

Comportamiento tribológico de un acero 4140 nitrocarburoado ferrítico por sales

RESUMEN: Este trabajo investiga el efecto de la nitrocarburoación en baño de sales y un subsecuente postratamiento, sobre el comportamiento tribológico del acero AISI 4140 sometido a los procesos Tenifer y Tenifer-QPQ. Para esto, el desempeño es comparado, bajo una condición tribológica fija, con la referencia del acero base sin tratamiento. Las muestras fueron expuestas al tratamiento de nitrocarburoado a 580 °C durante 90 min.

La metalografía reveló una capa de compuestos (capa blanca) de $10.3 \pm 1.0 \mu\text{m}$ para Tenifer y $13.5 \pm 0.5 \mu\text{m}$ para Tenifer-QPQ, con zonas de difusión de $250 \pm 20 \mu\text{m}$ y $280 \pm 20 \mu\text{m}$, respectivamente.

Los perfiles de microdureza Vickers indicaron durezas superficiales de $\sim 780 H_{V0.01}$ (Tenifer) y $\sim 1021 H_{V0.01}$ (Tenifer-QPQ), con disminución gradual hacia el núcleo.

La difracción de rayos X confirmó la presencia de las fases $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$ y $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$, además de Fe_3O_4 en el proceso Tenifer-QPQ.

La resistencia al desgaste se evaluó mediante ensayos de perno sobre disco bajo la norma ASTM G99, usando una esfera de alúmina de 5 mm de diámetro y una carga de 5 N, durante 250 m a 0.15 m/s.

El coeficiente de fricción fue 0.492 (acero referencia), 0.775 (Tenifer) y 0.378 (Tenifer-QPQ). Mientras que el volumen perdido en cada muestra fue 0.1045, 0.0999 y 0.0294 mm^3 , respectivamente.

Bajo las condiciones experimentales empleadas, la condición Tenifer-QPQ presentó el mayor incremento en resistencia al desgaste.

PALABRAS CLAVE: AISI 4140; coeficiente de fricción; volumen perdido; nitrocarburoado ferrítico; Tenifer; Tenifer-QPQ.



Colaboración

Virgilio Alberto Aquino Cruz; Roberto Carlos Vega Morón, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tlalnepanlla; Angel Manuel Delgado Brito, Tecnológico de Estudios Superiores de Jocotitlán; Lizbeth Melo Máximo; José Solís Romero, Tecnológico Nacional de México / Instituto Tecnológico de Tlalnepanlla

Fecha de recepción: 11 de febrero de 2026

Fecha de aceptación: 26 de mayo de 2026

Autor de Correspondencia: Roberto Carlos Vega Morón

ABSTRACT: This work investigates the effect of salt-bath nitrocarburoating and a subsequent post-treatment on the tribological behavior of AISI 4140 steel subjected to Tenifer and Tenifer-QPQ processes. The results were compared with the reference untreated substrate steel under a fixed tribological condition. The thermochemical treatments were conducted at 580 °C for 90 min.

The metallographic process revealed a compound (white) layer thickness of $10.3 \pm 1.0 \mu\text{m}$ for Tenifer and $13.5 \pm 0.5 \mu\text{m}$ for Tenifer-QPQ, with diffusion zones of $250 \pm 20 \mu\text{m}$ and $280 \pm 20 \mu\text{m}$, respectively. Cross-sectional Vickers microhardness profiles indicated surface hardness values of $\sim 780 H_{V0.01}$ (Tenifer) and $\sim 1021 H_{V0.01}$ (Tenifer-QPQ), decreasing gradually toward the core.

The X-ray diffraction tests identified the presence of $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$ and $\gamma\text{-Fe}_4\text{N}$, as well as Fe_3O_4 for Tenifer-QPQ.

The wear resistance was evaluated by dry pin-on-disk tests according to ASTM G99 standard, using a 5 mm alumina ball, with a normal load of 5 N, a sliding distance of 250 m, and a sliding speed of 0.15 m/s. The friction coefficient was 0.492 (reference), 0.775 (Tenifer), and 0.378 (Tenifer-QPQ); whereas the volume loss was 0.1045, 0.0999, and 0.0294 mm^3 , respectively.

Under the experimental conditions employed, Tenifer-QPQ showed the best improvement in wear resistance.

KEYWORDS: AISI 4140; coefficient of friction; volume loss; ferritic nitrocarburoating; Tenifer; Tenifer-QPQ.

INTRODUCCIÓN

El acero AISI 4140 es un acero de medio carbono, aleado con cromo y molibdeno, que presenta buenas propiedades mecánicas como dureza, resistencia al desgaste y a la abrasión, por lo que es ampliamente utilizado en la industria para diversas aplicaciones en componentes mecánicos, tales como piezas de maquinaria de alta resistencia, árboles de levas, cigüeñales, ejes y pernos, entre otros [1], [2]. Sin embargo, las superficies de los aceros tienden a presentar fallas mecánicas debido a las condiciones de trabajo y al medio al que se encuentran sometidas [3]. Durante su vida en servicio, los componentes pueden estar expuestos a mecanismos de daño como fatiga superficial, abrasión y desgaste adhesivo, lo que provoca una disminución significativa de su vida útil [4], [5].

Este comportamiento representa un problema de gran relevancia industrial y energética. Holmberg y Erdemir [6] estimaron que aproximadamente el 23 % del consumo total de energía a nivel mundial se origina en contactos tribológicos; de este porcentaje, alrededor del 20 % se utiliza para vencer la fricción y el 3 % se destina a la remanufactura y sustitución de componentes debido a fallas asociadas al desgaste. Asimismo, se ha reportado que las pérdidas asociadas a la fricción y al desgaste contribuyen de manera significativa a las emisiones de CO_2 , estimando la generación de aproximadamente 480 millones de toneladas anuales. Por eso, implementar tecnologías avanzadas de ingeniería de superficies podría reducir el consumo energético global y generar ahorros económicos equivalentes a cerca del 1.4 % del producto interno bruto mundial [7], [8].

En ese sentido, la ingeniería de superficies desempeña un papel fundamental en la mejora del rendimiento y la funcionalidad de los materiales metálicos en diversos sectores industriales. La posibilidad de modificar las propiedades superficiales sin afectar el comportamiento mecánico del sustrato ha permitido mejorar la resistencia mecánica, la resistencia al desgaste y la protección contra la corrosión de los aceros empleados en aplicaciones críticas [9].

Dentro de este contexto, la nitrocarburiación en baño de sales aplicada al acero AISI 4140 mediante los procesos Tenifer y Tenifer-QPQ se presenta como una alternativa efectiva para mitigar el desgaste superficial. Estos tratamientos termoquímicos generan capas compuestas de nitruros de hierro y zonas de difusión que incrementan la dureza superficial y la resistencia al desgaste. En particular, el proceso Tenifer-QPQ incorpora una etapa adicional de postoxidación, que favorece la formación de una capa superficial de óxido, la cual puede influir en el comportamiento tribológico del material bajo condiciones de deslizamiento en seco [10].

De manera específica, existen antecedentes sobre el acero AISI 4140 sometido a procesos de nitrocarburiación/nitruración mediante distintas rutas y postratamientos.

Dalibón et al. [11] analizaron AISI 4140 nitrurado por plasma con postoxidación, encontrando que la capa de óxido puede reducir el coeficiente de fricción al inicio bajo ciertas condiciones de contacto y mejorar la resistencia a la corrosión.

Yilmaz et al. [12] evaluaron la influencia del tiempo de postoxidación, en un AISI 4140 nitrocarburiado, identificando la coexistencia de fases ϵ y γ' junto con Fe_3O_4 , y reportando variaciones en rugosidad y fricción en función de la duración del postratamiento.

Por su parte, Chen et al. [13] aplicaron nitrocarburiación por sales con una oxidación subsecuente y evaluaron el efecto de shot peening en el desempeño a fatiga, reportando la transformación de la capa compuesta desde Fe_3N a Fe_2N tras la oxidación; además, observaron que el shot peening incrementó ligeramente el espesor de la capa y la profundidad total, aunque sin un efecto significativo adicional en fatiga respecto a la condición nitrocarburiada y oxidada. Finalmente, Daghbouch et al. [14] abordaron el nitrurado gaseoso en AISI 4140 mediante diseño de experimentos y modelado, mostrando la influencia conjunta de carga, dureza y velocidad de deslizamiento en la pérdida de masa por desgaste adhesivo, así como condiciones de tratamiento que optimizan la dureza para minimizar dicha pérdida.

Con base en lo anterior, se plantea la hipótesis de que la nitrocarburiación en baño de sales mejora la resistencia al desgaste del acero AISI 4140 respecto al material base, y que el tratamiento Tenifer-QPQ presenta un desempeño tribológico superior al proceso Tenifer. El objetivo de este trabajo es evaluar y comparar el comportamiento tribológico del acero AISI 4140 sin tratamiento y tratado mediante los procesos Tenifer y Tenifer-QPQ, bajo una condición tribológica fija de deslizamiento en seco con el fin de establecer la influencia del postratamiento de oxidación.

MATERIAL Y MÉTODOS

Tratamientos termoquímicos en baño de sales

Para este trabajo, primero se cortaron muestras de 8 mm de espesor a partir de una barra de acero AISI 4140 de 38.1 mm de diámetro, utilizando una cortadora metalográfica Buehler equipada con disco de diamante. Posteriormente, la preparación superficial se realizó mediante lijado secuencial desde grano 80 hasta 1200, seguido de pulido con suspensión de diamante de 6 μm hasta obtener un acabado tipo espejo, previo al tratamiento termoquímico.

Las muestras se sometieron a nitrocarburiación en baño de sales mediante los procesos Tenifer y Teni-

fer-QPQ (Quench-Polish-Quench), cuyo ciclo de tratamiento se presenta en la Figura 1. Ambos tratamientos se realizaron a 580 °C durante 90 min. La temperatura se encuentra dentro del intervalo empleado para la nitrocarburoización ferrítica de aceros de la familia AISI 4xxx (500–590 °C), en el que se favorece la formación de nitruros de hierro sin inducir transformación austenítica [10]. El tiempo de 90 min corresponde a una condición intermedia dentro del rango comúnmente reportado (60–120 min) para este tipo de tratamiento, en el que desarrollan una capa de compuestos y una zona de difusión representativas [11], [12]. En el proceso Tenifer-QPQ, posterior a la etapa principal de difusión en el baño de sales, se realiza un pulido superficial para mejorar el acabado, seguido de una etapa de postoxidación, que modifica la superficie del material.

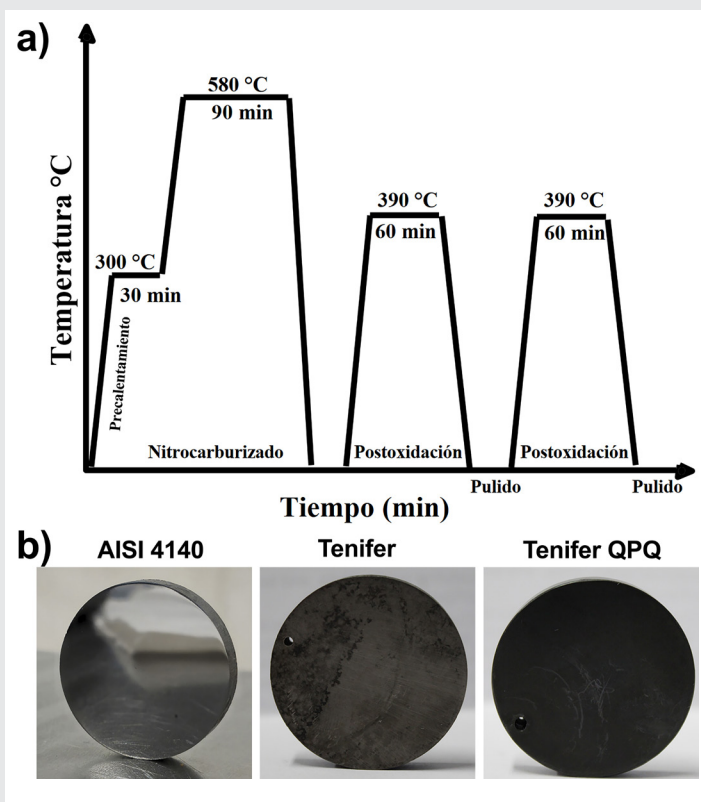


Figura 1. a) Diagrama del ciclo de los tratamientos termoquímicos; b) muestras utilizadas previo a pruebas de desgaste.

Fuente: Diagrama Hao Chen [13].

La formulación específica del baño (aditivos y parámetros de control/regeneración) no se detalla por tratarse de información propietaria del proveedor. No obstante, es conocido que el proceso se realiza en un recipiente de acero calentado que incorpora un sistema de aireación, el cual contiene una masa de sales fundidas basada principalmente en cianatos y carbonato alcalinos. Durante el tratamiento, el anión cianato reacciona de manera catalítica con la superficie de las piezas, promoviendo la liberación de especies reactivas de nitrógeno y la formación de carbonato en el medio, mientras

que la aireación contribuye a sostener la actividad del baño dentro de rangos controlados.

Caracterización microestructural y mecánica

Después de los tratamientos Tenifer y Tenifer-QPQ, se realizó un proceso metalográfico convencional. Primero se cortaron muestras de cada tratamiento en sección transversal, se encapsularon en baquelita y se prepararon mediante lijado hasta grano 1200 y pulido con suspensión de diamante de 6 μm . Finalmente, se aplicó ataque químico con Nital al 4 % para la observación de la microestructura. Los espesores de capa se midieron con microscopio óptico Olympus PMG 3.

Después, la identificación de fases se realizó mediante difracción de rayos X (DRX) en un equipo Bruker D8. Las mediciones se obtuvieron en configuración de haces paralelos, con una configuración theta 10°, twin primario Soller 0.2°, y un escaneo tipo "Coupled two theta/theta" en modo continuo, en el rango de 30 a 80°, utilizando radiación Cu - $\alpha\alpha$. En estos ensayos se analizaron las tres condiciones: acero AISI 4140 sin tratamiento (4140), y muestras tratadas por Tenifer (T) y Tenifer-QPQ (T-QPQ).

A continuación, se hicieron los ensayos de microdureza Vickers, usando un microdurómetro Shimadzu HMV-G-FA-D mostrado (Figura 2), conforme a la norma ASTM C1327 [15]. Las microindentaciones se efectuaron en sección transversal, iniciando al centro de la capa blanca (capa de compuestos) y avanzando hacia el centro del sustrato. En los ensayos se aplicó una carga de 10 gf (98.07 mN), con un tiempo de permanencia de 15 s, y se realizaron 15 indentaciones con una separación de 20 μm entre ellas.

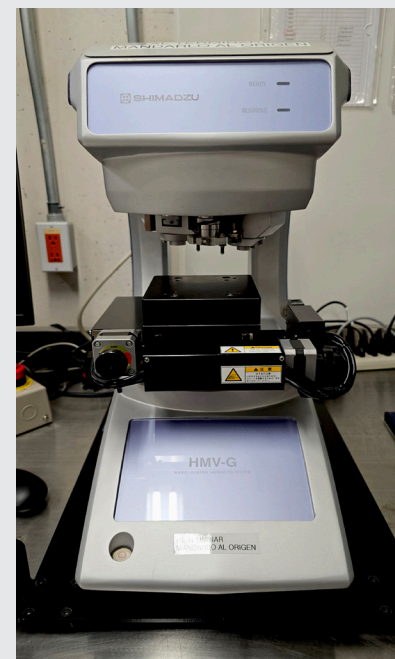


Figura 2. Microdurómetro utilizado para pruebas de microdureza. Fuente: Fotografía propia.

Caracterización Tribológica

Antes de realizar los ensayos de desgaste, se midieron las características de rugosidad Ra (rugosidad media aritmética), Rq (rugosidad media cuadrática) y Rz (altura máxima del perfil) de las tres condiciones (acero base con acabado espejo, Tenifer y Tenifer-QPQ). Las mediciones se realizaron con un rugosímetro Mitutoyo SJ-410 (Figura 3), conforme a la norma ISO 4287:1997. La adquisición de datos se efectuó mediante un perfil de superficie empleando un filtro Gauss para conservar únicamente el componente de rugosidad, con una velocidad de medición de 0.5 mm/s. Para cada muestra se realizaron cuatro mediciones desde el centro al exterior.



Figura 3. Rugosímetro utilizado para pruebas de rugosidad. Fuente: Fotografía propia.

A continuación, se realizaron los ensayos de desgaste en configuración bola-sobre-disco en condiciones secas, de acuerdo con la norma ASTM G99 [16], utilizando un tribómetro Anton Paar TRB³ (Figura 4). Como contraparte se empleó una esfera de alúmina (Al₂O₃) de 5 mm de diámetro. Previo a cada ensayo, tanto la esfera como las superficies de las muestras (AISI 4140 base, Tenifer y Tenifer-QPQ) se limpiaron con alcohol isopropílico.

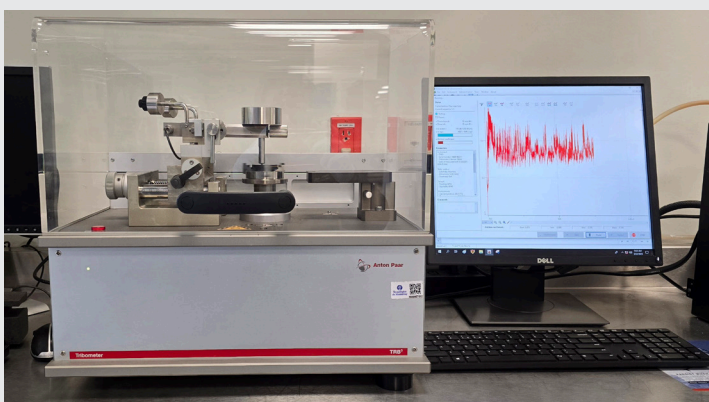


Figura 4. Tribómetro utilizado para pruebas perno sobre disco. Fuente: Elaboración propia.

Las pruebas se efectuaron con una carga normal de 5 N, lo que representa valores de presiones máximas de contacto de $4140\text{-}\sigma_{\text{max}} \approx 1.46 \text{ GPa}$, $T\text{-}\sigma_{\text{max}} \approx 1.54 \text{ GPa}$ y $T\text{-QPQ-}\sigma_{\text{max}} \approx 1.5 \text{ GPa}$; en los ensayos se consideró una distancia de deslizamiento de 250 m y una velocidad constante de 0.15 m/s. El coeficiente de fricción se registró mediante el sistema de adquisición del equipo y se reportó como el promedio calculado por el tribómetro a lo largo de toda la prueba.

Posteriormente, las huellas de desgaste se caracterizaron mediante microscopía óptica para medir el ancho de pista w . El valor de w se obtuvo como el promedio de 16 mediciones distribuidas a lo largo de toda la pista de desgaste. El radio de pista R se determinó a partir de la geometría de montaje del tribómetro, midiendo la distancia desde el centro del disco hasta la trayectoria de deslizamiento (centro de la pista de desgaste). El volumen perdido del disco (V) se estimó conforme a la ecuación 2.2 de la norma ASTM G99:

$$V = \frac{\pi R w^3}{6 r} \quad \text{Ec. (1)}$$

Ecuación: volumen perdido ASTM G99 [[16]]

donde V es el volumen perdido del disco (mm^3), R es el radio de la pista (mm), w es el ancho de la pista (mm) y r es el radio de la esfera (mm).

RESULTADOS

Microestructura y dureza

La Tabla 1 resume los espesores de la capa blanca y de la zona de difusión obtenidos con los tratamientos Tenifer y Tenifer-QPQ. Para Tenifer, la capa blanca presentó un espesor de $10.3 \pm 1.0 \mu\text{m}$ mientras que para Tenifer-QPQ se registró $13.5 \pm 0.5 \mu\text{m}$. En cuanto a la zona de difusión, Tenifer alcanzó $250 \pm 20 \mu\text{m}$ y Tenifer-QPQ $280 \pm 20 \mu\text{m}$. Estos resultados muestran que el tratamiento Tenifer-QPQ generó una capa blanca ligeramente más gruesa y una zona de difusión mayor bajo las condiciones de proceso empleadas. A pesar de que ambos tratamientos se realizaron bajo los mismos parámetros nominales ($580 \text{ }^\circ\text{C}$ por 90 min), el TTQ Tenifer-QPQ presentó una capa blanca y una zona de difusión mayores que el TTQ Tenifer. Esta diferencia sugiere que la secuencia adicional propia del QPQ (pulido y postoxidación) influye en el estado final de la capa formada, más allá de un cambio de acabado superficial. En particular, durante el postratamiento QPQ puede ocurrir movilidad del N y C, favoreciendo un crecimiento mayor. La Figura 5 presenta las micrografías en sección transversal para ambas condiciones.

Tabla 1. Espesores de capa.

| | Tenifer | Tenifer-QPQ |
|---------------------------------|--------------|----------------|
| Capa Blanca, μm | 10.3 ± 1 | 13.5 ± 0.5 |
| Zona de Difusión, μm | 250 ± 20 | 280 ± 20 |

Fuente: Elaboración propia

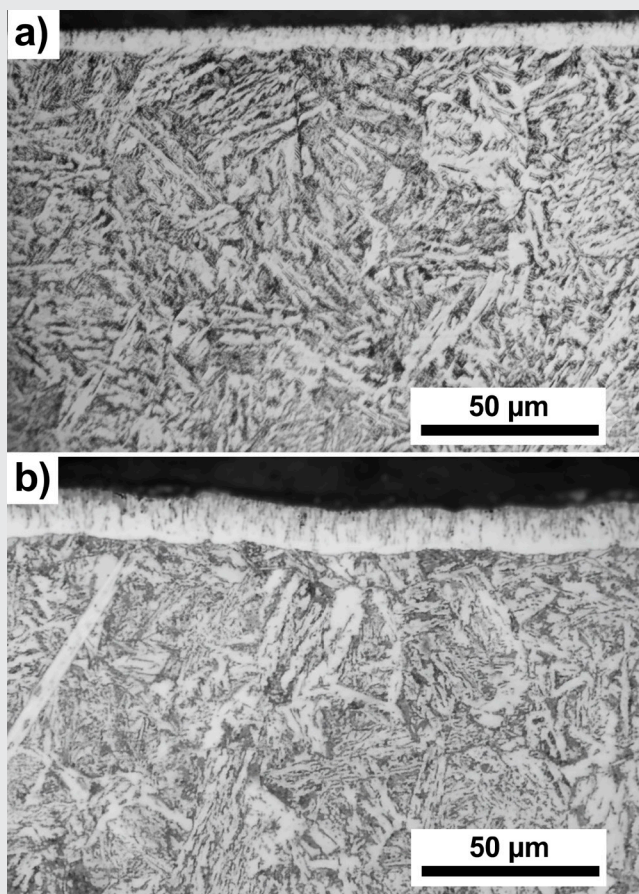


Figura 5. Micrografías de las muestras expuestas a los tratamientos termoquímicos: a) Tenifer; b) Tenifer-QPQ
Fuente: Elaboración propia.

fer-QPQ se alcanzaron valores cercanos a $\sim 1021 \text{HV}_{0.01}$. En ambos casos, la dureza decreció progresivamente conforme se avanzaba hacia el interior del sustrato, este comportamiento es denominado perfil por difusión, e indica el gradiente de presencia de N asociado a la capa formada y a la zona de difusión. Aproximadamente a $\sim 300 \mu\text{m}$, los valores se asemejan al rango del sustrato AISI 4140 (≈ 300 a 400HV). Es posible observar que Tenifer-QPQ presentó un nivel de dureza superior a lo largo del perfil.

La Figura 6 muestra los patrones de difracción obtenidos para 4140, T y T-QPQ. En el primero (Figura 6a), solamente se tiene la presencia de la fase $\alpha\text{-Fe}$ (ferrita), mientras que en Tenifer (Figura 6b) se identifican las fases $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$ y $\gamma'\text{-Fe}_4\text{N}$, asociadas a la capa blanca generada por la nitrocarburoización ferrítica. Luego, en la Figura 6c, que corresponde a Tenifer-QPQ, además de las fases $\epsilon\text{-Fe}_{2-3}\text{N}$ y $\gamma'\text{-Fe}_4\text{N}$, se detectó la presencia de Fe_3O_4 .

La detección de Fe_3O_4 en Tenifer-QPQ es consistente con la etapa de post-oxidación aplicada. Al transferir las piezas a un medio oxidante basado en nitratos-nitritos tras la nitrocarburoización y repetir el tratamiento después del pulido, se favorece la formación de una película superficial de magnetita, asociada con la apariencia negra característica del proceso y con un aporte a la resistencia a la corrosión de la superficie nitrocarburoizada.

Por otro lado, la Figura 7 presenta los perfiles de microdureza Vickers medidos en sección transversal desde la superficie hacia el interior del sustrato. En el tratamiento termoquímico Tenifer se observó una dureza superficial de $\sim 780 \text{HV}_{0.01}$, mientras que en Teni-

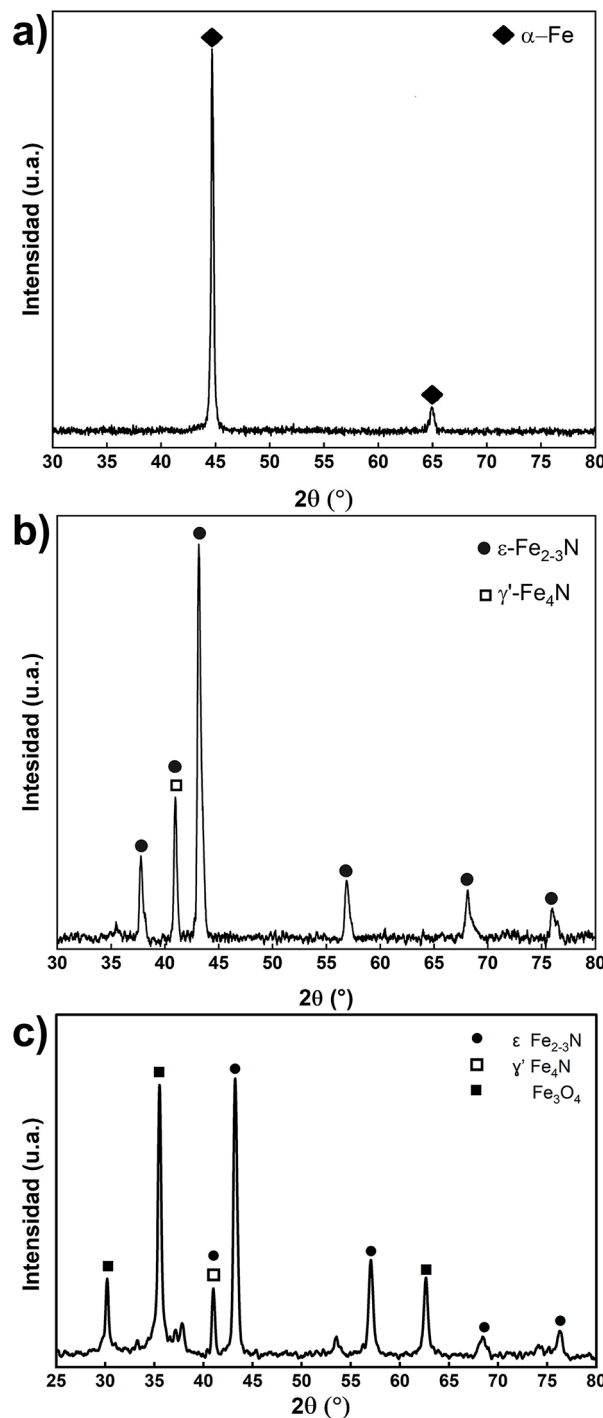


Figura 6. Patrones de difracción obtenidos en a) 4140; b) Tenifer; c) Tenifer-QPQ.
Fuente: Elaboración propia.

El incremento en los niveles de microdureza en TTQ Tenifer-QPQ puede asociarse a la secuencia de postratamientos del ciclo QPQ. Se reporta que la postoxidación redistribuye el nitrógeno, favoreciendo su enriquecimiento bajo la película de óxido y generando modificaciones en la capa compuesta. Además, la secuencia QPQ incorpora un pulido intermedio que puede remover la zona porosa superficial típica de la capa compuesta y exponer una región más densa antes de la oxidación final. En conjunto, estos efectos explican una capa blanca más dura en Tenifer-QPQ.

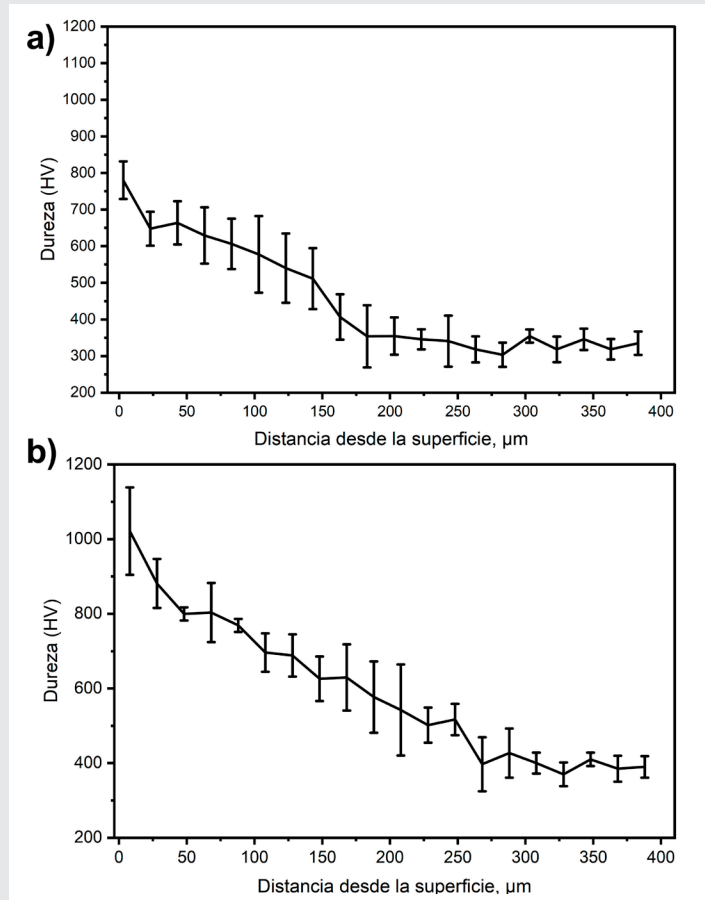


Figura 7. Gráfica de perfil de microdureza Vickers en sección transversal: a) Tenifer; b) Tenifer-QPQ.

Fuente: Elaboración propia.

Comportamiento tribológico

La Tabla 2, muestra los valores de rugosidad superficial (R_a , R_q y R_z) obtenidos a partir de cinco mediciones por condición.

Tabla 2. Rugosidad superficial conforme a ISO 4287:1997.

| Condición | R_a (μm) | R_q (μm) | R_z (μm) |
|-------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 4140 | 0.017 ± 0.005 | 0.023 ± 0.026 | 0.145 ± 0.038 |
| Tenifer | 0.220 ± 0.007 | 0.282 ± 0.031 | 1.726 ± 0.053 |
| Tenifer-QPQ | 0.185 ± 0.049 | 0.242 ± 0.254 | 1.487 ± 0.257 |

Fuente: Elaboración propia

Coefficiente de fricción (CoF)

En la Figura 8 se observa el comportamiento del coeficiente de fricción en función de la distancia de deslizamiento para las tres condiciones evaluadas, bajo deslizamiento en seco. En todos los casos se presenta una etapa transitoria inicial mientras se acoplan los pares tribológicos. En el acero AISI 4140, en esta etapa transitoria el CoF inicia con valores cercanos a ~ 0.6 y desciende hacia ~ 0.45 durante los primeros metros, para posteriormente mantenerse alrededor de un nivel cercano a su promedio (0.492) a lo largo del recorrido, con variaciones moderadas. En la condición Tenifer el CoF parte alrededor de ~ 0.68 a 0.70 y muestra una tendencia ascendente gradual conforme a la distancia recorrida, alcanzando valores instantáneos del orden de entre ~ 0.85 y 0.88 hacia el final del ensayo, por tanto, su CoF promedio es de 0.775 . Para Tenifer-QPQ, el CoF se mantiene en un nivel bajo entre una distancia de ~ 5 a ~ 130 m, presentando valores de entre ~ 0.30 y 0.35 , pero con mayor fluctuación que en las otras condiciones. Luego, en T-QPQ se aprecia una transición aproximadamente entre ~ 130 y 145 m, donde el CoF se incrementa ligeramente alrededor de ~ 0.40 a 0.45 , lo que puede asociarse a la interacción de los debris de residuos generados durante la prueba. Los valores promedio reportados por el equipo fueron 0.492 , 0.775 y 0.378 para AISI 4140, Tenifer y Tenifer-QPQ, respectivamente.

En la comparación entre el acero AISI 4140 y la condición Tenifer, el menor CoF del 4140 puede relacionarse con su menor rugosidad superficial. La Tabla II muestra que con el proceso Tenifer se incrementan significativamente R_a , R_q y R_z respecto al acabado espejo del 4140, lo que implica una topografía con mayor presencia de asperezas. Bajo deslizamiento en seco, esto favorece un contacto más severo entre asperezas y, por tanto, una mayor fricción. En consecuencia, es posible explicar que el acero 4140 presente un CoF promedio menor que Tenifer bajo las mismas condiciones de ensayo.

Además, el menor CoF observado en Tenifer-QPQ puede atribuirse a la modificación de la interfase de deslizamiento inducida por la postoxidación y el pulido intermedio del ciclo QPQ. En particular, se ha reportado que la postoxidación en condiciones relativamente bajas favorece la formación de una película densa de magnetita sobre la capa nitrocarburizada (Tenifer), esta capa puede sellar/llevar poros presentes en la capa compuesta y disminuir la superficie efectiva de contacto, reduciendo así la contribución adhesiva y la fricción durante una parte importante del ensayo. A partir de lo anterior, es posible elucidar que T-QPQ muestre un CoF menor y, hacia el final del recorrido, un incremento asociado a cambios del estado superficial conforme progresa el desgaste.

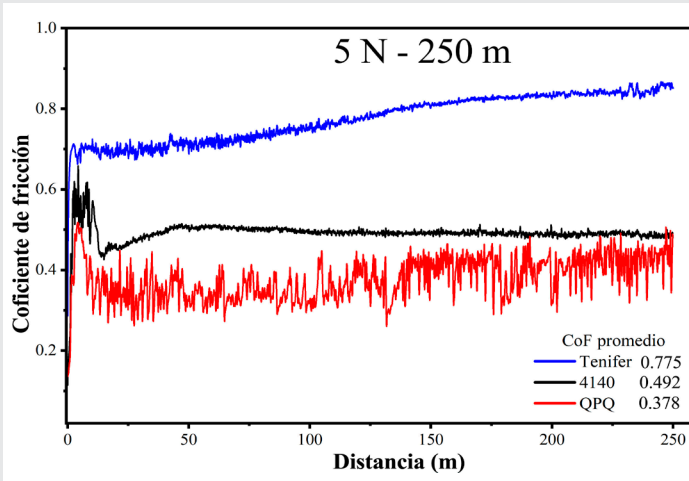


Figura 8. Gráfica de Coeficiente de fricción CoF (μ) en función de la distancia de deslizamiento.
Fuente: Elaboración propia.

Huellas de desgaste

Además, en la Figura 9 se observan micrografías representativas de las pistas de desgaste obtenidas en las muestras de las tres condiciones estudiadas. Es posible observar que en la muestra de 4140 (Figura 9a) el ancho de la pista es de $495 \mu\text{m}$. En comparación, tanto en Tenifer (Figura 9b) como en Tenifer-QPQ (Figura 9c), las pistas presentaron un ancho de $485 \mu\text{m}$ y $330 \mu\text{m}$, respectivamente. Además, se observa que la pista de desgaste en la condición 4140 presenta mecanismos de deformación plástica y adhesión severa, con surcos de arado profundos que evidencian la baja resistencia del sustrato; las manchas negras dentro del canal corresponden a material adherido, residuos del acero que fueron atrapados en el tribopar. Por otro lado, en las muestras TyT-QPQ los mecanismos predominantes también son arado, con menor presencia de material adherido, lo que corresponde a desgaste oxidativo y abrasión leve. Particularmente en la condición T-QPQ, la estabilidad de la capa de magnetita y la menor rugosidad favorecen un régimen de desgaste suave (mild wear), donde la generación de debris es mínima y la integridad de la superficie se mantiene durante un mayor periodo del ensayo.

Finalmente, en la Tabla 3, se presentan los resultados de volumen perdido de las tres condiciones investigadas, estos se calcularon utilizando la ecuación 1. Se puede observar que 4140 presentó un volumen perdido de 0.1045 mm^3 , el cual es aproximadamente 1.05 veces mayor que el de Tenifer (0.0999 mm^3) y 3.56 veces mayor que el de Tenifer-QPQ (0.0294 mm^3). Entonces, el tratamiento Tenifer mostró una ligera reducción del volumen perdido respecto al acero 4140 sin tratamiento; mientras que Tenifer-QPQ presentó una considerable disminución, lo que indica un claro incremento en la resis-

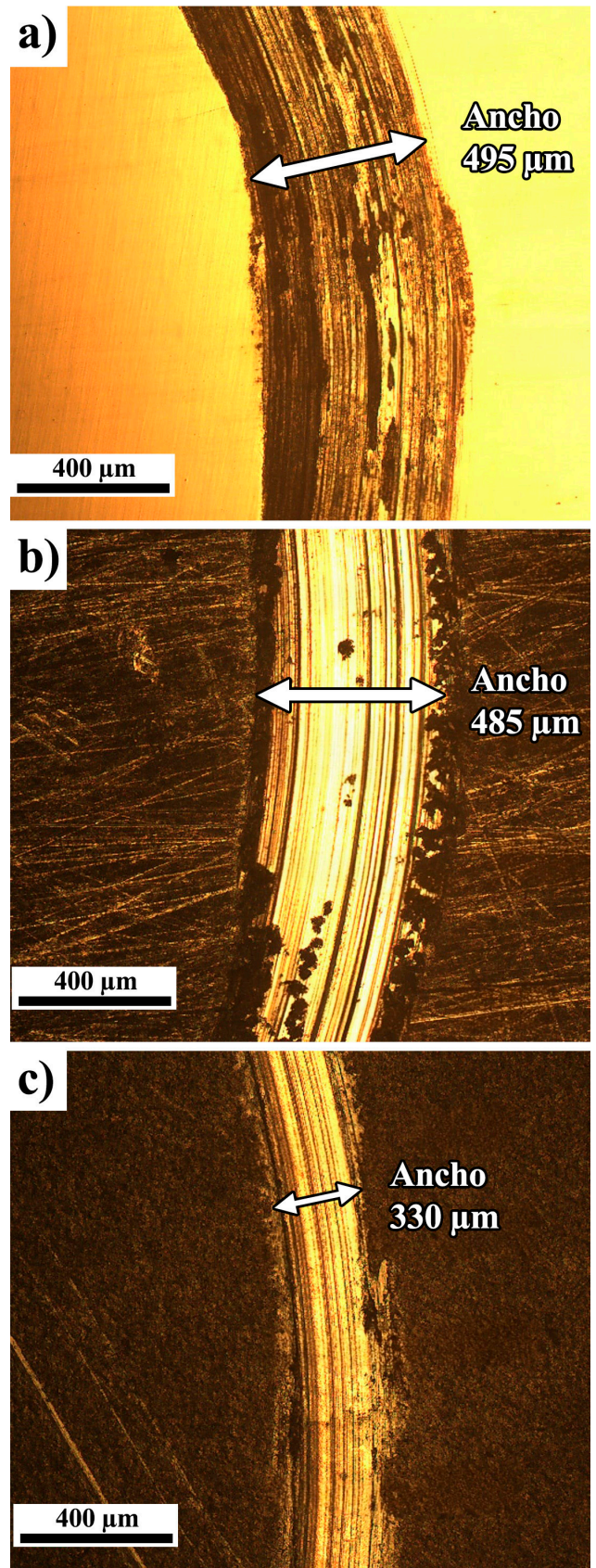


Figura 9. Micrografías de las pistas de desgaste realizadas con 5 N y 250 m de deslizamiento en: a) 4140; b) Tenifer; c) Tenifer-QPQ.
Fuente: Elaboración propia.

tencia al desgaste, bajo las condiciones ensayadas. Al comparar ambos tratamientos, T-QPQ presentó un volumen perdido ~ 3.40 veces menor que T, lo que puede asociarse a la contribución del proceso QPQ: la condición superficial tras el postratamiento (formación de óxidos y modificación de la capa externa) y el mayor endurecimiento superficial favorecen un contacto más estable y una menor remoción de material durante el deslizamiento en seco.

Tabla 3. Resultados de volumen perdido en las pruebas de desgaste realizadas con 5 N y 250 m de deslizamiento.

| Condición | Volumen perdido, (mm ³) |
|-------------|-------------------------------------|
| AISI 4140 | 0.1045 |
| Tenifer | 0.0999 |
| Tenifer QPQ | 0.0294 |

Fuente: Elaboración propia

CONCLUSIONES

En este trabajo se evaluó el efecto de la nitrocarburoización en baño de sales y de un postratamiento de oxidación sobre el desempeño tribológico del acero AISI 4140, comparando el acero sin tratamiento, con los procesos Tenifer y Tenifer-QPQ, bajo deslizamiento en seco. Ambos tratamientos generaron una capa de compuestos y una zona de difusión, siendo mayores en Tenifer-QPQ ($13.5 \pm 0.5 \mu\text{m}$ y $280 \pm 20 \mu\text{m}$) que en Tenifer ($10.3 \pm 1.0 \mu\text{m}$ y $250 \pm 20 \mu\text{m}$), junto con un endurecimiento superficial superior ($\approx 1021 \text{HV}0.01$ contra $\approx 780 \text{HV}0.01$). Los resultados de difracción de rayos X confirmaron la formación de $\epsilon\text{-Fe}_2\text{-}_3\text{N}$ y $\gamma\text{'-Fe}_4\text{N}$ en ambas condiciones tratadas, y la presencia de Fe_3O_4 en Tenifer-QPQ, asociada a la etapa de postoxidación. En términos tribológicos, Tenifer incrementó (0.775) el CoF promedio respecto a la condición base (0.492), mientras que Tenifer-QPQ lo redujo (0.378) y presentó la menor pérdida de volumen (0.0294 mm³), equivalente a ~ 3.6 veces menor que el acero base y ~ 3.4 veces menor que Tenifer. En conjunto, los resultados muestran que la secuencia Tenifer-QPQ proporciona el mayor beneficio en resistencia al desgaste para AISI 4140 bajo las condiciones evaluadas, al combinar una capa superficial más endurecida y una condición superficial modificada por el postratamiento

AGRADECIMIENTOS

Este estudio contó con el apoyo (25221.26-P) del Tecnológico Nacional de México a través de la Convocatoria de Proyectos de Investigación Científica, Humanística, de Desarrollo Tecnológico e Innovación 2026.

Los autores agradecen al ITESM por el uso de sus instalaciones en los Campus Santa Fé y Estado de México para realizar este trabajo.

Abreviaturas

| | |
|------|--------------------------------------|
| QPQ | Quench-Polish-Quench |
| TTQ | Tratamiento Termoquímico |
| DRX | Difracción de Rayos X |
| AISI | American Institute of Iron and Steel |
| MO | Microscopio Óptico |

BIBLIOGRAFÍA

[1] ASM International, Ed., "ASM Handbook, Vol. 1: Properties and Selection: Irons, Steels, and High-Performance Alloys," in ASM Handbook, vol. 1, Materials Park: ASM International, 1990, ch. Alloy Steels, p. 95.

[2] W. A. Khan, Q. Hayat, F. Ahmed, M. Ali, and M. Zain-ul-Abdein, "Comparative assessment of mechanical properties and fatigue life of conventional and multistep rolled forged connecting rods of high strength AISI/SAE 4140 steel," *Metals.*, vol. 13, no. 6, p. 1035, Jun. 2023, doi: 10.3390/met13061035.

[3] M. R. Ranju, P. M. Abhilash, and D. Kesavan, "Rolling contact fatigue studies on AISI 4140 steel under formulated lubrication conditions with nano graphene additives," *Wear*, vol. 544–545, May 2024, doi: 10.1016/j.wear.2024.205311.

[4] Gurumurthy, S. S. Sharma, Gowrishankar, Sowmith, Abhishek, and A. Devar, "Study of Mechanical Properties of Dual Phase EN19 Steel (AISI4140)," *Indian J. Sci. Technol.*, vol. 9, no. 37, pp. 1–6, Oct. 2016, doi: 10.17485/ijst/2016/v9i37/97422.

[5] L. Wang, L. Yang, L. Wang, X. Tang, and G. Liu, "Influence mechanism of grinding surface quality of 20CrMnTi steel on contact failure," *Sci. Rep.*, vol. 14, no. 1, p. Art. no. 14362, Dec. 2024, doi: 10.1038/s41598-024-64320-0.

[6] K. Holmberg and A. Erdemir, "Influence of tribology on global energy consumption, costs and emissions," *Friction*, vol. 5, no. 3, pp. 263–284, Sep. 2017, doi: 10.1007/s40544-017-0183-5.

[7] K. Holmberg, P. Kivikytö-Reponen, P. Härkisaari, K. Valtonen, and A. Erdemir, "Global energy consumption due to friction and wear in the mining industry," *Tribol. Int.*, vol. 115, pp. 116–139, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.triboint.2017.05.010.

[8] W. D. Callister and D. G. Rethwisch, *Ciencia e ingeniería de materiales*, 9th ed., vol. 1. Barcelona: Reverté, 2019.

[9] M. Ramezani, Z. Mohd Ripin, T. Pasang, and C. P. Jiang, "Surface Engineering of Metals: Techniques, Characterizations and Applications," *Metals.*, vol.

13, no. 7, p. Art. no. 1299, Jul. 2023, doi: 10.3390/met13071299.

[10] L. Bellas, G. Castro, L. Mera, J. L. Mier, A. García, and A. Varela, "Estudio comparativo de la nitrocarburoación de los aceros AISI 4340 y AISI 347 mediante el proceso Tenifer-QPQ[®]," *Rev. Metal.*, vol. 55, no. 1, p. e136, Jan. 2019, doi: 10.3989/rev-metalm.136.

[11] E. L. Dalibón, S. P. Brühl, I. Silva Cardenas, G. Prieto, and W. Tuckart, "Tribological and Corrosion Behavior of Oxidized and Plasma Nitrided AISI 4140 Steel," *Mater. Perform. Charact.*, vol. 12, no. 3, pp. 297–308, Jul. 2023, doi: 10.1520/MPC20220089.

[12] U. T. Yilmaz, A. Erkan, N. Akar, and V. Kilicli, "Effect of post-oxidation times in the nitrocarburi- zing process on the wear behavior of an AISI 4140 steel," *Materials Testing*, vol. 66, no. 11, pp. 1782–1794, Nov. 2024, doi: 10.1515/mt-2024-0062.

[13] H. Chen, T. C. Chen, H. H. Hsu, and L. W. Tsay, "Effect of Microstructure and Compressive Resi- dual Stress on the Fatigue Performance of AISI 4140 Steel with QPQ Salt-Bath Nitro-Carburizing," *Mate- rials*, vol. 18, no. 9, p. Art. no. 1995, May 2025, doi: 10.3390/ma18091995.

[14] A. Daghbouch, B. Louhichi, and M. A. Terres, "Optimization and Prediction of Mass Loss During Adhesive Wear of Nitrided AISI 4140 Steel Parts," *Crystals (Basel)*, vol. 15, no. 10, p. Art. no. 875, Oct. 2025, doi: 10.3390/cryst15100875.

[15] "Test Method for Vickers Indentation Hardness of Advanced Ceramics," Aug. 01, 2008, ASTM In- ternational, West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/ C1327-08.

[16] "Test Method for Wear Testing with a Pin-on- Disk Apparatus," Apr. 01, 2010, ASTM Internatio- nal, West Conshohocken, PA. doi: 10.1520/G0099- 05R10.

