

CIENCIA DE LOS MATERIALES: PROPIEDADES, PROCESOS Y CICLOS

**Materiales metálicos y no
metálicos: propiedades, tipos
y aplicaciones**

Clase 6

INTRODUCCIÓN DE LA CLASE

La ciencia de los materiales constituye un pilar fundamental en el campo de la ingeniería, abarcando el estudio de la relación intrínseca entre la estructura, las propiedades y el rendimiento de los materiales. En esta unidad, se explora el fascinante ámbito de los materiales metálicos, profundizando en sus características distintivas, aplicaciones industriales y consideraciones ambientales. Se abordan conceptos clave como la clasificación de metales, sus propiedades mecánicas y características estructurales, analizando en detalle las estructuras cristalinas, los enlaces metálicos y los defectos cristalinos que influyen en el comportamiento de los metales.

Asimismo, se examina el ciclo de vida de los materiales metálicos, incluyendo sus usos industriales, vida útil y procesos de reciclaje, con un énfasis especial en la huella de carbono de la industria metalúrgica y la relevancia de las normas ASTM en la medición y control del impacto ambiental. Estos conocimientos son esenciales para el ingeniero contemporáneo, permitiendo tomar decisiones fundamentadas sobre la selección y aplicación de materiales en proyectos sostenibles. Al concluir esta sección, el estudiante habrá desarrollado habilidades para aplicar conocimientos básicos de materiales metálicos y predecir su comportamiento bajo diversas condiciones físicas y químicas, contribuyendo así al estudio comparativo de materiales metálicos y sus implicaciones en la sostenibilidad.

Clase 6: Materiales metálicos y no metálicos: propiedades, tipos y aplicaciones

RDA2: Aplicar conocimientos básicos de materiales y sus análisis para predecir su comportamiento respecto a condiciones físicas y químicas a las que se exponen.

Reto # 2

Propiedades y tipos de materiales metálicos

Los materiales metálicos son fundamentales en la ingeniería y la industria debido a sus características únicas y versátiles. Estos materiales se distinguen por su estructura atómica y enlaces metálicos, que les confieren propiedades específicas y los hacen ideales para una amplia gama de aplicaciones.

Clasificación de metales

Los metales se pueden clasificar de diversas maneras, pero las categorías más comunes son:

a) Metales ferrosos y no ferrosos:

- **Ferrosos:** Contienen hierro como componente principal. Ejemplos incluyen el acero y el hierro fundido.

- **No ferrosos:** No contienen hierro o lo contienen en cantidades mínimas. Ejemplos son el aluminio, cobre, titanio y magnesio.

b) Metales puros y aleaciones:

- **Metales puros:** Compuestos por un solo elemento metálico.
- **Aleaciones:** Combinaciones de dos o más elementos, donde al menos uno es un metal.

c) Por su estructura cristalina:

- **Cúbica centrada en el cuerpo (BCC):** Como el hierro α (ferrita) y el cromo.
- **Cúbica centrada en las caras (FCC):** Como el aluminio, cobre y níquel.
- **Hexagonal compacta (HCP):** Como el titanio y el magnesio.

d) Por su reactividad química:

- **Metales nobles:** Resistentes a la corrosión, como el oro y el platino.
- **Metales activos:** Reaccionan fácilmente con otros elementos, como el sodio y el potasio.

e) Por su temperatura de fusión:

- **Metales refractarios:** Con altos puntos de fusión, como el tungsteno y el molibdeno.
- **Metales de bajo punto de fusión:** Como el plomo y el estaño.
-



Figura 1. Ejemplos de metales ferrosos y no ferrosos
Tomado de (Solis et al., 2021)

Esta clasificación es crucial para seleccionar el metal adecuado para cada aplicación específica en ingeniería y diseño de materiales.

Propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas de los metales son fundamentales para determinar su comportamiento bajo diferentes condiciones de carga y esfuerzo. Estas propiedades incluyen (William D. Callister & Rethwisch, 2014):

a) **Resistencia:**

- **Resistencia a la tracción:** Capacidad para soportar cargas de tensión.
- **Resistencia a la compresión:** Habilidad para resistir cargas de compresión.
- **Resistencia al cizallamiento:** Capacidad para soportar fuerzas de corte.

b) **Dureza:** Resistencia a la deformación superficial o penetración. Se mide mediante escalas como Brinell, Rockwell o Vickers.

c)

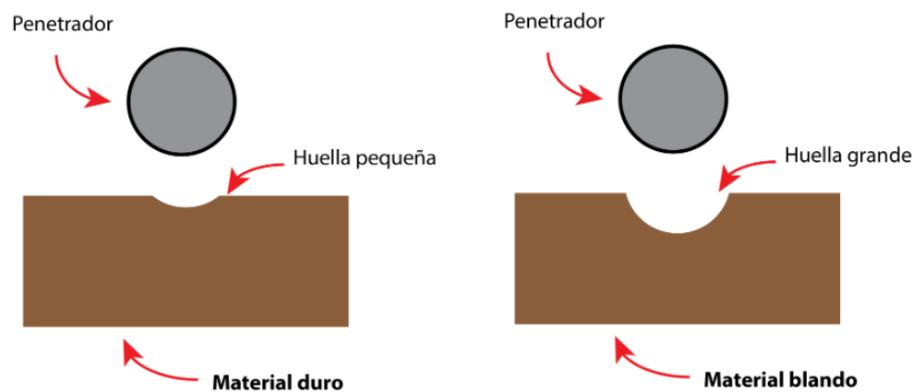


Figura 2. Ensayo típico de dureza
Tomado de (Ingeniosos, 2024)

- d) **Ductilidad:** Capacidad de deformarse plásticamente sin romperse. Se cuantifica mediante el porcentaje de elongación o reducción de área.
- e) **Tenacidad:** Habilidad para absorber energía antes de la fractura. Es crucial en aplicaciones que requieren resistencia al impacto.
- f) **Elasticidad:** Capacidad de recuperar su forma original después de la deformación. Se caracteriza por el módulo de Young (E), que se expresa como, (Pytel & Singer, 1994):

$$\sigma = E\varepsilon$$

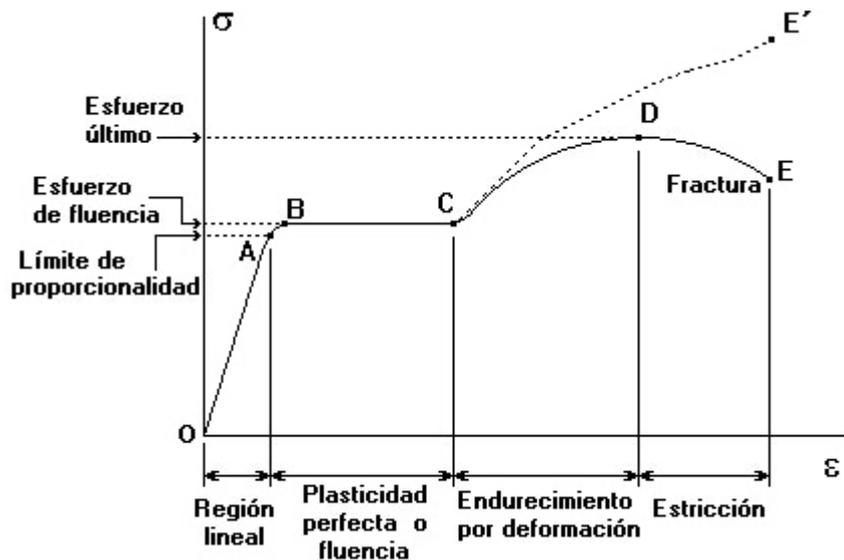


Figura 3. Gráfica de Esfuerzo vs deformación
Tomado de (Uribe Vargas et al., 2019)

Un análisis de la gráfica se puede observar en el siguiente video:
<https://www.youtube.com/watch?v=eFQeVogeHMM>

- g) **Fatiga:** Resistencia a cargas cíclicas o repetitivas. Se evalúa mediante curvas S-N (esfuerzo vs. número de ciclos).
- h) **Fluencia:** Deformación permanente bajo carga constante. Se define por el límite elástico y se representa en curvas de esfuerzo-deformación.

Estas propiedades son cruciales para el diseño y selección de materiales en aplicaciones de ingeniería, determinando la idoneidad de un metal para funciones específicas bajo diversas condiciones de carga y ambiente.

Características estructurales

Las características estructurales de los metales están intrínsecamente ligadas a su composición atómica y arreglo cristalino, lo cual influye directamente en sus propiedades macroscópicas:

- a) **Estructura cristalina:**
 - Los metales forman estructuras cristalinas regulares y repetitivas.
 - Las más comunes son BCC, FCC y HCP, cada una con propiedades específicas.
- b) **Enlaces metálicos:**
 - Caracterizados por electrones de valencia deslocalizados que forman un "mar de electrones".

- Este tipo de enlace confiere propiedades como alta conductividad eléctrica y térmica.

c) Defectos cristalinos:

- Vacantes: Ausencia de átomos en posiciones de la red.
- Dislocaciones: Imperfecciones lineales que afectan la deformación plástica.
- Límites de grano: Interfaces entre cristales de diferente orientación.
-

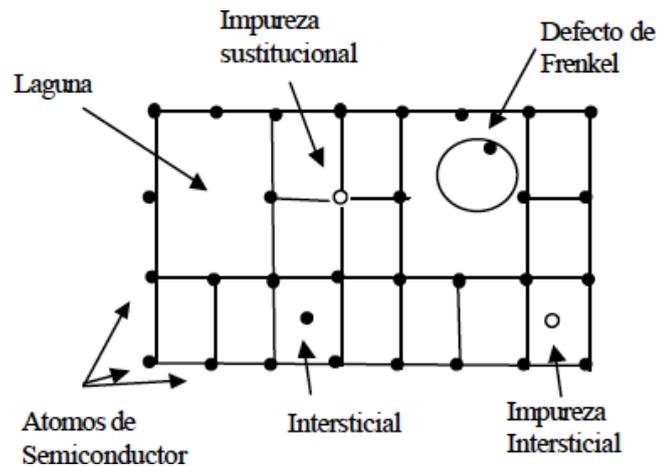


Figura 4. Defectos de tipos puntuales
Tomado de (Meléndez, 2021)

d) Microestructura:

- Tamaño y forma de los granos.
- Fases presentes y su distribución.
- Influye significativamente en propiedades como resistencia y ductilidad.

e) Anisotropía:

- Variación de propiedades según la dirección cristalográfica.
- Importante en metales con estructuras no cúbicas como el titanio.

Estas características estructurales son fundamentales para comprender y predecir el comportamiento de los metales en diversas aplicaciones de ingeniería.

Aplicaciones y ciclo de vida

Usos industriales

Los materiales metálicos desempeñan un papel crucial en diversos sectores industriales debido a sus propiedades únicas y versatilidad. Entre los principales usos industriales se encuentran:

- a) **Construcción:** Los metales como el acero y el aluminio son fundamentales en la edificación de estructuras, puentes y rascacielos. El acero estructural, por ejemplo, se utiliza ampliamente debido a su alta resistencia y durabilidad.
- b) **Transporte:** En la industria automotriz, aeroespacial y naval, los metales son esenciales. El aluminio se emplea en carrocerías de vehículos por su ligereza, mientras que las aleaciones de titanio son cruciales en la fabricación de componentes aeroespaciales debido a su alta resistencia y bajo peso.
- c) **Energía:** Los metales son indispensables en la generación y transmisión de energía. El cobre se utiliza extensivamente en cableado eléctrico, mientras que aleaciones especiales como Inconel se emplean en turbinas de gas y reactores nucleares.
- d) **Electrónica:** Metales como el oro, la plata y el cobre son esenciales en la fabricación de componentes electrónicos debido a su excelente conductividad eléctrica.
- e) **Medicina:** Aleaciones como el titanio y el acero inoxidable se utilizan en implantes médicos y equipos quirúrgicos debido a su biocompatibilidad y resistencia a la corrosión.
- f) **Industria química:** Metales y aleaciones resistentes a la corrosión, como el acero inoxidable y el hastelloy, son cruciales en la fabricación de equipos para procesos químicos.

La selección del metal adecuado para cada aplicación se basa en un análisis detallado de las propiedades requeridas, condiciones de operación y consideraciones económicas.

Vida útil

La vida útil de los materiales metálicos es un factor crítico en el diseño y la ingeniería, que influye directamente en la durabilidad y el rendimiento de los productos y estructuras. Los principales aspectos que afectan la vida útil de los metales incluyen (Araujo, 2017; Jin & Sun, 2012):

- a) **Fatiga:** La exposición a cargas cíclicas puede llevar a la falla por fatiga. La vida útil bajo estas condiciones se puede estimar utilizando la ecuación de Basquin:

$$N = A(\Delta\sigma)^{-m}$$

Donde N es el número de ciclos hasta la falla, $\Delta\sigma$ es el rango de esfuerzo, y A y m son constantes del material.

- b) **Corrosión:** La degradación química del metal en su entorno puede reducir significativamente su vida útil. La tasa de corrosión puede modelarse utilizando la ley de Faraday:

$$m = I t M / n F$$

Donde m es la masa perdida, I es la corriente, t es el tiempo, M es la masa molar, n es el número de electrones transferidos, y F es la constante de Faraday.

- c) **Desgaste:** El desgaste mecánico puede limitar la vida útil de componentes en movimiento. La ecuación de Archard describe la tasa de desgaste:

$$V = k \frac{F_N L}{H}$$

Donde V es el volumen desgastado, k es el coeficiente de desgaste, F_N es la carga normal, L es la distancia de deslizamiento, y H es la dureza del material más blando.

- d) **Condiciones ambientales:** Factores como temperatura, humedad y exposición a sustancias químicas pueden acelerar la degradación del metal.
e) **Calidad del diseño y fabricación:** Defectos iniciales o concentradores de esfuerzo pueden reducir significativamente la vida útil esperada.

La predicción precisa de la vida útil requiere considerar estos factores en conjunto, utilizando métodos como el análisis de elementos finitos y pruebas de envejecimiento acelerado, (Stoneham, 2009).

Reciclaje

El reciclaje de metales es un aspecto crucial en la gestión sostenible de recursos y la reducción del impacto ambiental de la industria metalúrgica. Los principales aspectos del reciclaje de metales incluyen (Ernst & Reuter, 1991; Graedel & Allenby, 2010):

- a) **Procesos de reciclaje:**
- Recolección y clasificación: Separación de diferentes tipos de metales.
 - Trituración y fragmentación: Reducción del tamaño para facilitar el procesamiento.
 - Separación magnética: Utilizada para separar metales ferrosos de no ferrosos.
 - Fundición y refinación: Proceso de fusión y purificación del metal reciclado.
- b) **Eficiencia energética:** El reciclaje de metales generalmente requiere menos energía que la producción primaria. Por ejemplo, el reciclaje de aluminio consume solo el 5% de la energía necesaria para producir aluminio primario.

- c) **Conservación de recursos:** El reciclaje reduce la necesidad de extracción de minerales, conservando recursos naturales y reduciendo el impacto ambiental de la minería.
- d) **Reducción de emisiones:** El reciclaje de metales contribuye significativamente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. La ecuación para calcular la reducción de emisiones es:

$$E_r = E_p - E_s$$

Donde E_r es la reducción de emisiones, E_p son las emisiones de la producción primaria, y E_s son las emisiones del proceso de reciclaje.

- e) **Desafíos en el reciclaje:**
 - **Contaminación:** La presencia de impurezas puede afectar la calidad del metal reciclado.
 - **Aleaciones complejas:** Algunos productos modernos contienen mezclas de metales difíciles de separar.
 - **Logística:** La recolección y transporte eficientes de chatarra metálica pueden ser desafiantes.
- f) **Economía circular:** El reciclaje de metales es un componente clave en la transición hacia una economía circular, donde los materiales se mantienen en uso el mayor tiempo posible.

El reciclaje efectivo de metales no solo tiene beneficios ambientales, sino que también contribuye a la seguridad del suministro de materiales críticos y a la reducción de costos en la industria metalúrgica (Reck & Graedel, 2012).

Huella de carbono y normativa ASTM

Medición de impacto

La medición del impacto ambiental de los materiales metálicos, particularmente su huella de carbono, es crucial para evaluar y mitigar los efectos de la industria metalúrgica en el cambio climático. La huella de carbono se define como la cantidad total de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas con un producto o proceso, expresada en equivalentes de dióxido de carbono (CO₂e) (Allwood, 2012; Norgate et al., 2007).

Para medir la huella de carbono en la industria metalúrgica, se utilizan varios métodos:

- a) **Análisis del Ciclo de Vida (ACV):** Este enfoque evalúa las emisiones de GEI en todas las etapas del ciclo de vida del metal, desde la extracción de materias primas hasta el reciclaje o disposición final.
- b) **Cálculo directo de emisiones:** Se miden las emisiones directas de los procesos de producción utilizando la siguiente ecuación:

$$E = A \times EF$$

Donde E son las emisiones totales, A es la cantidad de actividad (por ejemplo, toneladas de metal producido), y EF es el factor de emisión específico del proceso.



Figura 5. Determinación de huella de carbono

Tomado de (Carbon neutral, 2022)

- c) **Huella de carbono de producto (PCF):** Este método se centra en las emisiones asociadas a un producto específico a lo largo de su ciclo de vida.
- d) **Protocolo de Gases de Efecto Invernadero:** Proporciona estándares y guías para el cálculo y reporte de emisiones de GEI en diferentes alcances (directo, indirecto energético, y otras emisiones indirectas).

La precisión en la medición del impacto es fundamental para establecer estrategias efectivas de reducción de emisiones y para cumplir con regulaciones ambientales cada vez más estrictas (Nuss & Eckelman, 2014). Para entender mejor cómo realizar la medición de la huella de carbono puede revisar el siguiente video:

<https://www.youtube.com/watch?v=d6C2oPAPy9Y>

Estándares aplicables

Los estándares ASTM (American Society for Testing and Materials) juegan un papel crucial en la evaluación y control de la huella de carbono en la industria metalúrgica. Estos estándares proporcionan métodos consistentes y reconocidos internacionalmente para medir, reportar y verificar las emisiones de GEI y otros impactos ambientales. Algunos de los estándares ASTM más relevantes incluyen (ASTM, 2011; ASTM Int., 2009):

- a) **ASTM E2979:** Guía estándar para el cálculo de la huella de carbono de productos manufacturados.
- b) **ASTM E2921:** Práctica estándar para el análisis de sensibilidad mínima en el cálculo de la huella ambiental.
- c) **ASTM E3012:** Guía estándar para la caracterización de la incertidumbre en el análisis del ciclo de vida.
- d) **ASTM E3096:** Práctica estándar para el cálculo de la huella de carbono de productos electrónicos.

- e) **ASTM E2893:** Guía estándar para el cálculo del retorno de la inversión para inversiones en eficiencia energética y proyectos de energía renovable.

Estos estándares aseguran que las mediciones y los reportes de huella de carbono sean consistentes y comparables entre diferentes empresas y productos. Además, proporcionan un marco para la mejora continua en la reducción de emisiones y la eficiencia energética en la industria metalúrgica.



Figura 6. Logo ASTM
Tomado de (ASTM, 2011)

Certificaciones

Las certificaciones relacionadas con la huella de carbono y la sostenibilidad en la industria metalúrgica son herramientas importantes para demostrar el compromiso con prácticas ambientalmente responsables y para cumplir con las expectativas de los consumidores y reguladores. Algunas de las certificaciones más relevantes incluyen:

- a) **ISO 14064:** Esta norma proporciona un marco para la cuantificación y el informe de emisiones de GEI a nivel organizacional.
- b) **PAS 2050:** Especificación para la evaluación de las emisiones de GEI del ciclo de vida de bienes y servicios.
- c) **Carbon Trust Standard:** Certifica que una organización está midiendo, gestionando y reduciendo sus emisiones de carbono año tras año.
- d) **Cradle to Cradle Certified™:** Evalúa la sostenibilidad de un producto en múltiples categorías, incluyendo la gestión del carbono y la energía.
- e) **Environmental Product Declaration (EPD):** Proporciona información transparente y comparable sobre el impacto ambiental de los productos a lo largo de su ciclo de vida.
- f) **GreenCircle Certified:** Ofrece certificaciones de terceros para afirmaciones de sostenibilidad, incluyendo la huella de carbono.

Estas certificaciones no solo validan los esfuerzos de las empresas en la reducción de su huella de carbono, sino que también pueden proporcionar ventajas competitivas en mercados cada vez más conscientes del medio ambiente. Además, ayudan a las empresas a identificar áreas de mejora y a establecer objetivos concretos de reducción de emisiones.

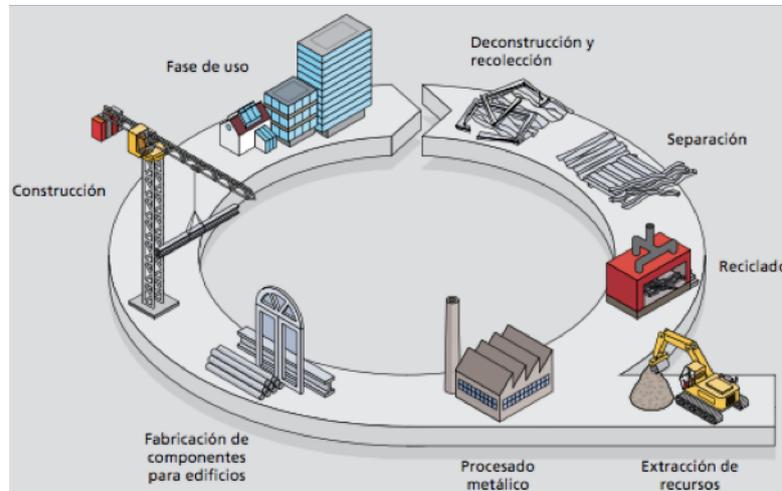


Figura 7. Proceso cíclico de uso de los metales
Tomado de (Torre, 2015)

Referencias citadas en la Clase 6.

- Allwood, J. M. (2012). The Future in Practice: The State of Sustainability Leadership_sustainable materials - with both eyes open. The Future in Practice: The State of Sustainability Leadership. UIT Cambridge Ltd, 3.
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.592.8127&rep=rep1&type=pdf>
- Araujo, E. (2017). Análise Numérica Estructural utilizando o Método dos Elementos Finitos. Instituto ESSS de Pesquisa e Desenvolvimento.
- ASTM. (2011). Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. ASTM E8/E8M-11.
- ASTM Int. (2009). Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials 1. Astm, C, 1–27. <https://doi.org/10.1520/E0008>
- Carbon neutral. (2022). ¿Qué es y cómo se calcula la huella de carbono? BIOELECTRIFY S.A.S. <https://www.carbonneutralplus.com/que-es-y-como-calculan-la-huella-de-carbono/>
- Ernst, W., & Reuter, M. A. (1991). Handbook of recycling. World, 3(February 2004), 9–15. [file:///Users/alex.neumann/Documents/Mendeley Desktop/Edited by Edited by/World/\[Darren_Swanson\]_Creating_Adaptive_Policies_A_Gui\(BookSee.org\).pdf](file:///Users/alex.neumann/Documents/Mendeley%20Desktop/Edited%20by%20World/[Darren_Swanson]_Creating_Adaptive_Policies_A_Gui(BookSee.org).pdf)
- Graedel, T. E., & Allenby, B. R. (2010). Industrial Ecology and Sustainable Engineering. Pearson.
- Ingeniosos. (2024). Ensayos de dureza. <https://lawebdeingeniosos.com/ensayos-de-dureza/>
- Jin, Z., & Sun, C. T. (2012). Fracture Mechanics. En Fracture Mechanics. <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84882212105&partnerID=tZOtx3y1>
- Meléndez, J. J. (2021). Estructura de los sólidos. Cristalografía, difracción y defectos. En Universidad de Extremadura, Manuales. <http://hdl.handle.net/10662/12423>
- Norgate, T. E., Jahanshahi, S., & Rankin, W. J. (2007). Assessing the environmental impact of metal production processes. Journal of Cleaner Production, 15(8–9), 838–848. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2006.06.018>
- Nuss, P., & Eckelman, M. J. (2014). Life Cycle Assessment of Metals: A Scientific Synthesis. PLoS ONE, 9(7), e101298. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0101298>
- Pytel, A., & Singer, F. L. (1994). Resistencia de materiales (4a ed.). HARLA.
- Reck, B. K., & Graedel, T. E. (2012). Challenges in Metal Recycling. Science, 337(6095), 690–695. <https://doi.org/10.1126/science.1217501>
- Solis, J. M., Miranda, O. V., Carranza, L. E., & Ballesteros, J. gabriel. (2021). La Importancia De La Estructura Cristalina De Los Metales. Polo del conocimiento, 6(9), 2408–2423. <https://doi.org/10.23857/pc.v6i9.3173>
- Stoneham, M. (2009). Materials and the Environment: Eco-informed material choice. Materials Today, 12(9), 47. [https://doi.org/10.1016/s1369-7021\(09\)70255-x](https://doi.org/10.1016/s1369-7021(09)70255-x)
- Torre, S. de la. (2015). Ciclo de vida del metal. <https://santiagodelatorre.wordpress.com/>
<https://santiagodelatorre.wordpress.com/2015/06/19/ciclo-de-vida-del-metal/>
- Uribe Vargas, C., Acevedo, M. J., González, G., Rodondo, R., Duque, G., & Peña, L. (2019). Ensayo de tracción de probetas metálicas. February.

William D. Callister, J., & Rethwisch, D. G. (2014). MATERIALS SCIENCE and ENGINEERING: An Introduction. Materials Science and Engineering: A, 42(1), 181.



La excelencia no se improvisa

síguenos

