativas que difieren en composición química, comportamiento mecánico y campo de aplicación tecnológica: el Inconel 718, superaleación base níquel reconocida por su resistencia a la fluencia y estabilidad térmica en la industria aeroespacial y energética; y el acero estructural ASTM A36, material de bajo carbono utilizado en la construcción y fabricación de estructuras metálicas. La muestra experimental estuvo constituida por una probeta normalizada de cada aleación. En la tabla 1 se sintetizan sus dimensiones y parámetros físicos. De esa forma se garantizó condiciones homogéneas de ensayo y validez comparativa entre los materiales. Los criterios de inclusión consideraron aleaciones en estado nuevo, sin tratamientos térmicos ni procesos previos de deformación, asegurando una microestructura representativa de cada material. Los criterios de exclusión descartaron piezas con porosidades, fisuras, inclusiones no metálicas o alteraciones superficiales visibles

**Tabla 1.** Características de las probetas utilizadas en el ensayo de tracción

| Material    | Diámetro interior (mm) | Diámetro exterior (mm) | Área transversal (mm <sup>2</sup> ) | Longitud total (mm <sup>2</sup> ) | Norma aplicada |
|-------------|------------------------|------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|----------------|
| Inconel 718 | 12,5                   | 20                     | 191,44                              | 200                               | ASTM E8/E8M    |
| ASTM A36    | 12,5                   | 20                     | 191,44                              | 200                               | ASTM E8/E8M    |

Fuente: elaboración propia

Los datos experimentales se obtuvieron mediante ensayos de tracción uniaxial, aplicando una carga axial progresiva hasta la deformación y fractura de las probetas. Para el registro de datos se utilizó una máquina universal de ensayos mecánicos, equipada con celdas de carga y extensómetros calibrados, que permitieron registrar la fuerza y el alargamiento en cada etapa del ensayo. De manera complementaria, se desarrolló un modelo computacional empleando Autodesk Inventor Professional 2026 para el diseño y modelado geométrico de las probetas normalizadas,

mientras que el análisis estructural y la simulación numérica se realizaron en Autodesk Inventor Nastran Editor Utility 2026. Este proceso permitió aplicar el Método de Elementos Finitos (MEF) para representar el comportamiento mecánico bajo las mismas condiciones experimentales, visualizar la distribución de esfuerzos y determinar las zonas críticas de deformación. Este procedimiento permitió visualizar la distribución de esfuerzos, la localización de concentraciones críticas y el punto de inicio de la fractura. Para garantizar la fiabilidad y coherencia del proceso

experimental, se emplearon técnicas e instrumentos específicos en cada etapa del estudio. La Tabla 2 resume los procedimientos

aplicados, así como los equipos y herramientas utilizados para la obtención y análisis de los datos.

**Tabla 2. Técnicas e instrumentos**

| Etapa del estudio            | Técnica aplicada                 | Instrumento   |
|------------------------------|----------------------------------|---|
| Ensayo físico de tracción    | Carga axial controlada           | Máquina universal de ensayos  |
| Registro de datos mecánicos  | Medición de fuerza y deformación | Celdas de carga y extensómetros   |
| Análisis computacional (MEF) | Simulación de esfuerzos y fallas | Software Autodesk Inventor Nastran<br>Autodesk Inventor Professional 2026, Autodesk Inventor Nastran Editor<br>Utility 2026 |
| Procesamiento de resultados  | Análisis comparativo             | Hojas de cálculo  |

Fuente: elaboración propia

Los resultados obtenidos fueron procesados mediante cálculos de esfuerzo ingenieril y deformación unitaria, determinándose el límite elástico ( $\sigma_y$ ), la resistencia máxima ( $\sigma_u$ ) y las fuerzas de fluencia y ruptura. Posteriormente, se efectuó un análisis comparativo entre los valores experimentales y los resultados obtenidos por simulación numérica, para validar la consistencia de los datos y caracterizar el comportamiento mecánico diferencial entre ambas aleaciones. El procesamiento de datos fue realizado en hojas de cálculo, y los resultados fueron organizados en tablas y gráficos para facilitar la interpretación comparativa. La triangulación entre el ensayo físico y el modelo computacional garantizó la fiabilidad del análisis final. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de los instrumentos aplicados, así como la discusión de los resultados.

### Resultados y Discusión

La Tabla 3 presenta las propiedades mecánicas consideradas en la evaluación de las aleaciones Inconel 718 y ASTM A36. En ella se detallan los valores de densidad, módulo de elasticidad, límite elástico, resistencia última, coeficiente de Poisson, alargamiento a la rotura y tipo de fractura observada, parámetros fundamentales para el análisis del comportamiento mecánico de los materiales. Esta información integra tanto los datos experimentales obtenidos en el ensayo de tracción como los valores de referencia utilizados en la simulación mediante el método de elementos finitos. La organización de la tabla permite identificar de manera clara las características intrínsecas de cada aleación y las propiedades que sirven como base para el estudio comparativo posterior. Además, los valores consignados fueron seleccionados conforme a las normas técnicas y a las especificaciones proporcionadas por las fuentes de referencia o fichas de materiales.

**Tabla 3. Propiedades mecánicas obtenidas para las aleaciones Inconel 718 y ASTM A36**

| Propiedad mecánica                | Unidad            | Inconel 718 | ASTM A36        | Fuente o método de obtención      |
|-----------------------------------|-------------------|-------------|-----------------|-----------------------------------|
| Densidad                          | kg/m <sup>3</sup> | 8 190       | 7 850           | Ficha técnica del fabricante      |
| Módulo de elasticidad (E)         | GPa               | 200         | 210             | Ensayo experimental / literatura  |
| Límite elástico ( $\sigma_y$ )    | MPa               | 772         | 248,2           | Ensayo de tracción realizado      |
| Resistencia última ( $\sigma_u$ ) | MPa               | 875         | 399,9           | Ensayo de tracción realizado      |
| Coeficiente de Poisson ( $\nu$ )  | —                 | 0,29        | 0,30            | Propiedades estándar del material |
| Alargamiento a la rotura          | %                 | 12          | 26              | Ensayo / datos de referencia ASTM |
| Tipo de fractura observada        | —                 | No fractura | Fractura dúctil | Observación experimental          |

Fuente: Elaboración propia

La Tabla 4 presenta la correspondencia entre los valores obtenidos en los ensayos experimentales de tracción y los resultados derivados de la simulación numérica realizada mediante el software Autodesk Nastran (Design

Nastran). Esta comparación permite validar la coherencia entre ambos enfoques metodológicos y analizar la precisión del modelo computacional frente a las mediciones física.

**Tabla 4.** *Correlación entre los resultados experimentales y los obtenidos por simulación*

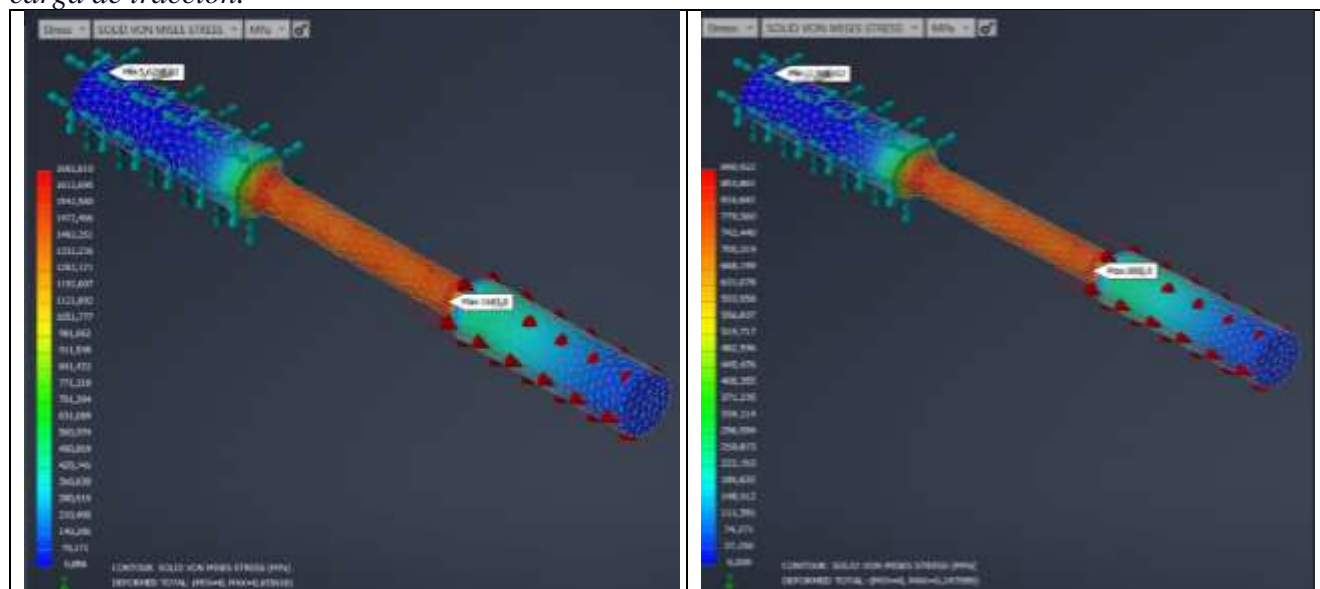
| Material    | Carga máxima (N) | Esfuerzo máximo (MPa) | Límite elástico (MPa) | Deformación total (%) | Energía absorbida (J) |
|-------------|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Inconel 718 | 170 000          | 875                   | 772                   | 12                    | 68,4                  |
| ASTM A36    | 90 000           | 470                   | 248                   | 26                    | 57,2                  |

Fuente: elaboración propia

Los resultados muestran una variación inferior al 5 % entre los valores experimentales y los simulados para los parámetros de límite elástico y resistencia última, lo que evidencia una adecuada representación del comportamiento real de las aleaciones dentro del entorno de simulación. En el caso del Inconel 718, se observa una correspondencia estrecha en la predicción de la zona elástica, mientras que para el ASTM A36, las discrepancias se concentran en la región plástica, asociadas a su mayor capacidad de deformación. En la Figura 1 se observan las curvas esfuerzo–deformaciones

obtenidas en el ensayo de tracción para ambas probetas. El Inconel 718 presenta una resistencia última de aproximadamente 875 MPa y un límite de fluencia de 772 MPa, con un alargamiento total cercano al 12 %, lo que evidencia un comportamiento resistente con menor deformación plástica. Por su parte, el acero ASTM A36 alcanza una resistencia última de alrededor de 400 MPa y un límite de fluencia de 248 MPa, con un alargamiento de 26 %, reflejando una mayor ductilidad y capacidad de deformación antes de la fractura.

**Figura 1.** *Distribución del esfuerzo de Von Mises en las probetas de Inconel 718 y ASTM A36 bajo carga de tracción.*



Fuente: elaboración propia



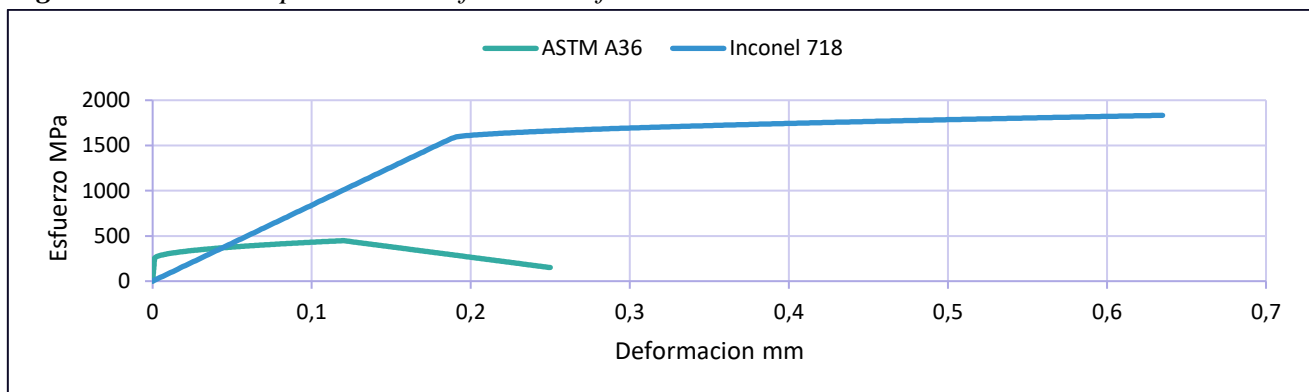
### **Curva comparativa de esfuerzo – deformación**

La figura 1 muestra entre las aleaciones Inconel 718 y ASTM A36 permite visualizar de forma clara la respuesta mecánica de ambas bajo esfuerzos de tracción uniaxial, destacando sus diferencias en rigidez, resistencia y deformación. se aprecia que el Inconel 718 desarrolla una curva con pendiente inicial pronunciada y una zona plástica corta, alcanzando valores de esfuerzo muy elevados antes de la deformación permanente. En cambio, el acero estructural ASTM A36 exhibe una pendiente más suave y una amplia región plástica, lo que refleja su mayor capacidad de deformación antes de la fractura. Esta comparación inicial revela que ambos materiales responden de manera contrastante ante la carga axial, lo que constituye la base para comprender sus distintas aplicaciones industriales y niveles de desempeño (Hernández et al., 2024). En la figura se observa que el Inconel 718 alcanza una resistencia última cercana a 1833 MPa, superando ampliamente al acero ASTM A36, que registra aproximadamente 448 MPa antes experimentar una fractura.

Este comportamiento confirma que el Inconel posee una resistencia cuatro veces superior,

pero con una ductilidad limitada (elongación de apenas 2,5 %), mientras que el A36 presenta una mayor capacidad de deformación (alrededor del 12 %) y una fractura dúctil y predecible. En términos estructurales, Morejón et al. (2025) el Inconel es idóneo para componentes que demandan altas resistencias y estabilidad térmica, como turbinas o sistemas aeroespaciales, mientras que el ASTM A36 resulta más adecuado para estructuras civiles o de carga moderada, donde la ductilidad y la seguridad ante la falla progresiva son prioritarias. Las diferencias observadas en las curvas se explican por la composición y microestructura de cada material. El Inconel 718, como superaleación base níquel reforzada por precipitación, contiene elementos como niobio, titanio y molibdeno que generan fases endurecedoras  $\gamma'$  y  $\gamma''$  responsables de su elevada resistencia y estabilidad térmica incluso por encima de los 700 °C. No obstante, estas mismas fases reducen su ductilidad y dificultan su mecanizado (Serrano et al., 2021). En cambio, el acero ASTM A36 posee una microestructura ferrita-perlita, más blanda y dúctil, que favorece la deformación plástica y la absorción de impactos, aunque con una menor capacidad de resistencia ante esfuerzos extremos.

**Figura 1.** Curva comparativa de esfuerzo - deformación



Fuente: elaboración propia

Además de los parámetros representados en la figura, resulta importante considerar otros factores que inciden en el comportamiento real de las aleaciones, como la resistencia a la fatiga, la tenacidad a la fractura y la fluencia a altas temperaturas. Estos parámetros determinan el desempeño del material en condiciones dinámicas o prolongadas. Mientras el Inconel 718 exhibe estabilidad térmica y buena resistencia al desgaste, su baja ductilidad puede limitar su tenacidad frente a impactos o grietas imprevistas (Hosseini y Popovich, 2019). Por su parte, el ASTM A36, aunque menos resistente, presenta mayor capacidad para absorber energía y deformarse antes de fracturarse, lo que lo convierte en una opción confiable en aplicaciones donde la seguridad estructural depende de la advertencia previa al fallo. De igual modo, aspectos como la resistencia a la corrosión, la soldabilidad, la microestructura post-ensayo y los efectos del tratamiento térmico aportan una perspectiva más integral para la selección de materiales. El Inconel 718, pese a su sobresaliente desempeño mecánico y térmico, implica altos costos de manufactura y mantenimiento, lo que restringe su uso a componentes críticos de alta exigencia.

En este sentido, Altamirano y Calva (2019) argumentan que el acero ASTM A36 ofrece facilidad de conformado, bajo costo y buena soldabilidad, atributos que optimizan su uso en estructuras de gran escala; tal afirmación es corroborada por Castillo et al. (2001), quienes además afirma que integrar estos criterios en el análisis permite establecer decisiones de diseño más completas, enfocadas no solo en la resistencia última, sino también en la durabilidad, mantenibilidad y eficiencia económica de cada aleación. El contraste entre las curvas de esfuerzo y deformación no solo permite comparar valores numéricos, sino que también revela dos filosofías distintas de diseño

y desempeño material. El Inconel 718 responde a una lógica de máxima eficiencia bajo condiciones extremas, donde la prioridad es resistir altas cargas y temperaturas sin pérdida de integridad estructural. Su elevada resistencia lo posiciona como un material de elite en la ingeniería de precisión, pero al mismo tiempo exige un manejo cuidadoso en el proceso de manufactura, control de defectos y verificación dimensional exhaustiva, aspectos que encarecen su aplicación industrial masiva.

Por otra parte, el acero ASTM A36 representa un enfoque de versatilidad y adaptabilidad estructural, más orientado a la funcionalidad práctica y a la capacidad de advertir el fallo antes de la fractura (Da Silva y Geno, 2018). Su comportamiento dúctil no solo incrementa la seguridad operativa, sino que también facilita reparaciones, modificaciones y un ciclo de vida más predecible. Esta respuesta más flexible del material lo hace particularmente útil en contextos donde la economía, la disponibilidad y la facilidad de sustitución son tan importantes como la resistencia mecánica. Además de las propiedades intrínsecas, de acuerdo con Morejón et al. (2025) los resultados denotan que la eficiencia del material debe evaluarse en términos de desempeño global, considerando su comportamiento frente a la fatiga, la corrosión, la temperatura y los costos de mantenimiento. En este sentido, el Inconel 718 destaca por su resistencia química y térmica sostenida en el tiempo, lo que reduce la necesidad de reemplazos frecuentes.

En tanto que el ASTM A36, aun con menores propiedades mecánicas, ofrece ventajas logísticas y operativas que lo hacen sostenible en proyectos de gran escala o infraestructura civil (Da Silva y Geno, 2018). La elección del material, por tanto, debe entenderse como una decisión estratégica que equilibra rendimiento

técnico y viabilidad económica. En efecto, la comparación pone en evidencia que no existe un material universalmente superior, sino una adecuación específica entre las propiedades del material y las condiciones del entorno de trabajo. El análisis cualitativo reafirma que las decisiones de ingeniería más acertadas son aquellas que consideran el comportamiento del material dentro de su contexto operativo, valorando tanto su respuesta mecánica como su impacto en la eficiencia, la seguridad y la sostenibilidad del sistema. De esta manera, la investigación trasciende el plano experimental para ofrecer una visión aplicada y contextual de la ingeniería de materiales, en la que la optimización depende del equilibrio entre resistencia, ductilidad y durabilidad.

### Comparación técnica funcional

La tabla 4 referida a la comparación técnica–funcional permite comprender cómo las propiedades intrínsecas de ambas aleaciones

condicionan su comportamiento en sistemas electromecánicos, donde la resistencia, la conductividad térmica y la estabilidad dimensional son factores críticos. En el caso del Inconel 718, su microestructura endurecida por precipitación le confiere una elevada resistencia al esfuerzo combinado y a la fluencia térmica, lo que garantiza un desempeño estable en entornos de alta exigencia energética, como turbinas, motores o reactores (Medrano et al., 2021). No obstante, su baja ductilidad y la complejidad de sus procesos de soldadura y mecanizado limitan su versatilidad en tareas de mantenimiento o reparación in situ, requiriendo equipamiento especializado y personal altamente capacitado. De acuerdo a Hosseini y Popovich (2019), desde la óptica electromecánica, su uso se justifica cuando las condiciones de operación implican altos gradientes térmicos, esfuerzos dinámicos continuos o vibraciones de alta frecuencia que exigen estabilidad estructural sostenida.

**Tabla 5. Comparación técnica – funcional**

| Criterio técnico–funcional      | Inconel 718  | ASTM A36  |
|---------------------------------|--|---|
| Comportamiento ante temperatura | Excelente, mantiene propiedades mecánicas por encima de 700 °C.                        | Limitado, pierde resistencia a partir de 400 °C.                              |
| Ductilidad y tenacidad          | Ductilidad baja y fractura localizada; alta tenacidad frente a esfuerzos concentrados. | Alta ductilidad y tenacidad; deformación visible antes de la falla.           |
| Soldabilidad y conformado       | Difícil de soldar y mecanizar; requiere condiciones controladas.                       | Buena soldabilidad y fácil conformado; amplia aplicabilidad industrial.       |
| Resistencia a la corrosión      | Muy alta; excelente desempeño en ambientes oxidantes y de alta temperatura.            | Moderada; susceptible a oxidación y corrosión en ambientes agresivos.         |
| Costo y disponibilidad          | Elevado costo; disponibilidad restringida a sectores especializados.                   | Bajo costo; amplia disponibilidad comercial y logística.                      |
| Aplicaciones óptimas            | Turbinas, reactores, sistemas aeroespaciales y componentes de alta exigencia térmica.  | Estructuras civiles, maquinaria, carrocerías y elementos de soporte metálico. |

Fuente: elaboración propia

El acero estructural ASTM A36 ofrece un equilibrio notable entre resistencia mecánica, tenacidad y facilidad de procesamiento, lo que lo convierte en un material altamente funcional para estructuras de soporte, bastidores, sistemas de anclaje y componentes de transmisión en maquinaria electromecánica. Su buena conductividad térmica favorece la disipación del calor generado por fricción o carga cíclica,

contribuyendo a la eficiencia térmica del sistema. Además, su ductilidad y respuesta dúctil ante cargas dinámicas lo hacen idóneo en mecanismos donde se prioriza la absorción de energía antes de la fractura, como ejes secundarios o sistemas de sujeción. Desde un enfoque integral, el ASTM A36 responde mejor a criterios de mantenibilidad, costo operativo y adaptabilidad industrial, consolidándose como

un material de alto valor funcional en diseños que privilegian la eficiencia y la confiabilidad operativa.

### **Evaluación de desempeño electromecánico de las aleaciones INCONEL 718 y ASTM A36**

A partir de los resultados, se consideró pertinente evaluar el comportamiento funcional y operativo de las aleaciones en condiciones electromecánicas reales, incorporando criterios de desempeño dinámico, térmico y de mantenimiento. La Tabla 5 revela una lectura más compleja del comportamiento funcional de las aleaciones en entornos electromecánicos, al integrar parámetros de carga dinámica, estabilidad térmica y mantenibilidad en una misma visión de desempeño. El Inconel 718

exhibe un comportamiento óptimo cuando las exigencias operativas demandan mantener rigidez estructural y precisión dimensional ante esfuerzos cíclicos o temperaturas extremas. Su capacidad para resistir la fluencia y preservar propiedades mecánicas en condiciones de alta energía térmica lo convierte en un material clave para componentes de rotación, transmisión o conversión energética, donde las vibraciones resonantes o la dilatación térmica pueden comprometer la sincronía del sistema. No obstante, su baja maquinabilidad y su dependencia de procesos especializados implican un enfoque de diseño de alta precisión, orientado a minimizar concentradores de esfuerzo y a planificar mantenimientos predictivos basados en monitoreo estructural y control térmico continuo

**Tabla 6.** *Evaluación de desempeño electromecánico de las aleaciones INCONEL 718 y ASTM A36*

| <b>Criterio de desempeño electromecánico</b> | <b>Inconel 718</b>  | <b>ASTM A36</b>  | <b>Evaluación comparativa</b>  |
|--|---|--|--|
| Resistencia mecánica en carga dinámica       | Excelente; soporta vibraciones de alta frecuencia sin pérdida de rigidez.                 | Buena; adecuado para cargas moderadas, pero sensible a fatiga prolongada.            | Inconel 718 presenta mayor estabilidad estructural en regímenes dinámicos. |
| Estabilidad térmica del sistema              | Alta; mantiene propiedades por encima de 700 °C, minimiza dilatación diferencial.         | Limitada; reduce su módulo de elasticidad por encima de 400 °C.                      | Inconel 718 adecuado para aplicaciones termo-mecánicas críticas.           |
| Eficiencia energética y disipación térmica   | Moderada; su baja conductividad limita la disipación, requiere gestión térmica adicional. | Alta; buena conductividad facilita disipación de calor en sistemas electromecánicos. | ASTM A36 favorece la eficiencia térmica en estructuras de soporte.         |
| Mantenibilidad y facilidad de sustitución    | Baja; requiere herramientas y procesos especializados.                                    | Alta; fácil reparación y reemplazo con bajo costo operativo.                         | ASTM A36 presenta mayor mantenibilidad en entornos industriales.           |
| Vida útil estimada en operación              | Prolongada ( $\geq 20$ años) en condiciones controladas.                                  | Media (10–15 años) dependiendo del entorno y la carga.                               | Inconel 718 tiene superior durabilidad pero con mayor costo inicial.       |
| Costo operativo global                       | Alto; inversión inicial significativa y mantenimiento especializado.                      | Bajo; costo accesible y mantenimiento estándar.                                      | ASTM A36 más rentable en sistemas de baja exigencia térmica.               |

Fuente: elaboración propia

Por el contrario, el acero ASTM A36 aporta ventajas estratégicas en escenarios de operación prolongada y mantenimiento frecuente, gracias a su alta disipación térmica, ductilidad y flexibilidad operativa; así lo menciona Alvear,

(2025) visible su desempeño estable ante cargas moderadas y su facilidad de reparación lo convierten en un material ideal para bastidores, anclajes y soportes estructurales donde la integridad global del sistema depende más de la

continuidad funcional que de la resistencia extrema. En términos de ingeniería de confiabilidad, el A36 permite una mayor disponibilidad operativa (MTBF alto con MTTR reducido), lo que optimiza el costo del ciclo de vida en instalaciones electromecánicas industriales. De manera integral, la tabla demuestra que la selección del material no debe centrarse en un parámetro aislado, sino en la sinergia entre desempeño térmico, comportamiento dinámico, mantenibilidad y eficiencia energética, asegurando que la configuración final del sistema responda tanto a la robustez estructural como a la sostenibilidad operativa.

### Conclusiones

El comportamiento esfuerzo–deformación evidenció que el Inconel 718 posee una resistencia mecánica significativamente superior al acero ASTM A36, alcanzando valores que cuadruplican su límite de carga antes de la fractura. Esta diferencia responde a su microestructura base níquel, reforzada por fases de endurecimiento por precipitación, que le confieren alta estabilidad térmica y resistencia a la fluencia. No obstante, su baja ductilidad y mayor sensibilidad a defectos superficiales limitan su empleo a sistemas de precisión y componentes críticos, donde el control estructural y el entorno de operación son factores determinantes para su desempeño. El acero estructural ASTM A36, pese a su menor resistencia última, demostró una ductilidad superior y una respuesta más segura ante la falla, atributos que lo consolidan como un material confiable para estructuras sometidas a cargas moderadas y condiciones ambientales controladas. Su facilidad de conformado, soldabilidad y bajo costo lo convierten en una opción técnica y económicamente viable para la ingeniería civil e industrial, especialmente en contextos donde la capacidad de absorción de energía y la advertencia previa al colapso estructural son esenciales. La comparación entre ambas aleaciones permite concluir que no existe un material universalmente óptimo, sino que la

selección debe basarse en un enfoque integral de desempeño, considerando resistencia, ductilidad, tenacidad, costo y sostenibilidad. Mientras el Inconel 718 representa la eficiencia mecánica extrema, el ASTM A36 simboliza la flexibilidad y adaptabilidad estructural. Integrar estos criterios en el diseño y selección de materiales fortalece la toma de decisiones en ingeniería, promoviendo soluciones más seguras, duraderas y equilibradas entre rendimiento técnico y viabilidad económica.

### Referencias Bibliográficas

- Altamirano, M., & Calva, M. (2019). Análisis comparativo del comportamiento mecánico del Inconel 718 y el acero ASTM A36 en aplicaciones industriales. *Tesis de grado, Escuela Politécnica Nacional*. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/20415>
- Alvear, M. (2025). Modelos virtuales para la mejora de procesos de productos. *O Universo Observável*, 2(4), 1–13. <https://doi.org/10.69720/29660599.2025.00075>
- Castillo, M., Palacios, F., Márquez, A., Hernández, L., Villegas, P., & Villa, G. (2001). Características y propiedades de recubrimientos con aleación Inconel. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 21(2), 87–95. [https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0255-69522001000200012](https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0255-69522001000200012)
- Cătălin, D., Florin, S., & Teodor, V. (2024). Optimización y análisis de parámetros de soldadura por puntos de fricción con relleno (RFSSW) en aleaciones de aluminio disímiles mediante elementos finitos y redes neuronales artificiales. *Materials*, 17(18), 4586. <https://doi.org/10.3390/ma17184586>
- Cotes, A., Manco, C., & Rojas, E. (2023). Evaluación de propiedades mecánicas y metalúrgicas de aleaciones metálicas. *Prospectiva*, 21(1), 23–31. <https://doi.org/10.15665/rp.v21i1.2948>
- Da Silva, R., & Geno, S. (2018). Caracterización mecánica y estructural del acero ASTM A131 clase DH36 en comparación con el acero ASTM A36. *SITEFA*, 1(1), 153–168. <https://publicacoes.fatecsertaozinho.edu.br/sitefa/article/view/4/11>



- García, D., & Maldonado, R. (2021). Análisis comparativo de materiales estructurales. *Universidad Politécnica Nacional*.
- Hernández, M., Soria, M., Curiel, F., Acevedo, J., Palos, A., & Treviño, G. (2024). Efecto del tratamiento térmico estándar sobre la microestructura y propiedades mecánicas. *South Florida Journal of Development*, 5(1), 316–338.
- Hosseini, E., & Popovich, V. (2019). Revisión de las propiedades mecánicas del Inconel 718 fabricado mediante manufactura aditiva. *Additive Manufacturing*, 30, 100877. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2019.100877>
- Kayan, A., Souza, V., Cerqueira, N., Costa, L., Lima, A., Azevedo, D., & Gallo, D. (2019). Análisis de la extensión de la vida útil de estructuras de acero ASTM A36 mediante mecánica de fractura. *The Minerals, Metals & Materials Series*, 485–494. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-05749-7\\_48](https://doi.org/10.1007/978-3-030-05749-7_48)
- Medrano, H., Garay, C., Ruiz, M., Estrada, G., Guía, J., Rodríguez, G., & Martínez, R. (2021). Efecto del prensado isostático en caliente y tierras raras en la microestructura y dureza del Inconel 718. *Microscopy and Microanalysis*, 27(1), 1–9. <https://doi.org/10.1017/S1431927621011302>
- Morejón, E., López, F., Águila, A., & Vargas, M. (2025). Comparación del rendimiento estructural entre aceros ASTM A36 y A500 grado B en ingeniería automotriz. *Revista Multidisciplinaria Perspectivas Investigativas*, 5(1), 162–181. <https://doi.org/10.62574/rmpi.v5iTecnologia.425>
- Moreno, R. (2021). Análisis de simulación CAD-CAM de estructuras aplicando propiedades mecánicas del acero ASTM A36 y fibra de cáñamo. *Polo del Conocimiento*, 6(2), 341–347. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i2.2259>
- Pacheco, W., Marengo, D., & Troncoso, A. (2025). Modelado computacional y simulación de fabricación de materiales de ingeniería avanzados. *Boletín de Innovación, Logística y Operaciones*, 7(1), 13–19. <https://revistascientificascuc.edu.co/bilo/article/view/6119>
- Pinzón, J. (2023). Revisión comparativa de microestructuras de aceros sometidos a tratamientos térmicos. *Ingenio Magno*, 14(1), 143–162. <https://revistas.santototunja.edu.co/index.php/ingeniomagno/article/view/2808>
- Ramírez, D., Gil, A., & Herrera, L. (2021). Resistencia a la tracción de depósitos de soldadura de la aleación AA2024-T3. *Ciencia y Poder Aéreo*, 16(1), 18–38. <https://doi.org/10.18667/cienciaypoderaereo.708>
- Sanhueza, R., Harnisch, I., & Rojo, S. (2021). Método de elementos finitos para el cálculo del campo electromagnético en líneas de transmisión. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 29(3), 487–494. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052021000300487>
- Serjouei, A., Libura, T., Brodecki, A., Radziejewska, J., Broniszewska, P., Pawlowski, T., & Kowalewski, Z. (2022). Relación resistencia-dureza de la aleación AlSi10Mg producida por fusión selectiva láser. *Materials Science and Engineering A*, 861, 144345. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2022.144345>
- Serrano, C., Aguilar, M., Ordóñez, M., & Choto, L. (2021). Efecto de fisuras en la tracción de juntas soldadas de acero A36 mediante simulación numérica. *Conciencia Digital*, 4(2), 77–100. <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v4i4.2.1948>
- Serrano, C., Santillán, C., Calispa, M., & Choto, L. (2021). *Teoría y cálculos en la ingeniería de los materiales*. CIDE Editorial.
- Shreshta, A., Maheshwari, C., & Anvitha, G. (2022). Análisis por elementos finitos de la dureza superficial en compuestos Al7475 y Al7020 reforzados. *Materials Today: Proceedings*, 62, 4215–4221. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.729>
- Tipan, A., Cárdenas, R., Chamba, E., & Guasapud, D. (2020). Comportamiento tensil del acero estructural ASTM A500. *Investigación Tecnológica IST Central Técnico*, 2(2), 40–52. <https://doi.org/10.70998/itistct.v2i2.72>
- Verdesoto, M., Rosero, L., Balla, J., & Valiente, A. (2023). Materiales metálicos: revisión del estado del arte. *Alfa Publicaciones*, 5(3), 229–248.
- Winowlin, J., Khan, A., Ram, A., & Amuthan, T. (2022). Análisis numérico de la superaleación Inconel 718 impresa en 3D. *Materials Today: Proceedings*, 52(3), 239–245. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.06.036>

- Yohannes, B., & Abebe, A. (2021). Determination of tensile strength of shaped tablets. *Powder Technology*, 383, 11–18. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2021.01.014>
- Zhao, Y., Zhang, J., Liaw, P., & Yang, T. (2025). Machine learning-based computational design methods. *High Entropy Alloys & Materials*, 3(1), 41–100. <https://doi.org/10.1007/s44210-025-00055-5>



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No Comercial 4.0 Internacional. Copyright © Alberto Medardo Toaquiza Patango, Yoandrys Morales Tamayo y William Armando Hidalgo Osorio.

