

INFLUENCIA DEL TAMAÑO DE GRANO EN LA DUREZA Y LA PROFUNDIDAD DE LA CAPA ENDURECIDA EN ACEROS MICROALEADOS AISI/SAE 8620 Y 4140

MSc. Ronald González 1, MSc. Luis Betancourt 2.

Resumen

En la industria del transporte, el tamaño de grano austenítico previo (TGAP) es un factor crítico en la calidad del endurecimiento superficial de componentes, como los fabricados con aceros microaleados AISI/SAE 8620 y 4140. Esta investigación tuvo como objetivo determinar la influencia del TGAP en las características de la capa endurecida mediante un proceso de cementación. Para ello, se utilizaron muestras de ambos aceros, las cuales se sometieron a tratamientos de normalizado y recocido (850°C) para obtener dos tamaños de grano diferentes (ASTM 8 y ASTM 4). Posteriormente, se aplicaron ciclos de cementación a 900°C con tiempos de 60 y 120 minutos. Se evaluaron la dureza, profundidad y homogeneidad de la capa endurecida utilizando técnicas de microscopía óptica, dureza y perfil de microdureza Vickers. Los resultados evidenciaron que el endurecimiento aumenta al incrementar el número de tamaño de grano (G) del TGAP, por lo que un tamaño de grano fino es más beneficioso, ya que promueve una capa cementada con mayor dureza, profundidad y homogeneidad, preservando la tenacidad del núcleo. No obstante, la morfología de la martensita también influye en dicho endurecimiento. Se determinó que un ciclo de 120 minutos resultó en los mejores espesores, alcanzando 0.86 mm en el acero 4140 y 1.22 mm en el 8620. Estos hallazgos demuestran que el control del TGAP es crucial para la optimización del tiempo en la fabricación de componentes con las exigencias comerciales del sector transporte.

Palabras clave: *Tratamientos térmicos, Difusión, Tamaño de grano austenítico previo, metalografía cuantitativa.*

Recibido: 23/09/2025
Aceptado: 04/10/2025

1 MSc. Ronald González
gonzalezl.ronaldh@gmail.com
ORCID: 0009-0004-3489-6236

2 MSc. Luis Betancourt
betacruz2020@gmail.com
ORCID: 0009-0004-3037-5281

INFLUENCE OF GRAIN SIZE ON HARDNESS AND HARDENED LAYER DEPTH IN AISI/SAE 8620 AND 4140 MICROALLOYED STEELS

Abstract

In the transportation industry, the pre-austenitic grain size (PAGS) is a critical factor in the surface hardening quality of components such as those manufactured with AISI/SAE 8620 and 4140 microalloyed steels. This research aimed to determine the influence of PAGS on the hardened layer characteristics obtained through a carburizing process. Samples of both steels were subjected to normalizing and annealing treatments (850°C) to obtain two different grain sizes (ASTM 8 and ASTM 4). Subsequently, carburizing cycles were applied at 900°C for 60 and 120 minutes. The hardness, depth, and homogeneity of the hardened layer were evaluated using optical microscopy, hardness testing, and Vickers microhardness profiling. The results showed that hardening increases with increasing grain size (G) of the pre-austenitic austenitic (PAA) layer. A finer grain size is more beneficial, as it promotes a cemented layer with greater hardness, depth, and homogeneity, while preserving core toughness. However, the martensite morphology also influences this hardening. A 120-minute cycle resulted in the best thicknesses, reaching 0.86 mm in 4140 steel and 1.22 mm in 8620 steel. These findings demonstrate that PAA control is crucial for optimizing manufacturing time for components that meet the commercial demands of the transportation sector.

Palabras clave: Heat treatments, Diffusion, Pre-austenitic grain size, Quantitative metallography.

Introducción.

La demanda de componentes mecánicos más ligeros, eficientes y duraderos en el sector transporte ha impulsado la investigación en el campo de los tratamientos termoquímicos. La cementación es un proceso fundamental en la fabricación de piezas como engranajes, ejes y piñones, ya que confiere una superficie endurecida y resistente al desgaste, manteniendo un núcleo tenaz y dúctil. Este doble perfil de propiedades es crucial para que el componente pueda soportar las cargas cíclicas y de impacto inherentes a su funcionamiento (Da Silva et al., 2017). Sin embargo, la calidad del proceso de cementación no solo depende de variables operativas como la temperatura y el tiempo, sino también de características microestructurales inherentes al material, como el tamaño de grano austenítico previo (TGAP).

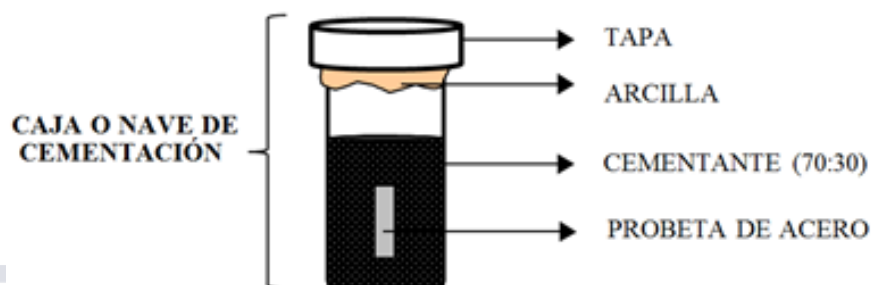
El TGAP se refiere al tamaño del grano de austenita al momento del temple y tiene una influencia directa en la cinética de la difusión y en las propiedades finales del acero (Kumar et al., 2021). Un TGAP fino se ha correlacionado con una mayor templeabilidad, una menor deformación durante el temple y una mejor tenacidad (Mahdian et al., 2016). A pesar de su importancia, el control y la evaluación del TGAP en la industria a menudo se subestiman (Sociedad Americana para Ensayos y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés) International, 2016). El objetivo de esta investigación fue determinar la influencia del TGAP sobre la dureza y la profundidad de la capa endurecida en aceros microaleados bajo la designación según AISI/SAE 4140 y 8620, con la finalidad de establecer un criterio técnico para optimizar el proceso de cementación para aplicaciones en el sector transporte.

1. Metodología Experimental.

Se seleccionaron seis (6) probetas de cada uno de los aceros microaleados AISI/SAE 8620 y 4140, para un total de doce (12) probetas. Para obtener dos tamaños de grano austenítico previo (TGAP) diferentes, las probetas se sometieron a los siguientes tratamientos térmicos:

- Tratamiento térmico (TT) de Normalizado: Las probetas se calentaron a 850°C por un tiempo de 60 minutos y se enfriaron al aire. Este proceso buscó obtener un tamaño de grano fino (aproximadamente $G= 8.0$).
- Tratamiento térmico (TT) de Recocido: Las probetas se calentaron a 850°C por un tiempo de 60 minutos y se enfriaron lentamente dentro del horno. Este proceso buscó obtener un tamaño de grano grueso (aproximadamente $G= 4.0$).
- Tratamiento térmico (TT) de Cementación: Se diseñaron y prepararon cuatro (4) naves o cajas de cementación cilíndrica con sus respectivas tapas. Internamente las probetas fueron distribuidas e inmersas en la mezcla de carbón vegetal (70%) y carbonato de bario (30%) empleado como agente cementante. Seguidamente, se sometieron a ciclos de cementación a 900°C en un horno tipo mufla marca Thermo Scientific / Thermo Line modelo 47900, a dos (2) tiempos de cementación: 60 y 120 minutos. En la figura 1 se puede observar de manera esquemática dicho proceso.

Figura 3. Transformación de la materia prima. Fuente: Briceño L, Carbone M, De la Rosa Y, Fray R, Pírela J (2025).



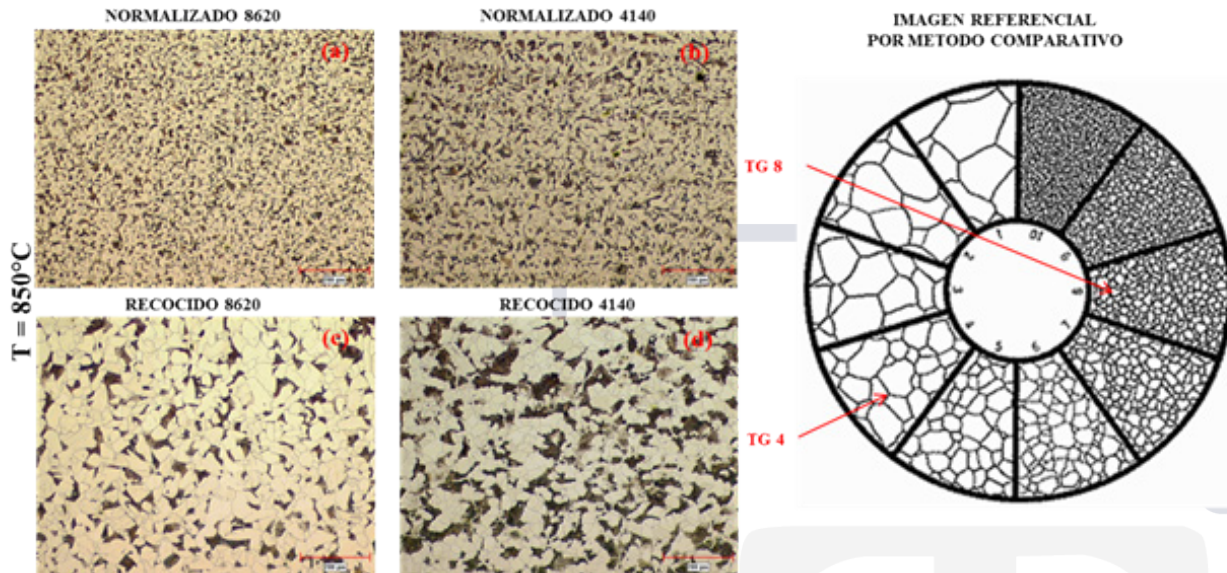
Una vez completados los ciclos, se realizaron las siguientes evaluaciones:

- **Caracterización Microestructural y Cuantificación del TGAP:** Las probetas se prepararon metalográficamente, según lo descrito en la norma ASTM E3-11/17 (ASTM International, 2017) (desbaste secuencial de lijas desde 80 hasta 600 grit, pulido por paños de nylon, fieltro, gamuza y terciopelo con abrasivo de suspensión de alúmina de 5, 1, 0,3 y 0,05 μ m. Seguidamente limpieza ultrasónica y ataque térmico por oxidación a 850°C por 3 minutos). Finalmente se observaron en un microscopio óptico Nikon modelo Epiphot 200, acoplado a un sistema de análisis de imagen Clemex Impak C. El TGAP se midió siguiendo el procedimiento del método Planimétrico de Jeffries de la norma ASTM E112-13 (ASTM International, 2013).
- **Evaluación de Propiedades Mecánicas:** La dureza se midió con un durómetro Marca Wolpert y un microdurómetro marca Clemex FM (para la capa cementada) bajo el método de Vickers, conforme a la norma ASTM E92-17 (ASTM International, 2017) y E384-22 (ASTM International, 2022), respectivamente. Esto con el propósito de determinar el perfil de dureza desde la superficie hacia el núcleo y establecer la profundidad de la capa endurecida.

2.Resultados y Discusión.

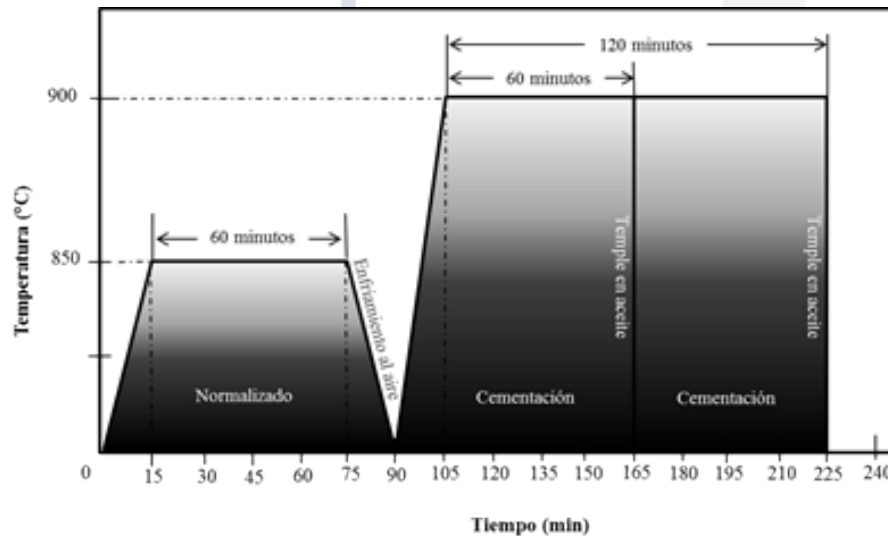
Los tratamientos térmicos iniciales de normalizado y recocido a temperatura constante de 850°C permitieron obtener los dos tamaños de grano iniciales deseados. Estos se determinaron mediante el método planimétrico y validados por comparación empleando la plantilla de la misma norma. Las probetas normalizadas presentaron un tamaño de grano más fino ($G= 8.0$), mientras que las recocidas mostraron un tamaño de grano más grueso ($G= 4.0$). En la figura 2 (a) y (b) se observan las fotomicrografías de ambos aceros tratados térmicamente, evidenciando una estructura bifásica de transformación en estado sólido constituida por Ferrita (granos claros) y Perlita (granos oscuros). En (c) y (d) se observa el notorio crecimiento o grosor del grano producto del recocido.

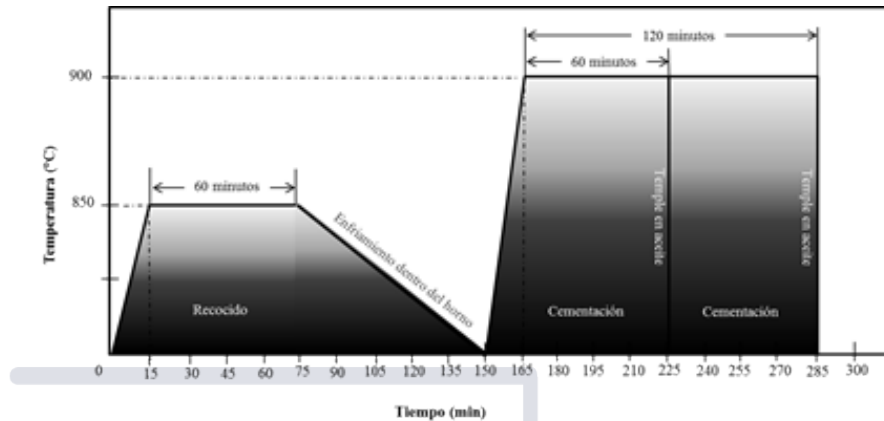
Figura 2. Fotomicrografías de las microestructuras resultantes del normalizado (a y b) y recocido (c y d) a 850°C/60 minutos. En todas las condiciones se observa una microestructura constituida por ferrita y perlita y tamaños de grano diferentes. Aumento: 100X



Para el proceso de cementación, como ya se mencionó anteriormente, se colocaron las probetas (previamente normalizadas y recocidas) en una nave o caja de cementación cilíndrica. Se llevaron a una temperatura constante de 900°C en dos (2) mesetas de permanencia 60 minutos (1 hora) y 120 minutos (2 horas), como se muestra de manera esquemática en la figura 3.

Figura 3. Esquema del diseño del tratamiento térmico de cementación.

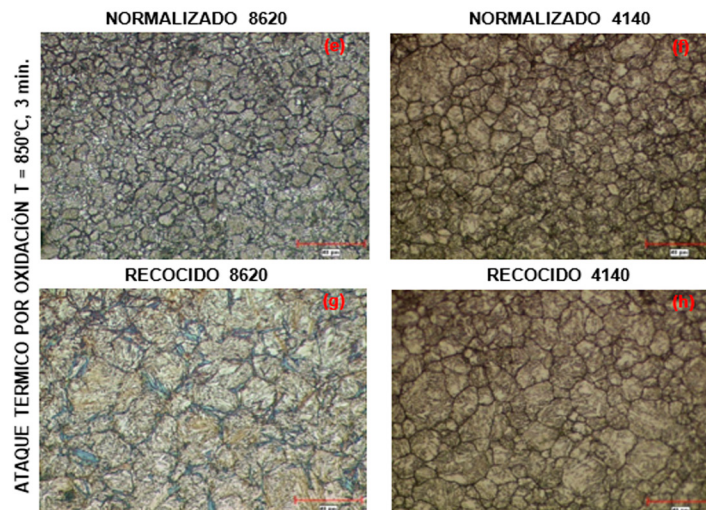




Los resultados de la cementación evidenciaron la clara influencia del TGAP en las propiedades finales de la capa endurecida. Se obtuvo que, en condición de normalizado, el acero AISI/SAE 8620 presentó un TGAP de 10 y el AISI/SAE 4140 de 9 según norma. Para la condición de recocido se obtuvo que el acero AISI/SAE 8620 presentó un TGAP de 8 y el AISI/SAE 4140 de 6 según norma. El método para revelar el TGAP fue el de oxidación térmica previa preparación metalográfica. En la figura 4 se puede observar la variación de dicho TGAP. Es importante señalar que las fotomicrografías tienen una magnificación de 500X, debido a que a aumentos más bajos se dificultaba la visualización y posterior cuantificación del TGAP.

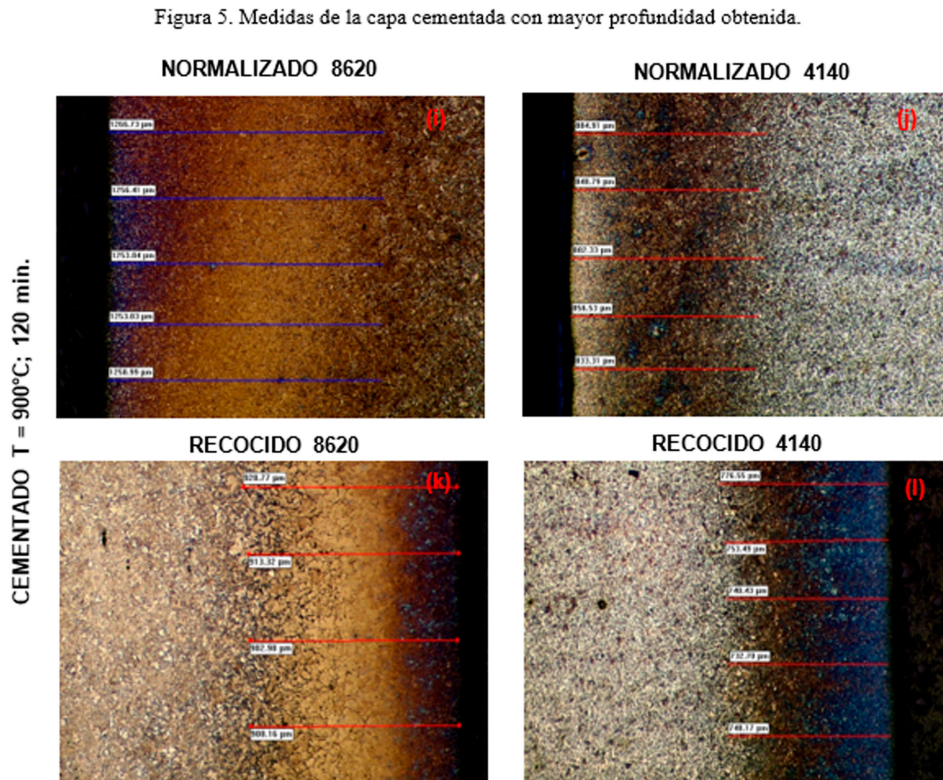
La investigación demostró que tanto el tamaño de grano austenítico previo (TGAP) como el tiempo de cementación son factores cruciales para la calidad de la capa cementada. Como era de esperarse, un mayor tiempo de permanencia en el horno favoreció la difusión de carbono, resultando en una penetración más profunda en todas las probetas. Sin embargo, se observó que este efecto fue particularmente beneficioso en las muestras con un TGAP fino ($G=10.0$ y 9.0) en comparación con las de grano grueso o de recocido ($G=8.0$ y 6.0).

Figura 4. Fotomicrografías de las microestructuras resultantes del ataque térmico por oxidación después del tratamiento térmico de cementación. Se observa un TGAP $G=10.0$ y 9.0 (muestras reviamente normalizadas) (e y f) y TGAP $G= 8.0$ y 6.0 (previamente recocidas) (g y h) respectivamente. Aumento: 500X



Queda evidenciado que la alta densidad de límites de grano actuó como múltiples vías para la difusión de carbono, lo que no solo incrementó la profundidad de la capa endurecida, sino que también promovió un perfil de concentración más uniforme y una microestructura de martensita más fina después del temple. Estos resultados, evidenciados en las fotomicrografías de la Figura 5, confirman que el control el TGAP es esencial para optimizar las propiedades de la capa cementada.

Figura 5. Medidas de la capa cementada con mayor profundidad obtenida.



Los ciclos de 120 minutos resultaron en una mayor profundidad de capa endurecida, alcanzando 1.22mm/1229µm en el acero AISI/SAE 8620 partiendo de un TGAP G= 10.0 y 0.86mm/861,17µm en el acero AISI/SAE 4140 partiendo de un TGAP G= 9.0, es decir, ambos en condición de normalizado. Estos valores son superiores a los obtenidos en los ciclos de 60 minutos, que fueron de 0.91mm/913,31µm en el acero AISI/SAE 8620 partiendo de un TGAP G= 8.0 y 0,75mm/750,25µm en el acero AISI/SAE 4140 partiendo de un TGAP G= 6.0.

El análisis de la dureza reveló que, si bien la dureza superficial aumentó en las probetas con un TGAP más grueso, esto tuvo un efecto negativo en la tenacidad del núcleo. Este compromiso no es ideal para componentes del sector transporte, los cuales requieren una alta capacidad para absorber impactos y cargas repentinas. En la tabla 1 se puede observar dicha diferencia en función de cada variable obtenida.

Tabla 1. Valores de dureza Vickers

ACERO	TT	TGAP	ESPESOR DE CAPA	DUREZA (15,25Kp)	
				HV	HRC
8620	CEMENTACIÓN (NORMALIZADO)	10	1,22 mm / 1229,18µm	618	56
	CEMENTACIÓN (RECOCIDO)	8	0,91 mm / 913,31µm	883	68
4140	CEMENTACIÓN (NORMALIZADO)	9	0,86 mm / 861,17µm	577	54
	CEMENTACIÓN (RECOCIDO)	6	0,75 mm / 750,25µm	695	60

HV: Hardness Vickers (Dureza Vicker); HR: Hardness Rockwell (Dureza Rockwell), escala C.

Fuente: resultados de la aplicación de la prueba

Los valores de dureza obtenidos en ambos aceros entran en el rango estándar establecido por los fabricantes de componentes endurecidos superficialmente bajo el tratamiento térmico de cementación (50 a 70 HRC).

Los valores de dureza máxima de la martensita en aceros como el AISI/SAE 4140 y el AISI/SAE 8620 están intrínsecamente ligados a su morfología, la cual a su vez depende del contenido de carbono (Callister, 2018). La martensita se genera a partir del enfriamiento rápido de la austenita, transformando su estructura cúbica en una tetragonal distorsionada, lo que produce su característica dureza. La forma en que se estructura esta fase, ya sea en listones o placas, determina las propiedades mecánicas finales del material (Reed-Hill & Abbaschian, 1992).

En aceros de bajo carbono, como el AISI/SAE 8620, la martensita adopta una morfología de listones. Estos listones se agrupan en bloques y paquetes, y debido a la menor cantidad de carbono en la red cristalina, la distorsión es menor, lo que se traduce en una microestructura más tenaz y menos frágil (Bhadeshia, 2001).

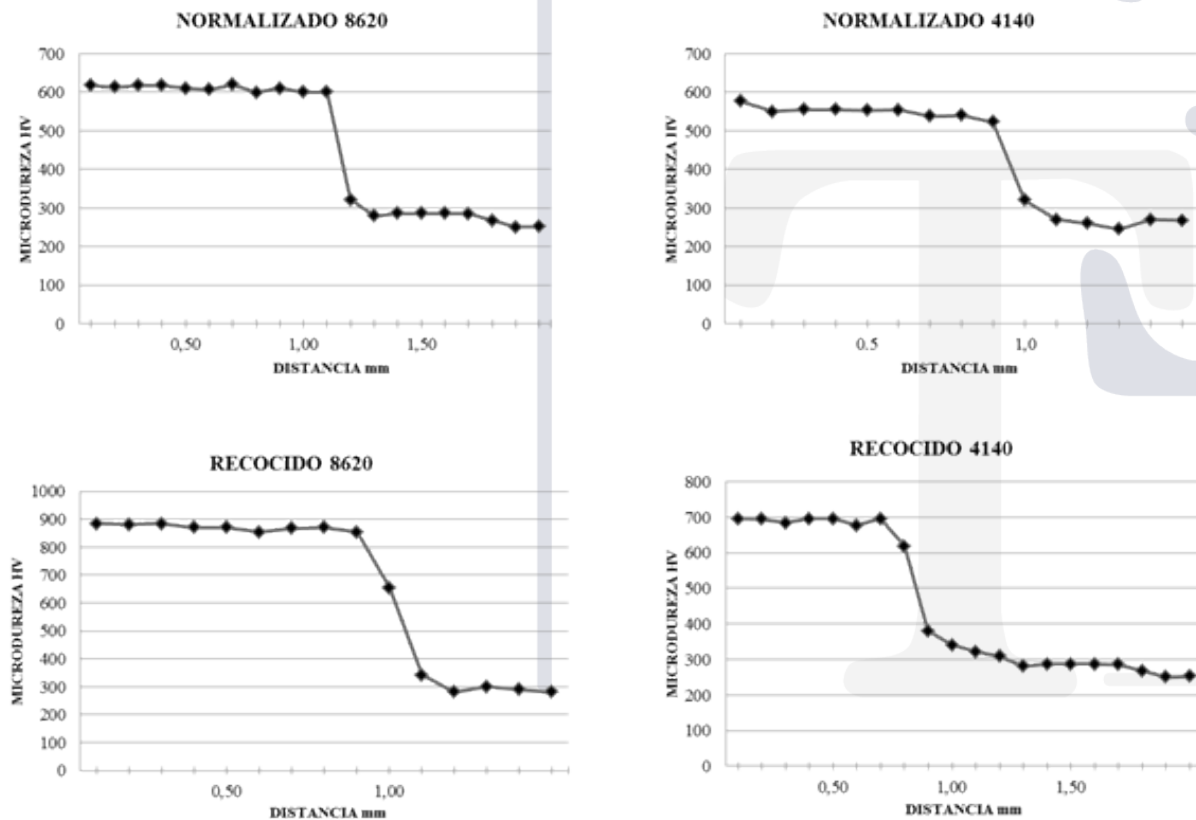
Por el contrario, en aceros de medio a alto carbono, como el AISI/SAE 4140, se forma martensita de placas. Estas placas son más grandes y se cruzan entre sí, generando una distorsión significativa en la red cristalina. Esto resulta en una mayor dureza, pero también aumenta la fragilidad de la estructura, lo que hace necesario un tratamiento térmico posterior de revenido para mejorar la tenacidad (Krauss, 2005).

Contrario a la expectativa de que el proceso de normalizado, al enfriarse al aire, debería producir una dureza superior a la del recocido (enfriamiento en horno), los resultados de dureza de la tabla 1 destacan una ligera diferencia en esta propie-

dad, lo que puede ser atribuible a la morfología de la martensita (tipo placas) y su relación con la dureza.

Con el propósito de validar la profundidad de la capa obtenida con el tratamiento térmico de cementación, se realizó un perfil de microdureza Vickers con carga de 300gf, desde el borde endurecido hasta el centro de las probetas. Los resultados de este perfil confirmaron la profundidad de la capa endurecida que se había medido previamente mediante microscopía óptica, tal como se muestra en la figura 5. A continuación, en la figura 6 se presentan los resultados del ensayo de microdureza, los cuales confirman lo antes señalado.

Figura 6. Perfil de microdureza Vickers desde la capa cementada al centro.



Conclusiones.

La investigación confirmó que el tamaño de grano austenítico previo (TGAP) y el tiempo de cementación son factores determinantes en la calidad y el rendimiento de la capa endurecida en los aceros AISI/SAE 4140 y 8620. Los hallazgos más significativos se resumen a continuación:

1. Influencia del TGAP: Un TGAP fino (ASTM G= 9.0 - 10.0) demostró ser considerablemente más beneficioso que un TGAP grueso (ASTM G= 6.0 - 8.0). La alta densidad de límites de grano en las microestructuras finas actuó como una red de difusión más

eficiente para el carbono, lo que resultó en una capa cementada más profunda y homogénea, con una microestructura de martensita más fina y una mayor dureza superficial. Además, el control de un TGAP fino es crucial para preservar la tenacidad del núcleo, una propiedad vital para los componentes del sector transporte que deben resistir cargas de impacto.

2. Impacto del Tiempo de Cementación: Los ciclos de cementación de 120 minutos resultaron ser los más efectivos, produciendo los mayores espesores de capa endurecida. Se alcanzaron 1.22 mm en el acero 8620 y 0.86 mm en el acero 4140, valores que cumplen con las exigencias del mercado.

3. Diferencias entre los Aceros: El acero AISI/SAE 8620 demostró tener una mayor capacidad de cementación y templabilidad en comparación con el 4140, lo que se atribuye a su composición química. Esto le permitió alcanzar una mayor profundidad de capa endurecida en los ciclos analizados.

En conclusión, el control del TGAP se establece como una herramienta estratégica para optimizar el proceso de cementación. Al favorecer un tamaño de grano fino, los fabricantes pueden no solo reducir los tiempos de tratamiento para alcanzar la profundidad de capa deseada, sino también garantizar la confiabilidad y durabilidad de los componentes para aplicaciones críticas en el sector transporte.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASTM International. (2013). ASTM E112-13: Standard Test Methods for Determining Average Grain Size. ASTM International.
- ASTM International. (2016). Carburizing and Carbonitriding. ASM International.
- ASTM International. (2017). ASTM E3-11/17: Standard Practice for Preparation of Metallographic Specimens. ASTM International.
- ASTM International. (2017). ASTM E92-17: Standard Test Methods for Vickers Hardness and Knoop Hardness of Metallic Materials. ASTM International.
- ASTM International. (2022). ASTM E384-22: Standard Test Method for Microindentation Hardness of Materials. ASTM International.
- Bhadeshia, H. K. D. H. (2001). Bainite in steels. IOM Communications.
- Callister, W. D. (2018). Material science and engineering: An introduction. Wiley.
- da Silva, D. M. T. F., Jorge, A. M., & da Costa, G. F. (2017). Effects of Carburizing and Quenching on the Mechanical Properties of Low-Alloy Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 26(11), 5403–5411.
- Kumar, S. G. H. R., Satya, A. K., Reddy, A. D., Sreevani, V., & Sravanthi, T. (2021). An overview on the influence of heat treatment parameters on the microstructure and properties of steel. *Materials Today: Proceedings*, 46, 4991–4996.
- Krauss, G. (2005). Steels: Processing, structure, and performance. ASM International.
- Mahdian, M. M., Zarei, B., Khoshhal, A., & Farzin, K. (2016). Investigation of Prior Austenite Grain Size on Mechanical Properties of AISI 4140 Steel. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 25(2), 643–650.
- Reed-Hill, R. E., & Abbaschian, R. (1992). Physical metallurgy principles. PWS-Kent Publishing.

DETERMINACIÓN DEL MECANISMO DE DEGRADACIÓN DE UN KIT DE EMBRAGUE UTILIZADO EN VEHÍCULOS LIVIANOS

MSc. González Ronald 1, MSc. Betancourt Luis 2, TSU. Briceño Diego 3,
TSU. Génesis Medina 4.

Resumen

El objetivo de esta investigación consistió en determinar el mecanismo de degradación de un kit de embrague utilizado en vehículos livianos mediante una caracterización metalúrgica. La metodología experimental empleada consistió en: revisión de las especificaciones técnicas del kit, inspección visual y registro fotográfico al momento de recepción, selección de las zonas de corte, preparación metalográfica, caracterización microestructural por microscopía óptica y dureza Vickers en zonas de interés. Macroscópicamente se evidenció un patrón de corrosión generalizada, desprendimiento del material, deformación, fractura de algunos elementos de los componentes evaluados y falta de lubricación. Los resultados permiten indicar que la microestructura presente en los elementos del plato de presión corresponde a una matriz ferrito-perlítica y perlita con grafito laminar tipo A y C, características de acero al carbono y fundición gris, respectivamente. Los elementos del disco presentan martensita revenida con islas de austenita retenida, características de aceros al carbono tratados térmicamente e inclusiones no metálicas. Por último, la microestructura presente en los elementos del collarín corresponde a aceros de bajo carbono tratados térmicamente con un significativo grado de degradación y deformación en los balines, pistas, retenes y blindaje. La Dureza Vickers de los componentes se corresponde con los valores permitidos para este tipo de aplicación. Finalmente, se determinó que de los tres componentes que conforman el kit, el que sufrió mayor degradación fue el collarín, evidenciándose degradación por desgaste adhesivo. La dureza encontrada corresponde a las condiciones originales del material y a las declaradas por los fabricantes.

Palabras clave: Embrague, degradación, desgaste adhesivo, microestructura, dureza.

Recibido: 24/09/2025
Aceptado: 30/09/2025

1 MSc. González Ronald
gonzalezl.ronaldh@gmail.com
ORCID: 0009-0004-3489-6236

2 MSc. Betancourt Luis
betacruz2020@gmail.com
ORCID: 0009-0004-3037-5281

3 TSU. Briceño Diego
ikunami97@gmail.com
ORCID: 0009-0001-4160-6696

4 TSU. Génesis Medina
medinastrella16@gmail.com
ORCID: 0009-0001-4555-5275