



Ciencia Latina
Internacional

Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar, Ciudad de México, México.
ISSN 2707-2207 / ISSN 2707-2215 (en línea), julio-agosto 2024,
Volumen 8, Número 4.

https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i4

REVISIÓN DE TRANSFORMACIONES DE FASE EN ESTADO SÓLIDO DE ACEROS EMPLEANDO TÉCNICAS DE ANÁLISIS TÉRMICO

**A REVIEW OF SOLID STATE PHASE TRANSFORMATIONS
OF STEELS USING THERMAL ANALYSIS TECHNIQUES**

José Guadalupe Tobías López

Universidad Autónoma de Coahuila, México

Ma, de Jesús Soria Aguilar

Universidad Autónoma de Coahuila, México

Edgar Omar García Sanchez

Universidad Autónoma de Coahuila, México

Francisco Raul Carrillo Pedroza

Universidad Autónoma de Coahuila, México

DOI: https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v8i4.13074

Revisión de Transformaciones de Fase en Estado Sólido de Aceros Empleando Técnicas de Análisis Térmico

José Guadalupe Tobías López¹

j.tobias@uadec.edu.mx

<https://orcid.org/0009-0003-7058-1760>

Universidad Autonoma de Coahuila
México

Ma, de Jesús Soria Aguilar

ma.soria@uadec.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0003-3910-7772>

Universidad Autonoma de Coahuila
México

Edgar Omar García Sanchez

egs7710@gmail.com

<https://orcid.org/0000-0002-1660-8622>

Universidad Autonoma de Nuevo León
México

Francisco Raul Carrillo Pedroza

raul.carrillo@uadec.edu.mx

<https://orcid.org/0000-0002-0413-0676>

Universidad Autonoma de Coahuila
México

RESUMEN

Los aceros son una aleación a base de hierro con contenidos de carbono inferiores al 2% denominados aceros al carbono, los cuales se clasifican, en bajo, medio y alto contenido de carbono. Una manera de mejorar las propiedades mecánicas de los aceros es mediante la adición de elementos de aleación. Otra forma es mediante la aplicación de tratamientos térmicos, que consisten principalmente en someter el material a un ciclo térmico, por un tiempo definido y un enfriamiento posterior, causando cambios en su estructura cristalina y en su microestructura (transformaciones de fase). En estos casos, es deseable la transformación martensítica, fase más resistente, la cual ocurre cuando el material se somete a un enfriamiento rápido. Los análisis térmicos son una técnica utilizada para estudiar las propiedades de los materiales en función de la temperatura, se basan en medir cómo cambian algunas propiedades físicas o químicas de una sustancia a medida que se le aplica calor o se enfría. Durante el proceso de análisis térmico, un material se somete a un control preciso de la temperatura, ya sea mediante el calentamiento o el enfriamiento, y a lo largo de este proceso, se registran diversas propiedades del material, como su masa, volumen, entalpía, entre otras, y al final, los datos obtenidos permiten entender cómo se comporta el material en diferentes condiciones térmicas.

Palabras clave: aceros, propiedades, térmicos, microestructura

¹ Autor principal.

Correspondencia: j.tobias@uadec.edu.mx

A Review of Solid State Phase Transformations of steels Using Thermal Analysis Techniques

ABSTRACT

Steels are an iron-based alloy with carbon contents less than 2% called carbon steels, which are classified as low, medium and high carbon content. One way to improve the mechanical properties of steels is by adding alloying elements. Another way is through the application of thermal treatments, which mainly consist of subjecting the material to a thermal cycle for a defined time and subsequent cooling, causing changes in its crystalline structure and microstructure (phase transformations). In these cases, the martensitic transformation, the most resistant phase, is desirable, which occurs when the material is subjected to rapid cooling. Thermal analyzes are a technique used to study the properties of materials as a function of temperature. They are based on measuring how some physical or chemical properties of a substance change as heat is applied or cooled. During the thermal analysis process, a material is subjected to precise temperature control, either by heating or cooling, and throughout this process, various properties of the material are recorded, such as its mass, volume, enthalpy, among others, and in the end, the data obtained allows us to understand how the material behaves in different thermal conditions.

Keywords: iron, properties, thermal, microstructure

Artículo recibido 10 julio 2024

Aceptado para publicación: 15 agosto 2024



INTRODUCCIÓN

Las transformaciones de fase en estado sólido son fenómenos fundamentales que ocurren cuando un material sólido cambia su estructura cristalina, composición química o propiedades físicas a medida que se somete a cambios de temperatura, presión u otros factores externos. Estas transformaciones son de gran importancia en diversos campos científicos e industriales debido a su efecto en las propiedades y aplicaciones de los materiales (Merino et al., 2012).

Las transformaciones de fase sólida son cruciales para comprender y diseñar materiales con propiedades específicas. Los científicos de materiales estudian estas transformaciones para desarrollar aleaciones metálicas más resistentes, cerámicas avanzadas y polímeros de alto rendimiento (Mesa y Zapata, 2005).

En la metalurgia, las transformaciones de fase son esenciales para controlar la microestructura y las propiedades de los aceros y otros metales. Esto afecta la durabilidad de estructuras como puentes y edificios, así como la calidad de los productos manufacturados (Ochoa et al., 2012).

En la industria, las transformaciones de fase se aplican en la fabricación de materiales para diversas tecnologías. Por ejemplo, en la industria de semiconductores, la modificación de la fase sólida mejora la conductividad eléctrica de los materiales, lo que es esencial para dispositivos electrónicos (Ysava y Luiggi, 2011).

Las técnicas de análisis térmico son herramientas que contribuyen en el estudio de las transformaciones de fase en estado sólido, ya que permiten observar cómo cambian las propiedades de un material a medida que se varía la temperatura (Bernal y Rangel, 2010).

A continuación, se describirán algunas técnicas importantes.

- La calorimetría diferencial de barrido (DSC Differential Scanning Calorimetry) mide la diferencia de calor absorbido o liberado por un material en función de la temperatura. Durante una transformación de fase, se produce un cambio en el calor específico del material, lo que se refleja en un pico en el gráfico DSC. Este pico proporciona información sobre la temperatura a la que ocurre la transformación y la cantidad de energía involucrada (Henning, 2010).
- El análisis termogravimétrico mide la pérdida de peso de un material a medida que se incrementa la temperatura. Es especialmente útil para estudiar transformaciones que involucran descomposición térmica, sublimación o evaporación. Los cambios en la curva de peso frente a la

temperatura proporcionan información sobre las temperaturas de inicio y finalización de la transformación (Brown, 1980).

- La dilatometría es utilizada para medir cambios volumétricos en función del tiempo y la temperatura. Se centra en la dilatación térmica de un material, recabando información enfocada en diversos campos, como la metalurgia, en la fabricación de nuevos materiales y su comportamiento para la mejora de sus propiedades (Idarraga et al., 2020).
- El análisis térmico con difracción de rayos X permite estudiar las transformaciones de fase cristalina en sólidos, identificando las fases cristalinas presentes y observando cómo cambian a medida que se varía la temperatura (Mittenmeijer et al., 2013).
- La microscopía térmica combina el calorímetro y el microscopio para visualizar transformaciones de fase en una escala microscópica. Permite la observación directa de cambios en la estructura y la morfología de las muestras a medida que se calientan o enfrían (White y Bernhard, 2010).

Estas técnicas son fundamentales en la investigación de transformaciones de fase en estado sólido, proporcionando datos precisos sobre la temperatura, la energía involucrada y otros detalles importantes. Las referencias mencionadas ofrecen una visión más detallada de cómo se aplican estas técnicas en la caracterización de materiales y en la comprensión de las transformaciones de fase (Mittenmeijer et al., 2013).

Con la finalidad de crear un mapa científico, se empleó el software Litmaps, para visualizar las relaciones que se presentan en las palabras clave seleccionadas, así como las nuevas palabras que surgen, permitiendo visualizar artículos relacionados a través de los años de los temas seleccionados.

Las Figuras 1 y 2, muestran un ejemplo de mapas de dicho software.

Figura 1. Diagrama de transformaciones de fase en estado sólido.

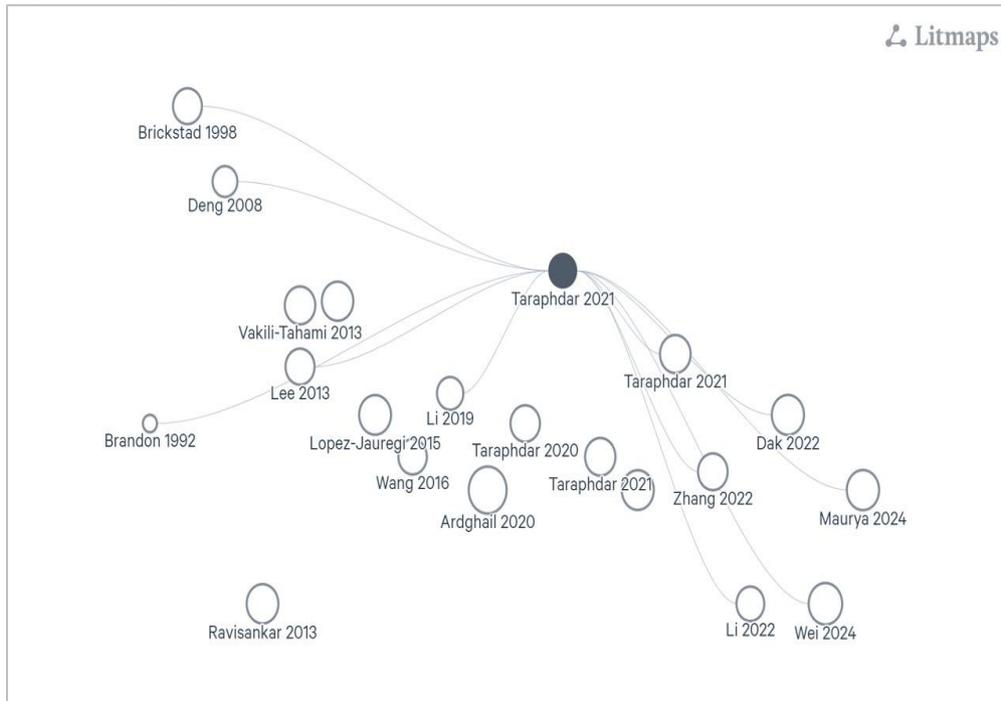
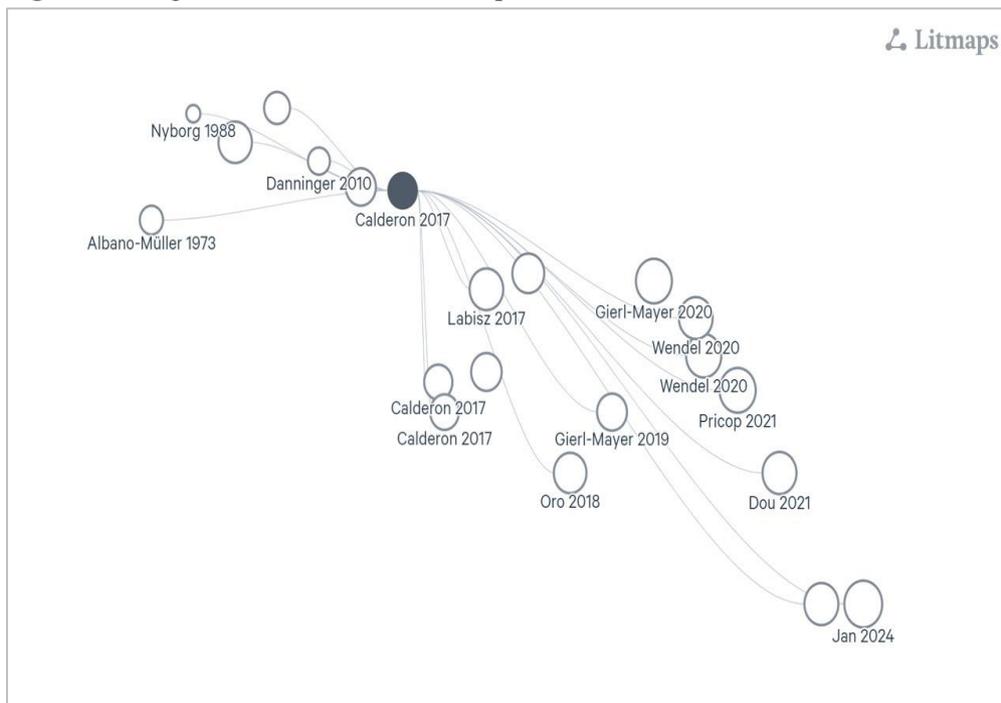


Figura 2. Diagrama de transformaciones por cuatro técnicas de análisis térmicos.



Fundamentos de las transformaciones de fases

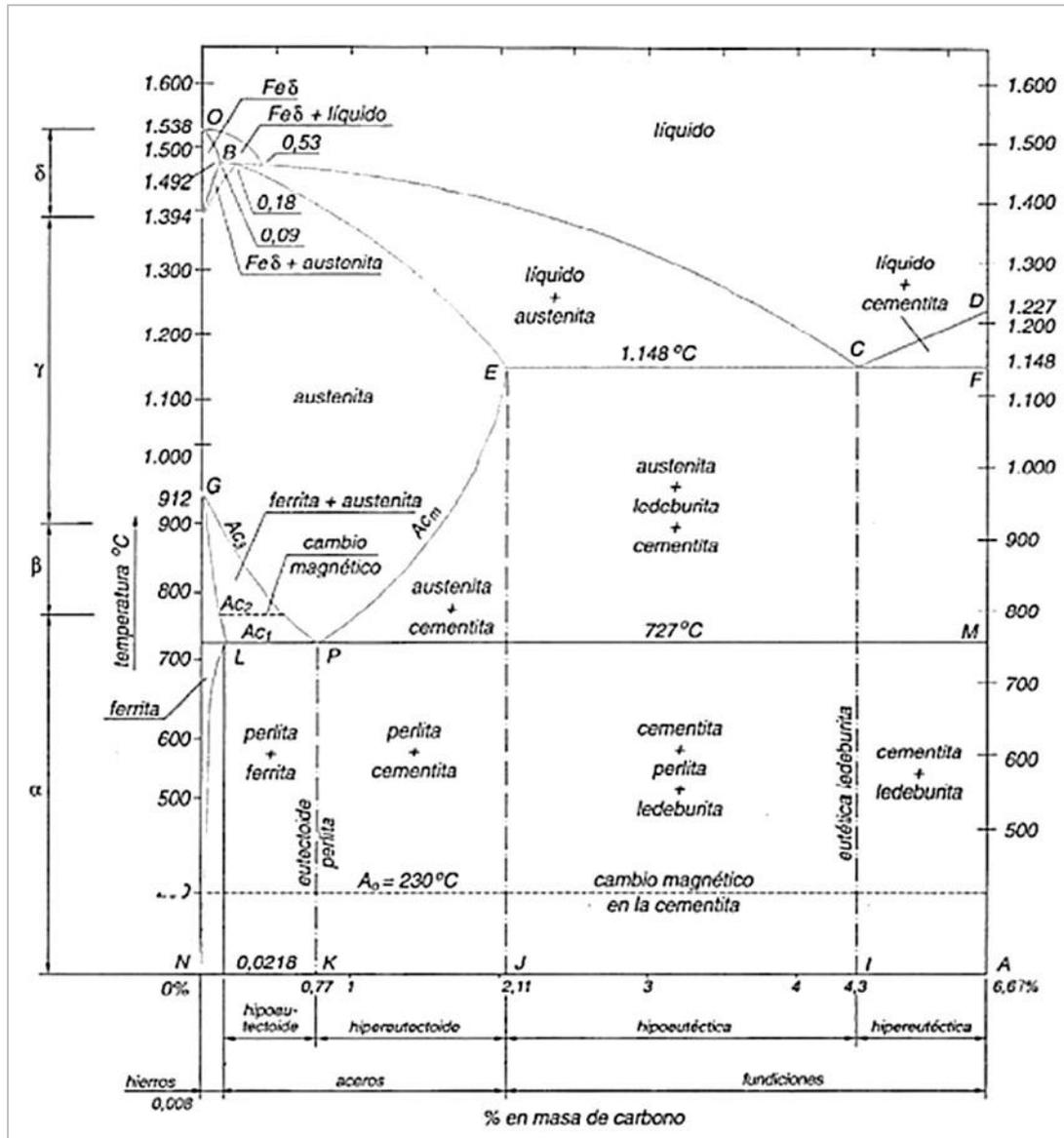
El entendimiento de las transformaciones de fase en estado sólido es esencial para comprender cómo los materiales cambian sus propiedades, estructuras y estados físicos en respuesta a factores como la temperatura y la presión.

1. Las transformaciones de fase en sólidos están vinculadas a la minimización de la energía libre de Gibbs del sistema. Cuando una fase sólida alcanza un estado en el que su energía libre es mínima, se encuentra en equilibrio termodinámico. Las transformaciones de fase ocurren cuando una fase existente ya no es la más estable y se forma otra fase más estable (Callister y Rethwisch, 2017).
2. Las transformaciones de fase pueden implicar cambios en la estructura cristalina del material. Por ejemplo, en el acero, la transformación martensítica involucra la reorganización de los átomos sin un cambio en la composición química, lo que resulta en una estructura cristalina diferente (Kittel, 1996).
3. La temperatura juega un papel crítico en las transformaciones de fase. Cada transformación tiene una temperatura crítica asociada a ella, como el punto de fusión para la fusión o el punto de Curie para la ferromagnetización. Además, las condiciones de equilibrio, como la presión, también pueden influir en las transformaciones de fase (Smith, 2018).
4. Además de la termodinámica, la cinética es un aspecto importante de las transformaciones de fase. La velocidad a la que ocurre una transformación depende de factores como la temperatura, la concentración de defectos en la estructura y la difusión atómica (Porter y Easterling, 1992).
5. Los diagramas de fase son herramientas gráficas que representan cómo cambian las fases de un material en función de la temperatura y la composición. Estos diagramas son fundamentales para comprender las transformaciones de fase en sistemas complejos y se utilizan ampliamente en la ciencia de los materiales (Hillert, 2008).

La Figura 3 muestra el diagrama hierro-carbono, también conocido como diagrama de fase o de equilibrio hierro-carbono, el cual es una representación gráfica que muestra las diferentes fases o estructuras que puede tener una aleación de hierro y carbono a diferentes temperaturas y composiciones químicas (UTP, 2013).



Figura 3. Diagrama de hierro-carbono (Fe-C) (UTP, 2013).



A continuación, se enumeran algunos tipos de transformación de fase.

1. La transformación de fusión es el proceso en el que un sólido se convierte en líquido a una temperatura específica conocida como punto de fusión. Esta transformación es fundamental en la fabricación de vidrio, metalurgia y la producción de materiales poliméricos (Debenedetti et al., 2001).
2. La cristalización es el proceso inverso a la fusión, en el que un líquido se convierte en un sólido cristalino a medida que se enfría. Este proceso es esencial en la formación de cristales sólidos, como la cristalización de minerales a partir de soluciones acuosas sobresaturadas (Nishinaga, 2012).

3. La recristalización es una transformación de fase que ocurre en materiales metálicos cuando se calientan para obtener nuevas fases recristalizadas y eliminar defectos en su estructura cristalina, como dislocaciones y granos deformados. Este proceso es esencial en la producción de materiales metálicos de alta calidad (Reed-Hill y Abbaschian, 1992).
4. La transformación martensítica es un cambio de fase que implica la transformación de una estructura cristalina en otra sin difusión atómica significativa. Es común en las aleaciones de hierro-carbono, como los aceros inoxidable, y puede estar relacionada con cambios en la temperatura o el esfuerzo aplicado (Bhadeshia, 2001).

Las transformaciones de fase ocurren en diversos materiales y sistemas. A continuación, se describen algunos de ellos.

Los aceros pueden experimentar una transformación de fase martensítica. Esto implica un cambio en la estructura cristalina del acero cuando se enfría rápidamente, debido al proceso de templado. La transformación martensítica es responsable de la formación de aceros endurecidos y se utiliza en la fabricación de herramientas, cuchillos y piezas de maquinaria (Nishiyama, 2012).

Análisis térmicos

El análisis térmico es una técnica de caracterización de materiales que se utiliza para estudiar cómo las propiedades de una sustancia cambian en respuesta a variaciones controladas de temperatura. Esta técnica proporciona información valiosa sobre una amplia gama de propiedades físicas y químicas, así como sobre las transformaciones de fase y reacciones que pueden ocurrir en el material (Haines, 2007).

Las técnicas de análisis térmico incluyen varias herramientas que se utilizan según el tipo de propiedad o reacción que se desea estudiar. Las más comunes son:

1. **Calorimetría diferencial de barrido (DSC):** mide la diferencia de calor absorbido o liberado por una muestra en comparación con una probeta de referencia mientras se varía la temperatura de manera controlada. Proporciona información sobre cambios en la capacidad calorífica, entalpías, transiciones de fase, como fusión y cristalización, y reacciones químicas. Es ampliamente utilizado en la caracterización de polímeros, metales y otros materiales (ASTM E1952, 2017).
2. **Análisis termogravimétrico (TGA):** mide la pérdida de peso de una muestra en función de la temperatura o el tiempo mientras se somete a una atmósfera controlada. Se utiliza para estudiar la



descomposición térmica, la sublimación, la adsorción y otras reacciones que afectan la masa de la muestra (McCullough, 2009).

3. **Análisis térmico diferencial (DTA):** mide la diferencia de temperatura entre una muestra de estudio y una de referencia mientras se calientan o enfrían juntas. Se utiliza para detectar cambios en la entalpía y las transiciones de fase (Miller y Noyes, 1958).

El análisis térmico se aplica en una variedad de campos y tiene numerosas aplicaciones, que incluyen:

- **Caracterización de materiales:** permite determinar propiedades como la temperatura de fusión, cristalización, transiciones vítreas y cambios en la capacidad calorífica. Se utiliza en la investigación de polímeros, cerámicas, metales y productos farmacéuticos.
- **Estabilidad de materiales:** ayuda a evaluar la estabilidad térmica y la vida útil de materiales, especialmente polímeros, alimentos y productos químicos.
- **Investigación de reacciones químicas:** identifica reacciones químicas y cinéticas de reacción a través de cambios de masa y energía. Se aplica en química orgánica, análisis de gases y síntesis de materiales.
- **Optimización de procesos industriales:** en la producción de productos químicos, cerámicas, vidrio y metales, el análisis térmico se utiliza para garantizar la calidad del producto y optimizar los procesos de fabricación (Speyer, 1993).

Durante un experimento de análisis térmico, se generan curvas que representan la propiedad medida (calor, masa, temperatura, volumen) en función de la temperatura o el tiempo. La interpretación de estos datos implica identificar picos, cambios en la pendiente o interrupciones en las curvas, que indican transformaciones de fase, reacciones químicas y cambios en las propiedades térmicas del material (Brown, 1980).

Dilatometría

La dilatometría es una técnica que permite evaluar la expansión y contracción de una muestra cuando es sometida a un calentamiento y enfriamiento (Espin, 2017). Se emplean los términos de dilatometría lineal y dilatometría volumétrica para describir las dimensiones medidas. La representación gráfica de la longitud y el volumen en función de la temperatura se denomina "la curva dilatométrica", y sus

derivadas respecto a la temperatura o el tiempo se conocen como "curva dilatométrica derivada" (Speyer, 1993).

Tal como se ha mencionado con anterioridad, la dilatometría es una técnica valiosa para investigar las propiedades termomecánicas de una amplia gama de materiales, incluyendo metales, cerámicas, polímeros y materiales compuestos. La información proporcionada por esta técnica es esencial en la caracterización de materiales y el desarrollo de procesos industriales (Davila y Galeas, 2011).

La Tabla I muestra la recopilación de algunas referencias bibliográficas enfocadas en el tema del presente trabajo, así, como una breve descripción de la metodología y resultados obtenidos bajo técnicas dilatométricas.

Tabla I. Revisión bibliográfica de transformaciones de fase por análisis térmicos (El-Fallah et al., 2023, Liu et al., 2023, Zhang et al., 2023, Villa et al., 2023).

Autores	Metodología	Transformación	Velocidad de enfriamiento	Resultados
El-Fallah et al. (2023).	Realizaron el análisis dilatométrico en aceros bainíticos con alto contenido de silicio y sus transformaciones en estado sólido.	Ferrita alotriomórfica y Widmanstätten	0.1 °C/s	Obteniendo transformaciones martensíticas a temperaturas de 220 °C, las velocidades de calentamiento de 0.1°C y con permanencias de 30 minutos.
Bernhard et al. (2023)	Realizaron la comparación de técnicas de análisis térmicos sobre un acero 0.4C-1.8Si-2.8Mn-0.5Al.	Martensita y Perlita	M = 5 °C/s P = 0.05°C/s	Obtuvieron un compuesto de distintas fases (perlita y martensita), velocidades de transformación de perlita de 0.05°C/s y martensita 5°C/s.
Zhang et al. (2019)	Analizaron el mecanismo de transformación de estado sólido en un acero inoxidable super austenítico, se sometió a un calentamiento a 1000 °C con una velocidad de 300 K/min, para después bajar el calentamiento a 10 K/min hasta llegar a 1250 °C.	Austenita	A = 0.01 °C/s	Obtuvieron transformación de estructura laminar en la fase σ .
Villa et al. (2023)	Realizaron el envejecimiento de un acero inoxidable martensítico antes del endurecimiento, realizaron dilatometría con atmosfera de argón a 99.9999% a baja velocidad de calentamiento de 0.9 °C/s hasta 1050 °C manteniéndose por 0.5 hora y enfriamiento de 1050 a 700 °C de 1.5 °C/s y de 700 °C a	Austenita a Martensita a 140 °C	M = 0.2 °C/s	Durante la rápida contracción del material, misma que duró 0.5 h, se obtuvieron transformaciones martensíticas, que sucedieron desde M_s a 140 °C hasta M_f a 40 °C.

Método experimental y parámetros

Las técnicas de análisis térmico poseen una gran versatilidad y encuentran aplicación en diversos campos, como la ciencia y tecnología de polímeros, ciencia y tecnología de materiales carbonosos, catálisis, industria metalúrgica, entre otros (Alvarado, 2006).

El análisis térmico implica el empleo de técnicas que permiten estudiar la variación de una propiedad del sistema en relación con la temperatura, sometiéndolo a una variación controlada de la misma. Los efectos del calor sobre los materiales pueden ser diversos, generando cambios significativos en sus propiedades (Manich et al., 2004).

Los análisis térmicos se realizan según a normas establecidas para cada prueba, siendo las siguientes las que rigen determinado análisis térmico.

- Análisis Calorimétrico (DSC) en base a la norma ASTM D 3418.
- Análisis de conductividad Térmica en base a la norma ASTM E 1530-06. Tamaño mínimo de muestra: 2 " de diámetro por 1/2" de espesor.
- Análisis Simultaneo (TGA-DSC) en base a la norma ASTM E1952.
- Análisis termogravimétrico (TGA) en base a la norma ASTM E1131.
- Análisis Termo mecánico (TMA) en base a la norma ASTM E 831.
- Análisis volumétrico en base a la norma ASTM C29.
- Calor específico (Specific Heat Capacity DSC) en base a la norma ASTM E1269.
- Dilatometría en base a la norma ASTM 228 (CIMAV, s.f).

Es necesario tener en cuenta las condiciones necesarias para cada análisis térmico, mismos que tienden a ser muy similares, entre las cuales se encuentran: marca y modelo del equipo, así como las dimensiones, registro de calibración, tamaño e identificación de la muestra material, capacidad y estado del horno/crisol que contenga la muestra, composición del material, presión del sistema, programa de temperaturas y sensibilidad de las determinaciones, entre otras (Alvarado, 2006).

La dilatometría como todos los procesos se rigen por normas internacionales estandarizadas, en el caso de esta técnica es la Norma ASTM 228, la cual establece los parámetros para cada tipo de dilatómetro desde la temperatura a la cual es capaz de llegar (tanto mínima como máxima), además, se establecen las ecuaciones con las que se pueden determinar los valores de expansión térmica, así como también las dimensiones necesarias para llevar a cabo la prueba. Las probetas en este caso deben ser cilíndricas con dimensiones de 25 ± 0.1 mm de longitud y de 5 a 10 mm de diámetro (ASTM 228, 1995).

Las velocidades de enfriamiento dependen del tipo de acero, la composición química y la fase que se pretende llegar, para ello es necesario hacer uso del software de simulación llamado JmatPro.

Este software es utilizado para la simulación y diseño de materiales, especialmente en la industria de la ingeniería de materiales y procesos. Es conocido por su capacidad para prever el comportamiento de los materiales en diversas condiciones y entornos, lo que lo hace valioso para este tipo de investigaciones. Una de sus funciones incluye la creación de diagramas CCT (por sus siglas en inglés Continuous Cooling Transformations), así como diagramas TTT (por sus siglas en inglés Time-Temperature-Transformation) (Guo et al., 2018).

Los diagramas de Transformación por Enfriamiento Continuo (CCT) son representaciones gráficas que ilustran las transformaciones experimentadas por un material. Se emplean para diseñar tratamientos térmicos o termomecánicos, donde el enfriamiento ocurre de manera continua y controlada. Estos diagramas permiten prever cambios de fase, microestructuras resultantes y propiedades mecánicas y térmicas finales de un acero. Construidos principalmente a partir de temperaturas en las que la austenita es la fase estable (austenización completa), las curvas en el diagrama reflejan las relaciones entre temperatura y tiempo para la formación de diversas fases o microestructuras en el material. (Gutiérrez et al., 2023).

Los diagramas TTT reflejan el lapso requerido, a cualquier temperatura, para el inicio y la conclusión de una transformación de fase (tiempo-temperatura-transformación). Para obtener esta información, se llevan a cabo pruebas con diversas muestras que experimentan velocidades variadas de enfriamiento, y se evalúan tanto su dureza como su estructura interna (Báez, 2021).

Las pruebas dilatométricas proporcionan información detallada sobre cómo los materiales responden a los cambios de temperatura, lo que es esencial para entender su comportamiento térmico y para aplicaciones en las que las propiedades dimensionales son críticas.

Entre los resultados a obtener se encuentran los siguientes

Coefficiente de expansión térmica lineal (α): el cual describe la variación relativa de la longitud de un material en función de la temperatura. Se expresa en unidades de $1/^\circ\text{C}$ y es esencial para comprender cómo un material se expande o contrae con los cambios de temperatura (Netzsch, s/f).

Puntos de transición: tales como puntos de fusión, solidificación o transiciones de fase, los cuales son cruciales para comprender el comportamiento del material bajo diferentes condiciones térmicas (Netzsch, s/f).

Anomalías térmicas, tales como contracciones o expansiones inusuales, que podrían indicar la presencia de cambios estructurales o fases adicionales en el material (Paucar, 2016)

Curvas de dilatación térmica, las cuales representan gráficamente la variación de la longitud o volumen del material en función de la temperatura. Analizar estas curvas proporciona información detallada sobre cómo el material responde a cambios térmicos (De la Garza, 2009)

CONCLUSIONES

Las transformaciones de fase en estado sólido son un aspecto crucial en la ciencia de los materiales, y su comprensión es esencial para el diseño y la manipulación de materiales con propiedades específicas. Además, tienen una amplia gama de aplicaciones tecnológicas en campos como la electrónica, la metalurgia y la nanotecnología.

Los análisis térmicos desempeñan un papel crucial en la caracterización, el diseño de materiales y la optimización de procesos en una amplia gama de campos, desde la ciencia de materiales y la química hasta la industria farmacéutica y la ingeniería. Proporcionando información esencial sobre las propiedades y el comportamiento térmico de los materiales y es una herramienta invaluable en la investigación y el desarrollo de productos.

La dilatometría es una técnica valiosa para estudiar y medir la expansión y contracción de los materiales en función de la temperatura. Tiene aplicaciones amplias en la ciencia de materiales, la industria y la

investigación, lo que la convierte en una herramienta fundamental para la caracterización y el diseño de materiales y componentes en una variedad de aplicaciones.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Alvarado, K. (2006). Aplicación del análisis térmico a la caracterización de materiales textiles [Tesis de maestría]. Instituto Politécnico Nacional.

https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/781/559_2005_ESIT_MAESTRIA_karina_alvarado.pdf?sequence=1

ASTM E1952-17, "Standard Test Method for Thermal Conductivity and Thermal Diffusivity by Modulated Temperature Differential Scanning Calorimetry," ASTM International. Available:

<https://blog.utp.edu.co/metalografia/5-diagrama-hierro-carbono/>

Báez, I. (2020). Métodos de elaboración diagramas TTT. En Studocu. Universidad de Guanajuato.

Recuperado 27 de noviembre de 2023, de <https://www.studocu.com/es-mx/document/utel-universidad-en-linea-de-mexico/quimica/diagramas-ttt-tratamientos-termicos/14307846>

Bernal J. L. & Rangel S. (2010). Análisis metalográfico y térmico diferencial en una aleación Zn – Al.

<https://www.redalyc.org/pdf/942/94248264001.pdf>

Bhadeshia, H. K. D. H. (2001). Martensite in steel: Strength and structure. Oxford University Press.

https://www.academia.edu/39439184/Harry_Bhadeshia_Robert_Honeycombe_Steels_Microstructure_and_Properties_Third_Edition20190607_70016_1510lww

Brown, M. E. (1980). Introduction to thermal analysis: Techniques and applications. Kluwer Academic Publishers.

<https://es.scribd.com/document/397727706/Brown-Introduction-to-Thermal-Analysis-Techniques-and-Applications-pdf>

Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2017). Fundamentals of Materials Science and Engineering: An Integrated Approach. John Wiley & Sons.

[https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/tdg/TEKNOLOGI%20REKAYASA%20MATERIAL%20PERTAHANAN/Fundamentals%20of%20Materials%20Science%20and%20Engineering%20An%20Integrated%20Approach%20by%20William%20D.%20Callister,%20David%20G.%20Rethwisch%20\(z-lib.org\).pdf](https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/tdg/TEKNOLOGI%20REKAYASA%20MATERIAL%20PERTAHANAN/Fundamentals%20of%20Materials%20Science%20and%20Engineering%20An%20Integrated%20Approach%20by%20William%20D.%20Callister,%20David%20G.%20Rethwisch%20(z-lib.org).pdf)



- Coefficiente lineal de expansión térmica (S/f). Netzsch. [Online]. Disponible: <https://analyzing-testing.netzsch.com/es/training-know-how/glosario/coeficiente-lineal-de-expansion-termica-clte-cte>
- Dávila, J. L., & Galeas, S. (2011). Nuevos Materiales (1.a ed., Vol. 2). Victor Hugo Guerrero. https://www.researchgate.net/publication/262524558_Nuevos_Materiales_Aplicaciones_Estructurales_e_Industriales
- De La Garza, A. (2009). Diseño y construcción de un dilatómetro de alta velocidad para el estudio de transformaciones de fase en materiales [Tesis de maestría]. Universidad Autónoma de Nuevo León. <https://cd.dgb.uanl.mx/bitstream/handle/201504211/5001/20066.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Debenedetti, P. G., & Stillinger, F. H. (2001). Supercooled liquids and the glass transition. *Nature*, 410(6825), 259-267. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11258381/>
- El-Fallah, G. M. A. M. (2023). Dilatometric study of High silicon bainitic steels: Solid-state Transformations. *Results in materials*, 100430. <https://doi.org/10.1016/j.rinma.2023.100430>
- Espin, M. J. (2017). Análisis de la distorsión en placas de acero soldadas siguiendo trayectorias con cambio de pendiente [Tesis de Maestría]. COMIMSA. <https://comimsa.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1022/316/1/TESIS%20MARIO%20ESPIN.pdf>
- Guo, Z., Lasne, P., Saunders, N., & Schillé, J. (2018). Introduction of materials modelling into metal forming simulation. *Procedia Manufacturing*, 15, 372-380. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.232>
- Gutierrez, C. E., Ruiz, C. D., Torres, C. A., Salinas, R. A., Deaquino, L. R. D., Bedolla, J. A. & Hernandez, B. C.A. (2023). Intercritical continuous cooling transformation diagram for the manufacture of low-alloyed low-carbon multiphase steels. *Materials Letters*, 331, 133528. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2022.133528>
- Haines, P. J. (2007). Principles of thermal analysis and calorimetry. Royal Society of Chemistry. <https://books.google.com.mx/books?hl=es&lr=&id=obarDwAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA72&dq>



[Bouaziz/post/Can you recommend a textbook for DSC technique/attachment/5eb672d9c005cf000189469f/AS%3A889208587694080%401589015256404/download/5-Thermal+analysis+of+polymers.+fundamentals+and+applications.pdf](https://www.researchgate.net/publication/260118946/AS%3A889208587694080%401589015256404/download/5-cf000189469f/AS%3A889208587694080%401589015256404/download/5-Thermal+analysis+of+polymers.+fundamentals+and+applications.pdf)

Merino, M. C. (2012). Diagramas y transformaciones de fase 7. Transformaciones en estado sólido. Difusionales y no difusionales. Reduca.

<https://www.revistareduca.es/index.php/reduca/article/view/943/960>

Mesa D. H. & A. Zapata (2005). Consideraciones sobre aplicaciones tecnológicas de transformaciones de fase en aceros. Scientia Et Technica, XI (27),115-120. ISSN: 0122-1701.
https://www.researchgate.net/publication/49588091_CONSIDERACIONES SOBRE APLICACIONES TECNOLOGICAS DE TRANSFORMACIONES DE FASE EN ACEROS

Miller, C. A., & Noyes, R. M. (1988). Introduction to Thermal Analysis, Differential thermal analysis. Wiley. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-94-009-1219-9>

Mittemeijer, E. J., & Welzel, U. (2013). The kinetics of phase transformations in metals. In Fundamentals of Materials Science and Engineering (pp. 441-502). Springer.
[https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/tdg/TEKNOLOGI%20REKAYASA%20MATERIAL%20PERTAHANAN/Fundamentals%20of%20Materials%20Science%20and%20Engineering%20An%20Integrated%20Approach%20by%20William%20D.%20Callister,%20David%20G.%20Rethwisch%20\(z-lib.org\).pdf](https://ftp.idu.ac.id/wp-content/uploads/ebook/tdg/TEKNOLOGI%20REKAYASA%20MATERIAL%20PERTAHANAN/Fundamentals%20of%20Materials%20Science%20and%20Engineering%20An%20Integrated%20Approach%20by%20William%20D.%20Callister,%20David%20G.%20Rethwisch%20(z-lib.org).pdf)

Nishinaga, T. (2012). Crystal Growth Technology: From Fundamentals and Simulation to Large-scale Production. John Wiley & Sons.

Nishiyama, Z. (2012). Martensitic transformation. Elsevier.

<https://www.perlego.com/book/1873580/martensitic-transformation-pdf>

Ochoa J. L., G. González, & L. Lozada. (2012). Transformación microestructural in situ y su correlación con la resistividad eléctrica en la aleación de aluminio AA-6061. ISSN: 0255-6952.

https://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0255-69522012000200004

Paucar, C. G. (2016). Vitrocerámicos con bajo coeficiente de expansión térmica obtenidos por sinterización con cristalización concurrente en partículas vítreas de $\text{Li}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{XSiO}_2$ [Tesis



Doctoral]. Universidad Autónoma de Madrid.

https://repositorio.uam.es/bitstream/handle/10486/670789/paucar_alvarez_carlos_guillermo.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Porter, D. A., & Easterling, K. E. (1992). Phase Transformations in Metals and Alloys. CRC Press.

<https://gateformme.wordpress.com/wp-content/uploads/2017/04/phase-transformations-in-metals-and-alloys.pdf>

Reed-Hill, R. E., & Abbaschian, R. (2009). Physical Metallurgy Principles. PWS Publishing Company.

[https://sku.ac.ir/Datafiles/BookLibrary/46/Physical%20Metallurgy%20Principles%20\(2009\).pdf](https://sku.ac.ir/Datafiles/BookLibrary/46/Physical%20Metallurgy%20Principles%20(2009).pdf)

Shackelford J. F. (2015). Introduction to Materials Science for Engineers. CRC Press.

<https://industri.fatek.unpatti.ac.id/wp-content/uploads/2019/03/060-Introduction-to-Materials-Science-for-Engineers-James-F.-Shackelford-Edisi-8-2015.pdf>

Speyer, R. F. (1994). Thermal analysis of materials. <https://doi.org/10.1201/9781482277425>

Temperatura de transición vítrea (S/f-b). Netzsch. [Online]. Available: <https://analyzing-testing.netzsch.com/es/training-know-how/glosario/temperatura-de-transicion-vitrea>

Universidad Tecnológica de Pereira, (2013), “Diagrama Fe-C,”. [Online].

<https://blog.utp.edu.co/metalografia/5-diagrama-hierro-carbono/>

Villa, M., Grumsen, F. B., Niessen, F., Dahmen, T., Cao, L., Reich, M., Kessler, O., Huang, X., & Somers, M. A. J. (2023). Aging 17-4 PH Martensitic stainless steel prior to hardening: Effects on martensitic transformation, microstructure and properties. *Materialia*, 32, 101882.

<https://doi.org/10.1016/j.mtla.2023.101882>

White, J. R., & Bernhardt, A. F. (2010). Handbook of Optical and Laser Scanning (p. 559). CRC Press.

Ysava V. & Luiggi N. (2011). Transformaciones de fases en aceros de bajo carbono.

http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-40652011000400008

Zhang, R., He, J., Xu, S., Zhang, F., & Wang, X. (2023). Exploring the mechanism of solid-state transformation $\Sigma \rightarrow \Gamma$ during homogenization in 7MO super austenitic stainless steel. *Journal of materials research and technology*, 26, 999-1005. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.07.221>

