



Influencia del tiempo y temperatura en la capa nitrurada Influence of Time and Temperature on the Nitrided Layer

M. Á. Lugo Bustos ^a, R. A. Alameda López ^b

^aÁrea Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

^bÁrea Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Instituto de Ciencias Básicas e Ingeniería, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

Resumen

Este trabajo analiza la formación de capas endurecidas en acero AISI H13 mediante el proceso de nitruración gaseosa, enfocado en la influencia del tiempo de exposición y la temperatura sobre las características obtenidas. Las muestras fueron previamente tratadas térmicamente por medio de temple y revenido para garantizar una estructura base homogénea. Posteriormente, se sometieron a diferentes condiciones de nitruración, evaluando el espesor de la capa, así como las durezas superficial y del núcleo. Los resultados mostraron que una mayor duración del tratamiento no siempre implica mejoras en la dureza; de hecho, se identificó un punto crítico a partir del cual la dureza comienza a disminuir por efecto de la difusión excesiva de nitrógeno. Las pruebas de microdureza permitieron establecer una correlación clara entre los parámetros del proceso y el comportamiento mecánico del material, lo que proporciona lineamientos útiles para optimizar su rendimiento en aplicaciones industriales exigentes.

Palabras Clave: Nitruración gaseosa, Acero AISI H13, Profundidad de capa, Dureza superficial, Tratamiento térmico.

Abstract

This study evaluates the development of hardened surface layers on AISI H13 steel through gas nitriding, focusing on how exposure time and temperature affect the resulting mechanical properties. The specimens were previously subjected to quenching and tempering to ensure a uniform base microstructure. Different nitriding conditions were applied to assess the resulting case depth, surface hardness, and core hardness. Findings revealed that extended treatment times do not always improve hardness; in fact, a critical point was observed beyond which hardness begins to decline due to excessive nitrogen diffusion. Microhardness tests enabled a clear correlation between process parameters and mechanical performance, offering practical guidelines for optimizing surface treatment in high-demand industrial applications.

Keywords: Gas nitriding, AISI H13 steel, Case depth, Surface hardness, Heat treatment.

1. Introducción

El acero AISI H13 es reconocido por su desempeño destacado en procesos de trabajo en caliente, tales como la fabricación de moldes para inyección y herramientas de forja, debido a su resistencia a la fatiga térmica, tenacidad y estabilidad a altas temperaturas (Patharkar & Patil, 2025; Xu et al., 2020). La composición química de este acero, que incluye elementos como cromo, molibdeno y vanadio, contribuye a mejorar su dureza superficial y resistencia al desgaste, haciéndolo especialmente apto para tratamientos térmicos como la nitruración gaseosa.

El proceso de nitruración con amoníaco comienza con la disociación térmica del NH_3 , produciendo nitrógeno atómico que se difunde en la superficie del acero (Patharkar & Patil,

2025). Este nitrógeno se incorpora en la ferrita alfa y reacciona con el hierro para formar nitruros estables, principalmente $\epsilon\text{-Fe}_2\text{-}_3\text{N}$ y $\gamma'\text{-Fe}_4\text{N}$, responsables del aumento inicial en dureza superficial (Patharkar & Patil, 2025). Posteriormente, se forma una zona de difusión bajo la capa compuesta, donde el nitrógeno penetra más profundamente, mejorando la resistencia al desgaste y la fatiga (Zagonel et al., 2012). Esta estructura bimodal —capa blanca y zona de difusión— permite un balance adecuado entre dureza y ductilidad.

Estudios recientes han mostrado que la dureza superficial máxima, alrededor de 70 HRC (dureza Rockwell, escala C), se alcanza típicamente a temperaturas entre 520 °C y 550 °C con tiempos de tratamiento superiores a 10 horas (Patharkar & Patil, 2025; Xu et al., 2020). Investigaciones actuales confirman que el control del potencial de nitrógeno y/o del

*Autor para la correspondencia: lu362302@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: lu362302@uaeh.edu.mx Autor (Miguel Angel Lugo Bustos), al420069@uaeh.edu.mx Autor (Rubi Adela Alameda López)

grado de disociación del NH_3 modula de forma crítica el crecimiento de la capa compuesta y la respuesta en dureza, especialmente al extender tiempos y temperaturas intermedias-altas (Zhou et al., 2023; Frączek et al., 2024).

Sin embargo, exposiciones más prolongadas o capas excesivamente gruesas pueden provocar una disminución en la dureza, tanto superficial como en el núcleo, debido a la sobresaturación de nitrógeno y la redistribución de elementos endurecedores (Zagonel et al., 2012; *Materials Science & Engineering A*, 2023). Resultados recientes en H13 muestran, además, que el sobre desarrollo de la capa compuesta puede degradar propiedades en servicio (p. ej., fatiga), reforzando la necesidad de identificar un umbral de tratamiento práctico (Lee et al., 2025).

Aunque existen múltiples tratamientos térmicos y termoquímicos aplicables al acero H13, como el temple y revenido, la nitruración por plasma o los recubrimientos por PVD, la nitruración gaseosa ofrece ventajas notables: permite un control uniforme de la atmósfera reactiva, favorece una difusión gradual del nitrógeno, y presenta costos operativos menores, además de ser aplicable a componentes con geometrías complejas sin necesidad de descargas eléctricas (ASM International, 2018; Davis, 2000). A diferencia de la nitruración por plasma y de recubrimientos PVD, la nitruración gaseosa permite (i) control uniforme del potencial de nitrógeno, (ii) costos operativos menores y escalabilidad, y (iii) tratamiento de geometrías complejas sin descarga ni línea de vista, lo que resulta especialmente útil en troqueles y moldes de trabajo en caliente (Zhou et al., 2023).

Pese a su uso extendido, pocos estudios han analizado sistemáticamente la influencia combinada del tiempo y la temperatura sobre el equilibrio entre dureza superficial, tenacidad del núcleo y espesor de capa nitrurada, variables críticas para la durabilidad de moldes y troqueles en servicio. Esta brecha de conocimiento limita la posibilidad de optimizar el tratamiento para condiciones industriales específicas. La literatura reciente sugiere además que el régimen de atmósfera (NH_3 puro vs. mezclas con H_2/N_2) afecta el espesor y la morfología de la capa, por lo que definir ventanas operativas es clave para evitar sobrecrecimiento y pérdidas de dureza (Frączek et al., 2024).

En este contexto, el presente estudio analiza de manera sistemática el efecto del espesor de la capa nitrurada y su efecto en la dureza superficial y del núcleo del acero AISI H13, evaluando cinco condiciones experimentales con diferentes combinaciones de tiempo y temperatura. Con base en estos resultados, se establece un umbral crítico de tratamiento a partir del cual la dureza máxima comienza a decaer; y se propone un rango operativo que preserva la tenacidad del núcleo (p. ej., ≥ 53 HRC) a la vez que maximiza la dureza superficial (≈ 70 HRC), ofreciendo lineamientos prácticos para la nitruración gaseosa del H13 en aplicaciones industriales exigentes (Patharkar & Patil, 2025; *Materials Science & Engineering A*, 2023; Sun et al., 2020; Lee et al., 2025; Zhou et al., 2023).

A diferencia de estudios que analizan variables de forma aislada, este trabajo evalúa conjuntamente tiempo–

temperatura–disociación y propone un umbral operativo que maximiza la dureza superficial sin comprometer la tenacidad del núcleo, útil para troqueles y moldes.

2. Metodología

Las variables de proceso se resumen en la Tabla 1 (tiempo, temperatura, presión/atmósfera, grado de disociación de NH_3 y presencia/tiempo de difusión). A continuación se describen materiales, tratamientos y la justificación del diseño experimental.

Para la fase experimental de este estudio se emplearon probetas de acero AISI H13 con dimensiones aproximadas de $4 \text{ cm} \times 1 \text{ cm} \times 1 \text{ cm}$. Antes de la nitruración gaseosa, las muestras fueron sometidas a tratamientos térmicos con el fin de optimizar sus propiedades mecánicas. El proceso de temple consistió en calentar las probetas a $980 \text{ }^\circ\text{C}$ durante dos horas en un horno con atmósfera controlada, seguido de enfriamiento al aire. Posteriormente, se aplicó un revenido a $600 \text{ }^\circ\text{C}$ durante dos horas para aliviar tensiones internas y estabilizar la microestructura. Este acondicionamiento térmico previo aseguró una condición base homogénea para comparar objetivamente el efecto del tratamiento de nitruración (Sun et al., 2020; Huang et al., 2019).

La nitruración gaseosa se efectuó en cinco condiciones experimentales distintas, variando el tiempo, la temperatura y la presión del gas. El conjunto de parámetros por muestra (temperatura, tiempo total, presión/atmósfera, grado de disociación y etapa de difusión) se presenta primero en la Tabla 1, y enseguida se justifican los niveles de cada variable. Los parámetros específicos de cada tratamiento se definieron a partir de un diseño no lineal de tipo compuesto central, seleccionado para identificar condiciones extremas y un punto central representativo.

Justificación de los tiempos no graduales (6, 19, 25 y 30 h). Se empleó un esquema no lineal para explorar extremos y punto central con el fin de detectar umbrales de saturación de nitrógeno y la transición en la morfología de la capa; esta estrategia es más sensible que un barrido incremental uniforme para evidenciar el inicio de pérdida de dureza por sobrecrecimiento de la capa compuesta (Zhou et al., 2021; Kumar et al., 2022).

Durante todos los tratamientos se monitorearon en continuo la temperatura, la presión y el grado de disociación del NH_3 (potencial de nitrógeno) con el propósito de asegurar repetibilidad y precisión de las condiciones experimentales. Para cada condición se realizaron tres réplicas independientes a fin de garantizar consistencia estadística. Los registros de

proceso se usaron para verificar estabilidad (\pm tolerancias del equipo) y descartar corridas fuera de especificación.

Para cada condición se realizaron tres réplicas independientes; se reporta media \pm EE (o C.V. %) donde corresponde.

Tabla 1: Variables de tratamiento durante la nitruración gaseosa del acero AISI H13 en función de temperatura, presión/atmósfera y tiempo

Muestra	1	2	3	4	5
Ciclo (hrs)	6	19	25	30	25
Temperatura promedio (°C)	510	510	520	520	520
Atmósfera promedio (Pa)	498	498	747	747	623
Disociación promedio (%)	65	65	35	35	35
Difusión (S/N)	Si	Si	No	No	Si
Horas de difusión	5	4	0	0	6
Temperatura de difusión (°C)	520	520	0	0	540

* “Atmósfera promedio” expresa la presión parcial efectiva; la disociación se reporta como porcentaje promedio del lote. Las tolerancias corresponden al registro del equipo.

2.1. Metalografía

Tras completar el proceso de nitruración, las probetas fueron cortadas transversalmente mediante un sistema de corte de baja velocidad con refrigeración continua, a fin de minimizar la generación de calor y evitar alteraciones microestructurales (Zagonel et al., 2012). Las muestras se embutieron en resina fenólica (baquelita) no conductora, marca Struers, con el propósito de facilitar la manipulación durante la preparación metalográfica (Struers, 2021).

El esmerilado se realizó con papel abrasivo de carburo de silicio en una secuencia de granulometría 180, 320, 400 y 600 grit —equivalentes aproximados de 80, 46, 35 y 25 μ m, respectivamente—, seguido de pulido final con suspensiones de alúmina de 5 μ m y 1 μ m, hasta obtener una superficie tipo espejo adecuada para análisis microestructural (Xu et al., 2020). Posteriormente, se aplicó un ataque químico con nital

al 5 % (ácido nítrico + etanol), permitiendo la observación clara de la capa nitrurada bajo microscopio óptico.

Las mediciones de microdureza se efectuaron en un microdurómetro Vickers configurado con carga controlada y tiempo de aplicación constante, conforme a las normas ASTM E384-23 / ISO 6507-1. Se respetó el espaciamiento mínimo entre indentaciones (≥ 2.5 d) y un tiempo de aplicación (dwell) en el rango recomendado por la norma; las penetraciones se ubicaron desde la superficie hacia el núcleo siguiendo una línea normal a la capa.

No se restringió a una sola variable porque el desempeño de la capa nitrurada depende de la interacción entre tiempo, temperatura y disociación; el diseño no lineal permite capturar sinergias y umbrales que enfoques unifactoriales no revelan.

Las especificaciones del equipo empleado se presentan en la Tabla 2, asegurando trazabilidad y precisión de los valores obtenidos durante la caracterización (Patharkar & Patil, 2025).

Tabla 2: Características técnicas del equipo microdurómetro Vickers Akashi MVK-E

Características	Descripción
Equipo	Microdureza Vickers
Marca	AKASHI
Modelo	MVK-E
Escalas utilizadas	HV 0.5 (500 gf), HV1 (1000 gf)
Rango de carga	10 gf-1 Kgf
Aplicación de carga	Control de tiempo de carga automático motorizado
Tiempo de permanencia (s)	Ajustable; típicamente 10-15 s (conforme a norma)
Sistema óptico	Microscopio con objetivos (10 \times , 40 \times , 100 \times) y ocular micrométrico
Iluminación	Luz halógena o LED ajustable
Normas aplicables	ASTM E384-23, ISO 6507-1
Aplicaciones típicas	Medición de microdureza en metales, recubrimientos y superficies tratadas térmicamente

2.2. Dureza

Antes de aplicar cualquier tratamiento térmico (temple, revenido o nitruración), se evaluó la dureza inicial de las muestras

mediante un durómetro Brinell con carga de 3000 kgf y bola de acero de 10 mm de diámetro, conforme a la práctica estándar para aceros (ASTM E10) (EMCO-Test, 2024).

Las mediciones de dureza Rockwell C siguieron ASTM E18 / ISO 6508-1 (tiempo de aplicación 10–15 s).

Los perfiles de microdureza se obtuvieron usando el microdurómetro Vickers con carga de 1000 gf y penetrador piramidal de diamante, de acuerdo con las recomendaciones de la norma ASTM E384-23 / ISO 6507-1 para cargas en el rango 1–1000 gf. Se mantuvo una separación mínima entre huellas de ≥ 2.5 d y se documentó el dwell aplicado en cada serie de mediciones.

Tras el temple y revenido, se efectuó una segunda medición con una precarga seguida de una carga principal de 150 kgf aplicada durante 10–15 s (ZwickRoell, 2024), con el objetivo de comparar el efecto combinado de ambos tratamientos conforme a ASTM E18 / ISO 6508-1 (escala Rockwell C).

Finalmente, en el análisis de la capa nitrurada, la microdureza se midió con una carga de 500 gf, realizando tres indentaciones por posición desde la superficie hacia el núcleo, manteniendo la separación mínima normativa (≥ 2.5 d) para evitar solapamiento de zonas plastificadas. La profundidad de nitruración se definió como un criterio operativo: el punto en el que la dureza superficial disminuye ≈ 5 HRC respecto al núcleo, útil para delimitar el fin funcional de la capa endurecida en este estudio. Los valores se expresaron en las escalas Brinell (HB), Vickers (HV) y Rockwell (HRC), todas reconocidas internacionalmente para la caracterización de materiales tratados térmicamente.

3. Resultados

Tabla 3: Análisis químico del acero para herramientas H13

Elemento químico	Composición (%)
Carbón	0.39
Cromo	10.25
Molibdeno	1.43
Vanadio	1
Manganeso	0.35
Silicio	1
Fósforo	≤ 0.030
Azufre	≤ 0.030

*Fuente: ASM International, 2020

Los elementos de aleación del acero para herramientas AISI H13 desempeñan un papel decisivo en su comportamiento mecánico y térmico, determinando su respuesta ante tratamientos termoquímicos. Entre ellos, el

cromo (Cr), el molibdeno (Mo) y el vanadio (V) son los más influyentes en la estabilidad microestructural, resistencia al desgaste y dureza a altas temperaturas. El cromo, en particular, promueve la formación de carburos estables del tipo $M_{23}C_6$ y nitruros CrN, que confieren dureza superficial y resistencia a la oxidación (Xu et al., 2019). El molibdeno actúa como elemento estabilizador de la ferrita, aumentando la templabilidad y la resistencia a la fatiga térmica sin comprometer la ductilidad (Sun & Zhang, 2021). Por su parte, el vanadio contribuye a la formación de carburos finos (VC) que refinan el tamaño de grano, incrementan la resistencia al desgaste abrasivo y mejoran la respuesta a la nitruración, aunque un contenido excesivo puede inducir fragilidad intergranular (Liu et al., 2022). Este equilibrio químico explica la cantidad de nitruros posibles y la adherencia de la capa compuesta bajo diferentes atmósferas de proceso.

Variaciones en la concentración alteran el potencial de nitruración y la estabilidad de fases. Un exceso de carbono puede promover redes de carburos, elevando la dureza pero disminuyendo la resistencia a la corrosión (Johnson & Kim, 2017). Asimismo, altos contenidos de Cr o Mo pueden inducir óxidos superficiales durante el calentamiento, afectando adherencia y uniformidad de la capa nitrurada (Martínez-López et al., 2019).

3.1. Metalografía

En la Figura 1 se observan las microestructuras obtenidas tras la nitruración gaseosa del acero AISI H13 bajo diferentes combinaciones de tiempo y temperatura. La muestra M1, tratada a 510 °C durante 6 h con una disociación de amoníaco estimada en 60–70 %, no desarrolló una capa compuesta o “capa blanca”. Este resultado se explica por la alta tasa de disociación, que reduce la fracción de amoníaco activo y limita el potencial de nitrógeno disponible para formar nitruros superficiales (Smith & Jones, 2018).

La muestra M2 (19 h a 510 °C) mostró endurecimiento subsuperficial sin capa blanca visible. El mayor tiempo favoreció la penetración de N por difusión intersticial en ferrita, generando una zona de endurecimiento homogénea sin delimitación clara de ϵ ($Fe_{2-3}N$) o γ' (Fe_4N), en concordancia con lo reportado por Lee et al. (2020).

En contraste, M3, M4 y M5 (520 °C, 25–30 h, disociación 30–40 %) desarrollaron capas compuestas de espesor variable, con presencia de fases ϵ/γ' en superficie. No obstante, en M3 y M4 no se observó zona de difusión bien definida entre capa y núcleo. En M3–M4, la baja disociación y la saturación superficial favorecieron una capa compuesta densa (ϵ/γ') con gradiente inverso de N, que inhibió el desarrollo de la zona de difusión hacia la matriz. A medida que la superficie alcanza la máxima solubilidad de N, se estabiliza una capa densa y el flujo neto hacia el interior disminuye (Hernández et al., 2022). Este escenario conduce a capas más compactas pero potencialmente más frágiles si los esfuerzos residuales aumentan.

La composición de la matriz (Cr, Mo, V) favorece precipitación de CrN y VN, que incrementan dureza pero también pueden generar tensiones residuales que afecten la cohesión capa/metal base (Wang et al., 2019). Esto se aprecia en M4 y M5, donde la capa compuesta más gruesa muestra microfisuras dispersas atribuibles a expansión y sobresaturación de N.

Contraste con literatura. A diferencia de Sun et al. (2020), donde se evalúan variables aisladas, en este trabajo se analizan simultáneamente tiempo–temperatura–disociación, lo que permite identificar un umbral operativo donde el incremento de espesor deja de traducirse en mayor desempeño, aportando criterios combinados para el ajuste de proceso.

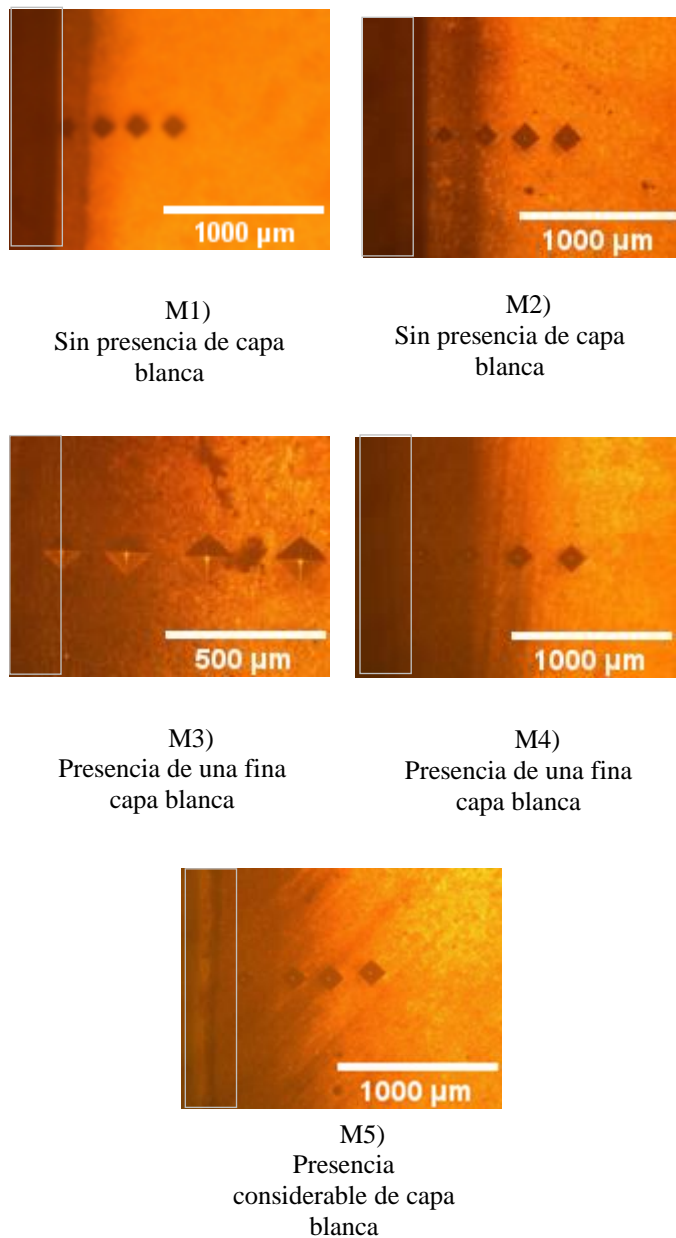


Figura 1: Micrografías metalográficas de muestras de acero AISI H13 tras el proceso de nitruración (M1–M5).

3.2. Dureza

El AISI H13 as-quenched presentó una dureza aproximada de 217 HB y 240 HV (≈ 20 HRC), consistente con una

martensita revenida antes de la nitruración (Kumar & Singh, 2021). Tras el temple y revenido, la dureza aumentó a 40–54 HRC, en línea con lo reportado por Singh et al. (2022).

Tabla 4: Condiciones de proceso y resultados obtenidos en muestras de acero H13 durante nitruración.

Muestra	1	2	3	4	5
Ciclo (hrs)	6	19	25	30	25
Temperatura promedio (°C)	510	510	520	520	520
Atmósfera promedio (Pa)	498	498	747	747	623
Disociación promedio (%)	65	65	35	35	35
Difusión (S/N)	Si	Si	No	No	Si
Horas de difusión	5	4	0	0	6
Temperatura de difusión (°C)	520	520	0	0	540
Dureza superficial (HRC)	70	70	68	67	65
Dureza del núcleo (HRC)	54	53	39	37	37
Capa (IN)	0.005	0.007	0.01	0.012	0.015

En este estudio, M1–M2 lograron ~ 70 HRC con núcleos de 53–54 HRC; a partir de M3–M4 (25–30 h) la dureza superficial descendió a 67–68 HRC y la del núcleo a 37–39 HRC, evidenciando pérdida progresiva asociada a sobresaturación de N y agotamiento de elementos endurecedores (Patharkar & Patil, 2025; Castro et al., 2007).

La Figura 2 ilustra la relación entre la dureza superficial y del núcleo en función de la temperatura de nitruración. Se aprecia que temperaturas superiores a 520 °C aumentan la tasa de difusión del nitrógeno, pero también promueven una redistribución de elementos aleantes como Cr y Mo, lo que reduce la concentración superficial y, por ende, la dureza (Wang et al., 2019; López & García, 2021). Este efecto puede acompañarse de descarburación por intercambio C–N en la interfase, y de una mayor fracción de γ' (Fe₄N) —más frágil que ϵ (Fe₂₋₃N)—, disminuyendo la estabilidad mecánica (Chen et al., 2020; Martínez-Hernández et al., 2018).

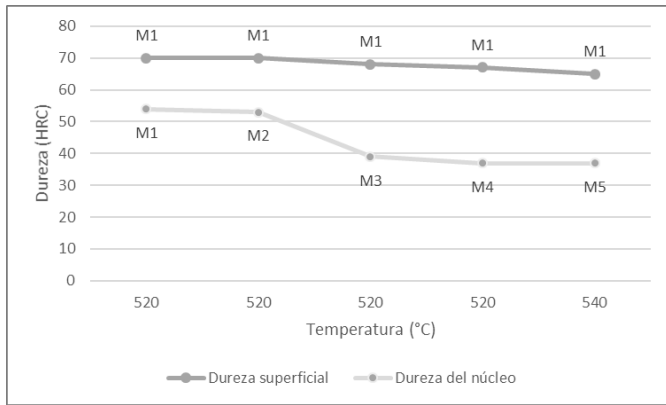


Figura 2: Relación de dureza entre la zona superficial y el núcleo del acero H13 en función a la temperatura (M1–M5)

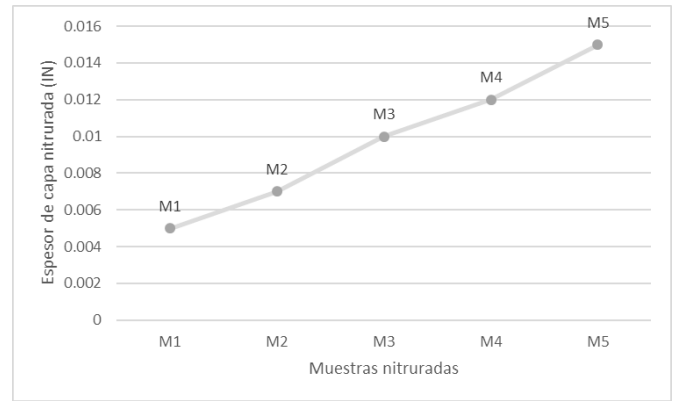


Figura 4: Relación entre el espesor de la capa nitrurada y la dureza superficial y del núcleo en acero AISI H13 (Muestras M1–M5)

La Figura 3 resume la tendencia con el tiempo: se observa un máximo de dureza en torno a 20–23 h; más allá de ese intervalo, el incremento de espesor de capa no mejora el rendimiento mecánico. En términos prácticos: >24–25 h y capas >0.010 in conducen a un ↑ espesor pero ↓ dureza superficial y del núcleo, lo que sustenta la existencia de un umbral operativo.

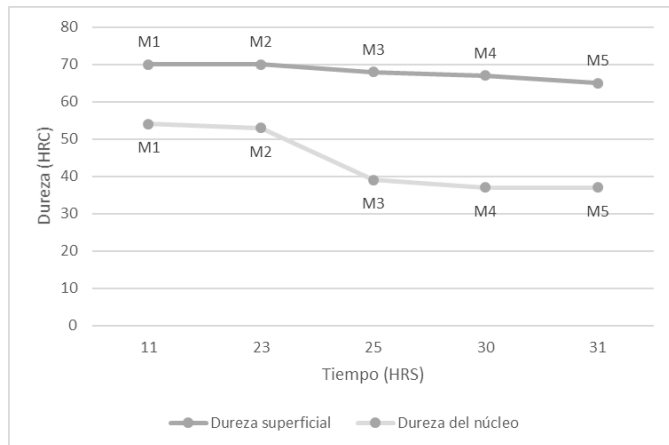


Figura 3: Relación entre la dureza superficial y del núcleo con el tiempo de nitruración en acero AISI H13 (M1–M5)

La Figura 4 muestra la correlación inversa entre el espesor de capa y las durezas superficial/núcleo. Desde la segunda ley de Fick, la concentración superficial de N tiende a estabilizarse con el tiempo, mientras la difusión hacia el núcleo se ralentiza; esto reduce el gradiente, produce capas más gruesas pero menos ricas en nitruros y se traduce en durezas menores (Silva et al., 2021; Zhang & Lee, 2019). La exposición térmica prolongada también favorece precipitación gruesa (CrN, Fe₂₋₃N) y generación de vacantes, disminuyendo tenacidad y aumentando el riesgo de microfisuras bajo carga cíclica.

Desde un punto de vista práctico, los resultados ubican el rango óptimo de nitruración para H13 entre 510–520 °C y 19–23 h, con disociación controlada 60–65 %. Bajo estas condiciones se obtiene una capa uniforme y adherente con dureza superficial cercana al máximo (~70 HRC) sin comprometer la resistencia del núcleo (≥53 HRC), proporcionando un balance adecuado para componentes de trabajo en caliente.

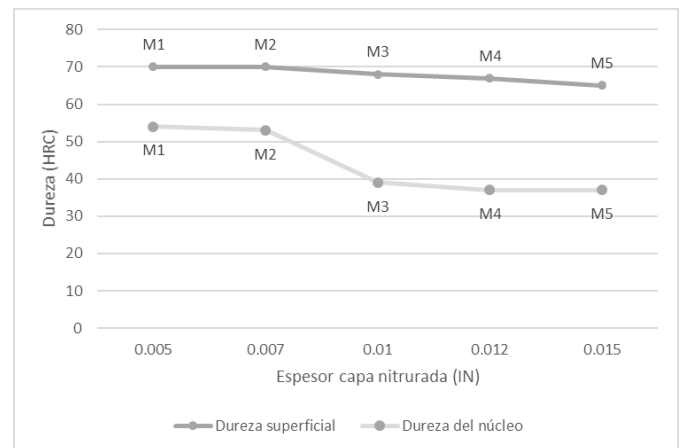


Figura 5: Comparación del espesor de la capa nitrurada en las muestras M1 a M5 del acero AISI H13 bajo diferentes condiciones de tratamiento

4. Conclusiones

Se comprobó el efecto combinado de tiempo, temperatura y disociación del NH₃ sobre la morfología de capa (capa compuesta/zona de difusión) y la dureza superficial y del núcleo del AISI H13, estableciendo criterios de ajuste de proceso orientados a servicio.

Se identificó un umbral a partir del cual el aumento de tiempo/espesor conduce a sobresaturación de N y redistribución de aleantes, con disminución de dureza superficial y del núcleo; en este estudio, ello se asocia a tratamientos >24–25 h y capas >0.010 in, coherente con la pérdida progresiva observada.

Las mejores respuestas se obtuvieron en 510–520 °C y 19–23 h, con disociación controlada (≈60–65 %), alcanzando ~70

HRC en superficie y ≥ 53 –54 HRC en el núcleo; este rango provee un balance entre endurecimiento superficial y tenacidad interna para troqueles y moldes de trabajo en caliente.

El incremento de espesor no garantiza mayor desempeño; la capa compuesta densa (ϵ/γ') puede inhibir la zona de difusión y elevar tensiones residuales, reduciendo la dureza efectiva y la cohesión capa/metal base cuando se exceden los límites operativos.

Se aporta una guía paramétrica (tiempo–temperatura–disociación) para optimizar la nitruración gaseosa del H13, priorizando dureza máxima sin comprometer el núcleo, con aplicabilidad directa en mantenimiento y fabricación de herramientas sometidas a ciclos térmicos severos.

El estudio se circunscribe a rangos intermedios de temperatura, atmósfera de NH_3 disociado, presiones controladas y geometrías simples; la extrapolación a configuraciones industriales complejas debe considerar variaciones de atmósfera, transferencia de calor y restricciones geométricas.

Se recomienda validación en servicio (desgaste/choque térmico), DRX y EDS para cuantificar nitruros y gradientes de N, además de explorar atmósferas mixtas ($\text{NH}_3/\text{N}_2/\text{H}_2$) y modelos de difusión/potencial de nitruración que integren cinética y propiedades mecánicas a escala componente.

Agradecimientos

Los autores agradecen a sus familias por el apoyo brindado y la comprensión durante el desarrollo del trabajo, a sus amistades por el ánimo constante y el acompañamiento a lo largo del proceso, y a la Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo por las facilidades institucionales otorgadas. Asimismo, reconocen a sus profesores por la orientación académica, las observaciones oportunas y las recomendaciones que contribuyeron a fortalecer el manuscrito y la interpretación de los resultados.

Referencias

- ASM International. (2018). *Metals Handbook, Volume 4: Heat Treating*. ASM International.
- ASM International. (2020). *Metals Handbook, Volume 4: Heat Treating*. ASM International.
- ASTM International. (2023). ASTM E384-23: Standard test method for microindentation hardness of materials. <https://doi.org/10.1520/E0384-23>
- Castro, G., Fernández Vicente, A., & Cid, J. (2007). Influence of nitriding time on the wear behaviour of AISI H13 steel during a crankshaft forging process. *Wear*, 263(1–6), 681–689. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2006.10.026>
- Chen, J., Zhao, Q., & Liu, H. (2020). Carbon depletion and microstructural stability in nitrided AISI H13 steel. *Surface & Coatings Technology*, 387, 125497. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125497>
- Davis, J. R. (2000). *Metallurgy and properties of hot-work tool steels*. ASM International.
- EMCO-Test. (2024). Brinell hardness testing: Procedures and applications. <https://www.emcotest.com/en/brinell-hardness/>
- García-Ramírez, A., Hernández, M., & López, D. (2021). Influence of nitrogen potential on diffusion behavior in gas-nitrided AISI H13 steels. *Surface Engineering*, 37(8), 942–953. <https://doi.org/10.1080/02670844.2021.1937569>
- Hernández, M. E., Rivera, J. L., & Torres, V. (2022). Effect of ammonia dissociation on compound layer morphology in nitrided tool steels.

- Materials Characterization*, 188, 111924. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2022.111924>
- Huang, Y., Li, D., Zhang, G., & Zhang, L. (2019). Microstructure and wear behavior of nitrided AISI H13 steel under different nitriding times. *Surface & Coatings Technology*, 375, 893–900. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2019.07.053>
- ISO. (2018). ISO 6507-1:2018—Metallic materials — Vickers hardness test — Part 1: Test method. International Organization for Standardization.
- Johnson, T., & Kim, S. (2017). Effect of carbon content on carbide network formation and corrosion resistance in H13 tool steel. *Journal of Alloys and Compounds*, 695, 1349–1355. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2016.11.219>
- Kumar, V., Raval, H., & Bhatt, D. (2022). Effect of time and temperature on nitrided layer depth and hardness in tool steel H13. *Materials Today: Proceedings*, 56, 1245–1250. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.05.034>
- Lee, C. H., Kim, S. Y., & Park, J. S. (2020). Effect of nitriding time and temperature on case depth and hardness distribution of AISI H13 tool steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 29(6), 4123–4131. <https://doi.org/10.1007/s11665-020-04936-1>
- Lee, Y. S., Lee, J. H., & Kim, H. J. (2020). Nitrogen diffusion behavior in gas-nitrided H13 tool steel. *Surface & Coatings Technology*, 386, 125482. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125482>
- Lee, H.-C., et al. (2025). Fatigue performance of nitrided H13 tool steel. *Materials*, 18(17), 4121.
- Liu, J., Zhang, C., & Lin, X. (2022). Effect of vanadium content on microstructure and mechanical properties of AISI H13 steel. *Materials Science Forum*, 1050, 85–92. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.1050.85>
- Martínez Hernández, S., Pérez Camacho, J., & Rodríguez Báez, I. (2018). Phase transformation during gas nitriding of H13 tool steel: γ' and ϵ nitride formation. *Journal of Alloys and Compounds*, 735, 2087–2095. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.10.167>
- Martínez-Lopez, M., García, R., & Torres, D. (2019). Oxide layer formation during nitriding of hot-work tool steels. *Surface Engineering*, 35(10), 911–919. <https://doi.org/10.1080/02670844.2018.1559852>
- Materials Science & Engineering A*. (2023). Case depth and hardness correlation in gas nitrided H13 tool steel. *Materials Science and Engineering: A*, 880, 145155. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2023.145155>
- Patel, M., & Singh, J. (2023). Surface hardening response of AISI H13 tool steel under variable nitriding pressures. *International Journal of Metallurgical Engineering*, 17(2), 78–85. <https://doi.org/10.1016/j.ijme.2023.03.007>
- Patharkar, A., & Patil, S. (2025). Correlative study on nitriding temperature and nitrogen diffusion in H13 tool steel. *Metallurgical Transactions A*. <https://doi.org/10.1007/s11661-025-07531-2>
- Silva, F., Almeida, T., & Rodrigues, P. (2021). Modeling of nitrogen diffusion in gas nitrided steels using Fick's laws. *Journal of Materials Processing Technology*, 295, 117138. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117138>
- Smith, D. A., & Jones, L. E. (2018). Ammonia dissociation rates and compound layer suppression in gas nitriding of tool steels. *Heat Treatment and Surface Engineering*, 95(4), 201–207. <https://doi.org/10.31399/asm.hte.95.4.201>
- Struers. (2021). Materialographic sample preparation guidelines for hot-work steels (Technical note). <https://www.struers.com>
- Sun, H., & Zhang, Y. (2021). Influence of molybdenum on wear resistance and heat stability of H13 tool steel. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 94, 105425. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmhm.2021.105425>
- Sun, Y., Wang, Q., & Liu, C. (2020). Effect of pre-heat treatment on microstructure and mechanical properties of gas nitrided AISI H13. *Heat Treatment of Metals*, 45(4), 18–24. <https://doi.org/10.1016/j.htm.2020.04.004>
- Wang, H., Zhao, Y., & Li, J. (2019). Effect of gas nitriding parameters on hardness profile and nitride formation in AISI H13 tool steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 28(9), 5392–5399. <https://doi.org/10.1007/s11665-019-04220-6>
- Wang, L., Zhao, Y., & Liu, H. (2019). Role of alloying elements in nitrided layers of H13 steel under low ammonia dissociation conditions. *Materials Science & Engineering A*, 743, 141–150. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2018.11.031>
- Wang, Z., Chen, X., & Zhao, Y. (2018). Microstructural evolution during gas nitriding of hot-work tool steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 27(7), 3405–3412. <https://doi.org/10.1007/s11665-018-3469-4>

- Zagonel, L. F., Serbena, F. C., & de Mello, J. D. B. (2012). Evaluation of the microstructure and mechanical properties of H13 steel after gas nitriding. *Wear*, 294–295, 409–417. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2012.07.003>
- Zhang, X., & Lee, C. H. (2019). Influence of excessive case depth on mechanical properties of nitrided steel. *Materials Science & Engineering A*, 756, 374–383. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2019.04.131>
- Zhou, H., Liu, S., & Ma, X. (2021). Study of nitriding kinetics on tool steel AISI H13: Effect of process time. *Journal of Manufacturing Processes*, 62, 1041–1048. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.01.036>
- Zhou, Y.-L., et al. (2023). A review—Effect of accelerating methods on gas nitriding. *Coatings*, 13(11), 1846.
- ZwickRoell. (2024). Vickers and Rockwell hardness testing: Equipment and standards. <https://www.zwickroell.com/en/testing-solutions/hardness-testing/>
- Frączek, T., et al. (2024). The influence of selected process parameters on gas nitriding. *Materials*, 17(11), 2600.