

INFLUENCIA DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN AL AMBIENTE CARBURIZANTE EN LA CARBURIZACIÓN DEL ACERO SAE 1018

Martín de Jesús Alfaro Almanza ^a, Emanuel Vargas García ^a, Matías García
Rodríguez ^a, Edwin Jesús Yáñez Peralta ^a, Gabriel Rodríguez Ortiz ^{a*}, Mario
Alberto Rodríguez Ángeles ^b, Edilberto Murrieta Luna ^c

^a Universidad Politécnica de Juventino Rosas, Ingeniería en Metalurgia, Comunidad de Valencia, C.P.
38253, Juventino Rosas, Gto., México. grodriguez@upjr.edu.mx

^b Universidad Tecnológica Del Suroeste De Guanajuato, Carretera Valle de Santiago - Huamimaro Km.
1.2, 20 de Noviembre, Ecologista, 38400 Valle de Santiago, Gto.

^c Universidad Politécnica de Juventino Rosas, Ingeniería en Industrial, Comunidad de Valencia, C.P.
38253, Juventino Rosas, Gto., México.

Resumen

El carburizado es un tratamiento termoquímico en el cual se someten piezas de acero a un ambiente rico en carbono, con el objetivo de promover el endurecimiento superficial mientras se mantiene un centro blando. La dureza superficial de las piezas depende de la distancia de penetración del carbono y, debido a que se trata de un proceso de difusión, este se ve influenciado por factores como la concentración, la temperatura y el tiempo de exposición, además de los elementos aleantes presentes. En este proyecto se probó la influencia del tiempo de exposición del acero SAE 1018 en la atmósfera rica en carbono durante su proceso de carburización. Se empaquetaron muestras cilíndricas del acero de 1cm de diámetro y 1cm de altura dentro de una caja metálica con carbón vegetal pulverizado. Las muestras fueron colocadas dentro de un horno a una temperatura de 950°C y se mantuvieron por tiempos de entre 2 y 14 horas, tomando muestras por triplicado para cada tiempo. Se realizaron análisis micrográficos en cada muestra obtenida para determinar el grosor de la película de cementita obtenida, así como análisis de dureza en la superficie. Finalmente, se utilizaron los datos promedio recolectados para construir curvas de comportamiento del

proceso. Los resultados mostraron un comportamiento logarítmico de la dureza del material con respecto al tiempo de exposición del acero.

Palabras clave: Carburización; Endurecimiento superficial; Profundidad de capa.

INFLUENCE OF EXPOSURE TIME TO THE CARBURIZING ATMOSPHERE ON THE CARBURIZATION OF SAE 1018 STEEL

Abstract

Carburizing is a thermochemical treatment in which steel components are exposed to a carbon-rich atmosphere with the objective of producing case hardening, characterized by a hardened surface layer and a softer core. The surface hardness of the components depends on the case depth, which is governed by carbon diffusion and influenced by factors such as carbon potential, temperature, exposure time, and the presence of alloying elements. In this study, the effect of exposure time of SAE 1018 steel in a carbon-rich atmosphere during the carburizing process was investigated. Cylindrical specimens of the steel, 1 cm in diameter and 1 cm in height, were packed in a metallic container filled with pulverized charcoal. The samples were heated in a furnace at 950 °C for durations ranging from 2 to 14 hours, with three replicates per condition. Metallographic analyses were performed to determine the case depth and the thickness of the cementite network, while surface hardness tests were conducted to evaluate mechanical performance. The average results were used to construct process behavior curves. The findings revealed a logarithmic relationship between surface hardness and exposure time during carburizing.

Keywords: Carburizing; Case hardening; Case depth.

1. Introducción

La carburización es un tratamiento termoquímico de superficies en el que una atmósfera rica en carbono suministra este elemento a un sustrato de acero a temperaturas elevadas, lo que da como resultado una capa endurecida (“case”) que mejora la dureza mientras se conserva un núcleo comparativamente más blando. Negara y Widiyarta, 2019 señalan que, en la práctica industrial, la carburización en paquete basada en la difusión de carbono a partir de energizantes sólidos como carbón vegetal o polvos derivados del mismo en un paquete sellado sigue utilizándose ampliamente para impartir resistencia al desgaste a componentes como engranajes, ejes, sujetadores y superficies de cojinetes, donde la integridad de la superficie y la tenacidad del núcleo son críticas (Karim y col., 2022; Syahid y col., 2020). La popularidad de este método radica en su simplicidad, bajo costo de herramientas y capacidad de ajustar el proceso mediante la selección del energizante, la temperatura y el tiempo de retención, con el fin de lograr propiedades superficiales específicas mientras se mantiene la ductilidad del núcleo (Negara y Widiyarta, 2019; Karim y col., 2022). Diversos estudios han demostrado que

la variedad de energizantes (Ba_2CO_3 , Na_2CO_3 , carbones de origen vegetal o animal, etc.) influye tanto en la tasa de difusión como en la microestructura resultante, lo que resalta el papel del potencial de carbono en la formación de la capa carburizada (Negara y Widiyarta, 2019; Nitha, 2025).

El rendimiento mecánico de los aceros carburizados se rige principalmente por la profundidad de la capa (case depth), es decir, el grado de penetración del carbono en la superficie. Esta determina el espesor de la zona endurecida formada por difusión y afecta la integridad de la red de cementita generada durante el tratamiento térmico posterior. Una capa más profunda generalmente mejora la resistencia al desgaste y la vida a fatiga, siempre que el núcleo conserve suficiente tenacidad; por el contrario, una capa excesivamente gruesa o frágil puede comprometer la ductilidad y originar tensiones residuales o distorsiones (Supriyono, 2018; Setiawan y Dipogusti, 2022; Satito y col., 2021). La literatura señala que tanto el perfil de dureza como la microestructura de la capa —que suele evolucionar de ferrita/perlita a martensita tras el temple— dependen en gran medida de la cinética de difusión. Karim y col., 2022 y Satito y col., 2021 demostraron que esta está

controlada por el potencial de carbono, la temperatura y el tiempo de exposición. Estas transformaciones impulsadas por difusión incrementan la dureza superficial e influyen en la resistencia al desgaste y en el comportamiento a fatiga de los componentes tratados (Syahid y col., 2020; Wongtimnoi y Chowwanonthapunya, 2022).

Una revisión de los factores que influyen en la difusión del carbono en sistemas de carburización muestra la interacción entre el potencial de carbono, la temperatura, el tiempo de exposición y la composición de aleación del acero. El potencial de carbono, definido por la fuente de carbono y la química del energizante, regula la fuerza impulsora de la difusión y puede controlarse a través de la selección de energizantes como BaCO_3 , carbón de cáscara de coco o melaza de caña (Negara y Widiyarta, (2019); Sujita y col., (2023); Handoko y col., (2021)). La temperatura ejerce un efecto decisivo sobre la cinética: valores más altos aceleran la difusión y promueven la formación de capas más profundas, como lo demuestran diversos estudios en aceros de bajo carbono (Karim y col., 2022; Satito y col., 2021; Wongtimnoi y Chowwanonthapunya, 2022). El tiempo de exposición, por su parte, determina la extensión de la penetración del carbono; se ha

reportado que tiempos prolongados producen capas más gruesas y redes de cementita más marcadas, aunque con ganancias decrecientes en la dureza (Karim y col., 2022; Satito y col., 2021); Wongtimnoi y Chowwanonthapunya, 2022). Finalmente, incluso elementos de aleación en niveles trazan pueden modificar las trayectorias de difusión y la precipitación de carburos, afectando la profundidad de la capa y la dureza final (Sujita y col., 2023; Okwesileze y col., 2022).

En este contexto, el acero SAE 1018, un grado de bajo carbono comúnmente tratado por carburización, resulta de interés particular. Aunque los estudios directos sobre este acero son limitados, investigaciones en materiales afines como el ST37 y el AISI 1020 demuestran la formación de capas endurecidas por difusión, donde la profundidad y la dureza dependen fuertemente de la química del energizante, la temperatura y la duración del tratamiento (Supriyono, 2018; Karim y col., 2022; Setiawan y Dipogusti, 2022; Satito y col., (2021)). Estos resultados respaldan la idea de que la carburización con energizantes basados en carbón vegetal puede generar incrementos sustanciales en dureza y mejoras en propiedades frente al desgaste y la fatiga, manteniendo a la vez la ductilidad del núcleo

(Syahid y col., 2020; Wongtimnoi y Chowwanonthapunya, 2022).

No obstante, persiste una brecha en el estudio sistemático del efecto del tiempo de exposición en la carburización del SAE 1018, especialmente en condiciones de atmósfera rica en carbono y uso de carbón pulverizado como energizante. Mahmood, 2024 y Setiawan, 2024 indicaron que, aunque se han reportado variaciones en dureza y profundidad de capa para distintos aceros y condiciones de temperatura, no existen investigaciones que aborden de manera integral la influencia de tiempos prolongados sobre la evolución de la red de cementita y la dureza superficial de este acero en particular. Atender esta brecha es relevante, pues el tiempo de exposición constituye un parámetro crítico de control en operaciones industriales, con implicaciones directas en el diseño de procesos y en el aseguramiento de calidad (Satito y col., 2021; Wongtimnoi y Chowwanonthapunya, 2022).

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es cuantificar el efecto del tiempo de exposición en la difusión del carbono y en las propiedades mecánicas del acero SAE 1018 carburizado en atmósfera rica en carbono con carbón pulverizado como energizante.

Mediante análisis metalográficos de la profundidad de capa y de la red de cementita, junto con pruebas de dureza superficial, se busca construir curvas de comportamiento que relacionen el tiempo de exposición con las propiedades determinadas por difusión a 950 °C. De forma complementaria, se discute si la dureza superficial sigue una dependencia logarítmica con el tiempo, como sugieren estudios previos en aceros de bajo carbono (Negara y Widiyarta, 2019; Supriyono, 2018; Satito y col., 2021; Wongtimnoi y Chowwanonthapunya, 2022).

2. Metodología experimental

2.1. Proceso de carburización en caja

Se empleó el proceso de carburización en caja utilizando acero SAE 1018 en forma de muestras cilíndricas de ½ pulgada de diámetro y 1 cm de altura. Para el empaquetamiento se fabricaron cajas de solera de acero inoxidable con dimensiones internas de 8 × 5 × 5 cm. Como medio carburizante se utilizó una mezcla de carbón vegetal pulverizado como fuente de carbono y carbonato de calcio (CaCO_3) como energizante, en una proporción de 9:1 en peso. Aproximadamente se utilizaron 180 g

de dicha mezcla por cada caja. Las muestras fueron completamente recubiertas con la mezcla carburizante y posteriormente las cajas se sellaron herméticamente con mortero de albañilería convencional, con el fin de minimizar fugas gaseosas durante el tratamiento térmico. El ciclo de carburización consistió en una rampa de calentamiento de 10 °C/min hasta alcanzar una temperatura de 950 °C. Una vez alcanzada dicha temperatura, se mantuvieron tiempos de carburización de 2, 4, 6, 8, 10, 12 y 14 horas. Finalmente, el enfriamiento se realizó al aire dentro del mismo horno tipo mufla Nabertherm P300.

2.2. Caracterización microestructural

La caracterización microestructural se llevó a cabo mediante microscopía óptica en un equipo OLYMPUS GX41. Las probetas fueron preparadas metalográficamente siguiendo un protocolo de desbaste progresivo con lijas de carburo de silicio (SiC) en granulometrías 240, 360, 500, 1000, 1500 y 2000. Posteriormente, se realizó el pulido con paño y suspensiones de alúmina hasta un tamaño de partícula de 0.3 µm. El ataque químico se efectuó con nital al 3%, permitiendo revelar la microestructura y la

capa carburizada. El análisis metalográfico y la medición del espesor de la capa se realizaron mediante el software Pax-it.

2.3. Ensayos de dureza

La dureza se determinó en la escala Vickers utilizando un durómetro SMTMF modelo MHVS-10AT, aplicando una carga de 1 kgf durante 10 segundos. Para evaluar el efecto del tiempo de carburización sobre la dureza superficial, se realizaron mediciones en la periferia circular de la probeta, a 1 mm de la superficie en la sección transversal.

Adicionalmente, se elaboraron perfiles de dureza desde la superficie exterior hasta el centro de cada muestra, con intervalos de 1 mm entre indentaciones. En cada posición se efectuaron cinco mediciones por pieza, con el propósito de obtener una estadística confiable del comportamiento de la dureza en función de la profundidad carburizada y del tiempo de tratamiento térmico.

3. Resultados y discusión

3.1. Microestructura

En la Figura 1 se muestran las microestructuras del acero SAE 1018 en condición inicial (Figura 1a) y después del proceso de carburizado en caja con carbón vegetal y CaCO_3 a 950°C durante diferentes tiempos de tratamiento (Figuras 1b–h). La condición sin carburizar (Figura 1a) revela una microestructura típica de un acero de bajo carbono, constituida principalmente por ferrita y perlita distribuida de manera homogénea, lo que se refleja en un contraste bajo y ausencia de gradientes de composición.

Tras 2 h de carburizado (Figura 1b), comienza a evidenciarse un enriquecimiento superficial de carbono, donde se forma una capa externa con mayor fracción perlítica y presencia incipiente de carburos, en contraste con el núcleo ferrítico. Este gradiente se hace más notorio conforme aumenta el tiempo de exposición. A 4 h (Figura 1c) y 6 h (Figura 1d), la capa carburizada muestra un incremento en el espesor efectivo, con una zona superficial más oscura atribuible a la formación de cementita secundaria y a la mayor saturación de carbono. En estas condiciones, la transición entre la superficie y

el núcleo es claramente perceptible. En los tiempos de 8 a 10 h (Figuras 1e y 1f), el espesor de la capa carburizada continúa creciendo, observándose una microestructura más compleja en la zona externa, compuesta por una matriz perlítica fina y cementita discontinua, mientras que el núcleo mantiene una fracción predominante de ferrita. Este comportamiento es característico del transporte difusivo de carbono a través de la austenita a alta temperatura.

Para tiempos prolongados de 12 y 14 h (Figuras 1g y 1h), la capa superficial se vuelve más heterogénea, con evidencia de coalescencia de carburos y zonas con posible sobresaturación de carbono que pueden favorecer la fragilización. A pesar de ello, la tendencia general muestra que el aumento del tiempo de carburizado genera un crecimiento sostenido de la capa endurecida y un gradiente microestructural pronunciado entre superficie y núcleo. Estos resultados son coherentes con lo reportado en la literatura, donde el espesor y la morfología de la capa carburizada dependen directamente del tiempo y la temperatura del tratamiento, así como de la reactividad de la mezcla de carburización empleada (Handoko y col., 2021; Karim y col., 2022; Fatkhurrohman y col., 2025). En este estudio, la combinación

de carbón vegetal y CaCO_3 demostró ser efectiva para inducir una difusión progresiva del carbono, obteniéndose capas con espesores crecientes y una microestructura que evoluciona de ferrita-perlita hacia perlita fina y cementita en la zona superficial.

3.2. Profundidad de capa carburizada

La Figura 2 muestra la evolución de la profundidad de la capa carburizada en el acero SAE 1018 a 950°C . Los valores aumentaron progresivamente con el tiempo de tratamiento, alcanzando aproximadamente $600\ \mu\text{m}$ a las 2 h, $750\ \mu\text{m}$ a las 4 h, $880\ \mu\text{m}$ a las 6 h, $1220\ \mu\text{m}$ a las 8 h y un máximo de $1650\ \mu\text{m}$ a las 12 h, seguido de una ligera reducción a $1320\ \mu\text{m}$ a las 14 h. Este comportamiento corresponde a un régimen controlado por difusión en las primeras etapas, donde la penetración de carbono sigue la ley de Fick, siendo proporcional a la raíz cuadrada del tiempo. La disminución observada en tiempos prolongados puede atribuirse a fenómenos de sobresaturación superficial y a la formación de cementita y carburos coalescidos, que actúan como barreras a la difusión de carbono hacia el interior, en concordancia con lo descrito en

estudios previos sobre aceros de bajo carbono.

Estos resultados concuerdan con lo reportado en la literatura. Handoko y col. (2021) encontraron que en el acero ST37 el espesor de la capa carburizada crece de manera sostenida hasta las 10–12 h, mostrando un estancamiento en tiempos mayores. De manera similar, Karim y col. (2022) documentaron que en el acero AISI 1020 el espesor de capa se incrementa significativamente entre las 8 y 12 h, alcanzando valores de 1–1.5 mm con mezclas de carbón y energizantes a base de carbonatos. Asimismo, Fatkhurrohman y col., 2025 observaron que el máximo desarrollo de la capa carburizada en el acero AISI 1020 carburizado con carbón de cáscara de coco y Na_2CO_3 ocurre en el intervalo de 10–12 h, con una estabilización posterior atribuida a limitaciones difusivas y a la presencia de carburos en la superficie. En conjunto, los resultados obtenidos en este estudio confirman que el intervalo más eficiente para lograr una capa carburizada profunda y homogénea en aceros de bajo carbono se encuentra entre 8 y 12 h de tratamiento, ya que en este periodo se obtiene la máxima profundidad sin comprometer la estabilidad microestructural de la superficie.

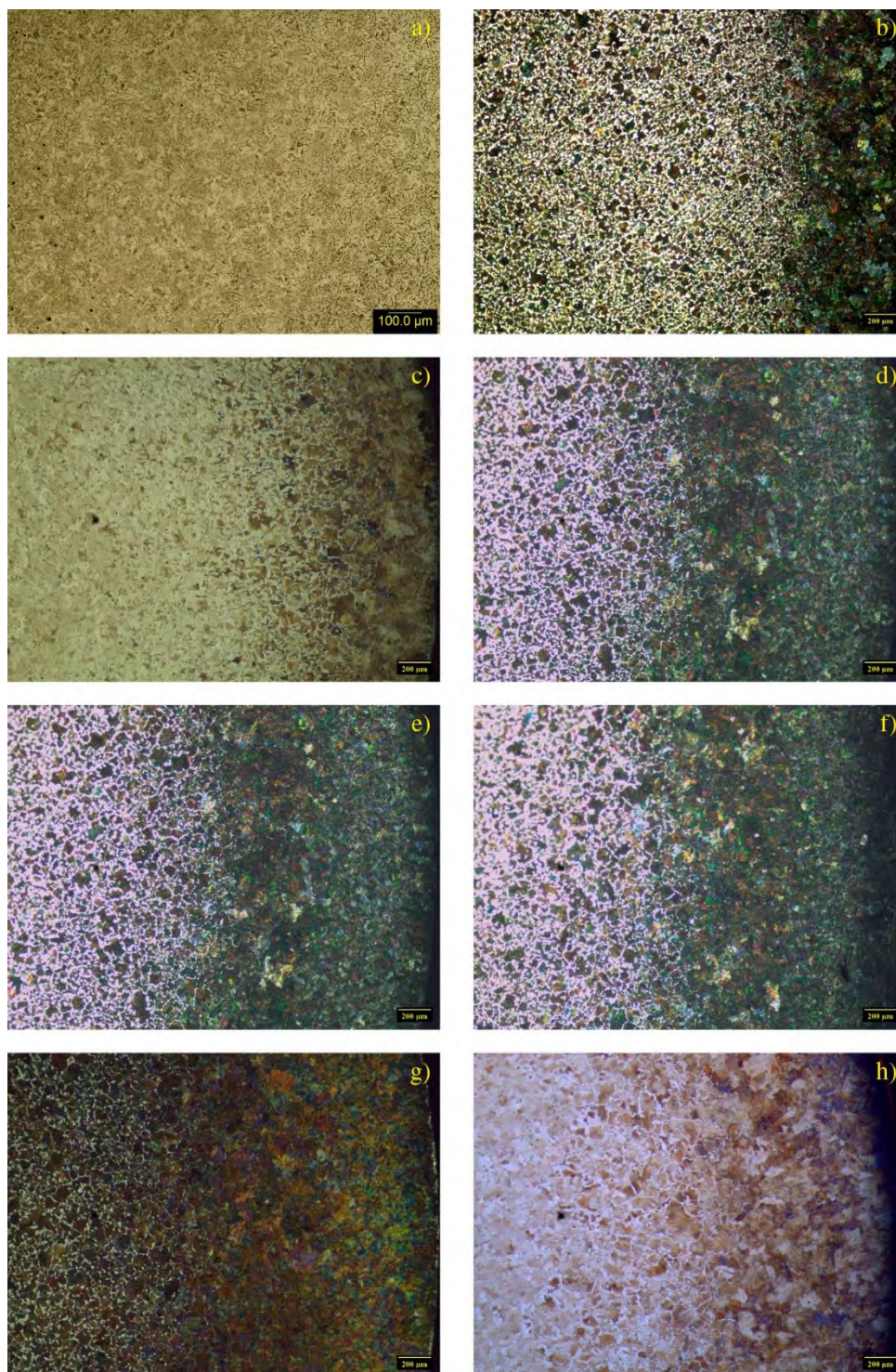


Figura 1. Microestructuras observadas por microscopía óptica del acero SAE 1018. a) condición sin carburizado; b–h) acero carburizado en caja con carbón vegetal y CaCO_3 a 950°C durante diferentes tiempos: b) 2 h, c) 4 h, d) 6 h, e) 8 h, f) 10 h, g) 12 h, y h) 14 h.

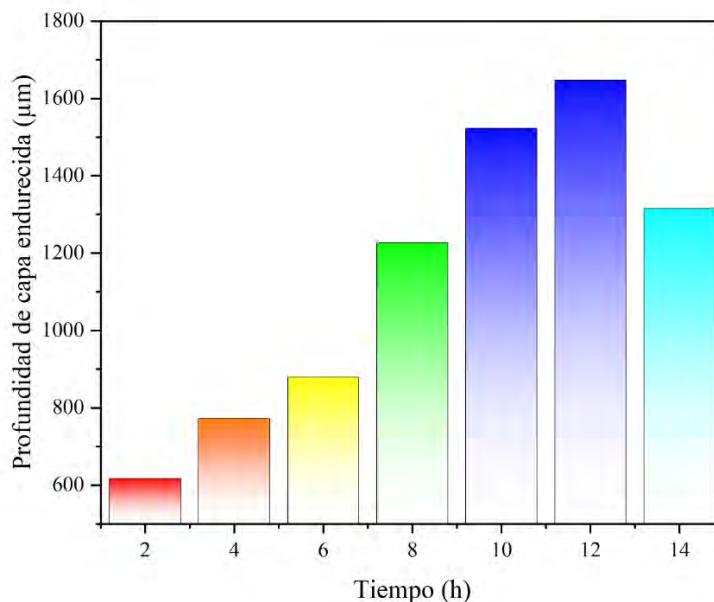


Figura 2. Profundidad de la capa endurecida en el acero SAE 1018 en función del tiempo de carburizado en caja a 950 °C.

3.3. Dureza de la capa carburizada

Los valores de microdureza Vickers obtenidos en la superficie del acero SAE 1018 (Figura 3) muestran un comportamiento característico de los procesos de carburización en caja. En condición inicial (0 h), la dureza es baja (~155 HV), atribuible a la microestructura ferrítica-perlítica del acero de bajo carbono. Tras 2 h de tratamiento, se observa un incremento abrupto hasta ~250 HV, lo cual indica una rápida difusión de carbono en la superficie y la formación de una fracción significativa de perlita fina y cementita secundaria. Este patrón, caracterizado por un aumento temprano

seguido de una meseta, coincide con lo informado para la carburización de aceros de bajo carbono, donde el mayor endurecimiento ocurre en la etapa inicial y posteriormente se limita por el equilibrio de difusión y el engrosamiento de carburos (Karim y col., 2022; Achmadi y col., 2025; Fatkhurrohman y col., 2025).

En los tiempos posteriores (4–14 h), la dureza superficial se mantiene en un rango estable de 230–250 HV, lo que indica que el proceso alcanza un equilibrio difusivo en el cual la velocidad de aporte de carbono desde el medio carburizante se compensa con la saturación de la austenita superficial. Este

comportamiento es consistente con lo observado en el acero ST37, donde el aumento inicial de la dureza ocurre entre las 2 y 4 h, estabilizándose en tratamientos más prolongados (Handoko y col., 2021).

De manera similar, Karim y col. (2022) documentaron que en el acero AISI 1020 la dureza superficial se incrementó de forma significativa en las primeras horas de carburizado a 950 °C, alcanzando valores de 240–260 HV tras 8–12 h. Fatkhurrohman y col. (2025) reportaron que la dureza del AISI 1020 carburizado con carbón de cáscara de coco y Na_2CO_3 aumenta de manera marcada durante las primeras 2–6 h y tiende a estabilizarse en el intervalo de 12–14 h, lo cual se atribuye a un estado casi estacionario de difusión y a la coalescencia de carburos en la zona superficial.

Otros autores también han confirmado esta tendencia. Santoso y col. (2022) informan que en aceros AISI 1020 la dureza se incrementa de forma pronunciada en las primeras horas y luego se estabiliza a valores cercanos a 240–260 HV. De igual manera, Sebayang y col. (2023) y Kulkarni y col. (2025) describen un endurecimiento rápido en la etapa temprana de carburización, asociado a la difusión de carbono, seguido de

una estabilización en tiempos prolongados. En conjunto, estos estudios corroboran que las primeras horas de carburización son críticas para obtener un refuerzo superficial sustancial, mientras que tiempos excesivamente largos no aportan mejoras significativas y pueden incluso favorecer la fragilización superficial por acumulación de cementita. De este modo, los resultados experimentales confirman que, para el acero SAE 1018, el mayor incremento de dureza ocurre en las primeras horas de tratamiento (0–2 h), mientras que para tiempos más prolongados se alcanza un régimen estable cercano a 250 HV, en concordancia con lo reportado en la literatura.

3.4. Perfil de dureza

Los perfiles de microdureza Vickers medidos a lo largo de la sección transversal del acero SAE 1018 muestran un comportamiento característico de los aceros de bajo carbono sometidos a carburización en caja como se muestra en la Figura 4. La dureza máxima se localiza en la superficie (~220–265 HV), mientras que el núcleo conserva valores cercanos a 120–150 HV, generando un gradiente marcado de propiedades mecánicas.

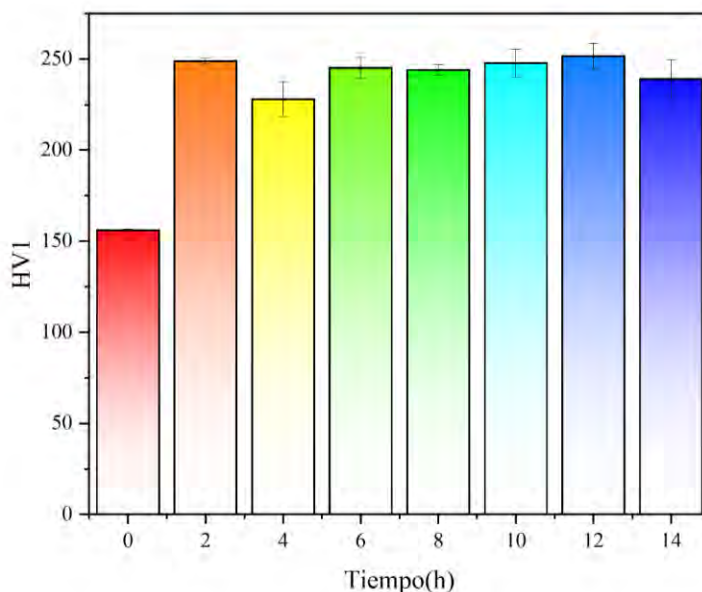


Figura 3. Variación de la dureza Vickers (HV1) en la superficie del acero SAE 1018 en función del tiempo de carburizado en caja a 950 °C. Se observa un incremento abrupto de dureza tras 2 h de tratamiento, seguido de una estabilización en el rango de 230–250 HV para tiempos prolongados.

En los tratamientos cortos (2–4 h), la dureza superficial alcanza valores elevados, pero el descenso hacia el núcleo es abrupto, indicando un espesor de capa limitado y una difusión restringida del carbono. Resultados similares fueron reportados por Negara y col., 2015;, quienes observaron que el aumento de dureza en las primeras horas está acompañado por una baja penetración del carbono y una transición rápida hacia el núcleo.

En los tratamientos intermedios (6–10 h), el gradiente de dureza se hace más progresivo y la zona de transición se amplía, manteniendo

valores intermedios (~170 HV) hasta profundidades de 3–4 mm. Este comportamiento coincide con lo informado por Mazuli y Haripriadi, 2020, quienes describieron un incremento en el espesor efectivo de la capa endurecida con tiempos prolongados, asociado al crecimiento difusivo de la zona carburizada.

En los tratamientos largos (12–14 h), la dureza superficial se mantiene elevada (~260 HV) y la disminución hacia el núcleo es menos pronunciada, lo que evidencia la formación de una capa carburizada más gruesa y homogénea. Estudios previos (por

ejemplo, Karim y col., 2022 también documentan que, a tiempos extendidos, se alcanza un régimen de cuasiequilibrio en el cual el gradiente de dureza es más suave y el espesor de la capa carburizada aumenta de manera significativa.

Los resultados obtenidos confirman que el mayor incremento de dureza ocurre en las primeras horas de carburizado, pero es en los intervalos intermedios y prolongados donde

se desarrolla una capa más profunda y con gradiente suave. Estas observaciones se alinean con el comportamiento controlado por difusión informado para la carburación en paquete de aceros bajos en carbono, donde el endurecimiento más sustancial ocurre en la etapa temprana, y el aumento posterior está limitado por el equilibrio de difusión y la dinámica de engrosamiento del carburo Karim y col., 2022, Achmadi y col., 2025, Fatkhurrohman y col., 2025.

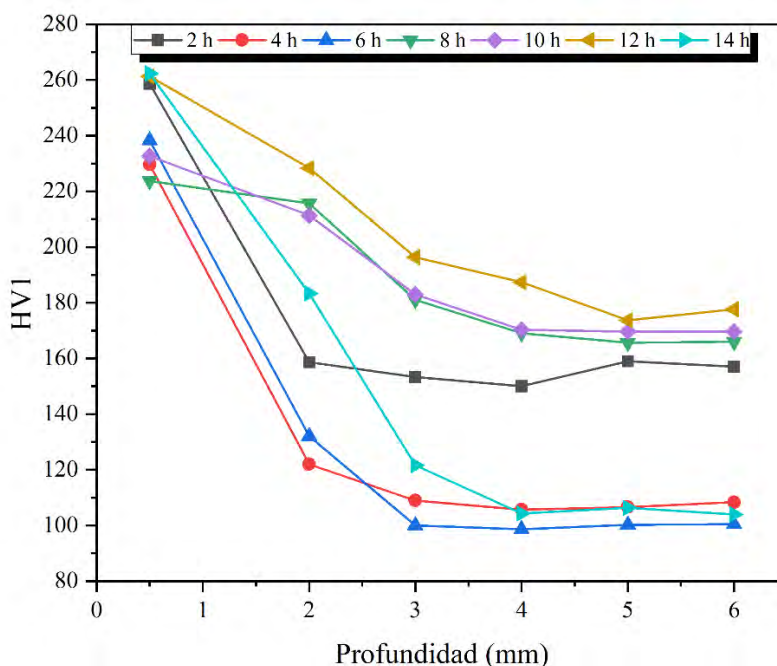


Figura 4. Perfiles de microdureza Vickers (HV1) a lo largo de la sección transversal del acero SAE 1018 carburizado en caja a 950 °C durante diferentes tiempos (2–14 h).

4. Conclusiones

La carburización en caja del acero SAE 1018 a 950 °C produjo un gradiente microestructural desde la superficie hasta el núcleo, caracterizado por la presencia de perlita fina y cementita en la zona exterior y una matriz ferrítica-perlítica en el interior. El espesor de la capa carburizada aumentó con el tiempo de tratamiento, evidenciando la naturaleza difusiva del proceso. Tiempos prolongados (≥ 12 h) favorecieron la coalescencia de carburos y heterogeneidades superficiales, lo que puede inducir fragilización.

La profundidad de capa aumentó progresivamente con el tiempo, alcanzando un máximo de ~ 1650 μm a las 12 h. Más allá de este tiempo, la profundidad se redujo ligeramente (~ 1320 μm a 14 h), lo que se relaciona con fenómenos de sobresaturación superficial y coalescencia de carburos. El intervalo de 8–12 h se identificó como el más eficiente para obtener capas profundas y homogéneas sin comprometer la integridad de la superficie.

La dureza inicial del acero sin carburizar fue baja (~ 155 HV), propia de su microestructura ferrítica-perlítica. Tras 2 h de carburización, la dureza superficial aumentó abruptamente

hasta ~ 250 HV, lo que evidencia una rápida absorción de carbono en las primeras horas. Para tiempos entre 4 y 14 h, la dureza superficial se mantuvo en el rango de 230–250 HV, indicando que el proceso alcanzó un estado de equilibrio difusivo.

Los perfiles de dureza mostraron gradientes claros desde la superficie hasta el núcleo, confirmando la difusión progresiva del carbono. En tratamientos cortos (2–4 h), la capa endurecida fue limitada, con descensos abruptos hacia el núcleo. En intervalos intermedios (6–10 h), la transición fue más gradual, alcanzando valores intermedios (~ 170 HV) hasta profundidades de 3–4 mm. Finalmente, para tiempos prolongados (12–14 h), la dureza superficial se mantuvo alta y el gradiente fue más suave, lo que indica un mayor espesor de capa carburizada.

Referencias bibliográficas

Achmadi, A., Widodo, T., & Irawan, Y. (2025). Influence of lorjuk mussel shells and peanut shells as carburizer media in the pack carburizing process of AISI 1020. *International Journal of Mechanical Engineering Technologies and Applications*, 6(1), 34–47.

<https://doi.org/10.21776/MECHTA.2025.006.01.4>

Fatkhurrohman, F., Aziz, M., & Nurpriyanti, I. (2025). Analisa ketebalan lapisan permukaan baja AISI 1020 setelah proses perlakuan panas pack carburizing menggunakan serbuk arang tempurung kelapa y Na_2CO_3 . *Creative Research in Engineering (Cerie)*, 5(1), 1–7.

<https://doi.org/10.30595/serie.v5i1.22929>

Handoko, D., Vivaldi, V., & Sutrisno, S. (2021). Pengaruh variasi jenis katalisator dan holding time pada proses pack carburizing terhadap perubahan komposisi karbon dan nilai kekerasan baja karbon rendah (low carbon steel) ST 37. *Vokasi Jurnal Publikasi Ilmiah*, 16(1), 38–45.

<https://doi.org/10.31573/vokasi.v16i1.316>

Karim, A., Azmy, I., Khoiriah, S., & Bintoro, C. (2022). Microstructure and mechanical properties of pack carburized AISI 1020 steel using Na_2CO_3 and CaCO_3 catalysts. *Journal of Renewable Energy and Mechanics*, 5(2), 52–59.

<https://doi.org/10.25299/rem.2022.vol5.no02.9965>

Kulkarni, A., Kukreja, T., & Dewangan, S. (2025). Comparative analysis of pack carburizing, flame hardening, and quenching

techniques used for surface hardening of AISI 1020 steel. *Acta Metallurgica Slovaca*, 31(2), 101–107.

<https://doi.org/10.36547/ams.31.2.2176>

Mahmood, O. (2024). Effect of carbonization on the mechanical properties of mild steel utilizing oak charcoal as a carbon source. *Engineering and Technology Journal*, 0(0), 1–9.

<https://doi.org/10.30684/etj.2024.144383.1630>

Mazuli, S., & Haripriadi, B. (2020). Analisa pengaruh arang kayu bakau, arang tempurung kelapa dan arang kayu leban pada proses pack carburizing terhadap kekerasan baja karbon ST 37. *Jurnal Rekayasa Material Manufaktur dan Energi*, 3(2), 128–137.

<https://doi.org/10.30596/rmme.v3i2.5275>

Negara, D., & Widiyarta, I. (2019). The study on mechanical properties of pack carburized low carbon steel using BaCO_3 as energizer. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 673(1), 012125.

<https://doi.org/10.1088/1757-899X/673/1/012125>

Negara, D., Muku, I., Sugita, I., Astika, I., Mustika, I., & Prasetya, D. (2015). Hardness distribution and effective case depth of low

carbon steel after pack carburizing process under different carburizer. *Applied Mechanics and Materials*, 776, 201–207. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.776.201>

Nitha, N. (2025). The influence of cooling techniques on the performance of pack carburized low carbon steel using cypress charcoal. *Aceh International Journal of Science and Technology*, 14(1), 84–94. <https://doi.org/10.13170/aijst.14.1.44224>

Okwesileze, I., Okafor, O., Atanmo, P., Ekengwu, I., & Uyaelumuo, E. (2022). Carburization-based optimization of AISI 8620 steel using rice husks and charcoal as carburizers. *Journal of Engineering Sciences*, 9(2), C9–C18. [https://doi.org/10.21272/jes.2022.9\(2\).c2](https://doi.org/10.21272/jes.2022.9(2).c2)

Santoso, B., Nugroho, S., & Firmansyah, M. (2022). Microstructural evolution and hardness mechanism in low-carbon steels during pack carburizing. *Journal of Materials Science and Technology*, 98, 1001–1008.

Satito, A., Hariyanto, H., & Supandi, S. (2021). Biaxial pressure pack carburizing method to modification local low carbon steel's mechanical properties. *IOP Conference Series: Materials Science and*

Engineering, 1108(1), 012036. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1108/1/012036>

Sebayang, A., Hidayat, A., & Lubis, Z. (2023). Impact of carburizing process on hardness and microstructure of ST37 steel. *Journal of Manufacturing Processes*, 92, 45–52.

Setiawan, A., & Dipogusti, A. (2022). Effect of pack carburizing and viscosity of quenching media on AISI 1010 steel. *Journal of Energy Mechanical Material and Manufacturing Engineering*, 7(1), 9–20. <https://doi.org/10.22219/jemmme.v7i1.20743>

Setiawan, M. (2024). Effect of holding time in the pack carburizing process on the mechanical properties of AISI 1045 steel. *TRAKSI*, 23(2), 239. <https://doi.org/10.26714/traksi.23.2.2023.239-246>

Sujita, S., Okariawan, I., & Hakim, L. (2023). Characteristics of ASTM A36 steel mechanical properties in pack carburizing with carburizing agent coconut shell charcoal and goat bone powder mixed. *Dinamika Teknik Mesin*, 13(1), 57. <https://doi.org/10.29303/dtm.v13i1.619>

Supriyono, S. (2018). The effects of pack carburizing using charcoal on properties of mild steel. *Media Mesin: Majalah Teknik Mesan*, 19(1).
<https://doi.org/10.23917/mesin.v19i1.5812>

Syahid, M., Hayat, A., Arief, S., & Rudi, R. (2020). Fatigue strength improvement of low carbon steel through carburizing process with coconut shell charcoal. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 875(1),
<https://doi.org/012064.10.1088/1757-899X/875/1/012064>

Wongtimnoi, K., & Chowwanonthapunya, T. (2022). Evolution of microstructure and wear resistance of carburized low carbon steel. *International Journal of Integrated Engineering*, 14(1).
<https://doi.org/10.30880/ijie.2022.14.01.007>