

## Efectos tribológicos y mecánicos del acero AISI 8620 borurado: Caracterización experimental y optimización con Taguchi Grey

### Tribological and mechanical effects of borided AISI 8620 steel: Experimental characterization and Grey Taguchi optimization

Citlalli H. Gómez Roa <sup>a</sup>, Edith Flores Vásquez <sup>b</sup>, Oscar A. Gómez Vargas <sup>c</sup>, Allan Balam Rueda Gutiérrez <sup>d</sup>, Arturo Cruz Avilés <sup>e</sup>, María de la Luz Moreno González <sup>f</sup>

#### Abstract:

This study analyzes the influence of temperature and treatment time on the formation and growth of boride layers on AISI 8620 steel, as well as, their impact on the tribological behaviour of the material. The boriding process was carried out at 800, 900, and 1000°C for 4, 6 and 8 h. The results show that increasing temperature and time promotes the growth of the Fe<sub>2</sub>B layer under a diffusion-controlled mechanism; however, excessive growth at a higher temperature may negatively affect the mechanical and tribological performance. The condition of 900°C for 6h led to the formation of a homogenous and well-adhered Fe<sub>2</sub>B layer, achieving maximum microhardness values and the lowest coefficient of friction, associated with a mild adhesive wear mechanism. Process optimization was performed using the Taguchi Grey Relational method, which allowed the simultaneous evaluation of multiple response variables and the determination of the optimal treatment parameters. The results show strong agreement between the statistical analysis and experimental observations, confirming the reliability of the model for predicting material performance. Therefore, the proposed approach represents an effective tool for optimizing thermochemical treatments with potential industrial applications.

#### Keywords:

Boride layers, tribological properties, Grey Relational Taguchi.

#### Resumen:

El presente trabajo analiza la influencia de la temperatura y el tiempo de tratamiento en la formación y crecimiento de las capas boruradas sobre un acero AISI 8620, así como su impacto en el comportamiento tribológico del material. El proceso de borurado se llevó a cabo a 800, 900 y 1000°C durante 4, 6 y 8 h. Los resultados evidencian que el incremento de la temperatura y el tiempo favorece el incremento de la capa Fe<sub>2</sub>B bajo un mecanismo controlado por difusión; sin embargo, un crecimiento excesivo a altas temperaturas puede afectar negativamente la respuesta mecánica y tribológica. La condición de 900°C durante 6 horas promovió la formación de una capa Fe<sub>2</sub>B homogénea y bien adherida, alcanzando valores máximos de microdureza y el menor coeficiente de fricción, asociados a un mecanismo de desgaste adhesivo leve. La optimización del proceso se realizó mediante la metodología Taguchi Grey Relacional, la cual permitió evaluar simultáneamente múltiples variables de respuesta y determinar la combinación óptima de parámetros de tratamiento. Los resultados obtenidos muestran una alta consistencia entre el análisis estadístico y la evidencia experimental, lo que confirma la confiabilidad del modelo para la predicción del desempeño del material. En este sentido, el método empleado se presenta como una herramienta eficaz para la optimización de tratamientos termoquímicos con potencial de aplicación en el ámbito industrial.

<sup>a</sup> TecNM | ITTLA | Tlalnepantla de Baz-Estado de México | México, <https://orcid.org/0009-0003-0035-0406>, Email: citlallihgr@gmail.com

<sup>b</sup> TecNM | ITTLA | Tlalnepantla de Baz-Estado de México | México, <https://orcid.org/0009-0009-0965-4776>, Email: edith.fv@tlalnepantla.tecnm.mx

<sup>c</sup> Autor de Correspondencia, TecNM| ITTLA | Tlalnepantla de Baz-Estado de México | México, <https://orcid.org/0000-0003-3310-6605>, Email: oscar.gv@tlalnepantla.tecnm.mx

<sup>d</sup> TecNM | ITTLA | Tlalnepantla de Baz-Estado de México | México, <https://orcid.org/0009-0002-1887-8148>, Email: allan.rg@tlalnepantla.tecnm.mx

<sup>e</sup> Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo | Escuela Superior de Ciudad Sahagún | Ciudad Sahagún-Hidalgo | México, <https://orcid.org/0000-0003-0455-1646>, Email: arturo\_cruz8085@uaeh.edu.mx

<sup>f</sup> TecNM | ITTLA | Tlalnepantla de Baz-Estado de México | México, <https://orcid.org/0009-0005-1154-0736>, Email: luceromoreno\_02@yahoo.com.mx

**Palabras Clave:**

Capas boruradas, tribología, Taguchi Grey Relacionado.

**Introducción**

Dentro de los aceros grado maquinaria el acero AISI 8620 tiene una gran aplicación y básicamente es en la industria automotriz y aeroespacial. Tiene un buen comportamiento a los esfuerzos de tensión, torsión y a la flexión; no obstante, dichas propiedades pueden optimizarse mediante tratamientos superficiales termoquímicos. Trabajos anteriores (Morales et. al., 2024), han demostrado que el tratamiento termoquímico de borurado proporciona mejoras significativas en la resistencia al desgaste, lo que contribuye a prolongar la vida útil de los componentes. Sin embargo, en el caso específico del acero AISI 8620 aún es necesario continuar con pruebas experimentales y caracterizaciones que aporten la evidencia suficiente para fundamentar el comportamiento y su potencial en aplicaciones industriales de alto desempeño.

El tratamiento termoquímico de borurado consiste en la difusión de átomos de boro desde la superficie al interior del acero, generando capas compuestas principalmente por lo compuestos FeB y Fe<sub>2</sub>B. Estas capas se caracterizan por su elevada dureza, la cual llega a superar los 2000 HV, así como una notable resistencia al desgaste y a la corrosión en diversos ambientes agresivos. La microestructura resultante suele presentar una morfología en forma “aserrada” o “dientes de sierra”, asociada al crecimiento columnar de los boruros al interior del sustrato, pero para aquellos aceros que tienen un alta “aleación” este frente de propagación tiende a ser un poco más plano. Además, podemos decir que la forma de crecimiento de las capas sobre la superficie no afecta de manera significativa las propiedades mecánicas del núcleo, lo cual resulta especialmente ventajoso en aceros de baja aleación. La Tabla 1 presenta los elementos de aleación para el acero AISI 8620. Por lo anterior, la evaluación sistemática de las propiedades tribológicas y mecánicas bajo diferentes condiciones para este acero constituye un tipo de interés, tanto científico como tecnológico.

Tabla 1. Composición Química, acero AISI 8620. Fuente: Elaboración propia.

**Composición química % prom. AISI 8620**

C	Mn	Si	Ni	Cr	Mo
0.20	0.80	0.25	0.60	0.50	0.20

A pesar de los avances reportados en la literatura sobre los beneficios del borurado, aún existe la necesidad de establecer parámetros óptimos de tratamiento que permitan maximizar las propiedades tribológicas y mecánicas del acero AISI 8620. En este sentido, resulta fundamental realizar estudios experimentales que consideren distintas combinaciones de temperatura y tiempo, a fin de evaluar la formación de capas de FeB/Fe<sub>2</sub>B y su influencia en el desempeño del material.

Por otro lado, con el propósito de fortalecer la caracterización y la toma de decisiones en ingeniería de superficies, en este trabajo se emplea la metodología Taguchi Grey Relacionado como herramienta estadística para optimizar los parámetros de borurado y generar predicciones confiables sobre el comportamiento del acero. De esta manera, se busca contribuir al entendimiento del efecto del borurado en el AISI 8620, proporcionando evidencia experimental que respalde su aplicación en entornos industriales donde demandan alta durabilidad y resistencia al desgaste.

Partiendo de datos de trabajos anteriores, la metodología del tratamiento de borurado fue por empaquetamiento en caja debido al control de la formación de las capas y por lo tanto de sus propiedades (Ortiz et. al., 2024).

**Metodología Experimental**

El material empleado fue un acero AISI 8620, del cual se maquinaron probetas a partir de una barra de 50mm de diámetro y 6 mm de espesor. Las muestras fueron preparadas mediante pulido hasta obtener un acabado a espejo, con el fin de eliminar irregularidades superficiales previas al tratamiento.

El proceso de borurado se realizó en un horno tipo mufla con control automático de temperatura, utilizando un medio sólido a base de carburo de boro (B<sub>4</sub>C). Los tratamientos se llevaron a cabo a 800, 900 y 1000°C durante 4, 6 y 8h. Posteriormente las muestras fueron enfriadas al aire, cortadas transversalmente y embebidas en resina epóxica para su análisis.

La caracterización microestructural se efectuó mediante microscopía óptica (MO) y microscopía electrónica de barrido (MEB), previa preparación metalográfica y ataque químico con Nital al 2%. El espesor de la capa borurada y su morfología fueron determinados a partir de estas técnicas, mientras que la composición química se evaluó mediante espectroscopía de energía dispersiva de rayos-X (EDS).

La microdureza superficial se determinó mediante ensayos de indentación Vickers con una carga de 50 g ( $HV_{0.05}$ ) y un tiempo de aplicación de 15s, obteniendo perfiles de dureza desde la superficie hacia el sustrato. El comportamiento tribológico se evaluó mediante ensayos tipo “pin on disc”, utilizando un contra cuerpo de rubí de 6mm de diámetro, una carga de 10N, una velocidad de deslizamiento de 0.1 m/s y una distancia de 800m. Se registró el coeficiente de fricción promedio ( $\mu$ ) y se analizaron las huellas de desgaste mediante MEB para identificar los mecanismos predominantes.

Finalmente, la optimización del proceso se llevó a cabo mediante la metodología Taguchi combinada con el análisis Grey Relacional (GRA), utilizando software Minitab®. Se consideraron como factores la temperatura y el tiempo de tratamiento, y como variables de respuesta la microdureza, el espesor de capa  $Fe_2B$  y el coeficiente de fricción. El diseño experimental  $L_9$  y el análisis de varianza (ANOVA) del Grey Relational Grade (GRG) permitieron determinar la condición óptima del proceso.

### Resultados y discusión

Se cortaron muestras del acero seleccionado de una barra de 1 pulgada de diámetro, con espesores máximos de 5mm, ver Figura 1. Los tiempos y temperaturas seleccionadas como ya se mencionó anteriormente se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2. Tiempos y temperaturas de borurado para el acero 8620. Fuente: Elaboración propia.

Temperatura en °C	800	900	1000
	4	4	4
Tiempo en h	6	6	6
	8	8	8



Figura 1. Corte de muestras de acero del tipo AISI 8620. Fuente: Elaboración propia.

Para las muestras cortadas se les realizó un pulido burdo con lijas abrasivas de diferente tamaño de partícula para eliminar cualquier tipo de defecto sobre la superficie. Consecutivamente los contenedores con las muestras se rellenaron con polvo de boro ( $B_4C$ ) como se muestra en la Figura 2. Los contenedores fueron fabricados en acero inoxidable. Al meter las muestras se les proporcionó un ligero “apisonamiento” para comprimir un poco el polvo de boro junto con las muestras dentro del contenedor.

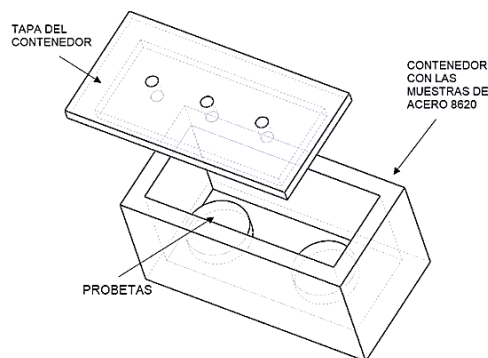
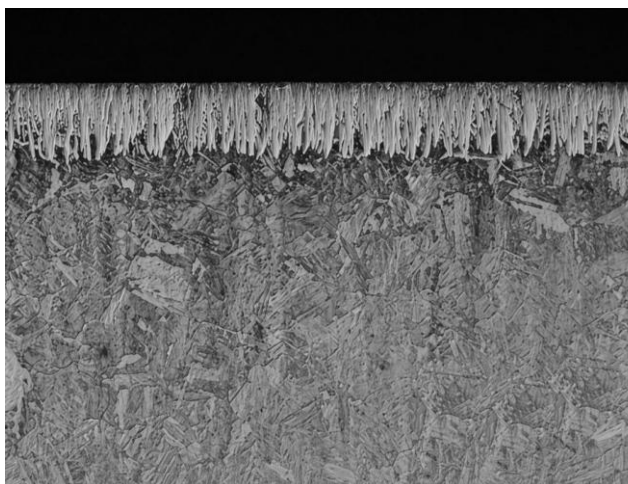
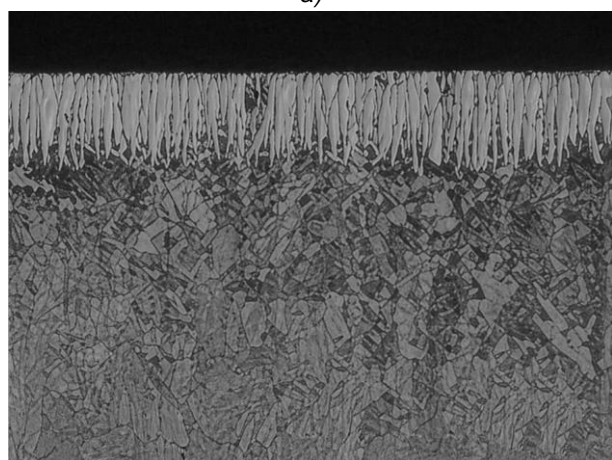


Figura 2. Contenedor utilizado en el tratamiento termoquímico. Fuente: Elaboración propia.

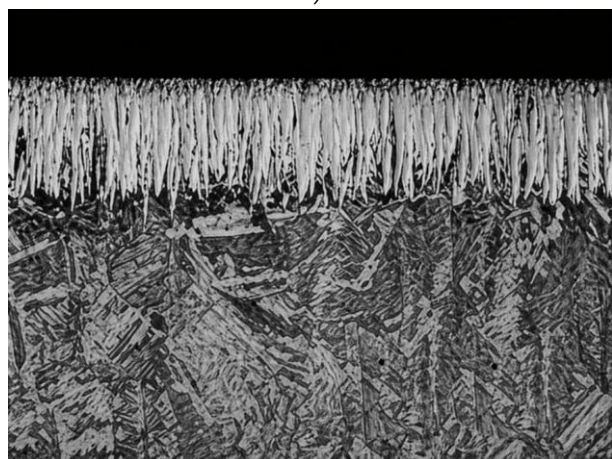
Después de los tratamientos termoquímicos se realizaron los cortes correspondientes y la metalografía para medir los espesores de capa. La Figura 3 muestra la metalografía de las muestras de 900°C a 4 (Figura 3a), 6 (Figura 3b) y 8h (Figura 3c), tomadas en el microscopio óptico.



a)



b)



c)

Figura 3. Espesor de capa de 60, 83 y 136 micras a 900°C por 4 (a), 6 (b) y 8h (c), respectivamente. Fotomicrografías a 100x.

La Tabla 3, muestra los espesores de capa Fe<sub>2</sub>B a partir de 5 mediciones independientes realizadas en diferentes puntos de la sección transversal y se reporta como valor promedio +/- desviación estándar.

Tabla 3. Espesores promedio obtenidos de las muestras de las diferentes temperaturas. Fuente: Elaboración propia.

Temperatura [°C]	Tiempo [h]	Espesor [μm]
800	4	50 +/- 2.2
	6	46.8 +/- 1.5
	8	50.4 +/- 1.1
900	4	63.6 +/- 1.8
	6	82.8 +/- 2.3
	8	98.8 +/- 1.6
1000	4	124.0 +/- 3.4
	6	135.6 +/- 1.8
	8	146.8 +/- 2.5

En el microscopio electrónico de barrido se tomaron los espectros y mapeos de las capas formadas, las Figuras 4 y 5 presentan los resultados correspondientes.

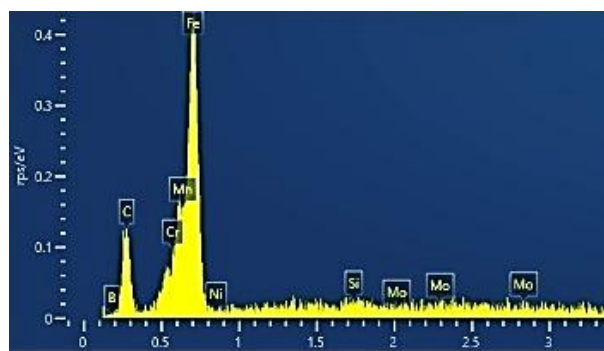


Figura 4. Espectro (EDS) obtenido de la capa generada sobre la superficie del acero AISI 8620. MEB/ITTLA.

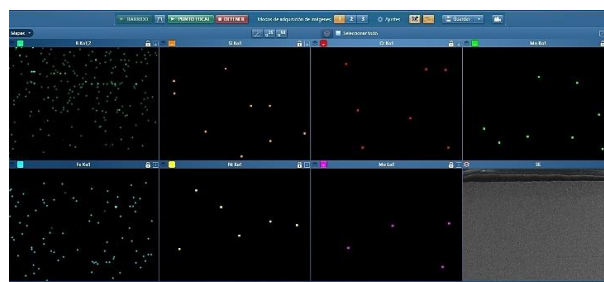


Figura 5. Mapeo de la superficie borurada de un acero AISI 8620. B, Mn, Si, Ni, Cr y Mo. MEB/ITTLA.

Los resultados de las pruebas de microdureza se pueden observar en la Tabla 4 y en la Figura 6 que representa una imagen de los diferentes perfiles obtenidos en las secciones transversales de las muestras cortadas y pulidas bajo las distintas condiciones de temperatura y tiempo del tratamiento. En todos los casos se observa un

incremento significativo de la dureza superficial en comparación con el material sin tratamiento.

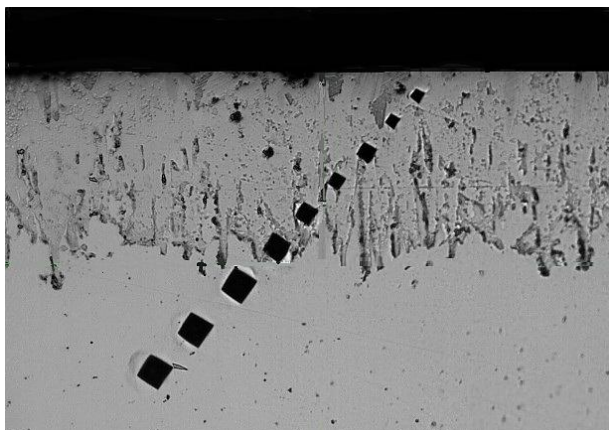


Figura 6. Evaluación de la capa FeB/Fe<sub>2</sub>B mediante la prueba de microdureza. Cortesía de la UAEH-Campus ciudad Sahagún. Fotomicrografía tomada a 200x.

El conjunto de los resultados obtenidos en la prueba de pin on disc se integran en la Tabla 5.

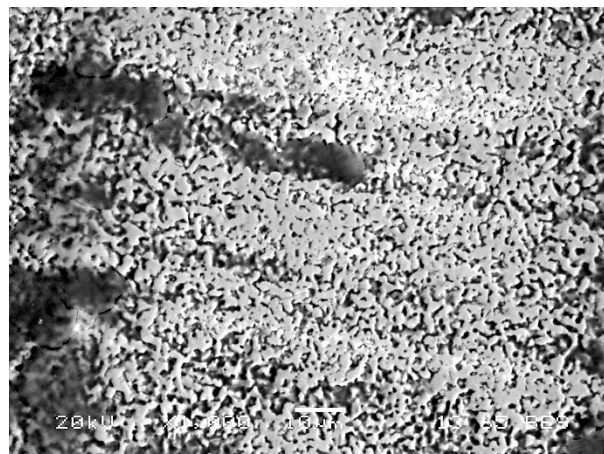


Figura 7. Prueba de pin on disc sobre la capa FeB/Fe<sub>2</sub>B a 900°C por 6h. Fotomicrografía tomada a 1000x. MEB/ITTLA.

Tabla 4. Valores HV obtenidos sobre la capa FeB/Fe<sub>2</sub>B de las muestras tratadas termoquímicamente. Fuente: Elaboración propia.

T [°C]	t [h]	HV				
800	4	1132	1129	1141	1137	1149
	6	1289	1290	1274	1271	1289
	8	1259	1250	1249	1259	1245
900	4	1321	1388	1304	1351	1299
	6	1427	1421	1427	1501	1491
	8	1163	1173	1163	1188	1167
1000	4	1171	1171	1180	1179	1175
	6	1255	1199	1221	1250	1241
	8	1183	1150	1186	1159	1170

Se realizaron varias pruebas de "pin on disc" para determinar el coeficiente de fricción. La Figura 7 es una fotomicrografía tomada en el MEB presenta la superficie de la huella de desgaste sobre una muestra que tuvo una temperatura de tratamiento de 900°C con un tiempo de 6h. Se observa una huella poco profunda y continua, sin evidencia de surcos pronunciados ni delaminación de la capa. La presencia de zonas de material compactado sugiere un mecanismo de desgaste predominantemente adhesivo leve, asociado a la formación de una tribocapa estable. Este comportamiento explica como el coeficiente de fricción registrado se mantiene junto con la distancia recorrida como se puede observar en la Figura 8 y confirma la adecuada adherencia y estabilidad mecánica de la capa FeB/Fe<sub>2</sub>B bajo condiciones de deslizamiento.

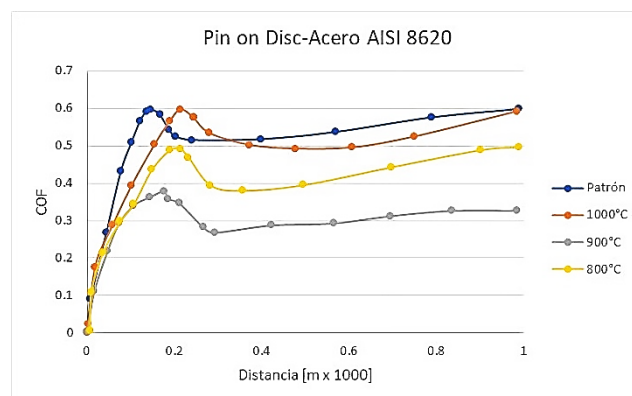


Figura 8. Prueba de "Pin on Disc" para determinar el coeficiente de fricción a diferentes temperaturas y mismo tiempo de exposición (6h). Cortesía, ITESM-CEM.

Con los resultados anteriores se hizo un arreglo ortogonal L<sub>9</sub> (3<sup>2</sup>) considerando como factores la temperatura (T) y el tiempo (t), las respuestas fueron: microdureza (HV), espesor de la capa (mm) y el coeficiente de fricción (μ), (Kalyan, et. al. 2011). Ver Tabla 5.

Tabla 5. Arreglo ortogonal Taguchi L<sub>9</sub> para el proceso de borurado sobre el acero AISI 8620

Corrida	T (°C)	t (h)	HV (prom)	Espesor FeB/Fe <sub>2</sub> B (micras)	μ (prom)
1	800	4	1137.6	48.0	0.52
2	800	6	1282.6	54.8	0.50
3	800	8	1252.4	54.8	0.56
4	900	4	1332.6	63.6	0.46

5	900	6	1453.4	82.8	0.34
6	900	8	1170.8	98.8	0.46
7	1000	4	1175.2	124.0	0.64
8	1000	6	1233.2	135.6	0.70
9	1000	8	1169.6	147.0	0.76

Para la Normalización Grey se aplicaron los criterios estándar, (Barragan, et. al. 2023):

Mayor es mejor: microdureza (HV), espesor (FeB/Fe<sub>2</sub>B)  
 Menor es mejor: coeficiente de fricción

La normalización se realizó según:

Mayor es mejor:

$$x_i^* = \frac{x_i - \min(x)}{\max(x) - \min(x)} \dots\dots[1]$$

Menor es mejor:

$$x_i^* = \frac{\max(x) - x_i}{\max(x) - \min(x)} \dots\dots[2]$$

Se calculó el GRC para cada respuesta y posteriormente el GRG como el promedio de los GRC individuales, ver tabla 6.

Tabla 6. Coeficiente relacional Grey (GRC) y Grey Relational Grade

Corrida	GRG
1	0.474
2	0.643
3	0.585
4	0.671
5	0.907
6	0.612
7	0.402
8	0.447
9	0.351

La Figura 9 muestra los valores de Grey Relational Grade (GRG) obtenidos para cada corrida del arreglo ortogonal Taguchi L<sub>9</sub>. La corrida 5 (900°C – 6 h) presenta el mayor valor de GRG, indicando la condición óptima del proceso de borurado del acero AISI 8620. Esta condición representa el mejor compromiso simultáneo entre:

- Alto valor de la microdureza
- Crecimiento adecuado de la capa FeB/Fe<sub>2</sub>B
- Mejor coeficiente de fricción

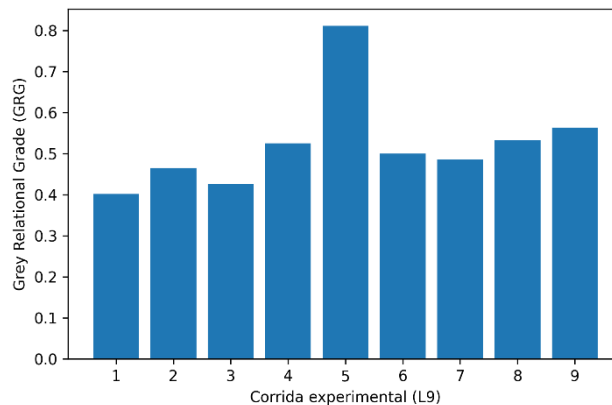


Figura 9. Valores GRG obtenidos para cada corrida del arreglo ortogonal Taguchi L<sub>9</sub>.

El diseño experimental Taguchi L<sub>9</sub>, el análisis Grey y el análisis de varianza (ANOVA) del Grey Relational Grade (GRG) se realizaron utilizando el software estadístico Minitab®, empleado para evaluar la influencia de la temperatura y el tiempo de borurado sobre las respuestas analizadas y para establecer la condición óptima del proceso.

### Conclusiones

El tratamiento de borurado aplicado al acero AISI 8620 permitió la formación de capas compuestas por las fases FeB y Fe<sub>2</sub>B, las cuales influyen significativamente en las propiedades mecánicas y tribológicas del material. En particular, la presencia predominante de la fase Fe<sub>2</sub>B favoreció la obtención de las capas homogéneas, con buena adherencia al sustrato y alta resistencia al desgaste.

Los resultados de microdureza demostraron un incremento considerable en la dureza superficial respecto al material base, alcanzando valores característicos de las capas boruradas. Aunque la fase FeB presenta valores de dureza superiores, su naturaleza frágil puede comprometer la integridad de la capa, mientras que la fase Fe<sub>2</sub>B ofrece un mejor equilibrio entre dureza y comportamiento mecánico.

El ensayo tribológico mediante ensayos tipo “pin on disk” evidenció que las condiciones de tratamiento influyen directamente en el coeficiente de fricción. En particular el tratamiento a 900°C durante 6h presentó el menor valor del coeficiente de fricción, asociado a la formación de una capa Fe<sub>2</sub>B estable y a un mecanismo de desgaste predominantemente adhesivo leve, sin evidencia de delaminación. Por otro lado, condiciones a mayor

temperatura favorecieron el crecimiento excesivo de la capa, lo que puede incrementar la rugosidad superficial y afectar negativamente el desempeño tribológico.

La aplicación de la metodología Taguchi Grey Relacional permitió optimizar simultáneamente múltiples variables de respuesta, identificando como condición óptima el tratamiento a 900°C durante 6h. Los resultados mostraron una alta concordancia entre el análisis estadístico y la evidencia experimental, lo que confirma la confiabilidad del método para la predicción del comportamiento del material bajo distintas condiciones del proceso.

En este sentido, el estudio demuestra que la optimización de los parámetros de borurado es fundamental para controlar el crecimiento de las capas Fe<sub>2</sub>B y mejorar el desempeño del acero AISI 8620, lo que representa una alternativa viable para aplicaciones industriales donde se requiere alta resistencia al desgaste y estabilidad mecánica.

## Referencias

- Barragán-Trinidad, M., Guadarrama-Pérez, O., Guillén-Garcés, R. A., Bustos-Terrones, V., Trevino-Quintanilla, L. G., & Moeller-Chávez, G. (2023). The Grey-Taguchi Method, a Statistical Tool to Optimize the Photo-Fenton Process: A Review. *Water*, 15(15), 2685. <https://doi.org/10.3390/w15152685>
- Kalyan-Das, S.; Sahoo, Prasanta. (2011). Study of Potentiodynamic Polarization Behaviour of Electroless Ni-B Coatings and Optimization using Taguchi Method and Grey Relational Analysis. *Journal of Minerals and Materials Characterization and Engineering*. Vol. 10. <http://dx.doi.org/10.4236/jmmce.2011.1014103>
- Morales-Robles, Á.J.; Ortiz-Domínguez, M.; Gómez-Vargas, O.A.; Moreno-González, M.d.l.L. Boronize Coatings Studied with a New Mass Transfer Model. *Materials* 2024, 17, 5309. <https://doi.org/10.3390/ma17215309>
- Ortiz-Domínguez, M.; Morales-Robles, Ángel J.; Gómez-Vargas, Oscar A.; Moreno-González, Georgina, (2024). Surface growth of boronize coatings studied with mathematical models of diffusion. *Metals*, 14, 670. <https://doi.org/10.3390/met14060670>.