

MODELADO NUMÉRICO COMPARATIVO DEL COMPORTAMIENTO ESFUERZO–DEFORMACIÓN Y DE LA DUREZA VICKERS EN ACEROS DIFUNDIDOS CON CARBURO DE SILICIO

COMPARATIVE NUMERICAL MODELING OF STRESS–STRAIN BEHAVIOR AND VICKERS HARDNESS IN SILICON CARBIDE- DIFFUSED STEELS

José Luis Pérez Rojas¹, Omar Sebastián Muñoz Merino², Diego Fernando Mayorga Pérez³,
María Verónica Albuja Landi⁴

{jose.perezl@esPOCH.edu.ec¹, omar.munoz@esPOCH.edu.ec², dmayorga@esPOCH.edu.ec³, maria.albuja@esPOCH.edu.ec⁴}

Fecha de recepción: 28/05/2026 / Fecha de aceptación: 24/06/2026 / Fecha de publicación: 08/07/2026

RESUMEN: Este trabajo presenta un estudio experimental y numérico sobre el efecto de la difusión de carbono en estado sólido, también conocida como cementación, en las propiedades mecánicas del acero AISI 1018. El tratamiento termoquímico se aplicó a probetas sometidas a temperaturas de 850 °C, 900 °C y 950 °C, con un tiempo de permanencia constante de 3 horas, empleando mezclas cementantes compuestas por grafito, carburo de silicio (SiC) y activadores a base de carbonato de sodio y carbonato de calcio, considerando dos niveles de concentración de carbono. El objetivo fue evaluar la influencia de la temperatura y de la concentración de carbono sobre la dureza Vickers y el comportamiento esfuerzo–deformación del material. La metodología incluyó ensayos de dureza Vickers con una carga de 1 kgf, pruebas de tracción y reconstrucción de datos experimentales mediante los métodos de interpolación de Lagrange y Newton. Los resultados evidenciaron un incremento de la dureza superficial y de la resistencia mecánica después del tratamiento, acompañado de una reducción progresiva de la ductilidad. La condición de 900 °C con alta concentración de carbono presentó el mejor desempeño en términos de dureza, mientras que las curvas esfuerzo–deformación

¹Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador, <https://orcid.org/0000-0002-8958-5556>; +593984185765

²Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador, <https://orcid.org/0009-0002-0933-4966>; +593992540183.

³Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador, <https://orcid.org/0000-0003-1731-9723>; +593999729389.

⁴Facultad de Mecánica, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Ecuador, <https://orcid.org/0000-0002-5959-1429>; +593993599252.

mostraron mayor resistencia en las probetas tratadas a temperaturas elevadas. Se concluye que la cementación por difusión en estado sólido mejora el desempeño mecánico del acero AISI 1018 y que los métodos de interpolación utilizados permiten representar adecuadamente la tendencia experimental.

Palabras clave: cementación, difusión de carbono, acero AISI 1018, dureza Vickers, esfuerzo–deformación, interpolación numérica

ABSTRACT: This work presents an experimental and numerical study on the effect of solid-state carbon diffusion, also known as carburizing, on the mechanical properties of AISI 1018 steel. The thermochemical treatment was applied to specimens subjected to temperatures of 850 °C, 900 °C, and 950 °C, with a constant holding time of 3 hours, using carburizing mixtures composed of graphite, silicon carbide (SiC), and activators based on sodium carbonate and calcium carbonate, considering two carbon concentration levels. The objective was to evaluate the influence of temperature and carbon concentration on Vickers hardness and the stress–strain behavior of the material. The methodology included Vickers hardness tests with a load of 1 kgf, tensile tests, and reconstruction of experimental data using Lagrange and Newton interpolation methods. The results showed an increase in surface hardness and mechanical strength after the treatment, accompanied by a progressive reduction in ductility. The 900 °C condition with high carbon concentration showed the best hardness performance, while the stress–strain curves indicated higher strength in specimens treated at elevated temperatures. It is concluded that solid-state diffusion carburizing improves the mechanical performance of AISI 1018 steel and that the interpolation methods used adequately represent the experimental trend.

Keywords: carburizing, carbon difusión, AISI 1018 steel, Vickers hardness, stress–strain, numerical interpolation

INTRODUCCIÓN

Los tratamientos de difusión, como la incorporación de cerámicos o carburos en aceros, son útiles para mejorar propiedades del material tales como la resistencia al desgaste, la dureza y el comportamiento frente a esfuerzos. Sin embargo, se requiere un análisis capaz de modelar e interpretar los datos obtenidos experimentalmente, como la curva esfuerzo–deformación o la dureza Vickers, parámetros de gran importancia por su capacidad para correlacionarse con las propiedades mecánicas del material (1).

El estudio de la curva esfuerzo–dureza, así como de la dureza Vickers, permite cuantificar la resistencia mecánica y la dureza del material después del tratamiento, lo cual resulta relevante para caracterizar el material posterior a la difusión. No obstante, los datos experimentales no siempre siguen un patrón lineal o de interpretación directa, ya que condiciones como la heterogeneidad de la difusión, las diferencias en la estructura del acero o las condiciones térmicas pueden producir valores dispersos (12). Por ello, el uso de métodos numéricos es fundamental para aproximar funciones que describan el comportamiento del material analizado (13).

La regresión polinómica y la interpolación mediante polinomios de Lagrange permiten obtener una aproximación de una curva a partir de datos experimentales. La regresión polinómica ajusta un polinomio que minimiza el error entre la función estimada y los datos experimentales (14). En cambio, la interpolación de Lagrange genera un polinomio que pasa por cada punto obtenido experimentalmente, preservando de esta manera los datos registrados en el laboratorio (16).

Este estudio tiene como objetivo aplicar la regresión polinómica y la interpolación polinómica de Lagrange para aproximar modelos que describan la curva esfuerzo–dureza y la dureza

Vickers en aceros tratados mediante difusión de zirconia y carburo de silicio (3). Los datos experimentales se obtienen a partir de mediciones realizadas después de someter probetas de acero a un proceso de difusión superficial, seguido de ensayos de dureza Vickers (15). Con base en estos valores, el estudio busca analizar las propiedades del material y predecir las propiedades mecánicas derivadas del tratamiento mediante métodos numéricos (2).

La importancia de este artículo radica en la posibilidad de estimar el comportamiento mecánico de un material después del tratamiento sin requerir un número excesivo de ensayos experimentales (17). El desarrollo de un modelo confiable permite reducir tiempos y costos, así como optimizar tratamientos como la difusión en estado sólido o los tratamientos térmicos. Además, se verifica la conexión entre los métodos numéricos y sus aplicaciones prácticas en ingeniería mecánica, demostrando cómo los métodos propuestos pueden utilizarse para caracterizar un material (18).

MATERIALES Y MÉTODOS

Interpolación numérica

La interpolación numérica es un procedimiento matemático que construye una función continua a partir de un conjunto finito de datos discretos. Su propósito es aproximar el comportamiento de un fenómeno físico cuando la relación funcional exacta es desconocida o difícil de modelar. En ingeniería, la interpolación es esencial para procesar datos experimentales, estimar valores intermedios y analizar tendencias en sistemas mecánicos, térmicos, eléctricos y de materiales (5).

Los métodos de interpolación polinómica buscan construir un polinomio de grado n que pase exactamente por $n + 1$ puntos dados. Este tipo de interpolación es útil para reconstruir curvas, como las curvas esfuerzo–deformación, en las que los datos suelen provenir de ensayos de laboratorio y pueden estar distribuidos de forma escasa o no uniforme (4).

Polinomio de interpolación de Lagrange

El método de interpolación de Lagrange define un polinomio de la forma:

$$P_n(x) = \sum_{i=0}^n y_i L_i(x) \quad (1)$$

donde $L_i(x)$ representa el i -ésimo polinomio base de Lagrange, definido por:

$$L_i(x) = \prod_{\substack{j=0 \\ j \neq i}}^n \frac{x - x_j}{x_i - x_j} \quad (2)$$

Este método no requiere el cálculo de diferencias divididas y proporciona una expresión cerrada del polinomio interpolante. Sin embargo, sus principales desventajas son el alto costo computacional y la inestabilidad numérica para valores grandes de n . Además, todo el polinomio debe reevaluarse cada vez que se añade un nuevo punto, lo cual limita su eficiencia.

A pesar de ello, su aplicación sigue siendo relevante cuando el conjunto de datos es relativamente pequeño y se requiere una expresión analítica explícita y exacta del polinomio interpolante. En este caso, se emplea para representar la interpolación de Lagrange a partir de los datos experimentales procesados en MATLAB.

Polinomio de interpolación de Newton

El método de Newton utiliza diferencias divididas para construir el polinomio interpolante:

$$P_n(x) = a_0 + a_1(x - x_0) + a_2(x - x_0)(x - x_1) \quad (3)$$

donde los coeficientes a_k se obtienen mediante la tabla de diferencias divididas. Este método es computacionalmente más eficiente que el método de Lagrange, especialmente cuando se incorporan nuevos datos, ya que permite actualizar el polinomio sin recalcularlo completamente desde el inicio.

Además, la forma progresiva del polinomio reduce el riesgo de inestabilidad numérica y facilita la implementación de métodos numéricos en software. Por estas razones, el método de Newton suele preferirse en aplicaciones donde la cantidad de datos es considerable o cuando se requiere una actualización continua del polinomio. En este trabajo, su implementación se realiza con apoyo de código desarrollado en MATLAB.

Curva esfuerzo–deformación

La curva esfuerzo–deformación describe la relación entre el esfuerzo aplicado (σ) y la deformación resultante (ϵ) en un material sometido a carga (19). Esta curva contiene regiones que representan distintas etapas del comportamiento mecánico:

- **Zona elástica:** región en la que el material recupera su forma original cuando se retira la carga.
- **Límite de fluencia:** punto en el cual comienza la deformación permanente.

- **Zona plástica:** región en la que la deformación aumenta de manera significativa ante pequeños incrementos de esfuerzo (20).
- **Punto de cedencia:** inicio de una deformación plástica apreciable.
- **Resistencia última:** esfuerzo máximo soportado antes de la fractura.
- **Fractura:** falla final del material.

La construcción precisa de esta curva es esencial para determinar propiedades mecánicas, diseñar componentes estructurales y evaluar fallas de materiales (21). Cuando los datos experimentales presentan vacíos o ruido, la interpolación polinómica permite generar una curva suave y continua que facilita el análisis (6).

Dureza Vickers

La dureza Vickers es una medida de la resistencia de un material a la indentación, determinada mediante la aplicación de una carga controlada sobre un indentador de diamante con forma piramidal (22). La dureza se calcula mediante:

$$HV = \frac{1,8544 F}{d^2} \quad (4)$$

donde:

- F es la carga aplicada.
- d es la longitud promedio de las diagonales de la huella de indentación:

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (5)$$

La interpolación numérica resulta útil en este contexto porque los valores de indentación pueden no ser perfectamente continuos o pueden requerir estimaciones en regiones donde no se tomaron mediciones (23). Además, permite comparar cómo distintos modelos matemáticos influyen en la estimación final de la dureza (7).

Importancia de comparar los métodos de Lagrange y Newton

La comparación entre los métodos de Lagrange y Newton es importante debido a sus diferencias en estabilidad, eficiencia y precisión. En el análisis de materiales:

- Una curva esfuerzo–deformación mal interpolada puede conducir a errores en propiedades críticas.
- La dureza Vickers, al depender de mediciones sensibles, puede verse afectada por interpolaciones inestables.
- La elección del método numérico puede influir en las conclusiones experimentales y en el diseño de ingeniería.

Una evaluación comparativa de ambos métodos permite identificar cuál resulta más adecuado para reconstruir curvas a partir de datos experimentales reales, contribuyendo así a mejorar la confiabilidad del análisis mecánico (24).

RESULTADOS

Determinación de la dureza Vickers (HV)

En esta sección se presentan los cálculos obtenidos a partir de las distintas indentaciones realizadas en el laboratorio, considerando las diagonales promedio de cada huella y utilizando las ecuaciones (4) y (5). Se calcularon los valores promedio por probeta, los cuales se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados del ensayo de dureza Vickers para acero AISI 1018 sometido a tratamiento de difusión de carbono

Probeta	HV promedio	N
850 °C – Alta concentración de carbono	171.54	2
850 °C – Baja concentración de carbono	155.42	2
900 °C – Alta concentración de carbono	208.83	2
900 °C – Baja concentración de carbono	194.60	2
950 °C – Alta concentración de carbono	194.32	2
950 °C – Baja concentración de carbono	163.72	2

Fuente: Los autores.

Es importante señalar que el valor promedio de dureza permite representar con mayor precisión el comportamiento mecánico del material después del proceso de difusión. Los mayores valores de dureza se encuentran en las probetas tratadas a 950 °C, tanto para alta como para baja concentración de carbono, lo que indica un mejor desempeño posterior a dicho tratamiento (25). La probeta con alta concentración de carbono presenta el comportamiento más favorable.

Gráficas de dureza Vickers

Los resultados que se presentan a continuación corresponden a gráficas comparativas de las curvas de dureza generadas mediante los métodos de interpolación de Lagrange y Newton, con el propósito de examinar su comportamiento y concordancia en la representación de los datos experimentales, enfatizando las gráficas que muestran mejor desempeño (26).

En las gráficas correspondientes a la interpolación de la dureza Vickers mediante el método de Lagrange, la curva roja representa el comportamiento de las probetas con alta concentración de carbono, mientras que la curva azul corresponde a las probetas con baja concentración de carbono (8).

Al interpolar la dureza Vickers mediante el método de Newton, la curva rosada representa las

probetas con alta concentración de carbono, mientras que la curva verde ilustra las probetas con baja concentración de carbono (27).

Los puntos experimentales se identifican mediante marcadores sólidos del mismo color de cada curva, lo que permite reconocer con precisión el impacto del contenido de carbono en la variación de la dureza superficial después del tratamiento termoquímico.

La distinción cromática entre las dos técnicas facilita la comparación directa de los resultados obtenidos por Newton y Lagrange, permitiendo evaluar la estabilidad y consistencia de cada interpolación respecto de los datos experimentales.

Dureza Vickers a 850 °C mediante interpolación de Lagrange. La Figura 1 presenta el perfil interpolado de dureza Vickers para la probeta tratada a 850 °C.

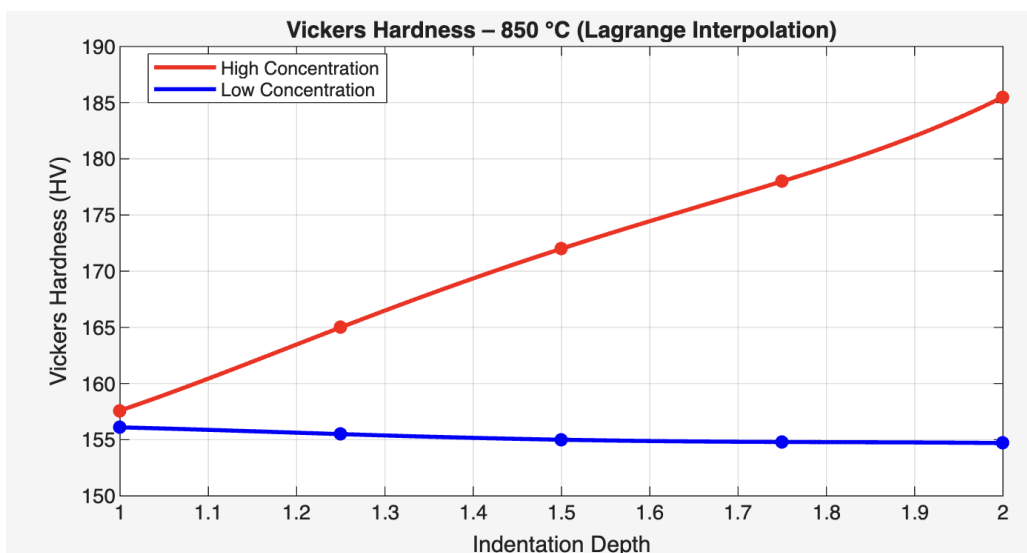


Figura 1. Dureza Vickers a 850 °C mediante interpolación de Lagrange.

Fuente: Los autores.

Dureza Vickers a 850 °C mediante interpolación de Newton. La Figura 2 presenta el perfil interpolado de dureza Vickers para la probeta tratada a 850 °C.

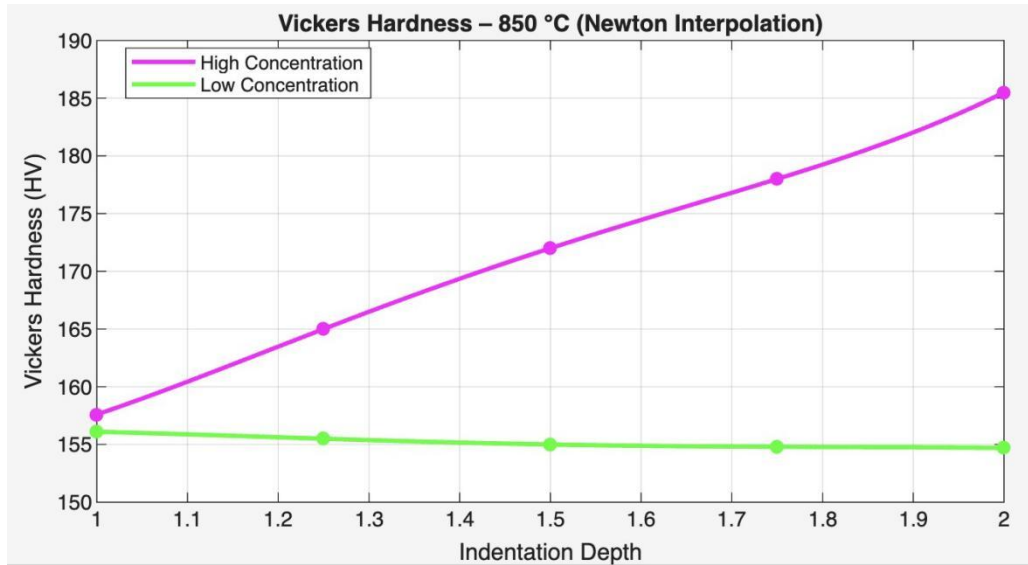


Figura 2. Dureza Vickers a 850 °C mediante interpolación de Newton

Fuente: Los autores.

Dureza Vickers a 900 °C mediante interpolación de Lagrange. La Figura 3 presenta el perfil interpolado de dureza Vickers para la probeta tratada a 900 °C.

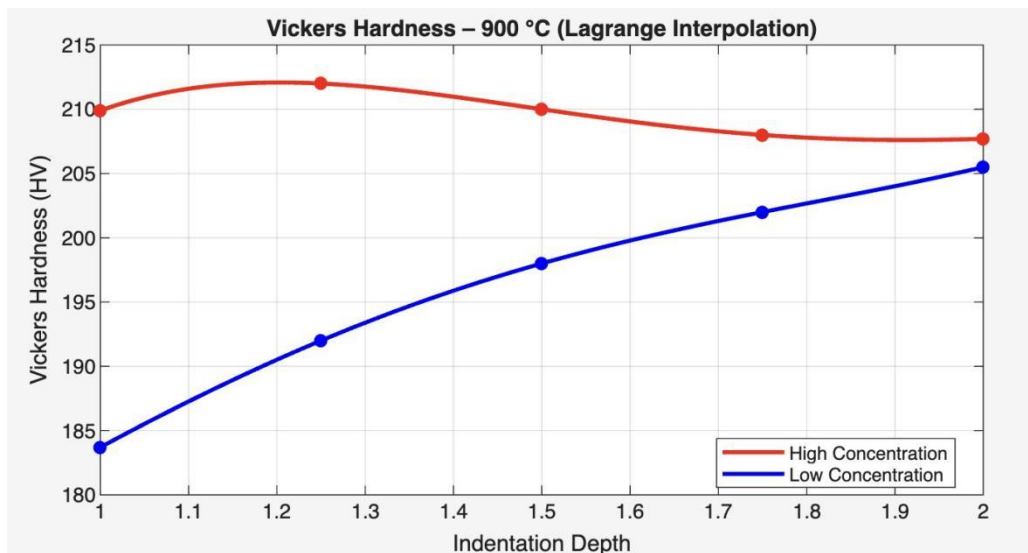


Figura 3. Dureza Vickers a 900 °C mediante interpolación de Lagrange

Fuente: Los autores.

Dureza Vickers a 900 °C mediante interpolación de Newton. La Figura 4 presenta el perfil interpolado de dureza Vickers para la probeta tratada a 900 °C.

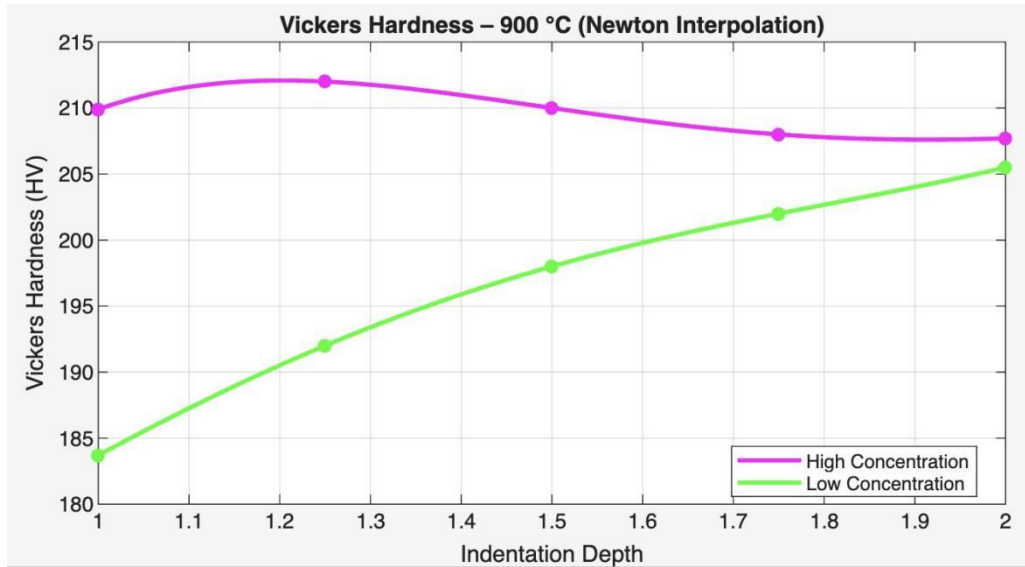


Figura 4. Dureza Vickers a 900 °C mediante interpolación de Newton

Fuente: Los autores.

Dureza Vickers a 950 °C mediante interpolación de Lagrange. La Figura 5 presenta el perfil interpolado de dureza Vickers para la probeta tratada a 950 °C.

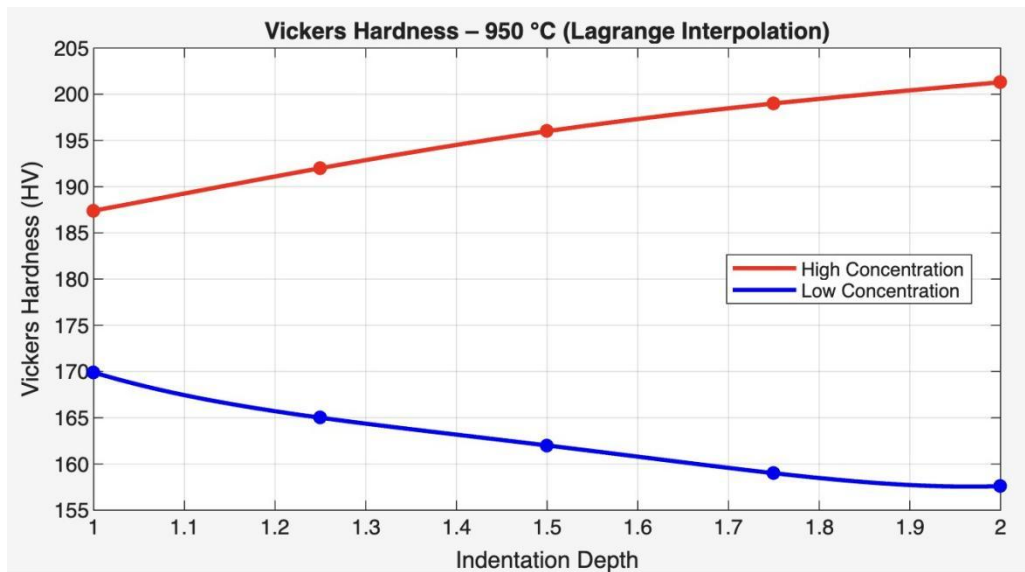


Figura 5. Dureza Vickers a 950 °C mediante interpolación de Lagrange

Fuente: Los autores.

Dureza Vickers a 950 °C mediante interpolación de Newton. La Figura 6 presenta el perfil interpolado de dureza Vickers para la probeta tratada a 950 °C.

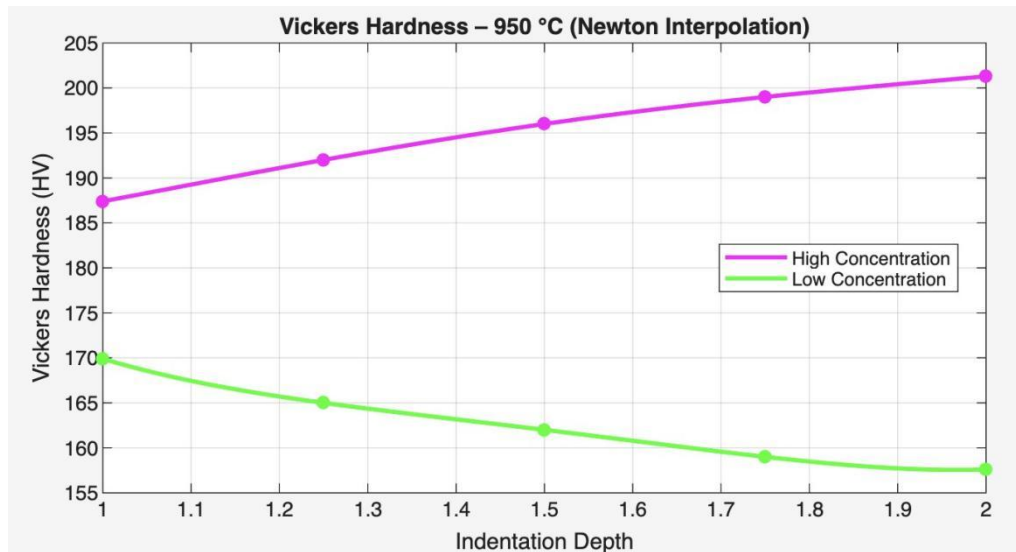


Figura 6. Dureza Vickers a 950 °C mediante interpolación de Newton

Fuente: Los autores.

Obtención y visualización de la curva esfuerzo–deformación

La curva esfuerzo–deformación se obtiene a partir de un ensayo de tracción, en el cual una probeta se somete a una carga axial creciente hasta su fractura. Durante el ensayo se registran la fuerza aplicada y el alargamiento del material, a partir de los cuales se calculan el esfuerzo normal y la deformación.

La representación gráfica del esfuerzo en función de la deformación permite analizar el comportamiento mecánico del material, identificando una región elástica inicial y una región plástica asociada con deformaciones permanentes. A partir de esta curva se determinan propiedades mecánicas como el límite elástico, la resistencia última y la deformación a la fractura (22).

En el caso del acero AISI 1018 cementado, el tratamiento termoquímico modifica la respuesta mecánica del material, generando un aumento de la resistencia y cambios en la ductilidad debido al endurecimiento superficial.

Las Figuras 7 y 8 muestran las curvas esfuerzo–deformación obtenidas mediante los métodos de interpolación de Lagrange y Newton para las condiciones de 850 °C, 900 °C y 950 °C. Ambas gráficas presentan una tendencia similar: 850 °C muestra los menores valores de esfuerzo, 900 °C una respuesta intermedia y 950 °C los mayores valores, lo que evidencia una buena concordancia entre los dos métodos de interpolación.

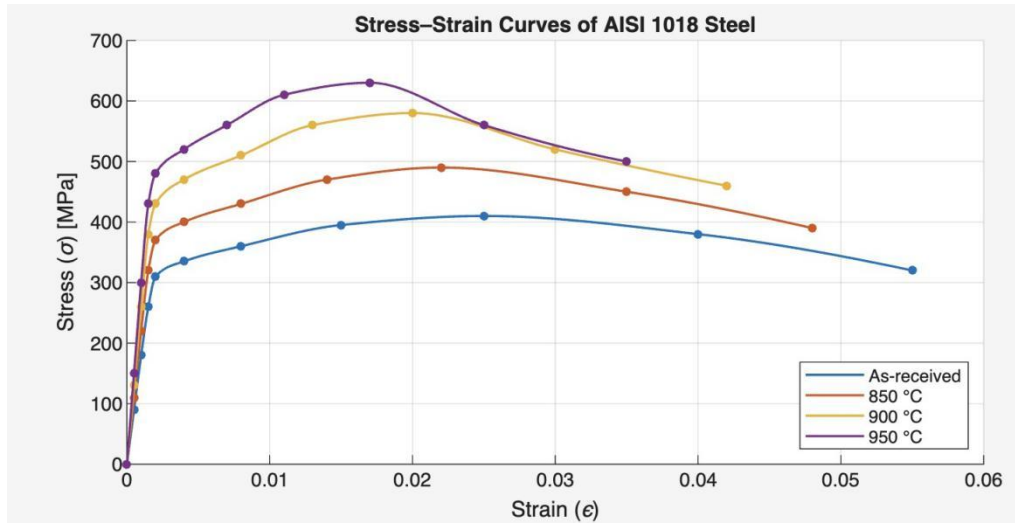


Figura 7. Curvas esfuerzo–deformación mediante interpolación de Lagrange

Fuente: Los autores.

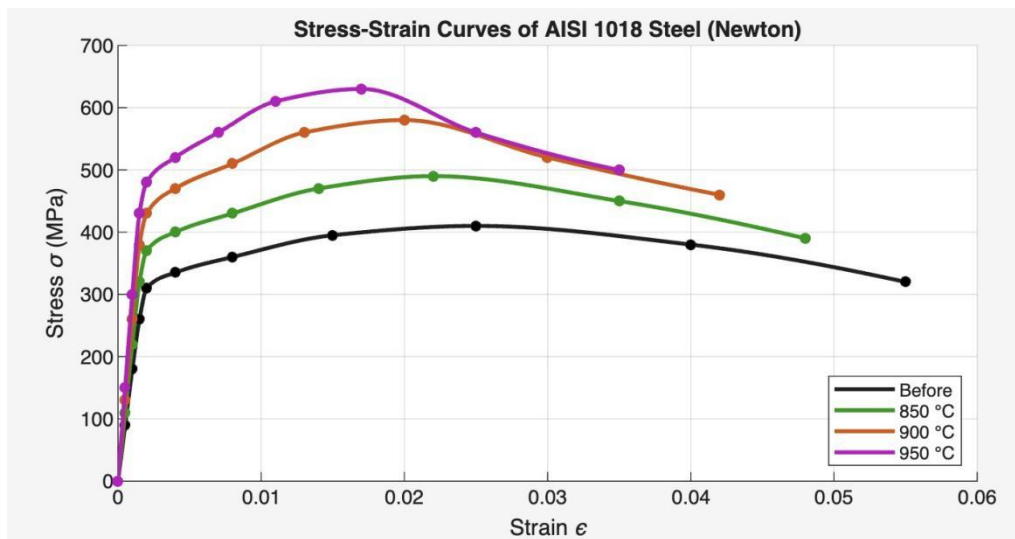


Figura 8. Curvas esfuerzo–deformación mediante interpolación de Newton

Fuente: Los autores.

DISCUSIÓN

El endurecimiento superficial del material se realizó mediante difusión en estado sólido, o cementación, sobre probetas circulares de acero AISI 1018 con diámetro de 1/2 pulgada. Las probetas fueron sometidas a tratamientos térmicos a 850 °C, 900 °C y 950 °C, con un tiempo de permanencia constante de 3 h. Para cada temperatura se emplearon dos concentraciones de carbono, baja y alta, utilizando una probeta por concentración y manteniendo constante la

masa total de la mezcla cementante en 60 g por probeta.

La mezcla cementante estuvo compuesta por grafito, carburo de silicio (SiC) y un activador formado por carbonato de sodio y carbonato de calcio. La concentración baja se definió como 15 % de activador, 50 % de grafito y 35 % de SiC, mientras que la concentración alta correspondió a 15 % de activador, 50 % de SiC y 35 % de grafito.

El ensayo de dureza Vickers se realizó utilizando una carga de 1 kgf, lo cual permitió evaluar el endurecimiento superficial inducido por el proceso de cementación sin afectar de manera significativa el núcleo del material.

Efecto de la temperatura de cementación

Los valores de dureza Vickers obtenidos muestran una tendencia general de incremento conforme aumenta la temperatura de tratamiento. A 850 °C, los valores promedio de dureza son relativamente bajos, lo que indica que la difusión de carbono ocurre de manera limitada debido a la menor movilidad atómica.

Al incrementar la temperatura a 900 °C, se observa un aumento significativo de la dureza Vickers, alcanzándose los valores promedio más altos del estudio. Este comportamiento sugiere que dicha temperatura proporciona condiciones óptimas para la difusión de carbono, favoreciendo la formación de una capa superficial endurecida sin generar efectos microestructurales adversos.

Para el tratamiento a 950 °C, aunque la dureza se mantiene elevada en comparación con la obtenida a 850 °C, no se evidencia un aumento proporcional respecto de los valores registrados a 900 °C. Este resultado puede atribuirse al crecimiento de grano o a una posible saturación de carbono en la superficie, lo que limita incrementos adicionales de dureza.

Efecto de la concentración de carbono

La comparación entre probetas tratadas con baja y alta concentración de carbono muestra que la alta concentración conduce consistentemente a mayores valores de dureza Vickers para una misma temperatura. Esto se debe a la mayor disponibilidad de carbono activo proporcionada por el mayor contenido de grafito en la mezcla cementante, lo cual incrementa el gradiente de concentración y promueve el proceso de difusión hacia el acero (9).

Sin embargo, las diferencias entre concentraciones no son excesivamente pronunciadas, lo que indica que el tiempo constante de tratamiento de 3 horas actúa como factor limitante sobre la profundidad de la capa cementada, incluso cuando la disponibilidad de carbono es mayor (7).

Repetibilidad del ensayo

Cada valor promedio de dureza fue obtenido a partir de dos indentaciones por probeta, aplicando la misma carga de 1 kgf, con variaciones moderadas entre mediciones individuales. Estas variaciones pueden atribuirse a heterogeneidades locales en la capa cementada, diferencias

microestructurales superficiales o ligeras imprecisiones en la medición de las diagonales de indentación Vickers. No obstante, los valores promedio permiten identificar claramente las tendencias generales del endurecimiento superficial.

Los resultados confirman que la cementación por difusión en estado sólido incrementa significativamente la dureza superficial del acero AISI 1018 de 1/2 pulgada, siendo este incremento dependiente de la temperatura de tratamiento y de la concentración de carbono en la mezcla cementante. El ensayo de dureza Vickers realizado con una carga de 1 kgf permitió evaluar adecuadamente el endurecimiento superficial del material. La condición de 900 °C con alta concentración de carbono presentó el mejor desempeño en términos de dureza, mientras que temperaturas mayores no produjeron incrementos proporcionales, resaltando la importancia de controlar los parámetros del proceso.

Análisis y discusión de la curva esfuerzo–deformación

A partir de los ensayos de tracción realizados en probetas de acero AISI 1018 sometidas a difusión de carbono en estado sólido, se generaron curvas esfuerzo–deformación mediante interpolación polinómica de Lagrange y Newton (18). Estas curvas permiten evaluar el efecto del tratamiento termoquímico sobre el comportamiento mecánico del material y analizar la aplicabilidad de ambos métodos numéricos en la reconstrucción de datos experimentales (10).

El análisis comparativo de las curvas correspondientes a las temperaturas de 850 °C, 900 °C y 950 °C, en relación con la probeta sin tratamiento, evidencia una relación directa entre la temperatura de difusión y la resistencia mecánica del acero.

La probeta tratada a 950 °C presenta el mayor esfuerzo último, con un valor aproximado de 630 MPa, en contraste con el acero previo a la difusión, cuyo esfuerzo máximo es cercano a 410 MPa. Este incremento se atribuye a una mayor difusión de carbono a temperaturas austeníticas elevadas, lo cual genera un endurecimiento superficial significativo, característico de los procesos de cementación sólida.

De manera inversa, se observa una reducción progresiva de la ductilidad conforme aumenta la temperatura. Mientras que la probeta sin tratamiento alcanza una deformación a la fractura cercana a $\epsilon \approx 0,05$, la probeta tratada a 950 °C se fractura alrededor de $\epsilon \approx 0,025$, lo que indica un comportamiento más rígido y una menor capacidad de deformación plástica. Esta pérdida de ductilidad se asocia con el endurecimiento superficial y con la formación de micro-estructuras más finas en la capa enriquecida con carbono, lo cual puede limitar su desempeño en aplicaciones sometidas a cargas dinámicas (17).

Las probetas tratadas a 850 °C y 900 °C presentan valores intermedios de resistencia y deformación, confirmando la naturaleza progresiva del tratamiento y mostrando una relación más equilibrada entre resistencia y ductilidad.

Comparación de métodos numéricos: Lagrange vs. Newton

Los métodos de interpolación de Lagrange y Newton permitieron reconstruir de forma continua

las curvas esfuerzo–deformación a partir de datos discretos, reproduciendo adecuadamente tanto la región elástica como la región plástica del material. No se observaron diferencias significativas entre las curvas obtenidas por ambos métodos, lo cual es coherente con el hecho de que ambos generan el mismo polinomio interpolante que pasa por los puntos experimentales (11).

A pesar de la posible inestabilidad numérica del método de Lagrange para polinomios de alto grado, las curvas obtenidas fueron suaves y estables dentro del intervalo analizado, lo que indica una selección y distribución apropiada de los datos experimentales. No obstante, desde el punto de vista computacional, el método de Newton ofrece una ventaja práctica, ya que permite incorporar nuevos puntos sin recalculer completamente el polinomio, característica conveniente en estudios experimentales iterativos.

Los resultados obtenidos confirman que el tratamiento por difusión en estado sólido incrementa significativamente la resistencia mecánica del acero AISI 1018, a costa de una reducción de la ductilidad. Este comportamiento es coherente con el endurecimiento superficial inducido por la difusión de carbono a temperaturas elevadas. Además, los métodos de interpolación de Lagrange y Newton demostraron ser herramientas eficaces para modelar el comportamiento mecánico del material, siendo el método de Newton el más conveniente desde el punto de vista computacional.

CONCLUSIONES

La curva esfuerzo–deformación y los valores de dureza Vickers del acero AISI 1018 fueron determinados satisfactoriamente a partir de datos experimentales, demostrando que el proceso de cementación por difusión en estado sólido incrementa significativamente la resistencia mecánica y la dureza superficial del material, a costa de una reducción progresiva de la ductilidad. Mediante la aplicación de los métodos de interpolación de Lagrange y Newton fue posible obtener polinomios que ajustan de manera consistente los datos experimentales registrados durante los ensayos de tracción.

Las curvas esfuerzo–deformaciones generadas mediante ambos métodos de interpolación mostraron un alto grado de concordancia entre sí, confirmando que ambos enfoques son válidos para reconstruir curvas mecánicas a partir de datos discretos obtenidos experimentalmente. Los valores de dureza Vickers interpolados mediante los métodos de Lagrange y Newton mostraron diferencias mínimas, lo que indica una estabilidad numérica y una precisión adecuadas en la estimación de esta propiedad mecánica, especialmente cuando los datos experimentales se encuentran bien distribuidos.

La comparación cuantitativa del desempeño numérico permitió concluir que, aunque ambos métodos producen resultados equivalentes, el método de Newton resulta más conveniente desde el punto de vista computacional, ya que facilita la incorporación de nuevos puntos experimentales sin necesidad de recalculer todo el polinomio.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo académico de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo durante la preparación de este manuscrito.

DECLARACIÓN DE INTERÉS

Los autores declaran que no presentan conflictos de interés relevantes con el contenido de este estudio.

CONTRIBUCIONES DE AUTOR

Los autores participaron en la organización del manuscrito, revisión del contenido técnico, análisis de resultados, preparación de figuras y aprobación de la versión final del artículo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Callister WD, Rethwisch DG. Materials Science and Engineering: An Introduction. 10th ed. John Wiley & Sons; 2018.
2. Smith WF. Principles of Materials Science and Engineering. 3rd ed. McGraw-Hill; 1993.
3. Dieter GE. Mechanical Metallurgy. 3rd ed. McGraw-Hill; 1986.
4. ASM International. ASM Handbook, Volume 4: Heat Treating. ASM International; 1991.
5. ASM International. ASM Handbook, Volume 8: Mechanical Testing and Evaluation. ASM International; 2000.
6. Okwesileze IA, Okafor OC, Atanmo PN, Ekengwu IE, Uyaelumuo EI. Carburization-based optimization of AISI 8620 steel using rice husks and charcoal as carburizers. Journal of Engineering Sciences. 2022;9(2):C9–C16. doi:10.21272/jes.2022.9(2).c2
7. Huamani Flores EW, Vizcardo Huayna MA. Composición óptima de un activador natural para mejorar el endurecimiento superficial de un acero SAE 1020 (tesis). Arequipa: Uni-versidad Nacional de San Agustín de Arequipa; 2016. Disponible en: <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/1911>
8. Totten GE, Howes MAH, Inoue T. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. ASM International; 2006.
9. Krauss G. Steels: Processing, Structure, and Performance. 2nd ed. ASM International; 2015.
10. Smith CJ, Sandland GE. An accurate method of determining the hardness of metals. Pro-ceedings of the Institution of Mechanical Engineers. 1921;100(1):1–18.
11. Chapra SC, Canale RP. Numerical Methods for Engineers. 6th ed. McGraw-Hill; 2010.
12. Hasan MZ, Hussein AA, Hasan AS, Ali OM. Improvement of AISI 1018 carbon steel Gr 1018 mechanical properties by liquid carburizing in salt bath. Materials Today: Proce-dings. 2020;20. doi:10.1016/j.matpr.2019.09.179
13. Akanji OL, Fatoba OS, Aasa AS. The influence of particle size and soaking time on surface hardness of carburized AISI 1018 steel. Current Journal of Applied Science and

- Techno-logy. 2015;7(1):37–44. doi:10.9734/BJAST/2015/13552
14. Singh R, Singh LP. Effect of carburizing and normalizing on mechanical properties and machinability of AISI 1018 low carbon steel. *Industrial Engineering Journal*. 2020;13(4). doi:10.26488/IEJ.13.4.1227
15. Gordon RE, Kalu EE, Adetunji AR, Campbell D, Kalu PN. The effect of the environment on the case hardening characteristics of AISI 1018 steel during cassava leaf pack cyaniding. *Alloys*. 2024;3(1):1–14. doi:10.3390/alloys3010001
16. Adedipe O, Medupin RO, Yoro KO, Dauda ET, Aigbodion VS, Agbo NA, et al. Sustainable carburization of low carbon steel using organic additives: A review. *Sustainable Materials and Technologies*. 2023;38:e00723. doi:10.1016/j.susmat.2023.e00723
17. Ramli, Wu CC. Effective case depth and wear resistance of pack carburized SCM 420 steel processed using different concentrations of natural shell waste powders and carburizing duration. *Crystals*. 2022;12(2):296. doi:10.3390/cryst12020296
18. Kwon GH, Park H, Lee YK, Moon K. Influence of alloying elements on the carburizing behavior in acetylene atmosphere. *Metals*. 2024;14(1):29. doi:10.3390/met14010029
19. Totten GE. Pack carburizing: Properties, microstructure and modeling. In: *Encyclopedia of Iron, Steel, and Their Alloys*. Taylor & Francis; 2016. p. 1–24. doi:10.1081/E-EISA-120051080
20. Smith RL, Sandland GE. An accurate method of determining the hardness of metals, with particular reference to those of a high degree of hardness. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*. 1922;102(1):623–641. doi:10.1243/PIME_PROC_1922_102_033_02
21. Dupen BM, Morral JE, Law CC. Finite element modeling of carburizing for alloy steels. In: Hoo JJC, editor. *Creative Use of Bearing Steels*, ASTM STP 1195. ASTM International; 1993. p. 61–71. doi:10.1520/STP24824S
22. Jacquet P, Rousse DR, Bernard G, Lambertin M. A novel technique to monitor carburizing processes. *Materials Chemistry and Physics*. 2003;77(2):542–551. doi:10.1016/S0254-0584(02)00106-2
23. Wang J, Yang S, Li J, Ju D, Li X, He F, et al. Mathematical simulation and experimental verification of carburizing quenching process based on multi-field coupling. *Coatings*. 2021;11(9):1132. doi:10.3390/coatings11091132
24. Liu D, Li Y, Wang Z, Wang Y, Wang Y. Modeling and analysis of effective case depth on meshing strength of internal gear transmissions. *Mathematical Problems in Engineering*. 2018;2018:5153292. doi:10.1155/2018/5153292
25. Liang R, Wang Z, Yang S, Chen W. Study on hardness prediction and parameter optimization for carburizing and quenching: an approach based on FEM, ANN and GA. *Materials Research Express*. 2021;8(11):116501. doi:10.1088/2053-1591/ac3279
26. Berrut JP, Trefethen LN. Barycentric Lagrange interpolation. *SIAM Review*. 2004;46(3):501–517. doi:10.1137/S0036144502417715
27. Higham NJ. The numerical stability of barycentric Lagrange interpolation. *IMA Journal of Numerical Analysis*. 2004;24(4):547–556. doi:10.1093/imanum/24.4.547