



Optimización de parámetros de procesos térmicos de herramientales para la fabricación de piezas automotrices

Optimization of thermal process parameters for tooling for the manufacture of automotive parts

Alejandro Cortez Cortez

Ingeniería Electromecánica
TecNM- campus Instituto Tecnológico de Delicias/Depto. de Ciencias Básicas
Delicias, Chihuahua, México

Rocio Daniela Orrantia Quiñonez

Ingeniería Electromecánica/Instituto Tecnológico de Delicias
TecNM- campus Instituto Tecnológico de Delicias
Delicias, Chihuahua, México

Elian Ernesto Leyva

Ingeniería Electromecánica/Instituto Tecnológico de Delicias
TecNM- campus Instituto Tecnológico de Delicias
Delicias, Chihuahua,

RESUMEN

En el estado de Chihuahua se han consolidado los procesos relacionados con la fabricación de herramientas para la industria automotriz, donde el factor de la precisión determina la calidad de los componentes finales del automóvil. El objetivo de la presente investigación es probar el efecto de la reducción en la temperatura de calentamiento, manteniendo un tiempo de permanencia constante de 30 minutos en la duración del temple, en la correlación entre la temperatura de austenización y la estabilidad dimensional del acero AISI 416. Mediante un análisis comparativo entre 990 °C y 1010 °C, se busca establecer un parámetro de proceso que minimice la deformación plástica y las tensiones residuales térmicas, utilizando como medio de temple aceite **Vulcan Park 50**. Los resultados muestran que la temperatura de 1000 °C presenta la mayor dureza promedio (43.17 HRC) para los tres diámetros evaluados (25.46 mm, 12.62 mm y 9.5 mm), en comparación con temperaturas de 990 °C, 1005 °C y 1010 °C. Se concluye que 1000 °C es la temperatura óptima de austenización para el acero AISI 416, minimizando la deformación plástica y las tensiones residuales sin comprometer la dureza requerida para herramientas automotrices.

Palabras clave: tratamiento térmico, acero inoxidable AISI 416, dureza, austenización, herramientas automotrices.

ABSTRACT

In the state of Chihuahua, processes related to the manufacture of tooling for the automotive industry have been consolidated, where the precision factor determines the quality of the final components of the automobile. The objective of this research is to test the effect of reducing the heating temperature, while maintaining a constant holding time of 30 minutes during the quenching process, on the correlation between the austenitizing temperature and the dimensional stability of AISI 416 steel. Through a comparative analysis between 990 °C and 1010 °C, the aim is to establish a process parameter that minimizes plastic deformation and thermal residual stresses, using **Vulcan Park 50** oil as the quenching medium. The results show that the temperature of 1000 °C exhibits the highest average hardness (43.17 HRC) for the three diameters evaluated (25.46 mm, 12.62 mm, and 9.5 mm), compared to temperatures of 990 °C, 1005 °C, and 1010 °C. It is concluded that 1000 °C is the optimal

austenitizing temperature for AISI 416 stainless steel, minimizing plastic deformation and residual stresses without compromising the hardness required for automotive tooling.

Keywords: *heat treatment, AISI 416 stainless steel, hardness, austenitizing, automotive tooling, heat treatment, AISI 416 stainless steel, hardness, austenitizing, automotive tooling.*

Received 08 Apr., 2026; Revised 18 Apr., 2026; Accepted 20 Apr., 2026 © The author(s) 2026.

Published with open access at www.questjournals.org

I. INTRODUCCIÓN

La industria automotriz en el estado de Chihuahua representa uno de los nodos socioprodutivos más dinámicos de la manufactura avanzada en México, destacando por su transición hacia procesos de alta complejidad técnica en la fabricación de herramientas de precisión. De acuerdo con el Instituto Nacional de Estadística y Geografía, el dinamismo exportador de la entidad alcanzó niveles históricos en el primer trimestre de 2025, aportando el 16% del valor total de las exportaciones nacionales en el subsector de equipo de transporte (INEGI, 2025). Esta especialización funcional no es casualidad, sino el resultado de una infraestructura robusta que, para mayo de 2025, integraba 3,637 unidades económicas vinculadas a la cadena de suministro automotriz y metalmecánica (INEGI, 2025). En términos de impacto laboral y competitividad, la Secretaría de Innovación y Desarrollo Económico reportó que este sector sostiene 180,412 empleos formales, lo que representa el 19% de la ocupación total en el estado, consolidando a Chihuahua como un líder en la captación de Inversión Extranjera Directa (IED) destinada a la modernización tecnológica (CHIHUAHUA, 2025).

La fabricación de herramientas de precisión se erige, por tanto, como el componente crítico que garantiza la calidad y la repetibilidad en las líneas de ensamble global, así como los aspectos relacionados con las especificaciones de metrología (Díaz, Valencia & Vasco, 2024). Por esto, el sector demanda herramientas con elevada precisión dimensional y dureza superficial para garantizar la calidad de los componentes fabricados. Uno de los materiales, mas ampliamente en la fabricación de estos herramientas es el acero inoxidable martensítico AISI 416, debido a su maquinabilidad superior y respuesta favorable al tratamiento térmico de temple. Sin embargo, la selección inadecuada de la temperatura de austenización puede generar deformaciones plásticas y tensiones residuales que afectan tanto la dureza final como la estabilidad dimensional de las piezas.

La temperatura de austenización óptima para el acero AISI 416 se ubica en un rango entre 980 °C y 1010 °C (ASM International, 2002). La variación en este rango puede producir diferencias significativas en la microestructura martensítica resultante y, por ende, en las propiedades mecánicas finales. Particularmente en piezas de diferentes diámetros, la tasa de enfriamiento puede variar, afectando la transformación de fase y la dureza obtenida.

El objetivo de este estudio es determinar la temperatura de austenización óptima en el rango de 990 °C a 1010 °C para el acero inoxidable AISI 416, evaluando su efecto sobre la dureza Rockwell C en muestras cilíndricas de tres diámetros distintos (25.46 mm, 12.62 mm y 9.5 mm), con el fin de establecer parámetros de proceso que minimicen la deformación plástica y las tensiones residuales en herramientas para la industria automotriz.

II. MARCO TEÓRICO

El acero inoxidable martensítico AISI 416 es una aleación de cromo (12-14%) con adición de azufre para mejorar su maquinabilidad. Su microestructura en estado recocido consiste principalmente en ferrita y carburos de cromo. Mediante el tratamiento térmico de temple, el material se austeniza a temperaturas entre 980 °C y 1010 °C, y posteriormente se enfría rápidamente en aceite, obteniendo una estructura martensítica de alta dureza (ASM International, 2002). El proceso de temple comprende tres etapas fundamentales: calentamiento hasta la temperatura de austenización, permanencia a dicha temperatura para homogeneizar la microestructura, y enfriamiento rápido en un medio de temple. La temperatura de austenización determina el grado de disolución de carburos en la austenita y, como consecuencia, el contenido de carbono disponible para la formación de martensita, lo que impacta directamente en la dureza final (Lakhtin, 1998).

2.1 LUGAR DONDE SE REALIZO LA INVESTIGACION

Fundada en el año 2009 en Ciudad Delicias, Chihuahua, la empresa SEMAIN inició sus operaciones como un taller de servicios, evolucionando con un firme ímpetu de crecimiento hasta consolidarse como un proveedor especializado en la industria automotriz. Actualmente, la organización se distingue por ofrecer soluciones integrales que abarcan desde la fase estratégica de diseño hasta la certificación final de herramientas de precisión, enfocándose particularmente en el área de mangueras curvas automotrices. Con sede en la Carretera

Delicias-Rosetilla Km 1, SEMAIN ha logrado integrar capacidades técnicas avanzadas para satisfacer las demandas de un mercado globalizado y altamente exigente.

2.2 EQUIPO IMPLEMENTADO

El Durómetro de la marca ASIMETO es una herramienta esencial para medir la dureza de materiales en una variedad de aplicaciones industriales (Figuras 1 y 2). Diseñado con precisión y durabilidad, este durómetro es ideal para profesionales que buscan resultados confiables y repetibles en sus mediciones de dureza. Las mediciones en el estudio se realizaron con este aparato, antes del tratamiento y después del tratamiento.

Figura 1. Durometro parte inferior



Fuente: Propia

Figura 2. Durometro parte superior



Fuente: Propia

También se utilizó un horno de tratamiento térmico, que es un equipo que utiliza un grupo de procesos térmicos en aplicaciones industriales y metalúrgicas, ideales para alterar intencionalmente las propiedades físicas, y a veces químicas, de un material (Figura 3). El uso principal de este proceso es ablandar un material para mejorar la maquinabilidad, el trabajo en frío o para mejorar las propiedades eléctricas o mecánicas.

Las propiedades físicas y químicas deseadas de la pieza de trabajo se logran mediante técnicas de tratamiento térmico como el recocido, el endurecimiento de la carcasa, la precipitación, el fortalecimiento, el temple, la normalización y el enfriamiento.

En este proceso, el acero se calienta a una temperatura específica y luego se enfría rápidamente. Si el material se calienta se forma una estructura más suave pero más resistente.

2.3 TIPOS DE TRATAMIENTOS TÉRMICOS

Los tratamientos térmicos aplicables a materiales ferrosos se clasifican en térmicos (temple, revenido y recocido en sus variantes de regeneración, globular, ablandamiento, homogenización, recristalización, isotérmico y normalizado) y termomecánicos-superficiales (cementación, nitrurado, cianuración y carbonitrurado). El ciclo de acabado para aceros herramienta comprende: recocido de eliminación de esfuerzos, pre-calentamiento en tres etapas (400 °C, 650 °C y 900 °C a razón de 30 s/mm), calentamiento hasta temperatura de temple, austenización, temple, tratamiento sub-cero de estabilización (-100 °C) y hasta tres ciclos de revenido. Este protocolo multi-etapa es esencial para minimizar gradientes térmicos y distorsión dimensional en piezas de sección variable (Morales, PRODLINE, 2025).

Figura 4. Horno de tratamientos térmicos



Fuente: Propia

2.4 DIAGRAMAS TTT Y CCT – TRANSFORMACIÓN DE FASE

El diagrama TTT (Temperatura–Tiempo–Transformación) representa las transformaciones isotérmicas de la austenita como función del tiempo a temperatura constante, con la clásica forma de “C”, nariz de perlita a ~550 °C y línea Ms de inicio de martensita alrededor de 230 °C para el acero eutectoide. El diagrama CCT (Transformación de Enfriamiento Continuo) representa el comportamiento de la austenita bajo enfriamiento continuo: velocidades altas (≥ 298 °C/s) producen martensita pura, velocidades intermedias generan mezclas bainita + martensita y velocidades lentas producen ferrita + perlita. Las temperaturas críticas del acero AISI 416 (~0.14% C, 13% Cr) se calculan como: $A_{c1} \approx 682$ °C, $A_{c3} \approx 778$ °C y $M_s \approx 296$ °C, confirmando que las temperaturas de austenización empleadas (990–1010 °C) se encuentran bien por encima de A_{c3} , garantizando la austenización completa del material antes del temple (Morales, PRODLINE, 2025).

2.5 DEFECTOS CRISTALINOS Y SU INFLUENCIA EN PROPIEDADES

Los cristales reales contienen imperfecciones que afectan propiedades físicas, mecánicas, ópticas, eléctricas y magnéticas. Se clasifican en: defectos puntuales o de dimensión cero (vacancia, átomo intersticial, sustitucional, defecto de Frenkel y de Schottky); defectos lineales o de una dimensión (dislocaciones de borde y

de tornillo, base del endurecimiento por deformación plástica); y defectos de dos dimensiones (bordes de grano, maclas y superficies externas, que actúan como barreras para el movimiento de dislocaciones). Estos defectos influyen en la capacidad de formación de aleaciones en frío, la conductividad eléctrica y la resistencia a la corrosión (Morales, PRODLINE, 2025).

2.6 MECANISMOS DE ENDURECIMIENTO

Los principales mecanismos de endurecimiento son: (a) **Solución sólida**: los átomos de cromo (12–14%) en el AISI 416 actúan como elementos sustitucionales generando distorsión en la red que dificulta el movimiento de dislocaciones; (b) **Tamaño de grano (Hall-Petch)**: los bordes de grano actúan como barreras para dislocaciones; temperaturas de austenización excesivas (>1010 °C) promueven crecimiento de grano austenítico y reducen la dureza, lo que explica la superioridad de 1000 °C respecto a temperaturas mayores; (c) **Transformación de fase (martínsita)**: mecanismo dominante en este estudio. La transformación martínítica es una transformación de corte sin difusión que ocurre al enfriar la austenita por debajo de M_s (~296 °C para el AISI 416), produciendo una solución sólida sobresaturada de carbono en hierro con estructura tetragonal centrada en el cuerpo (BCT). La temperatura de austenización controla cuánto carbono de los carburos de cromo pasa a solución sólida, determinando directamente la dureza de la marténsita resultante (Lakhtin, 1998; Morales, PRODLINE, 2025).

2.7 DIAGRAMA DE FASES FE-12%CR-C

El diagrama de sección transversal para el sistema Fe-12%Cr-C permite identificar las fases estables en función de temperatura y contenido de carbono. Para el AISI 416 (~0.14% C), la zona austénica (γ) se encuentra entre aproximadamente 1000 °C y 1200 °C, fundamentando el rango de temperaturas evaluado en este estudio (990–1010 °C). Por debajo de ~900 °C existe la región bifásica ($\alpha+\gamma$) y la presencia de carburos de cromo (C_m) en equilibrio con la austenita justifica la importancia de la temperatura de austenización para controlar la disolución de carburos y el contenido de carbono en solución sólida (Thum, 1935; Morales, PRODLINE, 2025).

2.8 PARÁMETROS DE REFERENCIA DEL ACERO AISI 416

El acero AISI 416 es una aleación de cromo (12–14%) con adición de azufre (mín. 0.15%) para mejorar su maquinabilidad mediante la formación de sulfuros de manganeso (MnS). Sus parámetros de referencia consolidados son: temperatura de austenización 980–1010 °C, temple en aceite, temperatura de revenido típica 350 °C, dureza esperada post-temple 37–41 HRC (con revenido), M_s calculada ~296 °C, A_{c1} ~682 °C y A_{c3} ~778 °C. Estos valores son consistentes con los parámetros de proceso validados en planta por SEMAIN S.A. de C.V. (ASM International, 2002; Morales, PRODLINE, 2025).

III. METODOLOGÍA

Se empleó un diseño experimental comparativo con muestras de acero inoxidable AISI 416 en tres diámetros: Diámetro 1 = 25.46 mm, Diámetro 2 = 12.62 mm y Diámetro 3 = 9.5 mm. Para cada diámetro se realizaron tratamientos térmicos a cuatro temperaturas de austenización: 990 °C, 1000 °C, 1005 °C y 1010 °C, con un tiempo de permanencia constante de 30 minutos. El medio de temple utilizado fue aceite Vulcan Park 50. La dureza fue medida mediante el método Rockwell C (HRC) antes del temple (condición ambiente) y después del temple para cada combinación de diámetro y temperatura. Los ensayos se realizaron en SEMAIN S.A. DE C.V.

Procedimiento Experimental:

1. Mediciones de la dureza inicial (condición ambiental / sin temple) de cada muestra mediante el Durometro ASIMETO HR-150 en escala Rockwell C.
2. Programación del horno a la temperatura de austenización correspondiente y espera hasta estabilización del control digital.
3. Introducción de la muestra al horno y permanencia durante 30 minutos a la temperatura de temple seleccionada.
4. Extracción y temple inmediato en aceite Vulcan Park 50 para enfriamiento rápido.
5. Enfriamiento a la temperatura ambiente y medición de la dureza Rockwell C post-temple.
6. Registro de resultados y calcular la media por temperatura para los 3 diámetros.
- 7.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Dureza Inicial – Material Sin Templar

Las muestras A en condición sin temple presentaron bajas durezas características del estado recocido del AISI 416, confirmando la microestructura ferrita + carburos de cromo sin tratamiento previo:

4.2 Resultados por Temperatura de Austenización

Muestra	Diámetro (mm)	Temperatura	Dureza (HRC)
Diámetro 1	25.46	Ambiente	13
Diámetro 2	12.62	Ambiente	11
Diámetro 3	9.50	Ambiente	15

Tabla 1

4.2 Resultados por Temperatura de Austenización

Dureza Rockwell C (HRC) post-temple por temperatura y diámetro

Muestra	990 °C	1000 °C	1005 °C	1010 °C
Diámetro 1 – 25.46 mm	41.5	43.5	42.0	42.5
Diámetro 2 – 12.62 mm	41.5	44.0	42.5	42.0
Diámetro 3 – 9.50 mm	40.0	42.0	41.5	41.0
Promedio HRC	41.00	43.17	42.00	41.83
Incremento vs. sin templear	+28.0	+30.2	+29.0	+28.9

Tabla 2

En la última fila el incremento promedio en HRC comparado con el material sin templear. Al realizar un Análisis Metalúrgico obtenemos resultados de comportamiento a 990 °C. En esta temperatura, el diagrama Fe-12%Cr-C indica una disolución incompleta de carburos de cromo en la austenita. Conforme a los mecanismos de endurecimiento estudiados, el contenido de carbono en solución sólida en la austenita es subóptimo, resultando en una martensita con menor tetragonalidad de red BCT. Esto explica la menor dureza promedio de 41.0 HRC obtenida en esta condición.

El comportamiento a 1000 °C es la Temperatura Óptima, representa el punto de balance óptimo entre: la disolución máxima de carburos de cromo en la austenita, el control del crecimiento de grano austenítico, y la minimización de tensiones residuales térmicas. El resultado es la mayor dureza promedio: 43.17 HRC, superando incluso el límite superior de la especificación de referencia de SEMAIN (37–41 HRC). Este resultado es consistente con el endurecimiento por transformación de fase documentado por PRODLINE (2025), que es el mecanismo que incrementa simultáneamente dureza, resistencia a la tensión, ductilidad y resistencia a alta temperatura.

El comportamiento a 1005 °C y 1010 °C que está por encima de 1000 °C, el crecimiento de grano austenítico comienza a ser significativo (efecto Hall-Petch negativo), reduciendo marginalmente la densidad de bordes de grano disponibles como sitios de nucleación de martensita. Adicionalmente, el exceso de carbono disuelto puede estabilizar la austenita retenida, cuya presencia reduce la dureza global de la microestructura. La temperatura de 1010 °C corresponde al parámetro de referencia del fabricante SEMAIN para el AISI 416, ajustado a medios de presión de aire; en aceite Vulcan Park 50 y sin revenido, 1000 °C resulta superior.

Efecto del Diámetro 2 (12.62 mm) presenta consistentemente la mayor dureza a 1000 °C (44 HRC), debido a que su relación masa/superficie produce una velocidad de enfriamiento en aceite que maximiza la fracción de martensita formada. El Diámetro 1 (25.46 mm) muestra mayor inercia térmica, con enfriamiento más lento en el núcleo. El Diámetro 3 (9.5 mm), con menor masa, experimenta un enfriamiento más rápido, pero también una mayor exposición superficial que puede generar oxidación superficial leve durante el calentamiento, afectando marginalmente las mediciones de dureza Rockwell en superficie.

Comparación con Parámetros de Referencia y Marco Teórico

Fuente	Temperatura	Dureza esperada	Medio de temple	Revenido
SEMAIN (referencia en planta)	1010 °C	37–41 HRC	Aire (presión)	350 °C / 15 min

Fuente	Temperatura	Dureza esperada	Medio de temple	Revenido
Este estudio – 990 °C	990 °C	41.0 HRC prom.	Aceite Vulcan Park 50	Sin revenido
Este estudio – 1000 °C (óptimo)	1000 °C	43.17 HRC prom.	Aceite Vulcan Park 50	Sin revenido
Este estudio – 1005 °C	1005 °C	42.0 HRC prom.	Aceite Vulcan Park 50	Sin revenido
Este estudio – 1010 °C	1010 °C	41.83 HRC prom.	Aceite Vulcan Park 50	Sin revenido
ASM International (2002)	980–1010 °C	37–41 HRC	Aceite	Recomendado

Tabla 3

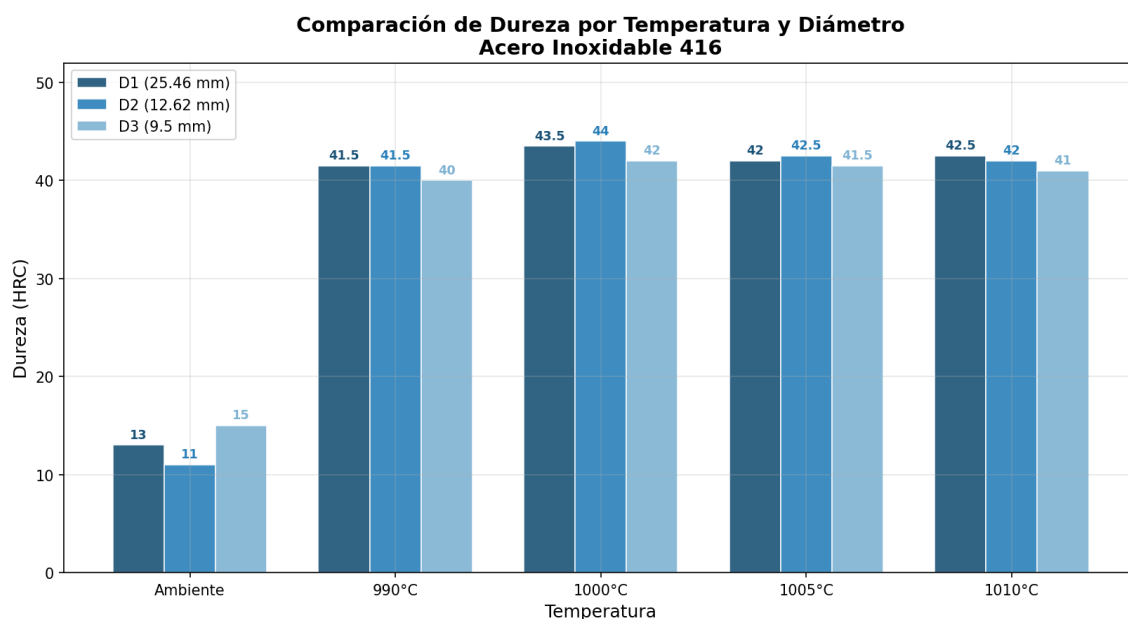
Los resultados experimentales superan la especificación mínima de referencia en todas las condiciones evaluadas. La condición de 1000 °C sin revenido alcanza una dureza que excede el rango ASM (37–41 HRC), lo que indica que la aplicación de un revenido posterior a 350 °C, tal como recomienda SEMAIN, reduciría esta dureza dentro del rango especificado, mejorando simultáneamente la tenacidad y reduciendo las tensiones residuales térmicas, lo cual es crítico para herramientas sometidos a esfuerzos cíclicos.

V. CONCLUSIÓN

El presente estudio, complementado con los fundamentos avanzados de metalurgia física del Grupo de Consultoría PRODLIN, S.A. de C.V., determinó que: La temperatura óptima de austenización para el acero AISI 416 en herramientas automotrices es 1000 °C, con 30 minutos de permanencia y temple en aceite Vulcan Park 50, alcanzando una dureza promedio de 43.17 HRC. El mecanismo de endurecimiento dominante es la transformación martensítica (transformación de fase), que según los datos de PRODLIN (2025) produce mejoras simultáneas en dureza, resistencia a la tensión, ductilidad, conductividad eléctrica y resistencia a alta temperatura. Las ecuaciones de temperaturas críticas permiten calcular $M_s \approx 296 \text{ °C}$ para el AISI 416, confirmando que el enfriamiento en aceite desde 1000 °C cruza esta temperatura con velocidad suficiente para obtener martensita. Las temperaturas de 1005 °C y 1010 °C promueven crecimiento de grano austenítico (efecto Hall-Petch negativo) y mayor fracción de austenita retenida, reduciendo marginalmente la dureza respecto a 1000 °C. La temperatura de 990 °C resulta en disolución incompleta de carburos de cromo, limitando el contenido de carbono en solución sólida y la tetragonalidad de la martensita resultante. Se recomienda aplicar un revenido posterior a 350 °C / 15 min (según protocolo SEMAIN) para aliviar tensiones residuales y mejorar la tenacidad del herramienta sin comprometer la dureza mínima especificada.

Comparación de Dureza por Barras Agrupadas

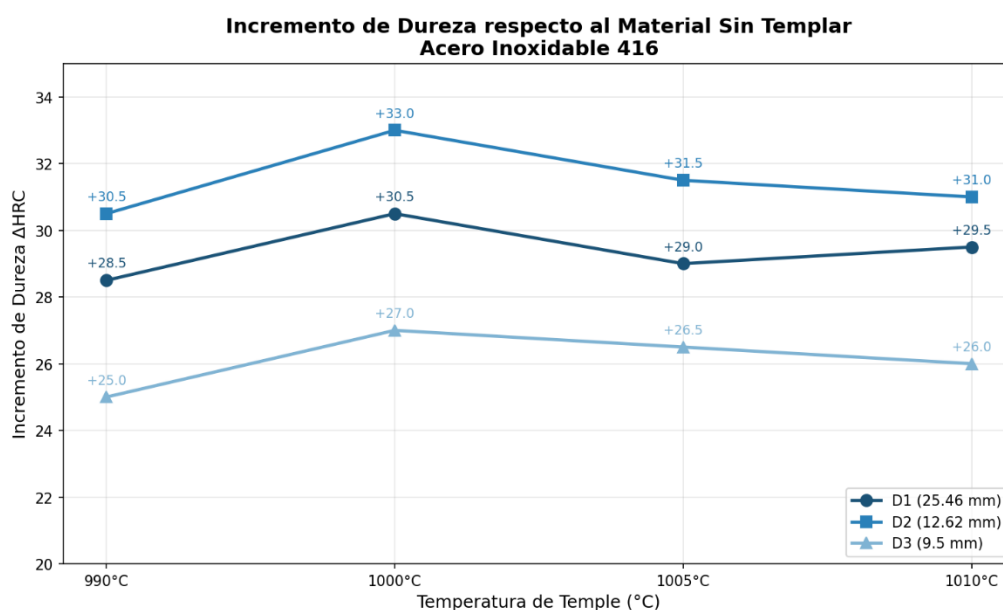
La gráfica de barras agrupadas permite una comparación directa entre diámetros a cada temperatura de tratamiento, evidenciando la pequeña diferencia relativa entre diámetros y la consistencia del efecto de la temperatura.



Gráfica de la comparación de dureza de los 3 diámetros antes y después del temple

Incremento de Dureza Δ HRC respecto al Material Base

Esta gráfica muestra el incremento neto de dureza producido por el temple, excluyendo el valor basal de cada diámetro, lo que permite comparar el efecto tratamiento independientemente de la dureza inicial.



Gráfica de medición de dureza del material sin templar

Para trabajos futuros se recomienda: (a) evaluar el efecto del tiempo de permanencia (15–45 min) a 1000 °C; (b) cuantificar la deformación dimensional mediante metrología de precisión antes y después del temple; (c) analizar la microestructura mediante microscopía óptica y electrónica para verificar la fracción de austenita retenida; y (d) ampliar el estudio a otros aceros herramienta empleados en SEMAIN (O1, D2).

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a SEMAIN S.A. DE C.V., al TecNM – campus Instituto Tecnológico de Delicias, al Departamento de Ciencias Básicas y al Departamento de Metal-Mecánica por el apoyo y las facilidades otorgadas para la realización de los experimentos de tratamiento térmico en sus instalaciones. Se agradece especialmente al Grupo de Consultoría PRODLINE, S.A. de C.V. y a la Ing. Lizbeth Morales por el material de capacitación sobre

Tratamientos Térmicos y Superficiales Avanzados (octubre 2025), cuyo contenido enriquece el marco teórico del presente informe.

REFERENCIAS

- [1]. ASM INTERNATIONAL. *ASM Handbook, Vol. 4: Heat Treating*. Materials Park, OH: ASM International, 2002.
- [2]. ASHBY, M. F.; JONES, D. R. H. *Engineering Materials 1*. 2. ed. [S.l.]: Elsevier, 1996.
- [3]. ASIMETO CALIBRATION LAB. *Calibration Certificate – Rockwell Hardness Tester, Part No. 640-01-0, S/N 0702*. Certificado ISO 17025, CNAS L6295. [S.l.: s.n., s.f.].
- [4]. BRICK, R. M. et al. *Structure and Properties of Engineering Materials*. New York: McGraw-Hill, 1977.
- [5]. CHIHUAHUA. Secretaría de Innovación y Desarrollo Económico. **Perfil Automotriz y de Manufactura Avanzada 2025**. Chihuahua: SIDE, 2025.
- [6]. INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. **Exportaciones Trimestrales por Entidad Federativa (ETEF): datos del primer trimestre de 2025**. Aguascalientes: INEGI, 2025.
- [7]. INEGI. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. **Directorio Estadístico Nacional de Unidades Económicas (DENUE): actualización de mayo de 2025**. Aguascalientes: INEGI, 2025.
- [8]. JIMÉNEZ, J. C. D.; PÉREZ, L. R. V.; LEAL, J. F. V. Metrología industrial en la industria automotriz: identificación de problemáticas en Querétaro, México. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], v. 10, n. 9, p. e72972, 2024. DOI: 10.34117/bjdv10n9-038. Disponible en: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BRJD/article/view/72972>. Aceso el: 20 ene 2026.
- [9]. LAKHTIN, Y. *Engineering Physical Metallurgy and Heat Treatment*. Moscow: Mir Publishers, 1998.
- [10]. MORALES, L. **Tratamientos Térmicos y Superficiales Avanzados – Módulo I: Fundamentos avanzados de metalurgia física**. Actividades de capacitación. [S. l.]: Grupo de Consultoría PRODLIN, S.A. de C.V., oct. 2025.
- [11]. SEMAIN S.A. DE C.V. **Tabla de Tratamiento Térmico – Materiales herramienta (O1, D2, Inox 416, Inox 1417-PH)**: Documento interno de planta. [S. l.: s. n.], [s. f.].
- [12]. THUM, E. E. *Book of Stainless Steels*. 2. ed. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 1935.
- [13]. BAIN, E. C.; PAXTON, H. W. *Alloying Elements in Steel*. 2. ed. Metals Park, Ohio: American Society for Metals, 1966.
- [14]. CALLISTER, W. D.; RETHWISCH, D. G. *Materials Science and Engineering: An Introduction*. 10. ed. Hoboken, NJ: Wiley, 2018.
- [15]. DIETER, G. E. *Mechanical Metallurgy*. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1986.
- [16]. HONEYCOMBE, R. W. K.; BHADESHIA, H. K. D. H. *Steels: Microstructure and Properties*. 4. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2017.
- [17]. KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. *Manufacturing Engineering and Technology*. 7. ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2014.
- [18]. KRAUSS, G. *Steels: Processing, Structure, and Performance*. 2. ed. Materials Park, OH: ASM International, 2015.
- [19]. LIDE, D. R. (ed.). *CRC Handbook of Chemistry and Physics*. 90. ed. Boca Ratón, FL: CRC Press, 2010.
- [20]. MESQUITA, R. A. (ed.). *Tool Steels: Properties and Performance*. Boca Ratón, FL: CRC Press, 2017.
- [21]. MORITO, S. et al. The morphology and crystallography of lath martensite in Fe-C alloys. *Acta Materialia*, Oxford, v. 51, n. 6, p. 1789–1799, 2003. DOI: 10.1016/S1359-6454(02)00577-3.
- [22]. OHLERT, J.; SCHMITT, J. H. Effect of austenitizing temperature on the microstructure and hardness of martensitic stainless steels. *Journal of Materials Science*, New York, v. 38, n. 2, p. 311–320, 2003.
- [23]. OUTEIRO, J. C. et al. Residual stresses in turning of hard steels: effects of cutting conditions and workpiece geometry. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Paris, v. 55, n. 1, p. 111–116, 2006. DOI: 10.1016/S0007-8506(07)60375-6.
- [24]. PADILHA, A. F.; RIOS, P. R. Decomposition of austenite in austenitic stainless steels. *ISIJ International*, Tokyo, v. 42, n. 4, p. 325–341, 2002. DOI: 10.2355/isijinternational.42.325.
- [25]. PORTER, D. A.; EASTERLING, K. E.; SHERIF, M. Y. *Phase Transformations in Metals and Alloys*. 3. ed. Boca Ratón, FL: CRC Press, 2009.
- [26]. REED-HILL, R. E.; ABBASCHIAN, R. *Physical Metallurgy Principles*. 3. ed. Boston, MA: PWS-Kent, 1992.
- [27]. SCHINDLER, I. et al. Influence of heat treatment on mechanical properties of AISI 420 martensitic stainless steel. *Metalurgija*, Zagreb, v. 57, n. 3, p. 197–200, 2018.
- [28]. SHACKELFORD, J. F. *Introduction to Materials Science for Engineers*. 8. ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson, 2015.
- [29]. SILVA, A. L. V. C.; MEI, P. R. *Aços e Ligas Especiais*. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2010.

- [30]. **TOTTEN, G. E. (ed.).** *Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies*. 2. ed. Boca Ratón, FL: CRC Press, 2007.
- [31]. **VANDER VOORT, G. F. (ed.).** *ASM Handbook, Vol. 9: Metallography and Microstructures*. Materials Park, OH: ASM International, 2004.
- [32]. **ZHANG, Z. et al.** Carbide dissolution behavior and its effect on hardness and corrosion resistance of 12Cr martensitic stainless steel during austenitization. *Materials Science and Engineering: A*, Amsterdam, v. 748, p. 1–10, 2019. DOI: 10.1016/j.msea.2019.01.100.