



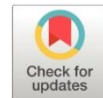


Fractura de materiales: un estudio del arte sobre la fractura dúctil de materiales metálicos.

Fracture of materials: a study of the art on ductile fracture of metallic materials.

- ¹ Joseph Ariel Llangari Rivera  <https://orcid.org/0009-0001-0092-7389>
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
joseph.llangari@unach.edu.ec
- ² Stefany Tatiana Morocho Ortuño  <https://orcid.org/0009-0000-1661-6086>
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
stefany.morocho@unach.edu.ec
- ³ Michael Patricio Zavala Pozo  <https://orcid.org/0009-0003-4519-7812>
Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
michael.zavala@unach.edu.ec
- ⁴ Carmen del Rocío Moyón Moyón  <https://orcid.org/0000-0001-8798-7060>
Maestrante en la Universidad Nacional de Chimborazo, Investigador Independiente, Riobamba, Ecuador.
carmy_111@hotmail.com



Artículo de Investigación Científica y Tecnológica

Enviado: 11/05/2023

Revisado: 19/06/2023

Aceptado: 14/07/2023

Publicado: 30/08/2023

DOI: <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v6i3.2655>

Cítese: Llangari Rivera, J. A., Morocho Ortuño, S. T., Zavala Pozo, M. P., & Moyón Moyón, C. del R. (2023). Fractura de materiales: un estudio del arte sobre la fractura dúctil de materiales metálicos. *ConcienciaDigital*, 6(3), 207-232. <https://doi.org/10.33262/concienciadigital.v6i3.2655>



CONCIENCIA DIGITAL, es una revista multidisciplinar, **trimestral**, que se publicará en soporte electrónico tiene como **misión** contribuir a la formación de profesionales competentes con visión humanística y crítica que sean capaces de exponer sus resultados investigativos y científicos en la misma medida que se promueva mediante su intervención cambios positivos en la sociedad. <https://concienciadigital.org>

La revista es editada por la Editorial Ciencia Digital (Editorial de prestigio registrada en la Cámara Ecuatoriana de Libro con No de Afiliación 663) www.celibro.org.ec

Esta revista está protegida bajo una licencia Creative Commons Attribution Non Commercial No Derivatives 4.0 International. Copia de la licencia: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Palabras claves:

Fractura, dúctil,
materiales,
metálicos,
revisión,
bibliográfica

Resumen

La presente investigación se enfoca en un análisis exhaustivo de las diversas investigaciones desarrolladas en función del mecanismo de fractura dúctil, esto debido a que históricamente, la humanidad ha buscado comprender y evitar la fractura de sus construcciones y artefactos. En este contexto, la Mecánica de Fractura ha sido una disciplina fundamental, dedicada al estudio de los mecanismos que rigen el comportamiento de materiales bajo cargas y tensiones extremas. El enfoque se ha centrado en la fractura dúctil de materiales metálicos. Mediante una metodología cualitativa y un meticuloso flujo de pasos para la selección de fuentes bibliográficas certeras, se ha obtenido información verificada de revistas, libros y documentos de repositorios en internet. Asimismo, se analiza un caso práctico relacionado con la evaluación de la tenacidad a la fractura en un gasoducto de suministro de gas natural con sus respectivos métodos de análisis y resultados representados en tablas y gráficos matemáticos. Este estudio demuestra que la fractura de materiales es esencial para garantizar la seguridad e integridad estructural de sistemas críticos, incluyendo aquellos fabricados con materiales metálicos.

Keywords:

Fracture, ductile,
materials, metallic,
literature, review.

Abstract

This research focuses on an exhaustive analysis of the various investigations developed in terms of the ductile fracture mechanism, because historically, mankind has sought to understand and avoid the fracture of its constructions and artifacts. In this context, Fracture Mechanics has been a fundamental discipline, dedicated to the study of the mechanisms that govern the behavior of materials under extreme loads and stresses. The focus has been on the ductile fracture of metallic materials. By means of a qualitative methodology and a meticulous flow of steps for the selection of accurate bibliographic sources, verified information has been obtained from journals, books and documents from internet repositories. Also, a case study related to the evaluation of fracture toughness in a natural gas supply pipeline is analyzed with its respective analysis methods and results represented in mathematical tables and graphs. This study demonstrates that fracture of materials is

essential to ensure the safety and structural integrity of critical systems, including those made of metallic materials.

Introducción

La fractura ha sido considerada desde siempre como un efecto indeseado entre los materiales, dado que su aparición supone un cese del material en servicio. Un material fracturado carece de importancia desde el punto de vista comercial. Desde tiempos remotos, los humanos han buscado comprender y evitar la fractura de sus construcciones y artefactos, ya que esta puede conducir a la falla catastrófica de estructuras cruciales (Guadalupe, 2007).

No obstante, con el avance del conocimiento científico, se ha comprendido que la fractura también puede ser un fenómeno útil en ciertas aplicaciones y materiales específicos. Consecuentemente, la Mecánica de Fractura ha experimentado un desarrollo importante en las últimas décadas, a diferencia de lo ocurrido en toda la historia de los materiales (Sahel, 2016).

La Mecánica de Fractura (fractura de materiales) ha experimentado significativos avances tecnológicos en las últimas décadas, impulsados por la creciente demanda de mejorar la seguridad y confiabilidad de diversos sistemas y estructuras. Estos avances han permitido una comprensión más profunda de los mecanismos de fractura y la capacidad de predecir y prevenir posibles fallas, permitiendo una comprensión más profunda de los mecanismos de fractura y sus implicaciones en diversos materiales (Wang, 2022).

En este artículo, se profundiza uno de los aspectos más importantes de la Mecánica de Fractura: la fractura dúctil de materiales metálicos. La fractura dúctil es un fenómeno común en materiales metálicos con alta ductilidad, como acero, aluminio, cobre y titanio, entre otros. A diferencia de la fractura frágil, donde la separación de los componentes ocurre sin deformación plástica significativa, en la fractura dúctil se produce una deformación plástica sustancial antes de la separación final.

Durante la fractura dúctil de metales, se origina la iniciación, el crecimiento y la coalescencia de vacíos microscópicos en el material. Estos vacíos, también conocidos como micro huecos, suelen formarse en las interfaces de inclusiones y partículas de segunda fase presentes en el material. La disociación de estas interfaces se considera el mecanismo dominante de la nucleación de los vacíos. Una vez que los vacíos se inician, la deformación plástica adicional aumenta su tamaño y distorsiona su forma, un proceso conocido como crecimiento de vacíos.

La fractura dúctil en materiales metálicos es de gran importancia en diversas aplicaciones industriales y estructurales (Mouritz, 2012). Su resistencia y capacidad de deformación antes de la ruptura hacen que estos materiales sean ideales para su uso en componentes y estructuras críticas, como puentes, aviones, automóviles, barcos y equipos médicos, donde la seguridad y la confiabilidad son fundamentales. Los metales con fractura dúctil pueden soportar altas cargas y deformaciones antes de fracturarse, lo que los convierte en materiales valiosos en situaciones donde se requiere absorber energía en el evento de un impacto o carga repentina.

En un estudio específico, se llevó a cabo la evaluación de la tenacidad a la fractura del material utilizado en el gasoducto Ferreyra, que es una de las líneas de suministro de gas natural en Sudamérica. Este gasoducto ha estado en funcionamiento durante más de cincuenta años, y debido a su larga vida útil y la importancia de mantener la integridad de su estructura, se realizó una investigación para determinar la resistencia y la capacidad de deformación del material en caso de una posible fractura.

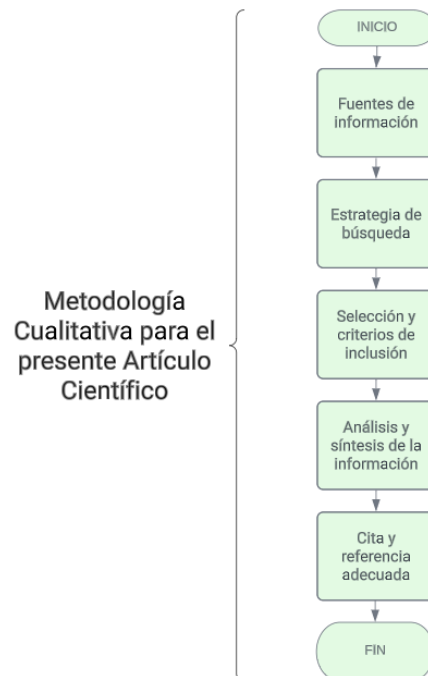
En la actualidad, el campo del modelado de fracturas dúctiles ha tenido un gran avance en función de dos tópicos fundamentales, el primero los modelos acoplados, mismos que se analizan tanto desde el punto de la evolución del daño en el material, como en las ecuaciones distintivas de cada uno de los materiales. Los modelos que permiten evaluar de forma adecuada la mecánica de fractura dúctil incluyen dos campos que de forma obligatoria deben tomarse en cuenta, el campo que se basan en el análisis del daño a nivel mesoscópico y el establecimiento de la mecánica de daño de forma continua, fundamental para una medición adecuada de los efectos de la fractura dúctil (Enkai, 2023).

Materiales y métodos

Este artículo científico utiliza una metodología cualitativa para examinar en detalle el tema de la fractura de materiales como lo explica Gómez (2014). Mediante una revisión bibliográfica de fuentes confiables y reconocidas en el ámbito de la fractura dúctil de materiales metálicos, se ha llevado a cabo una investigación exhaustiva para comprender los mecanismos y comportamientos asociados con este fenómeno. La metodología cualitativa ha permitido analizar y sintetizar cuidadosamente la información extraída de artículos científicos, libros y revistas especializadas, con el propósito de identificar tendencias emergentes, nuevas perspectivas y contribuir al avance del conocimiento en el campo de la ciencia de materiales y sus implicaciones.

Figura 1.

Flujograma del proceso para recopilar información verídica.



Realizado por: Autores (2023)

En la Figura 1 se presenta de manera esquemática y secuencial el proceso de investigación utilizado para abordar el tema de las fracturas dúctiles de materiales metálicos en el artículo. Este flujograma ilustra los pasos fundamentales seguidos en la metodología cualitativa aplicada en esta investigación.

En primera instancia, se utilizaron diversas fuentes de información, como bases de datos académicas, revistas científicas, libros e informes técnicos, para abordar el tema de estudio sobre fracturas de materiales y todo lo relacionado (Gálvez, 2002).

Siguiendo con la estrategia de búsqueda, esta se enfocó en obtener información relevante y actualizada sobre fracturas de materiales. Se emplearon palabras clave específicas, como "fractura de materiales", "fractura dúctil de materiales" y "materiales metálicos y su composición" como lo detalla Codina (2018). Estas palabras clave se introdujeron en motores de búsqueda académicos como Google Académico y bibliotecas en línea en español e inglés (Science Direct, Scielo, entre otras).

Como siguiente paso en la metodología aplicada, se realizó una selección minuciosa de las fuentes de información encontradas previamente en las bibliotecas digitales. En este paso, se examinaron diversas fuentes, y se utilizaron criterios específicos como autoría,

contenido y enfoque, referencias y citas para incluir solo aquellas que se alineaban con el tema propuesto (Torres, 2018).

Posteriormente, se organizó la información en secciones temáticas para facilitar su presentación coherente en el artículo. La síntesis permitió destacar los aspectos clave y las conclusiones fundamentales relacionadas con la fractura de materiales, asegurando que la información presentada sea clara y comprensible para su lectura (Cisneros, 2022).

Durante el paso del proceso de análisis y síntesis de la información, se extrajeron datos significativos de cada fuente y se organizaron de manera coherente para facilitar la presentación en este artículo. La revisión de la información permitió identificar historia, patrones y tendencias en los mecanismos de fractura dúctil de materiales metálicos, así como las principales variables que afectan este comportamiento (Palankeeze, 2018).

Como último paso, se destacó la correcta cita y referencia de todas las fuentes utilizadas en esta investigación. Al hacerlo, se otorga el debido crédito a los autores originales por sus contribuciones y se respeta la propiedad intelectual. Asimismo, se garantiza la transparencia y la integridad académica del trabajo, evitando cualquier forma de plagio. La precisión en las citas respalda la validez de los resultados y demuestra el rigor científico con el cual se ha llevado a cabo esta investigación sobre fracturas de materiales (Sánchez, 2021).

Una vez recopilada y seleccionada la información, se procedió a redactar el artículo científico como lo menciona Padrón et al. (2014) en su trabajo. El contenido se organizó en secciones clave, como una introducción para exponer el tema y lo que se realizó a lo largo de los puntos expuestos del mismo. La revisión bibliográfica presentó los descubrimientos relevantes y el contexto actual sobre las fracturas dúctiles en materiales metálicos y se lo añadió en la parte de “Resultados y Discusión”. Esta sección también analizó y comparó los resultados obtenidos con investigaciones previas. Por otro lado, las conclusiones resumieron los hallazgos principales en cuanto a la revisión bibliográfica de libros, revistas, páginas web, etc. ligadas a la fracturación de materiales. Esta estructura sólida aseguró una presentación coherente y exhaustiva de la investigación ante la comunidad científica.

Resultados y discusión

Historia de la Mecánica de la Fractura

Los orígenes iniciales de la investigación en el campo de la fractura se atribuyen a Leonardo da Vinci, el mismo que proporcionó diversas pautas que señalaban los indicios de las causas de la fractura. Leonardo llevó a cabo los primeros experimentos en Fractura, estos fueron mediciones de la resistencia en alambres de hierro, los cuales fabricaba en su trefiladora, y donde se descubrió que la resistencia variaba de manera inversamente

proporcional a la longitud de los alambres todo esto expresado en el trabajo de Arana (2002).

Aunque los resultados obtenidos eran principalmente cualitativos, el ingeniero mecánico británico Alan Arnold Griffith estableció la relación entre la fractura y el tamaño de los defectos en su primer estudio publicado en 1920. En este trabajo, aplicó el análisis de tensiones a un agujero elíptico, un problema que había sido previamente abordado por Inglis siete años antes (Monsalve, 2013).

El surgimiento de la Mecánica de Fractura se atribuye a un equipo de investigadores del Laboratorio de Investigación Naval en Washington D.C., quienes realizaron un minucioso estudio sobre el problema de la fractura. En la década de los 50, el Dr. G.R. Irwin lideró este grupo de investigación que, tras examinar los trabajos anteriores de Griffith, Inglis y otros, llevó a cabo un trabajo significativo para ampliar los postulados de Griffith a los materiales metálicos tal como lo dicta González (2004).

Conceptos Básicos de la Mecánica de Fractura

El entendimiento de la mecánica de fractura permite mejorar las condiciones de diseño al considerar explícitamente los efectos de los defectos y las condiciones de operación para mitigar las posibles consecuencias de una fractura potencial (McEvily, 2010).

La mecánica de fractura aborda el impacto de los defectos que se asemejan a fisuras, tanto a nivel microscópico como macroscópico, en la integridad estructural. Esta disciplina se fundamenta en la premisa de que fisuras o defectos similares a fisuras están presentes desde el inicio o podrían desarrollarse durante el servicio del material o estructura.

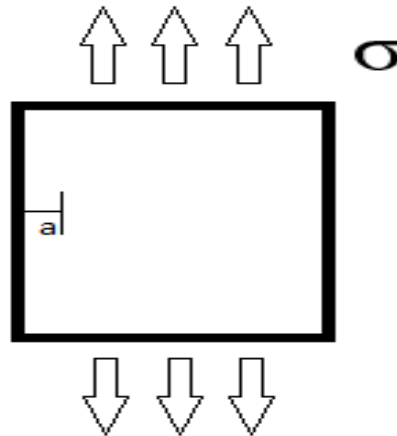
En un enfoque simplificado, la fractura se produce cuando una fisura se propaga. La mecánica de fractura tiene como objetivo determinar las combinaciones críticas de tensión y tamaño de la fisura que conducen a su propagación (McEvily, 2010).

El autor McEvily (2010) dicta que la mecánica de fractura considera tres parámetros fundamentales:

1. La tensión global aplicada sobre la pieza o estructura (σ).
2. Las propiedades de resistencia a la fractura, que son características del material.
3. El tamaño de cualquier defecto presente similar a una fisura (a).

Figura 2.

Material donde se detalla los tres parámetros fundamentales.



Fuente: McEvily, (2010)

Teoría de Griffith

Según McEvily en su obra (Arthur McEvily, 2010) Griffith presentó una teoría, ahora conocida como la teoría de Griffith, para explicar la fractura en materiales frágiles. Según esta teoría, la fractura ocurre cuando la energía de deformación elástica absorbida alcanza o supera la energía necesaria para formar una nueva superficie.

$$\delta U^{el} \geq G_c t da \quad (1)$$

Donde, δU^{el} es el cambio en la energía de deformación elástica; el término G_c hace referencia a la energía requerida para crear una unidad de superficie de grieta, t se refiere al espesor del sólido y da es el incremento en la longitud de la grieta.

Al paso de los años con los avances tecnológicos y consideraciones de científicos como Inglis en la fórmula de Griffith (placa sin grieta, placa con grieta y energía superficial) (Anglada, 2002), se ha establecido la siguiente fórmula:

$$\sigma_c = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{\pi a}} \quad (2)$$

Donde, σ_c es la tensión de Griffith, E es el módulo de elasticidad, al término γ_s hace referencia a la energía superficial específica y a es la mitad de la longitud de una grieta interna.

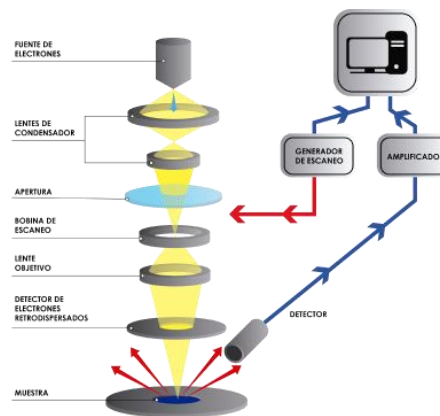
Comportamiento en Fractura de Materiales Metálicos

En las diversas partes de esta sección, se abordan los dos mecanismos principales de fractura en metales, conocidos como fractura por clivaje y fractura dúctil.

El avance en el estudio de los mecanismos de fractura ha sido impulsado por el uso del microscopio electrónico. Aunque el microscopio electrónico de transmisión ha sido importante, la necesidad de preparar réplicas con un espesor lo suficientemente pequeño (500 a 1000 Å) para permitir la transmisión de electrones ha llevado a que la microscopía de transmisión quede en un segundo plano. En cambio, la microscopía electrónica de barrido (SEM) ha ocupado el primer lugar en el examen de fracturas desde que se hizo posible este tipo de caracterización microscópica como lo detalla el autor en su trabajo (Ipohorsky, 2011).

Figura 3.

Partes del microscopio electrónico de barrido (SEM).



Fuente: Ipohorsky, (2011)

Las fracturas pueden ser directamente observadas en las cámaras de vacío del microscopio electrónico de barrido sin la necesidad de ninguna preparación previa, salvo una adecuada limpieza y eliminación de posibles aceites lubricantes o suciedad que a menudo se encuentran en las superficies de desarrollo de grietas.

Fractura por Clivaje

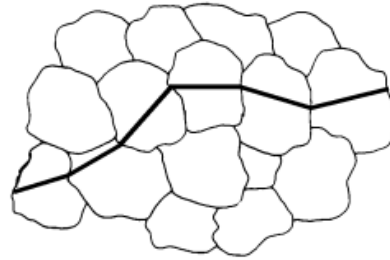
Como lo menciona Arana (2002) la fractura por clivaje se puede describir como una propagación excepcionalmente rápida de una grieta debido a la separación sencilla de los enlaces atómicos a lo largo de un plano cristalográfico específico.

Por ejemplo, el hierro (BCC) experimenta fractura por clivaje a lo largo de los planos del cubo de su celda unitaria (100). Esta particularidad provoca que la superficie de la grieta

de clivaje sea relativamente lisa dentro de cada grano, lo que se presenta en materiales policristalinos con una trayectoria transgranular, así lo menciona Vargas et al. (2008).

Figura 4.

Mecanismo de clivaje a lo largo de los granos de un material cristalino.



Fuente: Vargas et al., (2008)

Fractura Dúctil

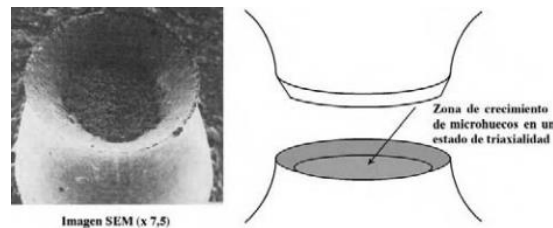
Después de haber recapitulado conceptos básicos y antecedentes sobre la mecánica de fractura se inducirá al tema central. La fractura dúctil está relacionada con la deformación plástica; la cantidad de deformación plástica necesaria para provocar la fractura puede ser limitada en algunos casos, con un bajo consumo de energía. Aunque la fractura dúctil muestra cierta deformación plástica, desde una perspectiva ingenieril, se considera como una fractura frágil que puede iniciarse en una entalla o grieta aguda, con valores relativamente bajos de tensión nominal, especialmente si existe un estado de deformación plana que reduce las oportunidades de deformación plástica (Mouritz, 2012).

En metales y aleaciones metálicas, la fractura dúctil suele originarse debido a la aparición, el crecimiento y la coalescencia de pequeñas cavidades durante la deformación plástica. Estas cavidades suelen formarse en las interfaces de inclusiones y partículas de segunda fase. Se considera que la disociación de estas interfaces es el mecanismo principal de formación de las cavidades. Una vez que se forman las cavidades, la deformación plástica continua aumenta su tamaño y distorsiona su forma, lo que comúnmente se conoce como crecimiento de cavidades (Li, 2019).

El ensayo de fractura más común presentado en el trabajo de Arana (2002), que generalmente muestra un comportamiento dúctil, es el ensayo de tracción, el cual resulta en una clásica rotura dúctil de copa y cono, como se observa en la Figura 5. Después de alcanzar la carga máxima, la deformación plástica se concentra en una pequeña parte de la muestra, lo que da lugar a la característica estricción.

Figura 5.

Rotura característica en forma de copa y cono que se observa comúnmente en un ensayo de tracción, acompañada de la formación de microhuecos.



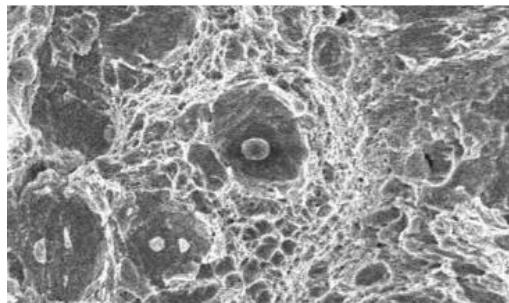
Fuente: Arana, (2002)

Los materiales de ingeniería siempre presentan abundantes cantidades de partículas secundarias e inclusiones metálicas. Entre los diversos tipos de partículas se pueden mencionar:

- Partículas de tamaño variable de hasta 20 μm que son visibles mediante el microscopio óptico.
- Partículas de tamaño medio, cuyas dimensiones oscilan entre 50 y 500 nm.
- Partículas extremadamente diminutas, detectables únicamente a través del microscopio electrónico, con tamaños que pueden variar del orden de 5 a 50 nm.

Figura 6.

Fotografía de microscopía electrónica de barrido (SEM) que muestra una fractura con formación de microhuecos en inclusiones no metálicas en un acero de temple y revenido (con composición C 0,24; Mn 1,00; Cr 1,00; Ni 1,00; Mo 0,40).



Fuente: Arana, (2002)

El comportamiento en fractura dúctil varía según el material en cuestión, ya que algunos materiales son más susceptibles que otros. Por ejemplo, en las aleaciones de aluminio endurecidas por precipitación, es común encontrar partículas intermetálicas de gran tamaño junto con fases secundarias precipitadas de tamaño submicroscópico, que se dispersan finamente. Estas aleaciones también contienen partículas muy dispersas que se

agregan durante el proceso de solidificación para facilitar el refinado del grano y que tienen un tamaño de pocas micras, esto se detalla en la obra de Arana (2002).

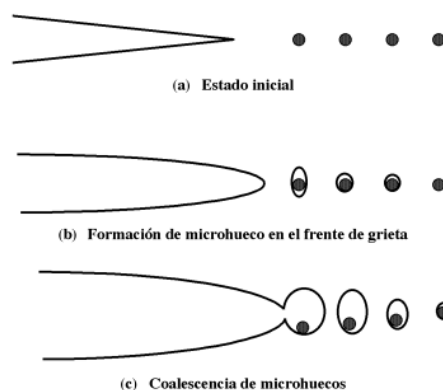
Durante el proceso de fractura dúctil, los microhuecos tienden a formarse de manera más sencilla en las inclusiones, pero también las partículas de tamaño muy pequeño, como las mencionadas, contribuyen a la formación de microhuecos.

Crecimiento Dúctil de la Grieta

Como se puede ver en la Figura 7, debido a las fuerzas aplicadas en la pieza con grietas, se generan tensiones y deformaciones significativas en el frente de la fisura, lo que provoca la formación de microhuecos. Estos microhuecos aumentan de tamaño junto con el desarrollo de la grieta y, en ciertas condiciones, pueden fusionarse con la grieta principal, ocasionando un crecimiento continuo de la fisura mediante la repetición de este proceso (Nunez, 2015).

Figura 7.

Formación de microhuecos en materiales metálicos.



Fuente: Arana, (2002)

La Figura 7 muestra las tensiones y deformaciones cercanas al frente de una fisura con crecimiento obtenida mediante elementos finitos. La deformación presenta una singularidad cerca del frente de la grieta, mientras que la tensión σ_{yy} alcanza su valor máximo a una distancia aproximada del doble de la apertura del desplazamiento en el frente de la grieta (CTOD), es decir, $\approx 2\delta$ desde el frente de la fisura.

Ejemplo de Fractura de Material de un Gasoducto

Como ejemplo del tema de investigación, se tomó como referencia el trabajo realizado por Matusевич (2012) donde llevó a cabo una evaluación de la tenacidad a la fractura del material utilizado en el Gasoducto Ferreyra, una de las líneas de suministro de gas

natural para la ciudad de Córdoba, Argentina, que ha estado operando durante más de cincuenta años.

Tal y como lo dice el autor, se tomó una muestra de un tubo con un diámetro exterior de 273 mm (10¾"), un espesor nominal de 5,16 mm y una longitud de 1270 mm. Debido a estas dimensiones, no fue posible preparar probetas para determinar el valor de K_{Ic} siguiendo la norma ASTM E399 (la norma ASTM E399 es ampliamente reconocida a nivel internacional y describe el procedimiento para evaluar la resistencia a la fractura mediante la prueba de tenacidad de materiales metálicos. Esta prueba es comúnmente conocida como el ensayo de fractura por entalla o ensayo de tenacidad a la fractura). Después de realizar los ensayos respectivos dieron los siguientes parámetros:

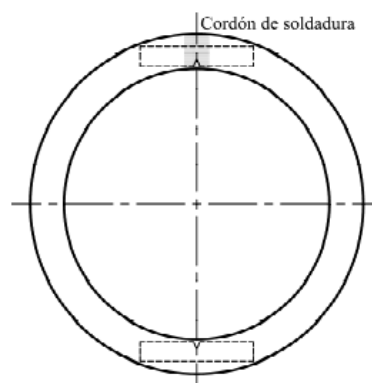
1. Resistencia a la tracción (R_m).
2. Límite convencional de fluencia para una deformación plástica del 0,2% ($R_{p0,2}$).
3. Tensión para una deformación total especificada del 0,5% ($R_{t0,5}$).
4. Alargamiento porcentual de rotura (A).

Ensayo de impacto Charpy

Después de tener los parámetros adecuados como la máquina de ensayo, niveles de energía, energías absorbidas, temperaturas características de cada ensayo, entre otras; en el trabajo de Matusevich (Ariel Matusevich, 2012) se confeccionaron muestras de impacto Charpy utilizando el cordón de soldadura y el material base del tubo. La disposición de las muestras se ilustra esquemáticamente en la Figura 8.

Figura 8.

Disposición de las probetas de choque.



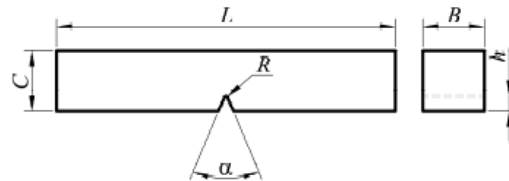
Fuente: Matusevich, (2012)

En el trabajo de referencia, se presenta un esquema con las dimensiones principales de una probeta de impacto en la Figura 9. En la Tabla 1 se enumeran las dimensiones de la

probeta utilizada, junto con las dimensiones de la probeta estándar. Se puede observar que ambas probetas difieren en el ancho C y en la profundidad de la entalla h .

Figura 9.

Dimensiones características de la probeta de impacto Charpy.



Fuente: Matusevich, (2012)

Tabla 1

Dimensiones de la probeta de choque.

Dimensión	Probeta Estándar	Probeta Utilizada
L [mm]	55	55
B [mm]	10	10
C [mm]	10	3
α [°]	45	45
h [mm]	2	0,61
R [mm]	0,25	0,25

Fuente: Matusevich, (2012)

Para ajustar los valores de energía obtenidos con las muestras no estándar a los valores CVN (probeta estándar), se aplicó el siguiente factor de normalización.

$$NF = \left(\frac{Bb^2}{K_t' L} \right) \quad (3)$$

La ecuación utiliza las siguientes variables: B representa el espesor de la probeta, b es el espesor debajo de la entalla (ligamento), K_t' es el factor de concentración de tensiones modificado y L es la longitud de la probeta.

Mediante esta normalización, la energía $E_{estandar}$ de la probeta estándar se relaciona con la energía $E_{no-estandar}$ de la probeta no estándar de la siguiente manera:

$$\frac{E_{estandar}}{(Bb^2/K_t' L)} = \frac{E_{no-estandar}}{(Bb^2/K_t' L)} \quad (4)$$

Dado que el único parámetro que cambia en caso del autor es la longitud b del ligamento ($b = C - h$), se obtiene el siguiente factor de corrección:

$$\begin{aligned}
 E_{estandar} &= \\
 &= \frac{(b^2)_{estandar}}{(b^2)_{no-estandar}} E_{no-estandar} \\
 &= \frac{(10 - 2^2)}{(3 - 0.61)^2} E_{no-estandar} \\
 &= 11.2043 E_{no-estandar}
 \end{aligned} \tag{5}$$

El autor usa este factor de corrección para facilitar la conversión de los valores de energía obtenidos con la probeta no estándar a los valores de energía CVN.

Relación Entre la Tenacidad a la Fractura KIC y la Energía de Impacto CVN

Para el ejemplo propuesto, se describe a continuación la metodología propuesta por Barsom y Rolfe, involucra dos etapas:

1. Transformar los valores de energía CVN a valores de tenacidad a la fractura K_{Id} utilizando la siguiente expresión:

$$\begin{aligned}
 K_{Id} &= \sqrt{5E(CVN)}, [psi\sqrt{in}] \tag{6}
 \end{aligned}$$

Donde, E es el módulo del Young del material en psi y la energía CVN está expresada en pies-libras.

2. Emplear la siguiente expresión para calcular la diferencia de temperaturas entre K_{Id} y K_{Ic} :

$$\begin{aligned}
 T_s &= \frac{[215 - 1.5(R_{p0,2})] - 32}{1.8}, [^{\circ}C] \tag{7}
 \end{aligned}$$

En esta fórmula, $R_{p0,2}$ representa el límite convencional de fluencia del material en unidades de ksi. Para transformar los valores de energía CVN de la región dúctil de la curva a valores de tenacidad a la fractura K_{Ic} , se emplea la correlación de Rolfe-Novak-Barsom.

$$K_{Ic} = R_{p0,2}$$

$$* \sqrt{\frac{5}{R_{p0,2}} \left(CVN - \frac{R_{p0,2}}{20} \right)}, [ksi\sqrt{in}] \quad (8)$$

La ecuación utiliza $R_{p0,2}$ que es el límite convencional de fluencia en la zona dúctil, medido en ksi, y CVN está expresado en pies-libras. La Tabla 2 muestra los valores promedio obtenidos para los parámetros R_m , $R_{p0,2}$, $R_{t0,5}$ y A .

Tabla 2

Resultados de los ensayos de tracción.

Parámetro	Material base	Cordón de soldadura	% cambio Cs-Mb
R_m [Mpa] (psi)	484 (70198)	520 (75420)	7
$R_{p0,2}$ [MPa] (psi)	340 (49291)	424 (61452)	25
$R_{t0,5}$ [MPa] (psi)	347 (50321)	429 (62236)	24
A [%]	31	13	-58

Fuente: Matusевич, (2012)

En la última columna de la tabla, se presenta el porcentaje de cambio entre los parámetros del cordón de soldadura y el material base, calculado mediante la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} & \%_{Cs-Mb} \\ & = \left(\frac{\text{Parámetro}_{Cs} - \text{Parámetro}_{Mb}}{\text{Parámetro}_{Mb}} \right) \quad (9) \\ & * 100\% \end{aligned}$$

La ecuación utiliza M_b para representar el material base y C_s para referirse al cordón de soldadura.

Ensayos de Impacto Charpy

En las Tablas 3 y 4 se presentan los resultados de los ensayos de impacto realizados en las muestras del material base y del cordón de soldadura, respectivamente. También se

incluyen los valores de energía corregidos obtenidos al aplicar el factor de la ecuación (5).

Tabla 3

Energía de impacto (material base).

Temperatura [°C]	Energía obtenida [J] (pies-libras)	Energía corregida [J] (pies-libras)
-35	4,7 (3,5)	52,7 (38,8)
-25	5,6 (4,1)	62,7 (46,3)
-10	5,3 (3,9)	59,4 (43,8)
-5	7,0 (5,2)	78,4 (57,8)
0	7,2 (5,3)	80,7 (59,5)
5	7,1 (5,2)	79,6(58,7)
22	8,2 (6,0)	91,9 (67,8)
50	7,9 (5,8)	88,5 (65,3)
70	8,2 (6,0)	91,9 (67,8)

Fuente: Matusevich, (2012)

A continuación, la Tabla 4 con los datos obtenidos de la energía de impacto con el rango de temperaturas previamente obtenidos.

Tabla 4

Energía de impacto (cordón de soldadura).

Temperatura [°C]	Energía obtenida [J] (pies-libras)	Energía corregida [J] (pies-libras)
-35	1,9 (1,4)	21,3 (15,7)
-25	1,2 (0,9)	13,4 (9,9)
-10	1,5 (1,1)	16,8 (12,4)
-5	3,2 (2,4)	35,9 (26,4)
0	5,8 (4,3)	65,0 (47,9)
5	6,3 (4,6)	70,6 (52,1)
22	6,5 (4,8)	72,8 (53,7)
50	6,4 (4,7)	71,7 (52,9)
70	6,8 (5,0)	76,2 (56,2)

Fuente: Matusevich, (2012)

En las Figuras 10 y 11 se presentan los gráficos de los valores de energía corregida de las Tablas 3 y 4, respectivamente. En estas figuras, se incluyen las curvas que se ajustan a los resultados y que siguen la siguiente función:

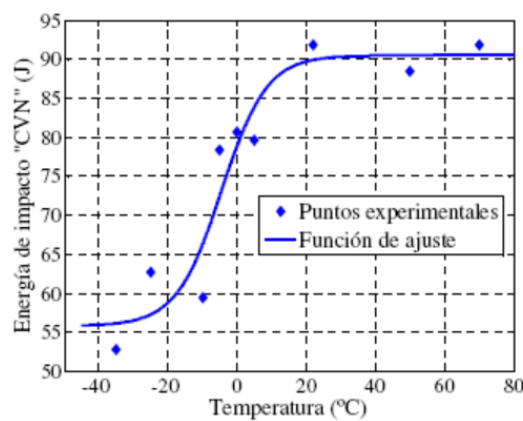
$$CVN (T) \quad (10)$$

$$= \left(\frac{a}{2}\right) \left[1 - \tanh\left(\frac{T - b}{c}\right)\right] + \left(\frac{d}{2}\right) \left[1 + \tanh\left(\frac{T - b}{c}\right)\right]$$

La ecuación utiliza los parámetros a , b , c y d que deben ajustarse y representan la energía en la región frágil, la temperatura del punto de inflexión de la curva, el rango de temperaturas de la transición dúctil-frágil y la energía en la región dúctil, respectivamente. T representa la temperatura en grados centígrados.

Figura 10.

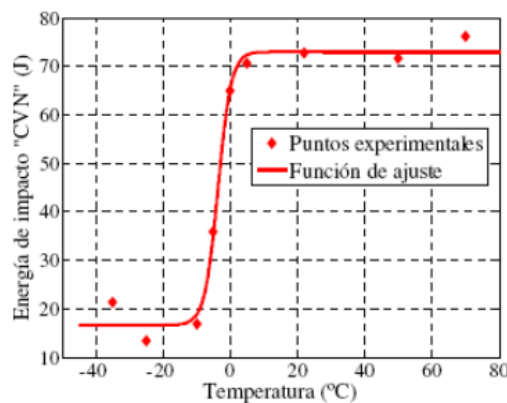
Energía de impacto en función de la temperatura (material base).



Fuente: Matusevich, (2012)

Figura 11.

Energía de impacto en función de la temperatura (cordón de soldadura).



Fuente: Matusevich, (2012)

Los valores de ajuste para ambas curvas, junto con sus desviaciones estándar, se presentan en la Tabla 5. Además, en la última columna, se incluye la diferencia porcentual entre los parámetros del cordón de soldadura y el material base, calculada mediante la expresión (9).

Tabla 5

Parámetros que ajustan la curva CVN en función de T.

Parámetro	Material base	Cordón de soldadura	% cambio Cs-Mb
a	55,78 ± 4,97	16,58 ± 2,02	-70
b	-4,49 ± 3,67	-3,63 ± 0,52	-19
c	13,08 ± 7,59	3,94 ± 0,86	-70
d	90,52 ± 3,40	72,98 ± 1,67	-19

Fuente: Matusevich, (2012)

Cálculo de la tenacidad a la fractura

Matusevich (2012) propone que es necesario conocer el módulo de Young (E) y el límite convencional de fluencia ($R_{p0,2}$) del material bajo estudio. Entonces se tiene que el valor de E aparece en la ecuación (6), mientras que $R_{p0,2}$ se utiliza en las expresiones (7) y (8). Los valores de $R_{p0,2}$ obtenidos de los ensayos realizados se encuentran en la Tabla 2, los mismo que fueron utilizados. Para el material base y el cordón de soldadura, se adoptó un valor de $E = 207$ GPa (30015 ksi), que corresponde a un acero similar de grado 50.

Los valores calculados de K_{Ic} para el material base y el cordón de soldadura se presentan en las Tablas 6 y 7, respectivamente.

Tabla 6

Tenacidad a la fractura (material base).

Temperatura [°C]	Zona	K_{Ic} [MPa√m] (ksi√in)	Corrimiento de temperaturas entre K_{Ic} y K_{Ia} [°C]
-35	F	83,5 (76,0)	61
-25	F	91,1 (82,9)	61
-10	F	88,7 (80,7)	61

Tabla 6

Tenacidad a la fractura (material base). (continuación)

Temperatura [°C]	Zona	K_{Ic} [MPa√m] (ksi√in)	Corrimiento de temperaturas entre K_{Ic} y K_{Id} [°C]
-5	T	-	-
0	T	-	-
5	T	-	-
22	D	139,4 (126,9)	0
50	D	136,7 (124,4)	0
70	D	139,4 (126,9)	0

Fuente: Matusевич, (2012)

A continuación, la Tabla 7 con los valores obtenidos de la tenacidad de fractura por medio del cordón de soldadura.

Tabla 7

Tenacidad a la fractura (cordón de soldadura).

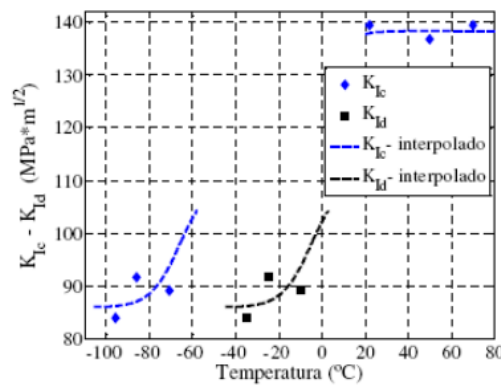
Temperatura [°C]	Zona	K_{Ic} [MPa√m] (ksi√in)	Corrimiento de temperaturas entre K_{Ic} y K_{Id} [°C]
-35	F	53,1 (48,3)	51
-25	F	42,2 (38,4)	51
-10	F	47,2 (42,9)	51
-5	T	68,9 (62,7)	51
0	T	-	-
5	T	134,8 (122,7)	0
22	D	137,1 (124,7)	0
50	D	135,9 (123,7)	0
70	D	140,4 (127,8)	0

Fuente: Matusевич, (2012)

En las Tablas 6 y 7, se señalan con las letras F, T y D las zonas frágiles, de transición y dúctil, respectivamente. Los resultados de dichas tablas se representan gráficamente en las Figuras 12 y 13 del trabajo. En estas figuras, también se muestran los valores de tenacidad a la fractura K_{Ic} obtenidos al interpolar los valores de energía CVN utilizando la función (10).

Figura 12.

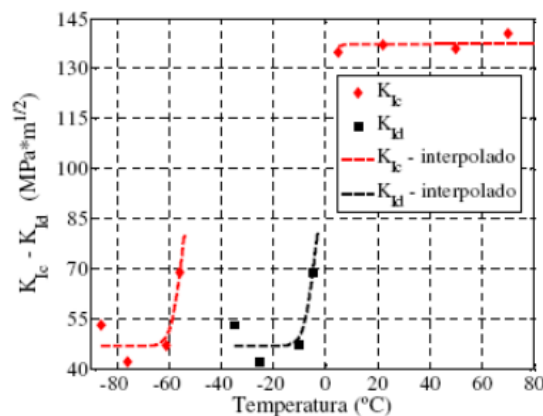
K_{Ic} - K_{IId} en función a la temperatura (material base).



Fuente: Matusevich, (2012)

Figura 13.

K_{Ic} - K_{IId} en función a la temperatura (cordón de soldadura).



Fuente: Matusevich, (2012)

Conclusiones

- La sección de “Materiales y Métodos” de este trabajo, representa una parte esencial de este artículo científico, ya que proporciona la base de conocimiento sobre la cual se sustentan los resultados y conclusiones presentados. En este

apartado se concluye que la búsqueda de información ha permitido obtener una visión completa de la fractura dúctil de materiales metálicos, lo cual es crucial para el avance en el campo de la ciencia de materiales y el diseño de estructuras más seguras y resistentes en el día a día (Araque, 2013).

- Por otra parte, Se puede concluir que la transparencia y meticulosidad en la revisión bibliográfica contribuyen a la confiabilidad y validez de este estudio, permitiendo que futuros investigadores puedan construir sobre esta base y continuar avanzando en el conocimiento de la fractura dúctil de materiales metálicos.
- Como se pudo evidenciar, uno de los principales avances ha sido el desarrollo de sofisticadas técnicas de modelado y simulación computacional conjuntamente con la SEM. La Mecánica de Fractura ahora se beneficia de la potencia de la computación para realizar análisis detallados de estructuras complejas bajo condiciones de carga realistas. Estas simulaciones permiten evaluar la propagación de grietas y la resistencia a la fractura en diferentes materiales y geometrías, lo que ayuda a optimizar el diseño y la selección de materiales en diversas industrias (Martínez, 2020).
- Hablando del tema del artículo, se ha explorado los conceptos fundamentales de la Mecánica de Fractura y su relevancia en diversos campos de la ingeniería y la industria (Clerc, Brunner, Niemz, Van de Kuilen, 2020). A lo largo de la investigación, se ha profundizado en los mecanismos de fractura de materiales metálicos, centrándonos especialmente en la fractura dúctil y sus características. También, se ha analizado un ejemplo práctico de aplicación de la Mecánica de Fractura, como el estudio de la tenacidad a la fractura en el gasoducto de suministro de gas natural en Argentina. A través de este análisis, se ha comprendido la importancia de evaluar la resistencia y capacidad de deformación de materiales para asegurar la integridad y la seguridad de infraestructuras críticas.
- De acuerdo al ejemplo planteado, en las Figuras 9 y 10, se nota que la dispersión de los puntos experimentales es significativamente mayor que la resolución de la máquina de ensayo. Para mitigar estos efectos, se optó por aplicar la ecuación de ajuste (10) para determinar las energías características en las regiones dúctil, frágil y de transición dúctil-frágil, el cual hace que sea un da concluyente del ejemplo. Al comparar las curvas de las Figuras 9 y 10, se observa una notable reducción en la energía absorbida para el material del cordón de soldadura en comparación con el material base; en la región frágil, dicha disminución es del 70 %, mientras que en la región dúctil es del 19 %. También se aprecia que la transición dúctil-frágil es más abrupta en el caso del material del cordón de soldadura, ya que el parámetro c disminuye un 70 % en comparación con el material base.
- Como se puede observar en las Figuras 11 y 12, los valores de tenacidad a la fractura para el material del cuerpo del caño y su cordón de soldadura son

similares en la región de comportamiento dúctil. Sin embargo, en la región de comportamiento frágil, se aprecia una considerable disminución del 45 % en la tenacidad a la fractura del material del cordón de soldadura en comparación con el material base.

- Gracias a estos datos se tiene esta diferencia en las propiedades fractomecánicas se atribuye al proceso de soldadura ERW de baja frecuencia. Actualmente, se emplean gasoductos fabricados con el proceso de soldadura ERW de alta frecuencia, que no presentan estos inconvenientes.
- Por último, mediante el ejemplo, se pudo entender de una forma aplicativa los ensayos de impacto Charpy (Ortega, 2005), obteniendo valores de energía de fractura presentado en las tablas de manera organizada.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existe conflicto de intereses.

Referencias Bibliográficas

- Anglada, M. (2002). *Fractura de Materiales* (ISBN: 84-8301-592-7 ed.). Barcelona: Edicions UPC. Obtenido de Fractura de materiales.
- Arana, J. (2002). *Mecánica de fractura*. <https://addi.ehu.es/bitstream/handle/10810/9356/Mecanica%20de%20fractura.pdf> f ISBN: 84-8373-455-9
- Araque, N. et al. (2013). *State of the art in structural integrity of welded joints and crack models for structures life management*. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052013000200011>
- Cisneros, A. (2022). *Técnicas e Instrumentos para la Recolección de Datos que Apoyan a la Investigación Científica en Tiempo de Pandemia*. <https://doi.org/10.23857/dc.v8i1.2546>
- Clerc G., Brunner A., Niemz P., Van de Kuilen J. (2020). *Application of fracture mechanics to engineering design of complex structures*. <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.10.152>
- Codina L. (2018). *Revisiones bibliográficas sistematizadas: procedimientos generales y Framework para ciencias humanas y sociales*. <https://repositori.upf.edu/handle/10230/34497>
- Enkai Dai, Zhiqin Lv, Panpan Yuan, Guoqiang Liu, Ning Guo, Zhe Liu, Bingtao Tang, Ductile fracture of anisotropic QP980 steel sheet by using the

- isotropic/anisotropic modified Mohr-Coulomb models, *Engineering Fracture Mechanics*, 2023, 109522, ISSN 0013-7944, <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2023.109522>.
- Gómez, D. (2014). *Literature review methodology for scientific and information management, through its structuring and systematization*. <https://doi.org/10.15446/dyna.v81n184.37066>
- Gálvez A. (2002). *Literature review: use and practice*. <https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/ibc-23040>
- González, J. (2004). *Mecánica de Fractura* (Segunda Edición. ISBN: 968-18-6130-2 ed.). México: Limusa.
- Guadalupe, M. (2007). *Modelos de fractura dúctil en condiciones estáticas y dinámicas*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=18934&orden=238004&info=link&info=link>
- Ipohorsky, M. (2011). *Una mirada al microscopio electrónico de barrido*. <https://www.cnea.gob.ar/nuclea/handle/10665/1162>
- Li, M. (2019). *Deformation-Based Processing of Materials*. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-01559-8>
- Martínez, D. (2020). *Estudio numérico de la función de degradación en la simulación computacional de fractura frágil con el método de phase-field*. <http://hdl.handle.net/10317/8899>
- Matusevich, R. (2012). *Determinación de la tenacidad a la fractura del material de un gasoducto*. http://ve.scielo.org/scielo.php?pid=S0255-69522012000200012&script=sci_arttext
- McEvily, D. (2010). Recuperado el 2023, de *Materiales Aeronáuticos. Conceptos Básicos de la Mecánica de Fractura*: <http://www.aero.ing.unlp.edu.ar/catedras/archivos/Mecanica%20de%20Fractura%202010rev01.pdf>
- Monsalve, A. (2013). *Griffith y el inicio de la mecánica de la fractura*. <https://revistas.usach.cl/ojs/index.php/remetallica/article/download/1706/1586/>
- Mouritz, A. (2012). *Introduction to Aerospace Materials*. <https://doi.org/10.1533/9780857095152.428>
- Nunez, S. (2015). *A novel method of tracing the inception and progress of fatigue crack-growth in steel*. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-50732015000200005>

- Ortega Y. (2005). *Prueba de impacto: ensayo Charpy*.
https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1870-35422006000100008&script=sci_arttext
- Padrón, N. (2014). *Important aspects of scientific writing*
http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1561-31942014000200020&script=sci_arttext&tlng=en ISSN 1561-3194
- Palankeeze, K. (2018). *Metallurgical Failure Analysis*. <https://doi.org/10.1016/C2017-0-01343-5>
- Sahel, D. (2016). *Modelado de fractura dúctil sobre aceros modificados superficialmente 545-A*. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=114668>
- Sánchez, M. (2021). *Data collection techniques and instruments: analysis and processing by the qualitative researcher*. <https://doi.org/10.35290/rcui.v8n1.2021.400>
- Torres, K. (2018). *Métodos de recolección de datos para una investigación*. <http://biblioteca.udgvirtual.udg.mx/jspui/handle/123456789/2817>
- Vargas B., Hallen J., Albiter A., Ángeles C. (2008). *Revista de Metalurgia. Degradación de la tenacidad al impacto durante el envejecimiento acelerado de soldadura en acero microaleado*. <https://doi.org/10.3989/revmetalm.0747>
- Wang, J. et al. (2022). *Progressive and Compound Forming of Metallic Sheets for Making Micro-/Meso-Scaled Parts and Components*. <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780128197264000223>

El artículo que se publica es de exclusiva responsabilidad de los autores y no necesariamente reflejan el pensamiento de la **Revista Conciencia Digital**.



El artículo queda en propiedad de la revista y, por tanto, su publicación parcial y/o total en otro medio tiene que ser autorizado por el director de la **Revista Conciencia Digital**.



Indexaciones

