

UNIVERSIDAD DE MONTERREY
ESCUELA DE INGENIERÍA Y TECNOLOGÍAS
INGENIERO MECÁNICO ADMINISTRADOR
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA

**Diseño de Propiedades Mecánicas con
Termo Procesamiento para Aceros al Boro**

Sarah María García Ramírez - 630794

Asesora:
Dra. Gabriela Margarita Martínez Cázares

AGENDA

1. CLIENTE
2. INTRODUCCIÓN
3. MARCO TEÓRICO
4. EXPERIMENTACIÓN
5. RESULTADOS
6. CONCLUSIONES
7. REFERENCIAS
8. ANEXOS





EMPRESA LÍDER EN LA INDUSTRIA DEL
ACERO EN MÉXICO

EXTRACCIÓN DEL MINERAL DE HIERRO
FABRICACIÓN DEL ACERO
ELABORACIÓN DE PRODUCTOS DE ALTO VALOR
DISTRIBUCIÓN

Cliente

Contacto



Carr. Santa María La Floreña Km 15, Rancho La Joya, Ejido La Victoria, 66650 Pesquería, N.L.



Representantes:

Dr. Rafael Mercado Solís
R&D Ternium - Manager

Ing. Efraín Rodríguez
Automotive Early Vendor - Manager

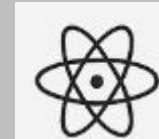


Página web: <https://mx.ternium.com/es/nuestra-empresa>

Introducción

Introducción a los Aceros al Boro

¿Qué son?



- Aceros de bajo carbono con pequeñas adiciones de Boro.
- Destacan por su alta templabilidad, dureza y resistencia al desgaste.

Industria Automotriz



- Estampado en caliente
- Refuerzos estructurales
- Parachoques y Body In White (BIW)
- Rieles, travesaños

Agroindustria



- Herramientas de labranza
- Componentes sometidos a abrasión severa
- Partes de maquinaria agrícola

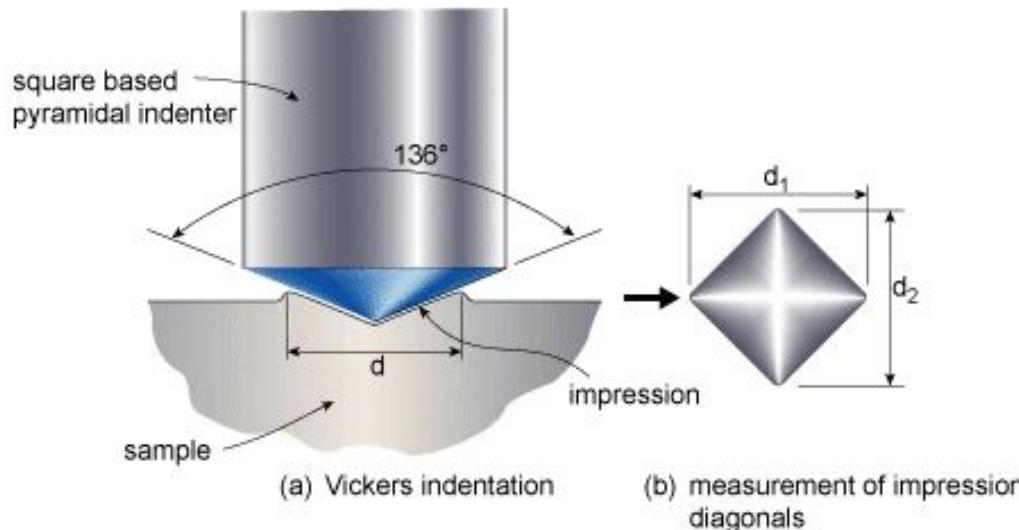
Basado en: Wróbel 2022; Naderi 2011; Er 2004; Tang 2023

Introducción

OBJETIVOS DEL PROYECTO

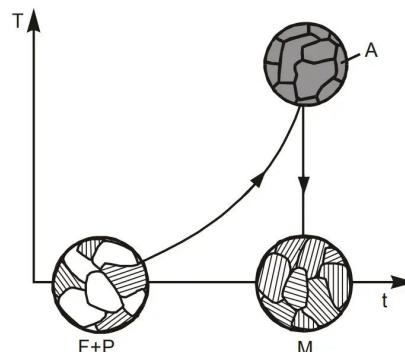
GENERAL

- Incrementar la dureza de aceros por encima de 513 HV (50 HRC) a través de espesor del acero mediante la optimización de ciclos de temple y revenido



ESPECÍFICOS

- Determinar el acero y el TT que presentan la dureza más alta alcanzable de acuerdo a la composición química.
- Mejorar la resistencia al desgaste abrasivo del acero mediante la implementación de ciclos de temple y revenido



Introducción

Objetivos de Desarrollo Sostenible

- Promueve **innovación en procesos metalúrgicos** (optimización de tratamientos en acero al boro).
- Aporta a la **mejora de materiales** para aplicaciones industriales, aumentando eficiencia y vida útil.
- Favorece la **competitividad tecnológica** en el sector metalmecánico.

9 INDUSTRIA, INNOVACIÓN E INFRAESTRUCTURA

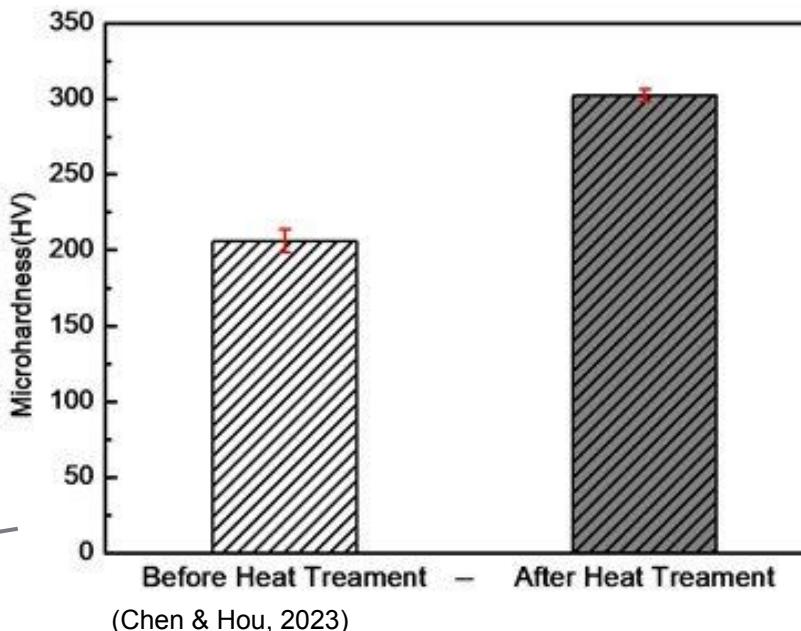


Marco Teórico

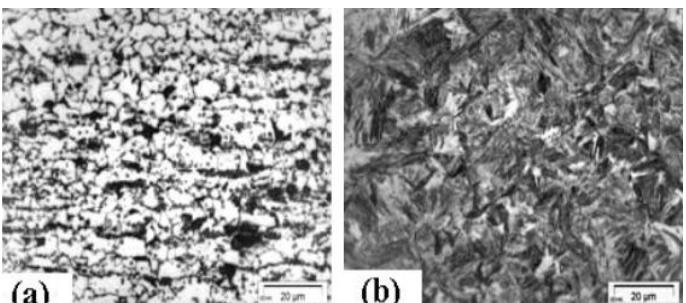
Planteamiento del Problema de Investigación

Antes

Después



Tratamientos térmicos
(Temple y Revenido)



Naderi (2007)

¿Qué implicaciones tiene un TT mal diseñado?

Los acero al boro utilizados en aplicaciones industriales requieren comúnmente **alta resistencia al desgaste y dureza superficial**.

1. Baja resistencia al desgaste → **Fallos prematuros**
2. Tratamiento Térmico No Controlado/No Homogéneo → **Reprocesos o sobrecostos**

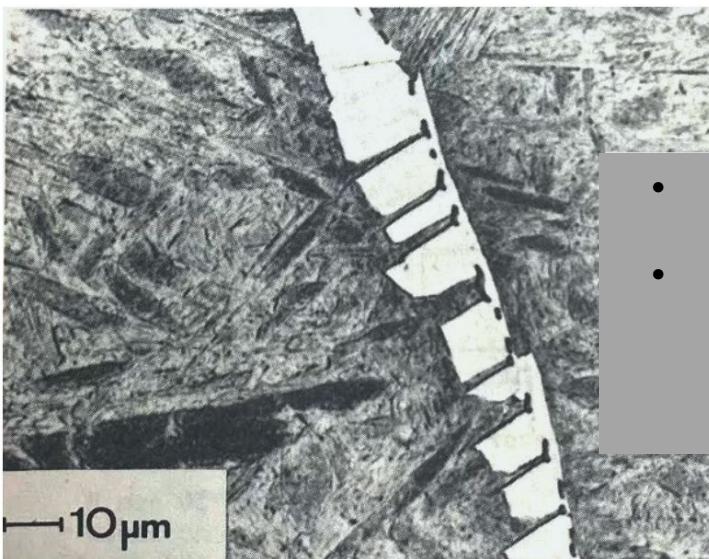


Marco Teórico

Planteamiento del Problema de Investigación

Función del Boro (0.0015 - 0.003 wt.%)

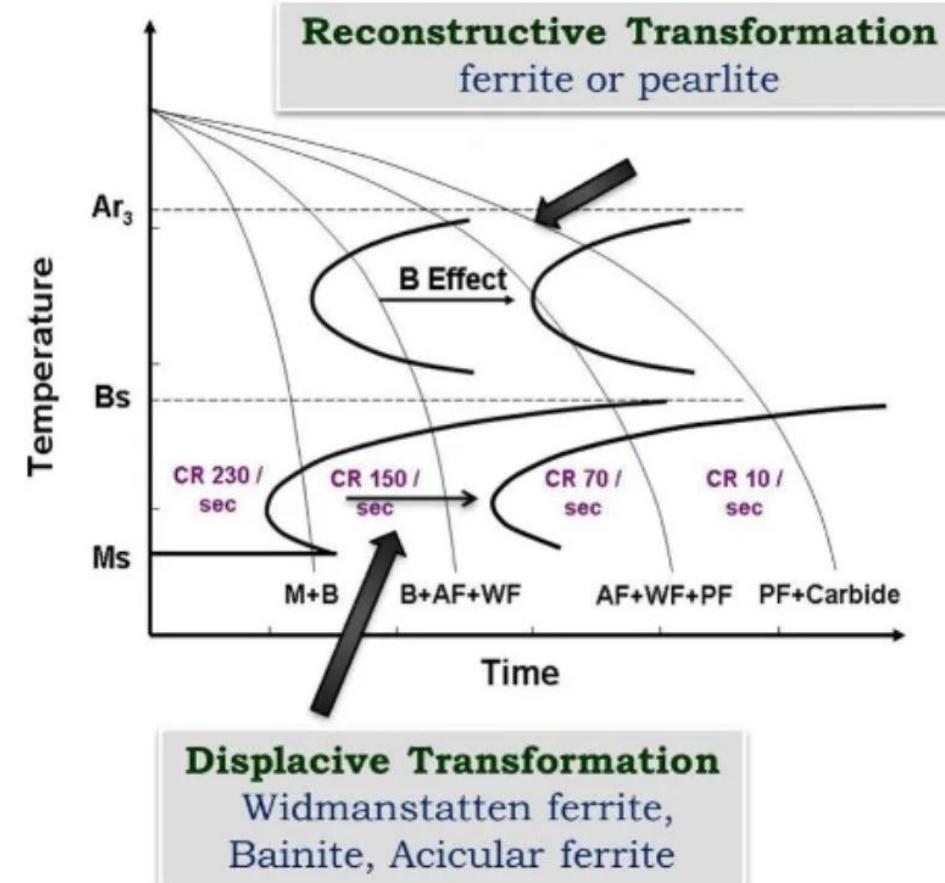
- Se ubica en los límites de grano de **austenita**
- Retarda la formación de **ferrita y perlita** → Facilita la formación de **martensita** al templar
- Permite obtener mayor templabilidad con bajo carbono (Säglitz et al. 2008)



- Fenómeno in situ en un acero 5120 tratado con boro
- Al suprimir la transformación difusiva de ferrita y perlita durante el temple →, los borocarburos permiten que las transformaciones de endurecimiento por martensita se inicien con mayor facilidad

(Willse, 2025)

Efecto del Boro (B effect)



Marco Teórico

Efectos de Elementos Aleantes en el Acero

Carbono (C)

- Principal responsable de la dureza
- Incrementa la resistencia mecánica
- +C → Martensita + dura



Boro (B)

- Aumenta la templabilidad
- Retarda formación de perlita/ferrita → Favorece martensita
- Austenización >900°C → precipitación



Manganese (Mn)

- Estabiliza la austenita
- Aumenta la templabilidad y resistencia al desgaste
- Reduce riesgo de temple insuficiente



Cromo (Cr)

- Incrementa resistencia al desgaste
- Mejora la templabilidad
- Forma carburos duros



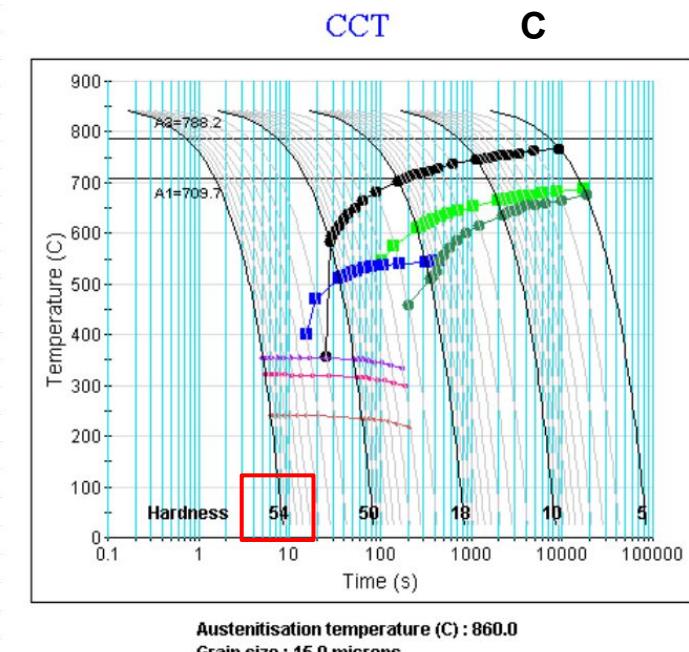
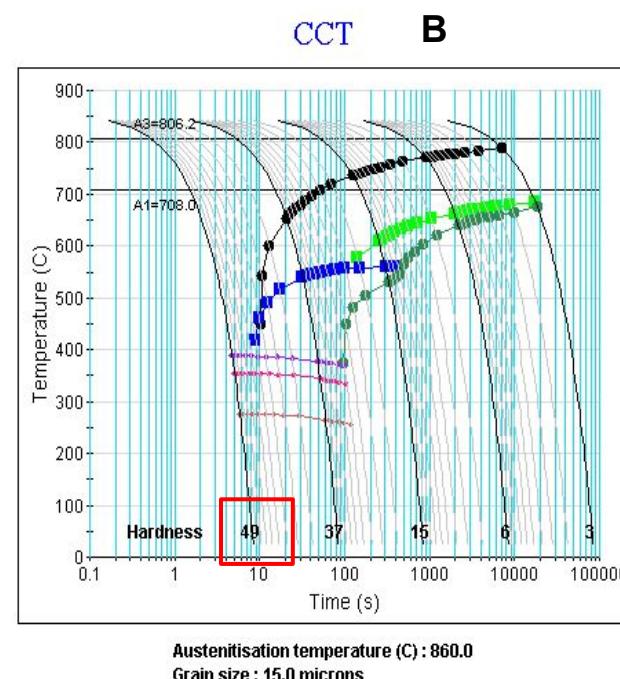
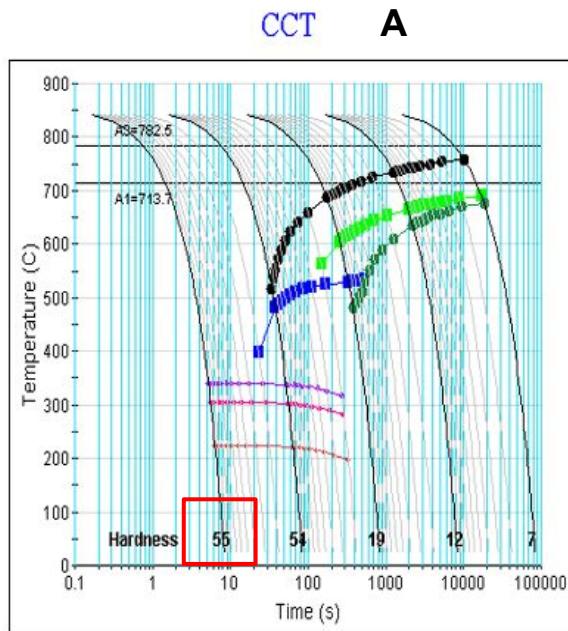
Molibdeno (Mo)

- Evita fragilización
- Incrementa dureza a alta temperatura
- Retarda la formación de perlita/ferrita



Experimentación

Curvas CCT (Cooling Continuous Transformation)



wt.%
C: 0.34
B: 0.0021
Mn: 1.37
Mo: 0.003

wt.%
C: 0.24
B: 0.0027
Mn: 1.18
Mo: 0.004

wt.%
C: 0.312
B: 0.0039
Mn: 1.33
Mo: 0.002

Experimentación

Matriz Experimental-Propuesta y Elegida

Matriz experimental (Tratamientos Térmicos & Pruebas de desgaste abrasivo de acuerdo con ASTM G65)				
Acero	Piezas en Total	Condición	Temp. Revenido (°C)	Pruebas
A	36	A0	NA [As received]	0*
		A1	NA [As quenched]	0*
		A2	250	9
		A3	300	9
		A4	350	9
		A5	400	9
B	36	B0	NA [As received]	0*
		B1	NA [As quenched]	0*
		B2	250	9
		B3	300	9
		B4	350	9
		B5	400	9
C	20	C0	NA[As received]	0
		C1	NA[As quenched]	0
		C2	250	5
		C3	300	5
		C4	350	5
		C5	400	5
			Total	92

- Medio de temple: agua
- Inmersión vertical, sin agitación
- Temperatura de austenización: 850°C
- *Soaking time:* 15 min
- Tiempo de revenido: 30 min
- NOTA: 0*= Resultados referencia de Alexis Sauceda (tesis de Maestría)

Experimentación

Preparación de Muestras

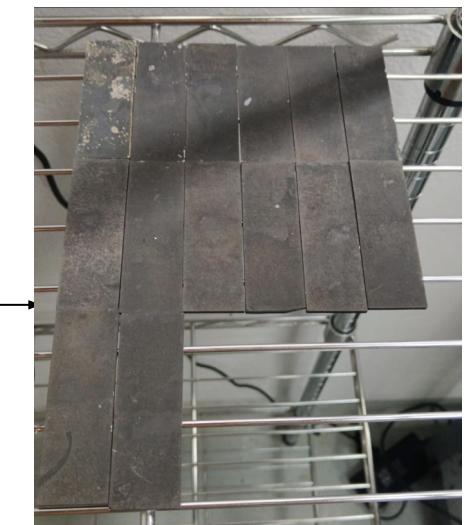
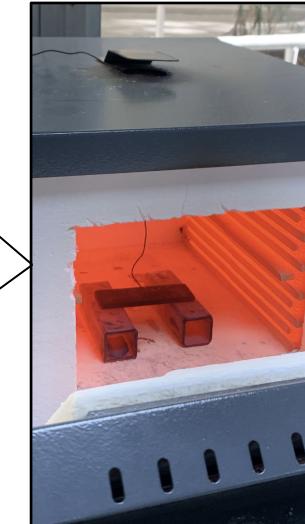
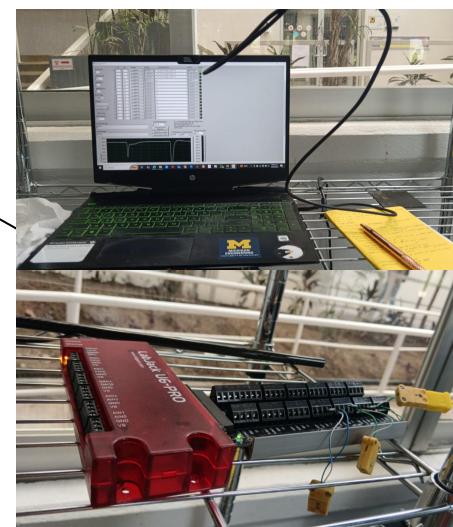


Experimentación

Tratamientos Térmicos

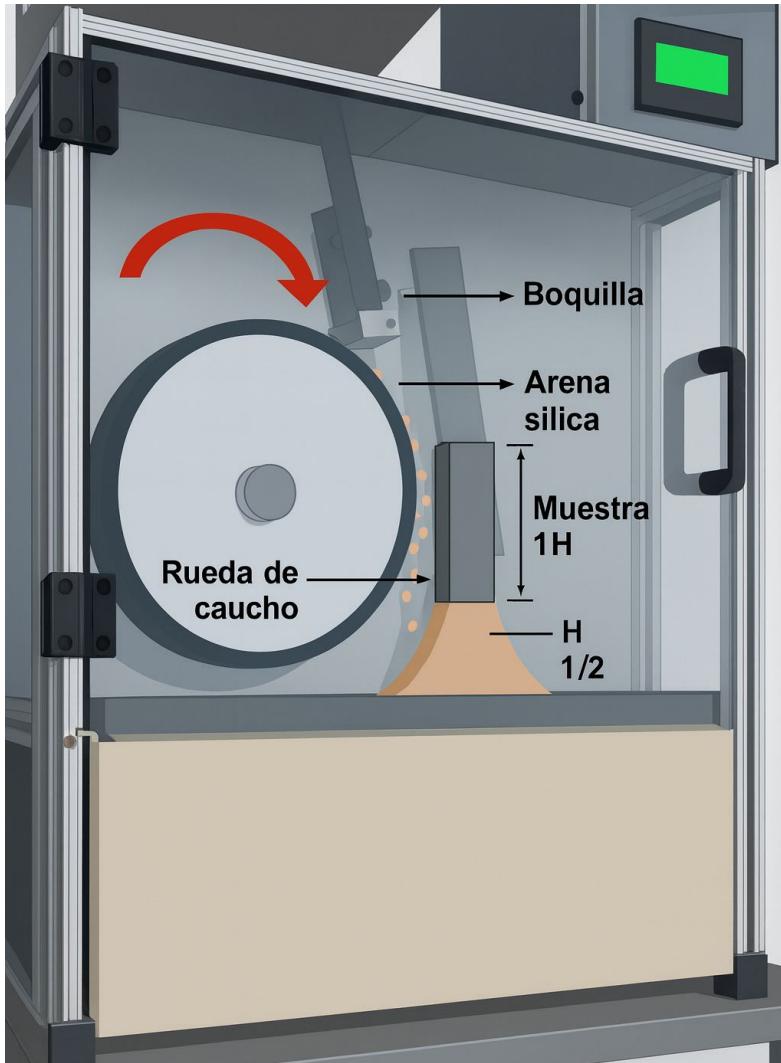


Siempre usar el EPP

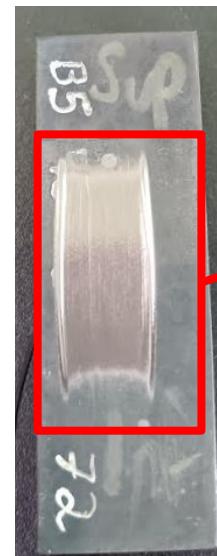


Experimentación

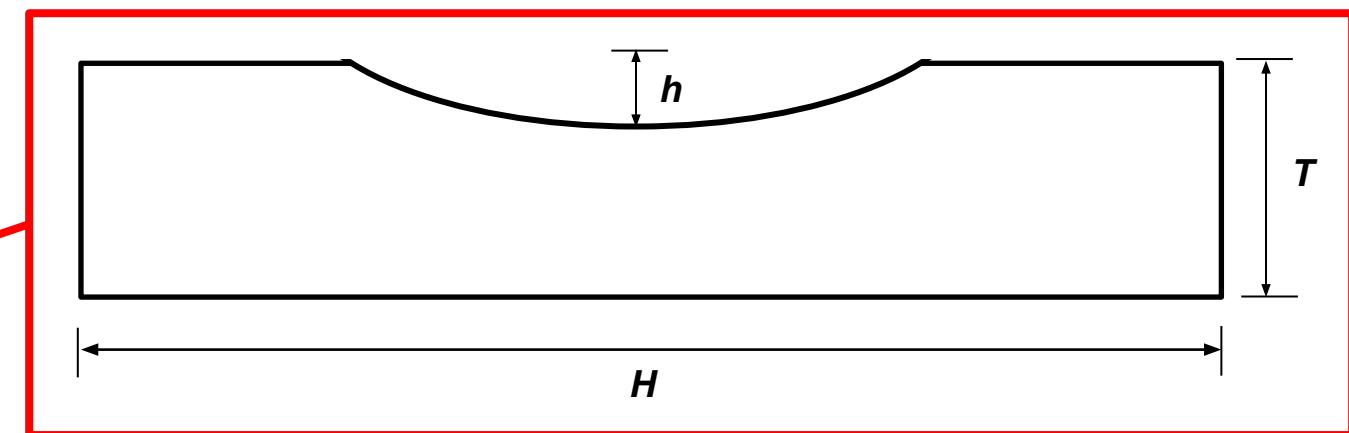
Pruebas de Desgaste Abrasivo



Muestra



Vista Transversal



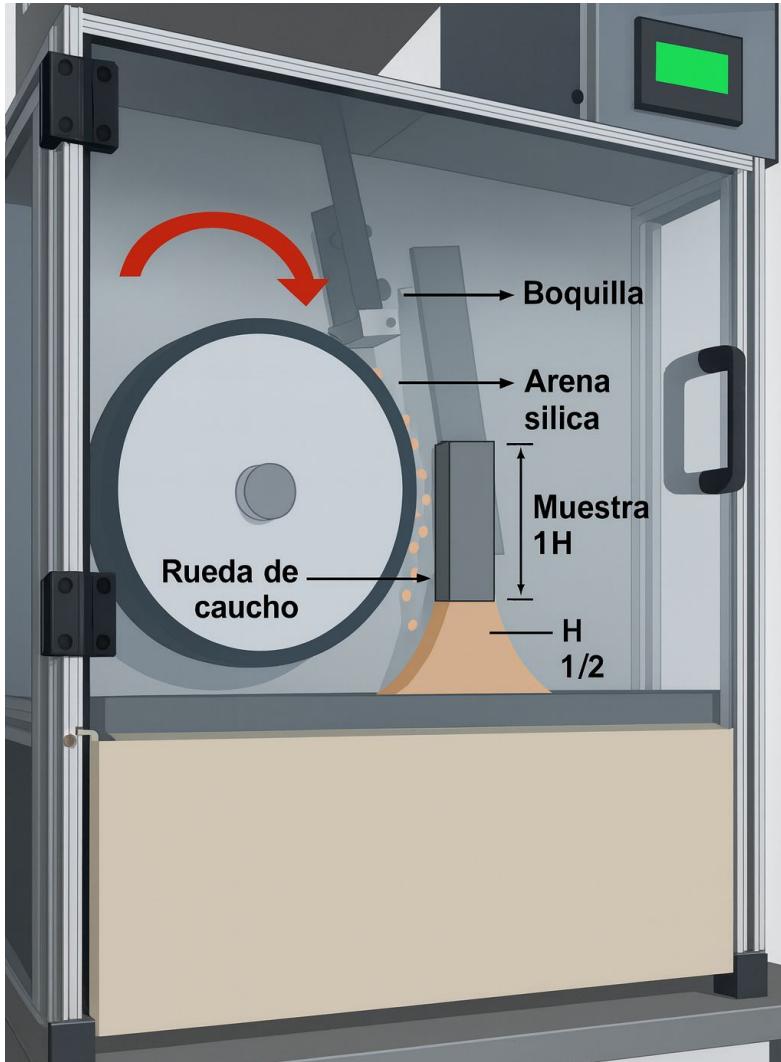
H : Ancho de probeta

T : Espesor

h : profundidad ("surco") de desgaste

Experimentación

Pruebas de Desgaste Abrasivo



El estándar ASTM G65 registra 'pérdida de volumen' sobre una superficie que ha sido sometida a condiciones de desgaste abrasivo.

Parámetros de prueba:

Dimensiones de muestra: 1 x 3 in

Carga aplicada: 30 lb (130 N)

Diámetro de rueda: 9 in (228. 6 mm)

Revoluciones: 6000

Abrasión lineal: 4309 m / 14, 138 ft

Flujo de arena: 300 – 400 g/min

Tiempo de prueba: 30 min

Velocidad de rueda: 200 RPM

Arena sílica como elemento abrasivo (AFS 50-70)

Distancias utilizadas:

1000 m → 3280 ft

2000 m → 6561 ft

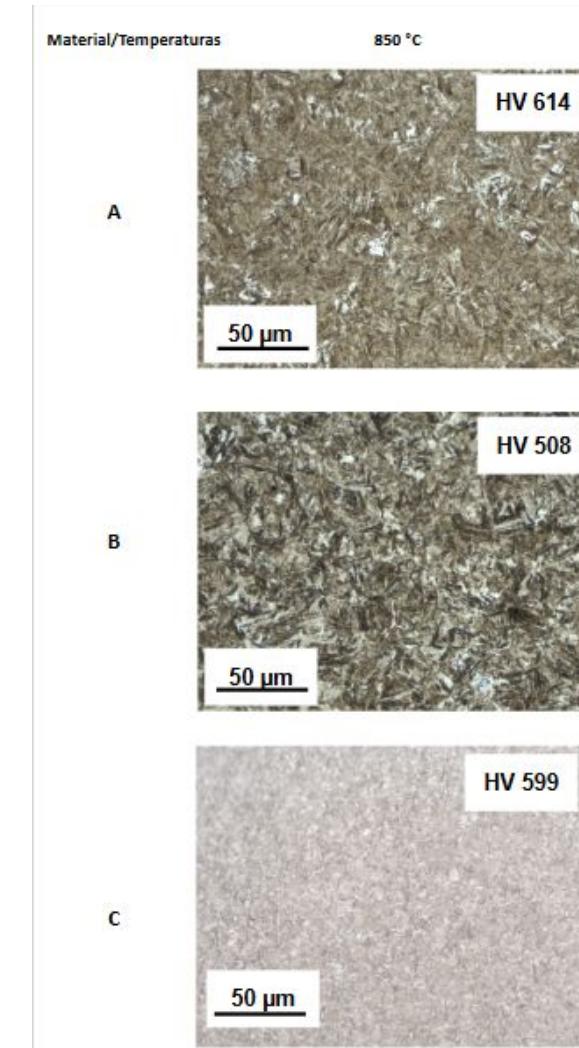
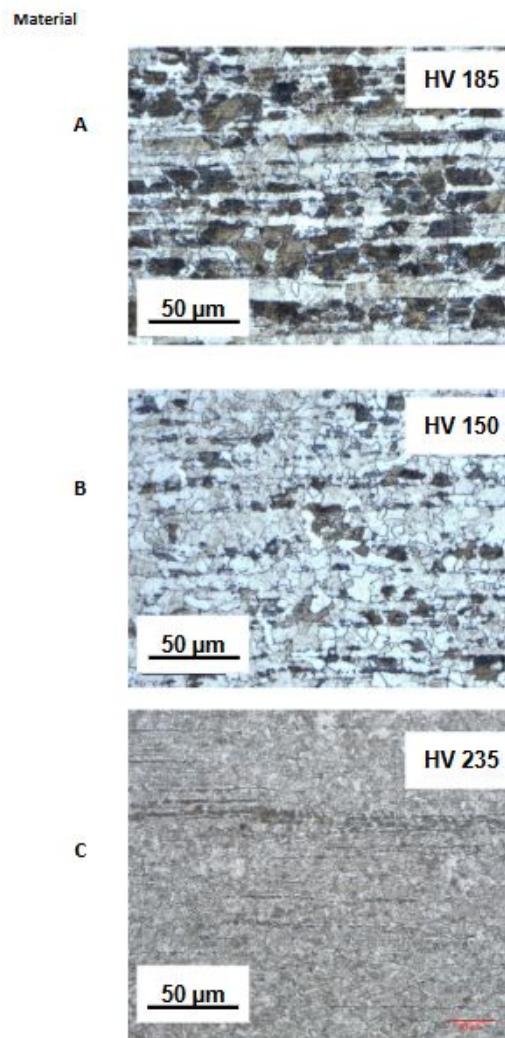
3000 m → 9842 ft

$$\text{Volume Loss (mm}^3\text{)} = \left(\frac{\text{Mass Loss (g)}}{\text{Density } \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right)} \right) * 1000 \text{ (mm}^3\text{)}$$

$$\text{Wear Coefficient } \left(\frac{\text{mm}^3}{\text{m} * \text{N}} \right) = \left(\frac{\text{Volume Loss (mm}^3\text{)}}{\text{Linear Abrasion (m)} * \text{Normal Load (N)}} \right)$$

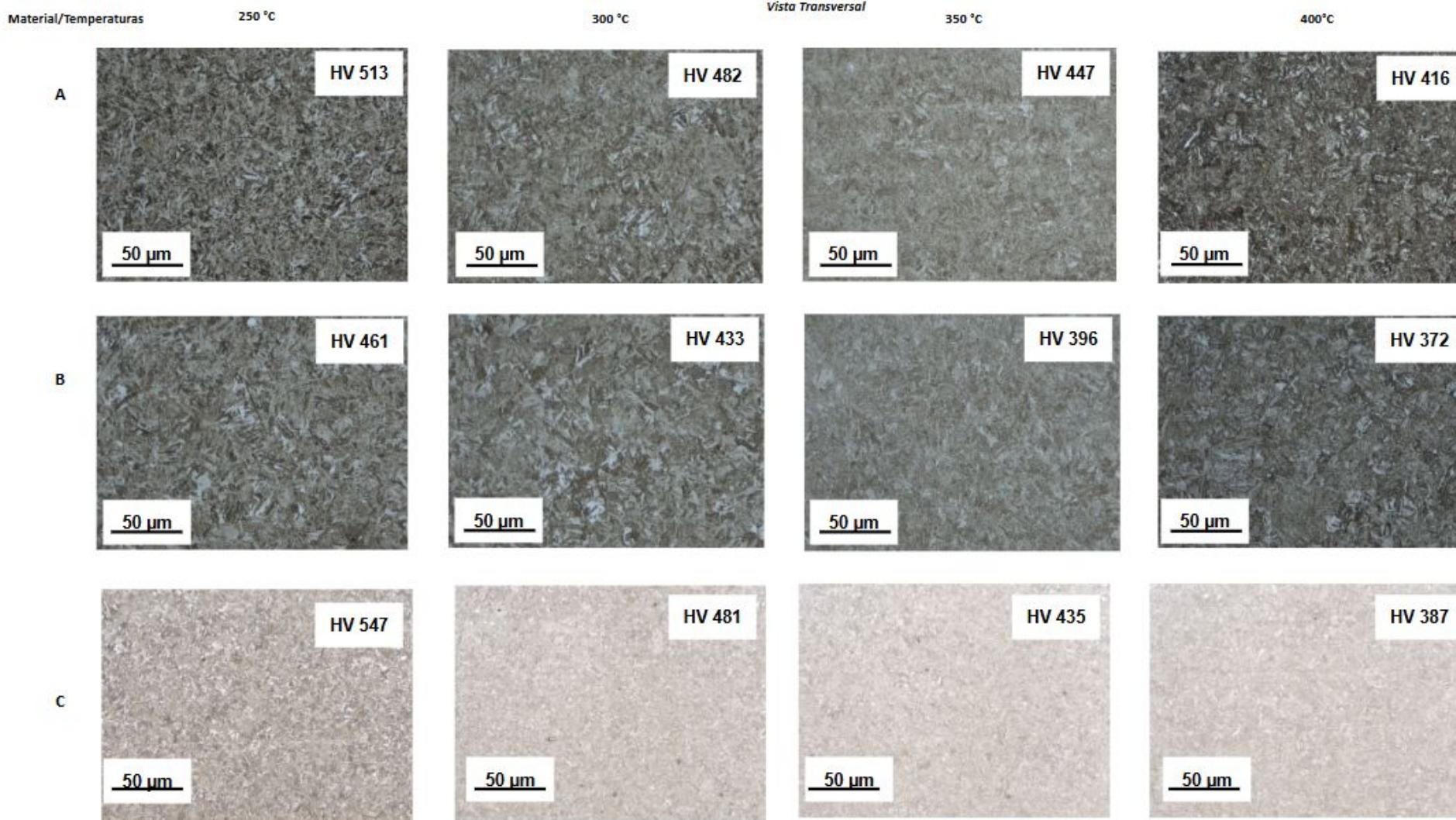
Experimentación

Metalografía (As Received y As Quenched) - HV



Experimentación

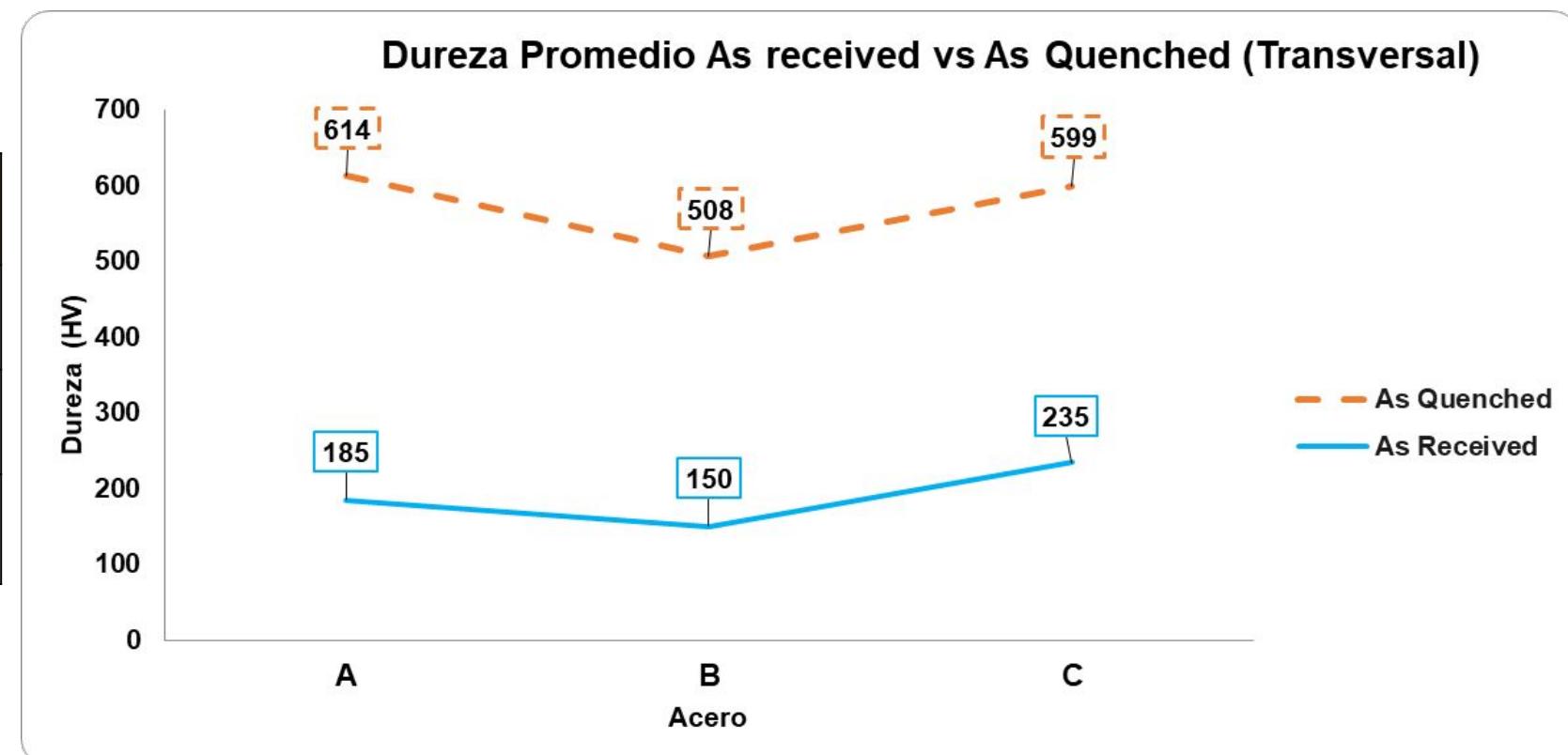
Metalografía (Después de Revenido a 250, 300, 350 y 400 °C) - HV



Resultados

Resultados Obtenidos – Durezas (As Received y As Quenched)

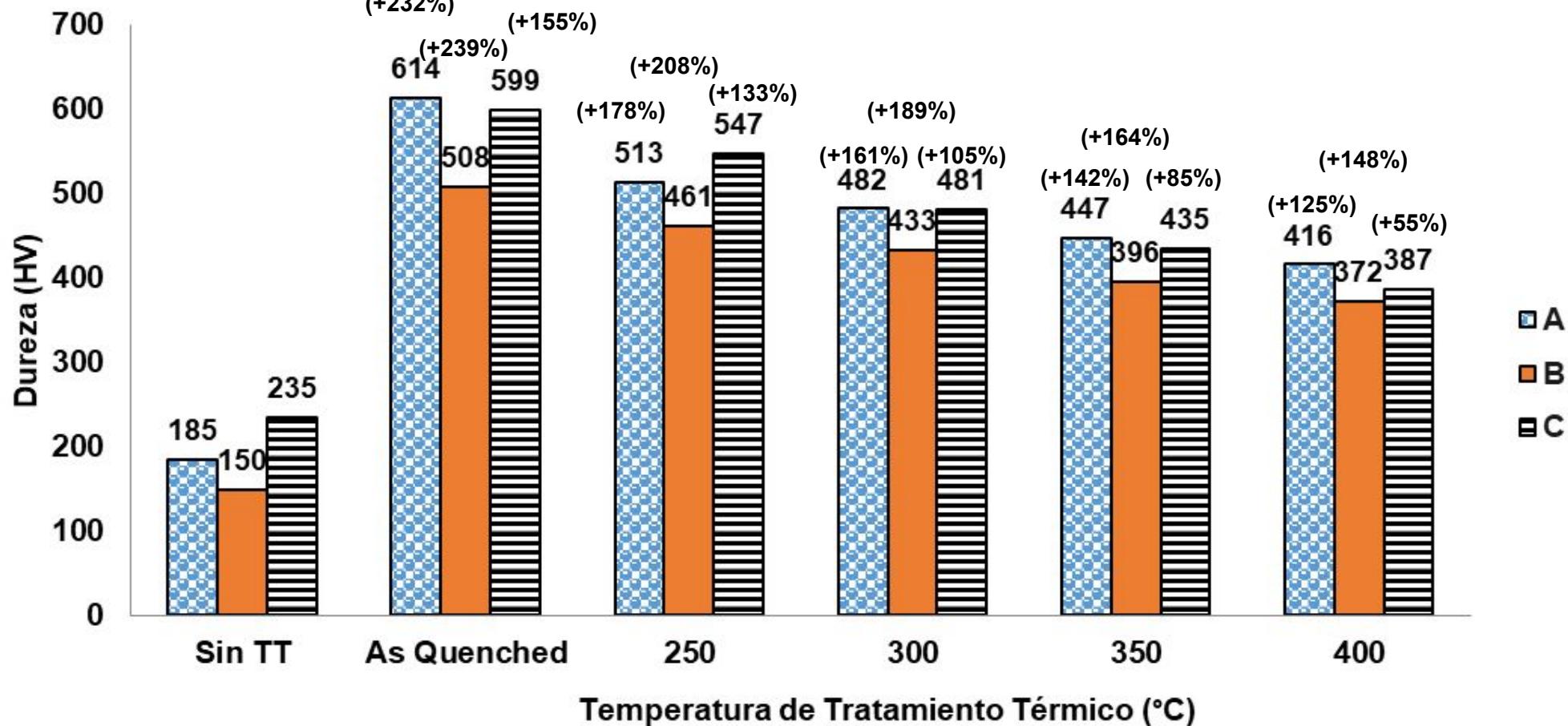
Acero/Sección	As Received	As Quenched
A	185	614
B	150	508
C	235	599



Resultados

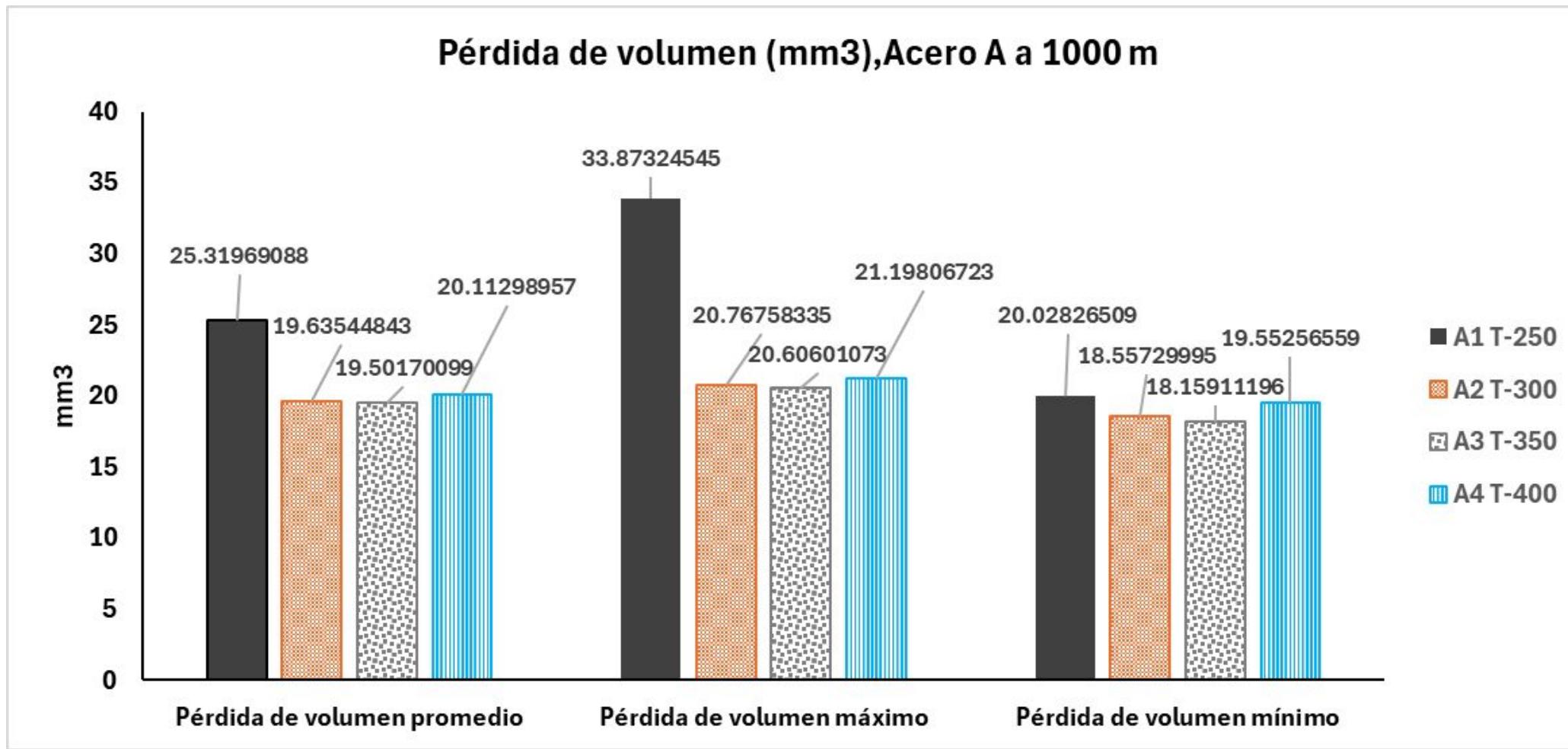
Resultados Obtenidos – Durezas (Sin TT; As Quenched; Revenido a 250, 300, 350 y 400 °C)

As Received vs As Quenched vs Revenido (Transversal)



Resultados

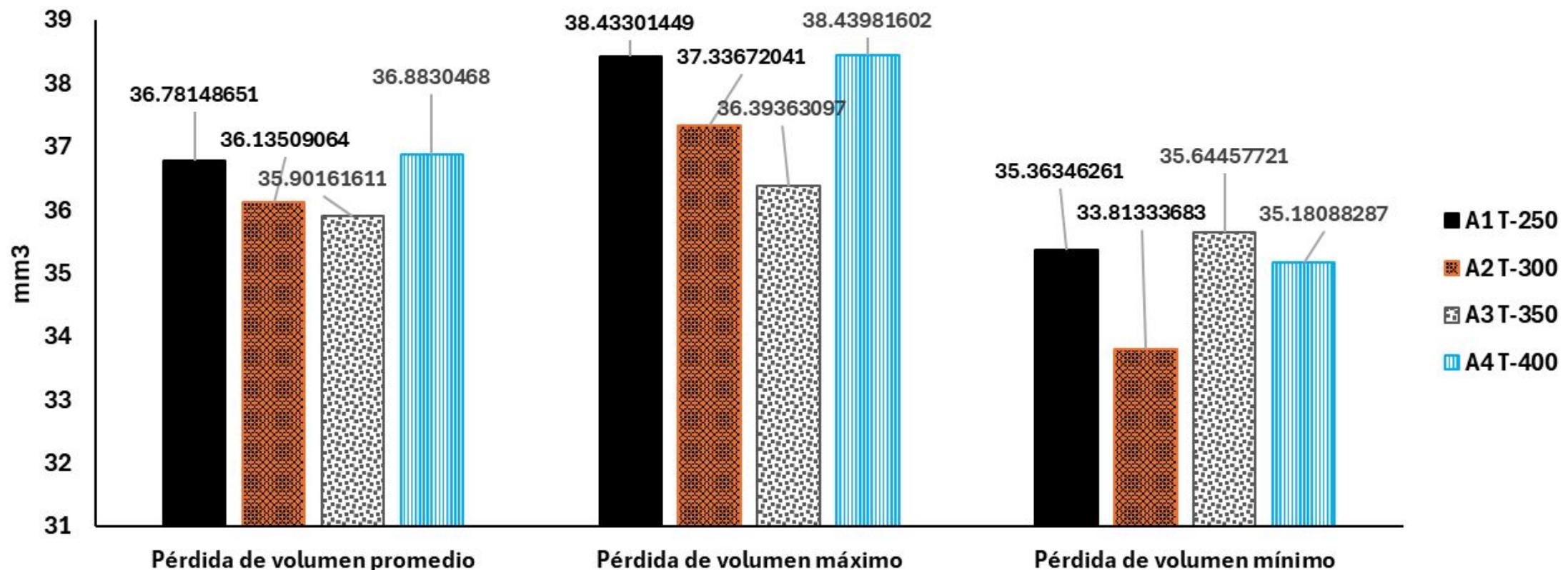
Resultados Obtenidos – Abrasividad (Revenido a 250, 300, 350 y 400 °C)



Resultados

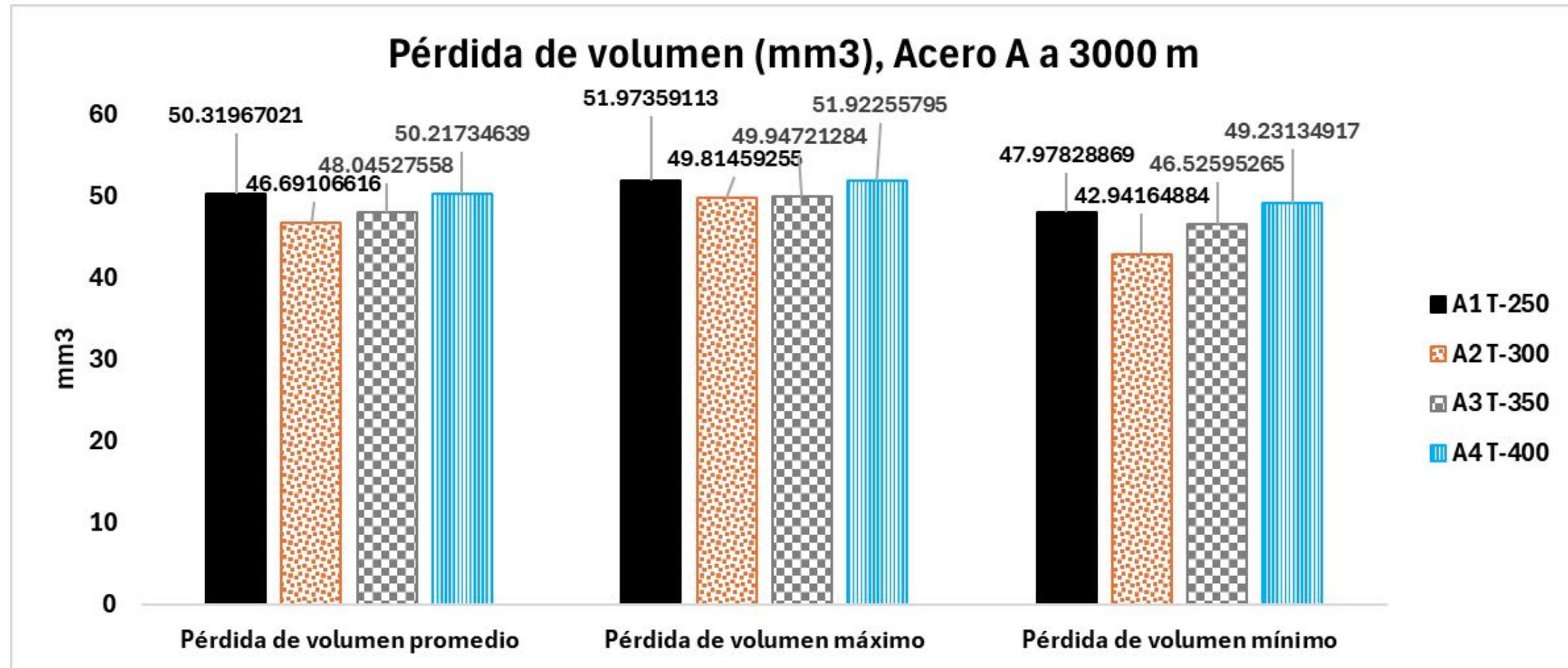
Resultados Obtenidos – Abrasividad (Revenido a 250, 300, 350 y 400 °C)

Pérdida de volumen (mm³), Acero A a 2000 m



Resultados

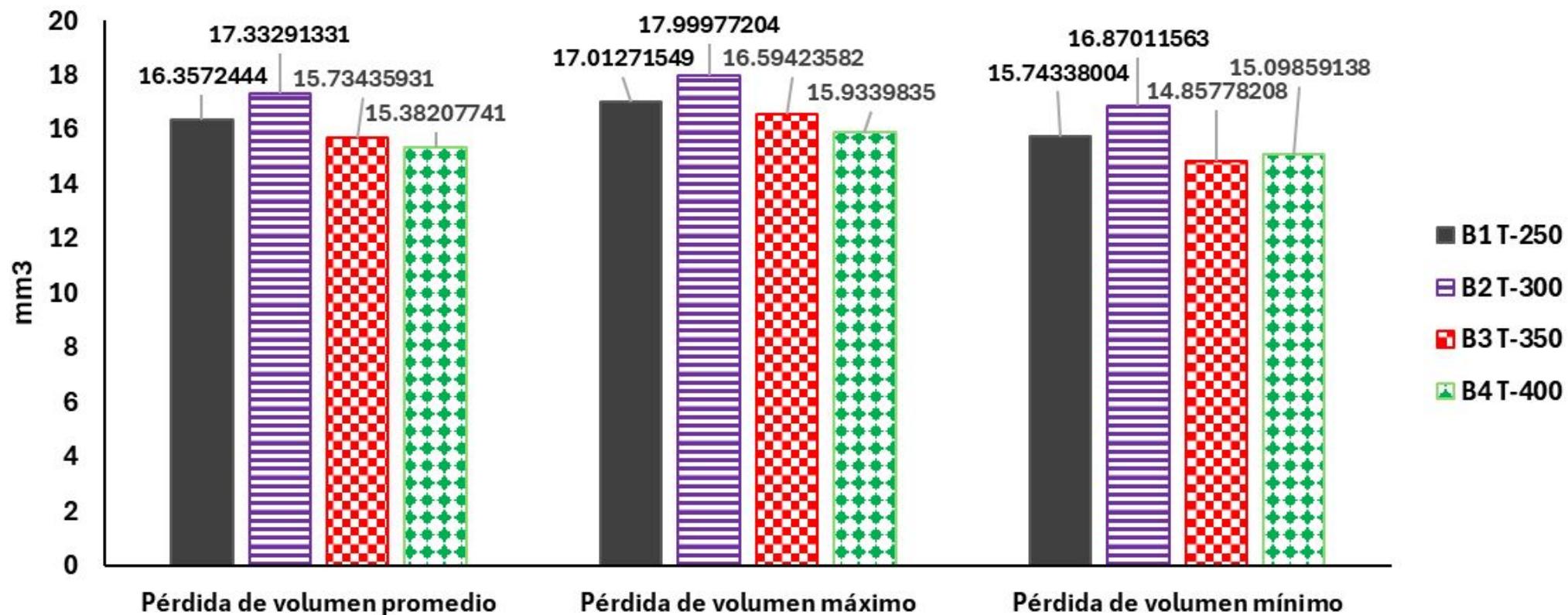
Resultados Obtenidos – Abrasividad (Revenido a 250, 300, 350 y 400 °C)



Resultados

Resultados Obtenidos – Abrasividad (Revenido a 250, 300, 350 y 400 °C)

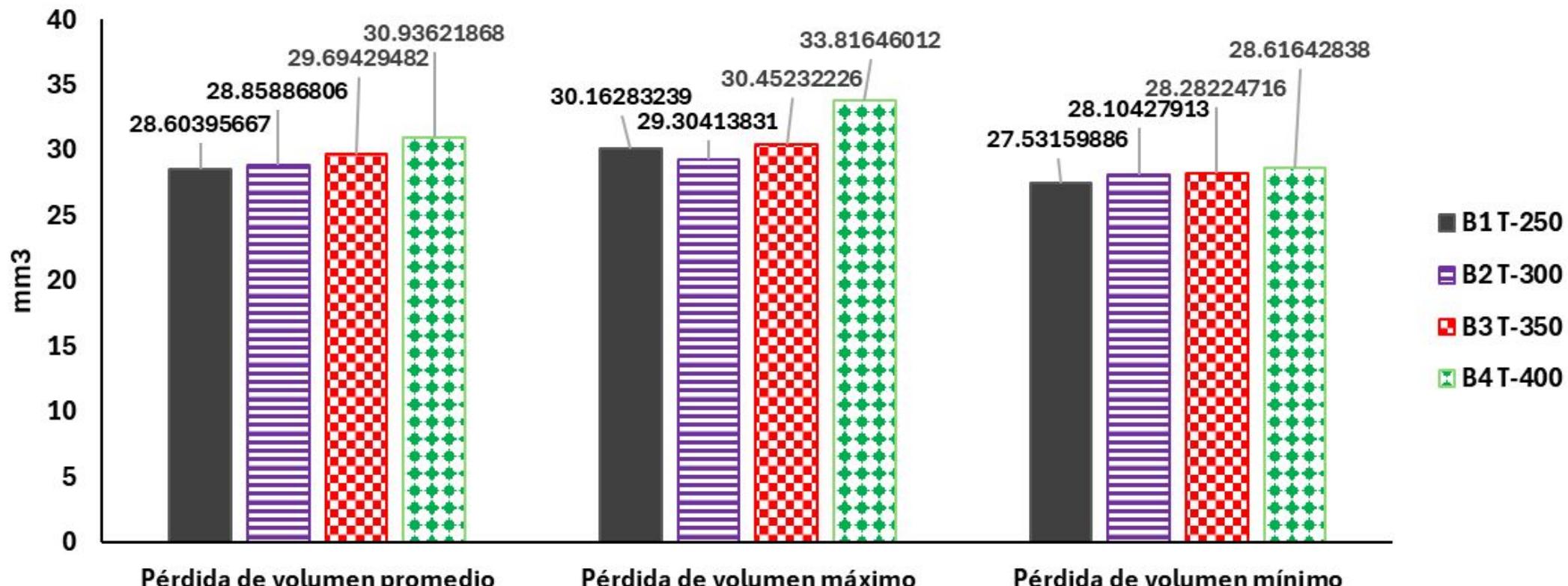
Pérdida de volumen (mm³), Acero B a 1000 m



Resultados

Resultados Obtenidos – Abrasividad (Revenido a 250, 300, 350 y 400 °C)

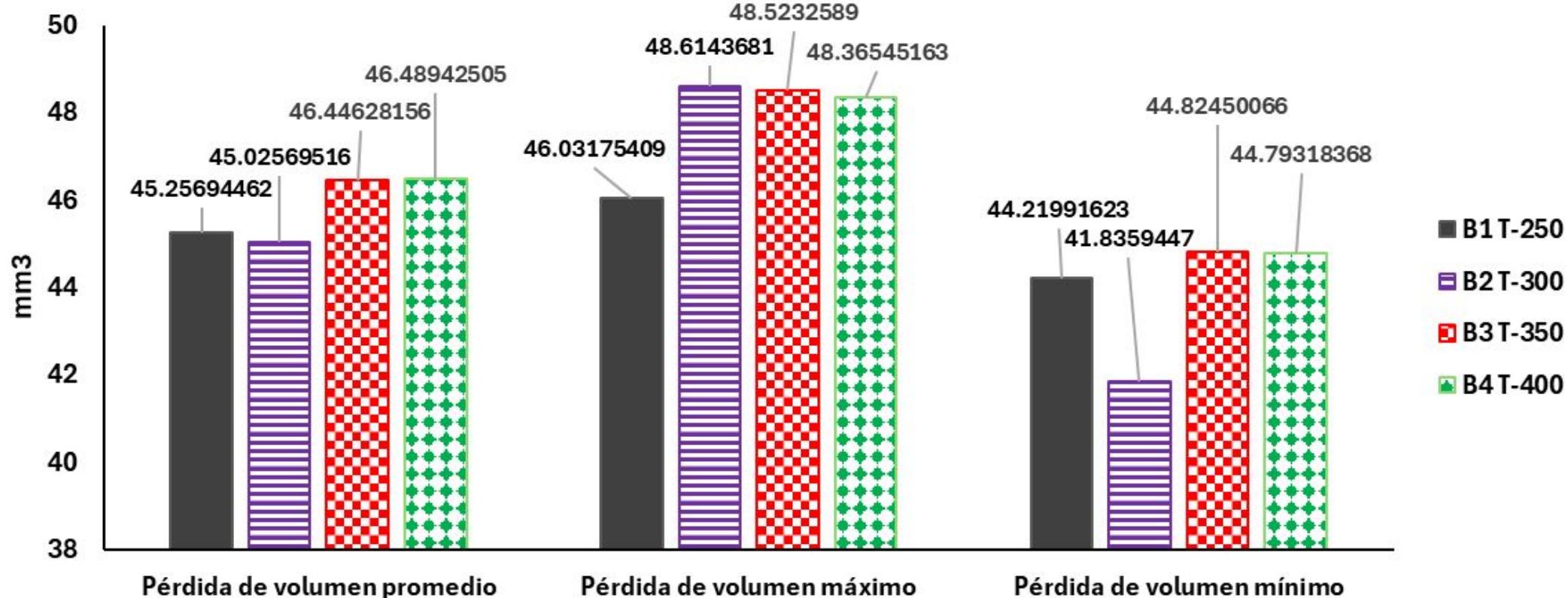
Pérdida de volumen (mm³), Acero B a 2000 m



Resultados

Resultados Obtenidos – Abrasividad (Revenido a 250, 300, 350 y 400 °C)

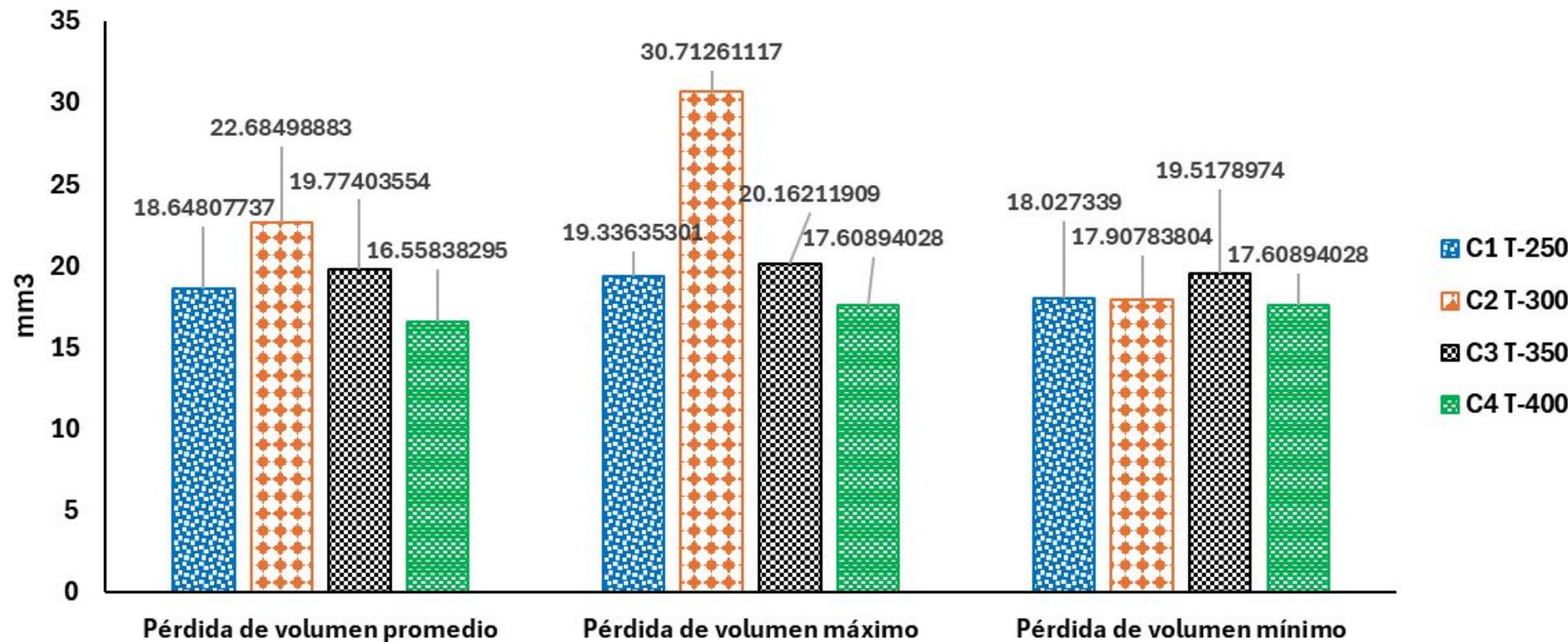
Pérdida de volumen (mm³), Acero B a 3000 m



Resultados

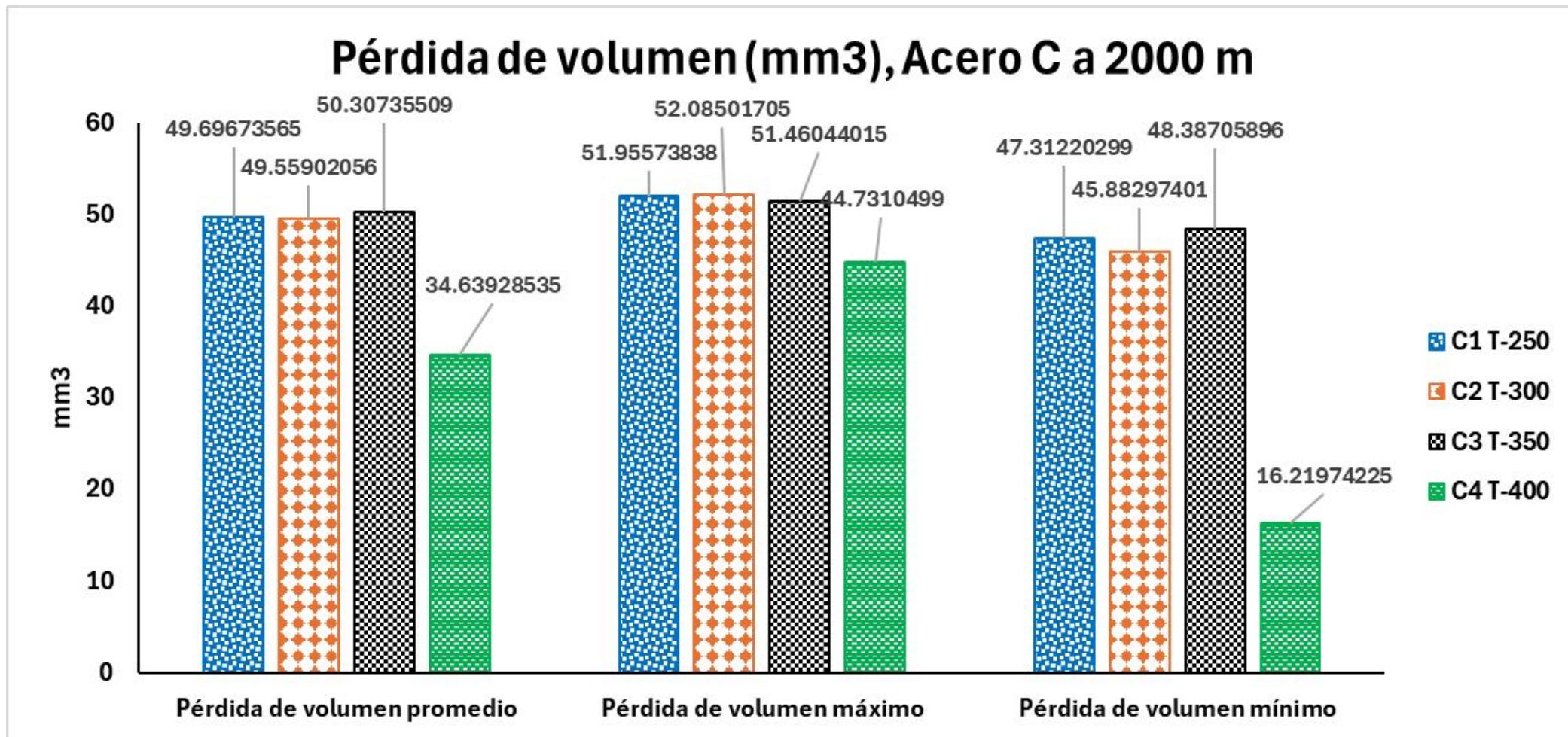
Resultados Obtenidos – Abrasividad (Revenido a 250, 300, 350 y 400 °C)

Pérdida de volumen (mm³), Acero C a 1000 m



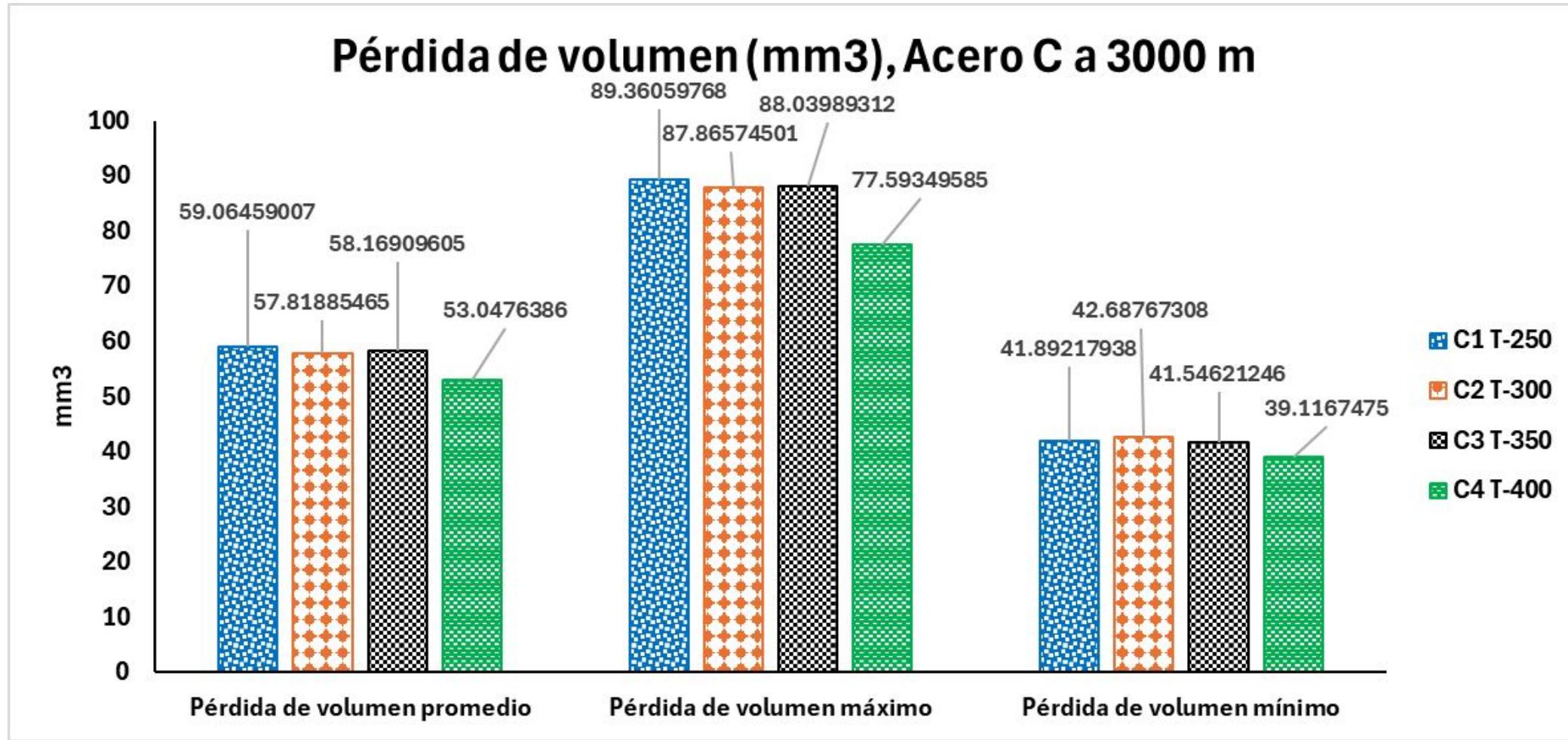
Resultados

Resultados Obtenidos – Abrasividad (Revenido a 250, 300, 350 y 400 °C)



Resultados

Resultados Obtenidos – Abrasividad (Revenido a 250, 300, 350 y 400 °C)



Resultados

Resultados Obtenidos – Abrasividad (Ecuación de Archard)

Ecuación de Archard (Mercado et al., 2017)

El volumen removido (mm^3) de una superficie es proporcional a una carga normal (N) aplicada y una distancia deslizada (m).

$$V_c = K_c * (S * N) \longrightarrow$$

V_c = Volumen perdido (mm^3)

K_c = Coeficiente de desgaste ($\text{mm}^3/\text{m} * \text{N}$)

S = Distancia de deslizamiento (m)

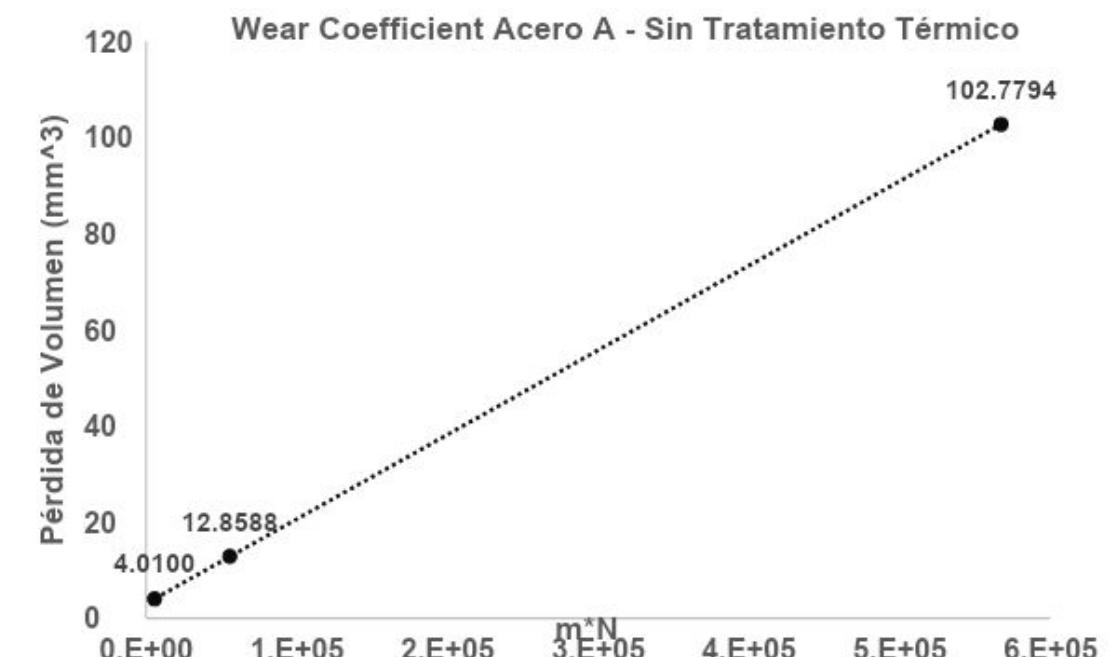
N = Carga Normal (N)

$$y = mx + b$$

$$m = K_c = \left(\frac{\text{mm}^3}{\text{m} * \text{N}} \right)$$

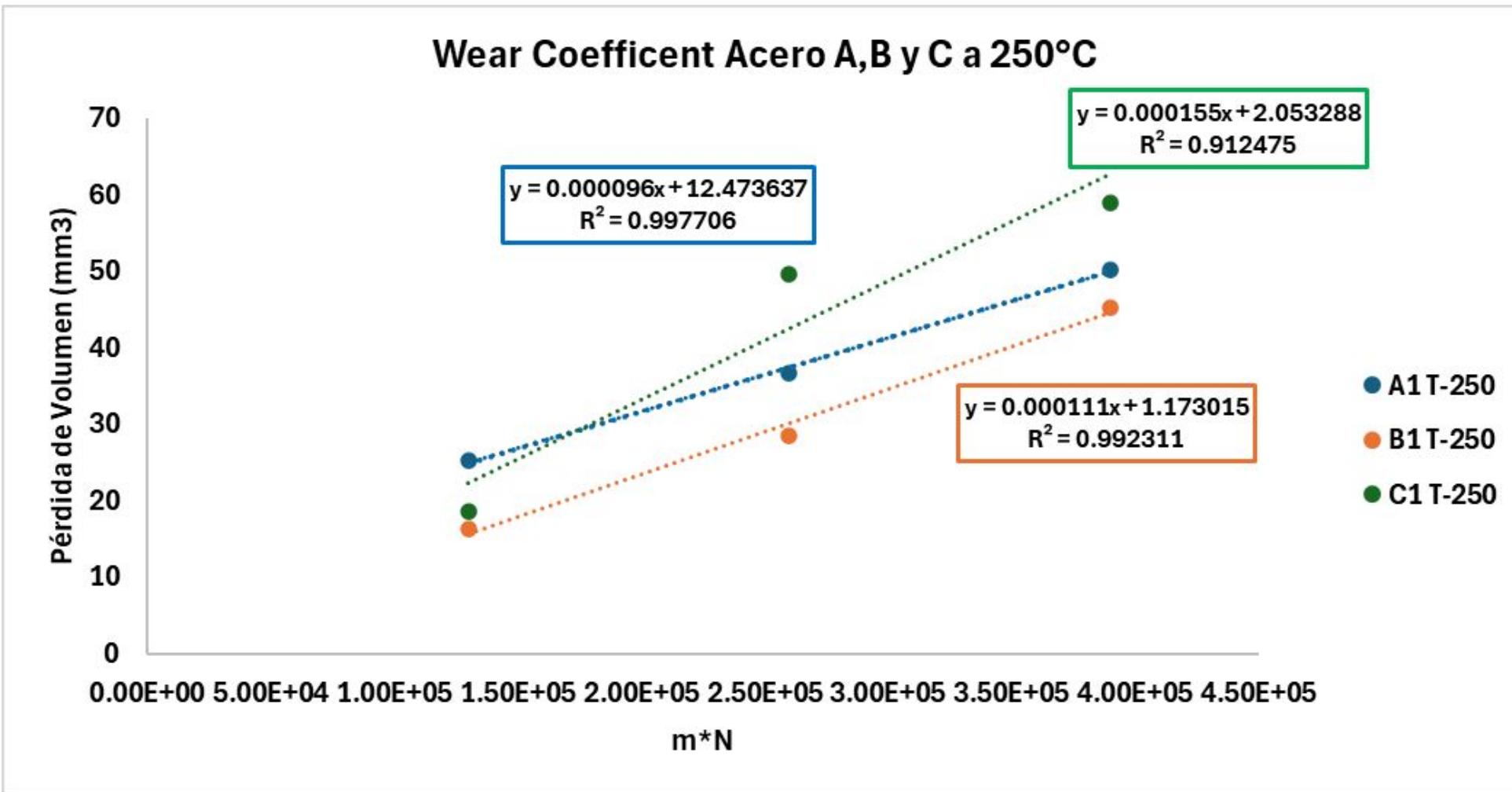
$$x = (S * N) = m * N$$

b = Es un intercepto lineal (Jensen et al., 2024) en mm^3



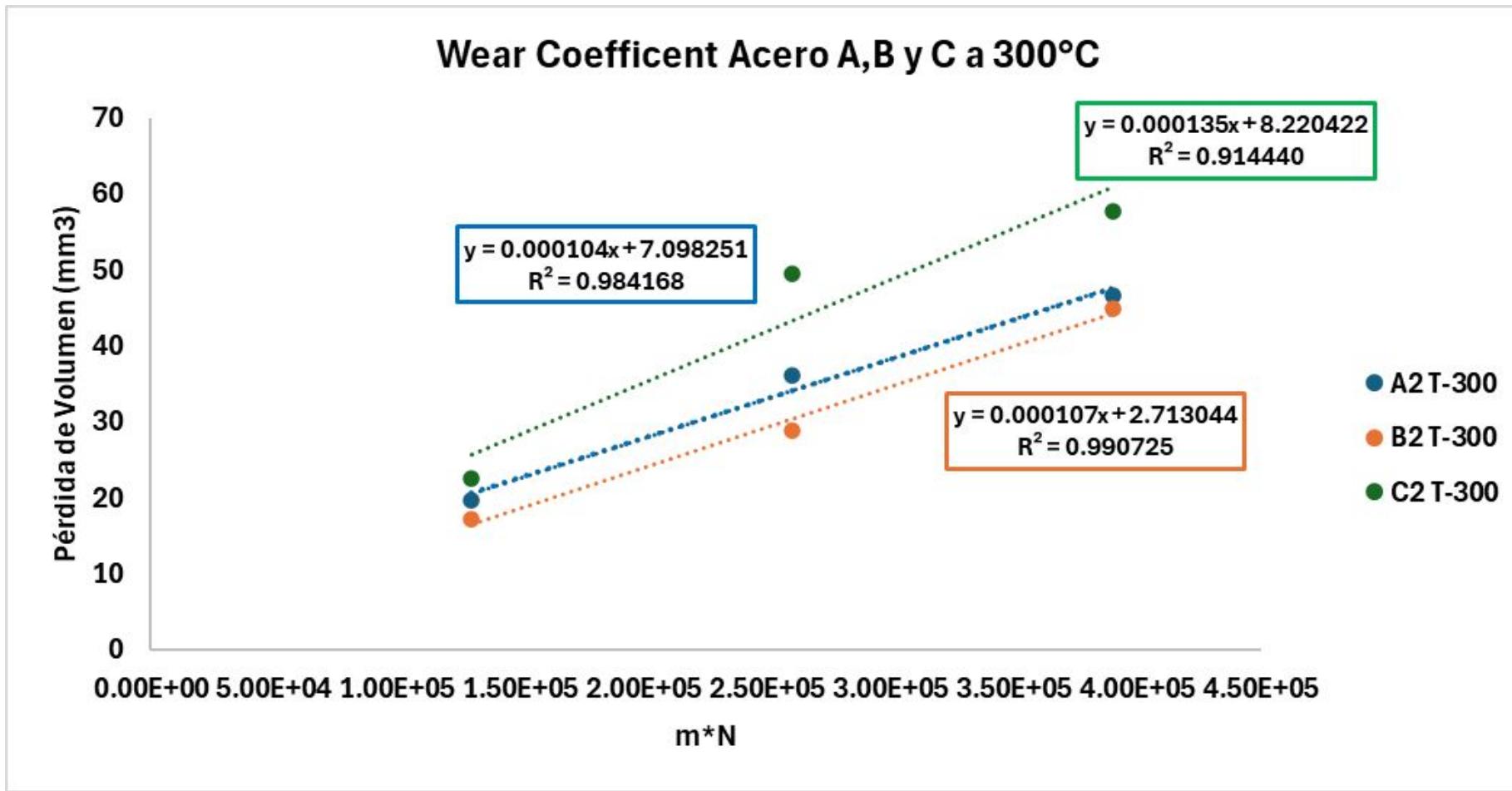
Resultados

Resultados Obtenidos – Abrasividad (Wear Coefficient)



Resultados

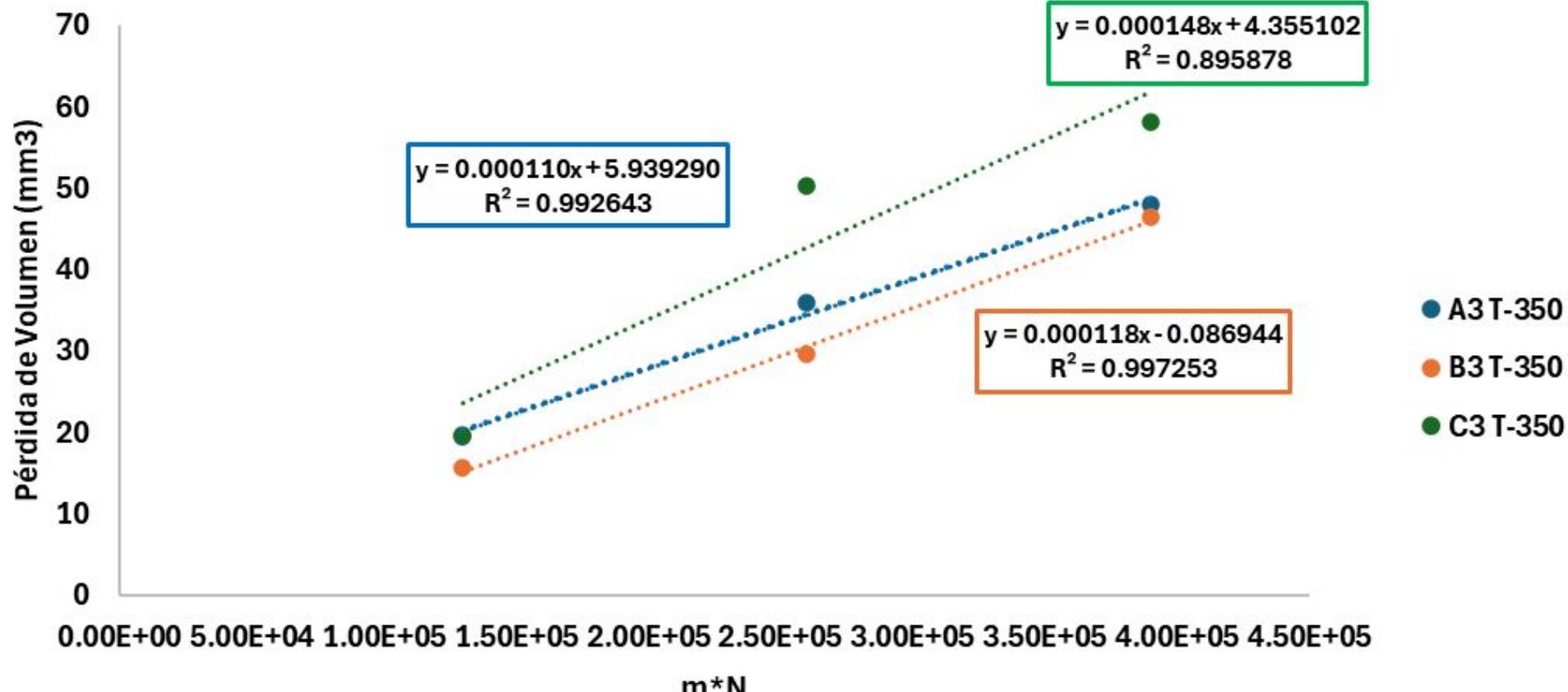
Resultados Obtenidos – Abrasividad (Wear Coefficient)



Resultados

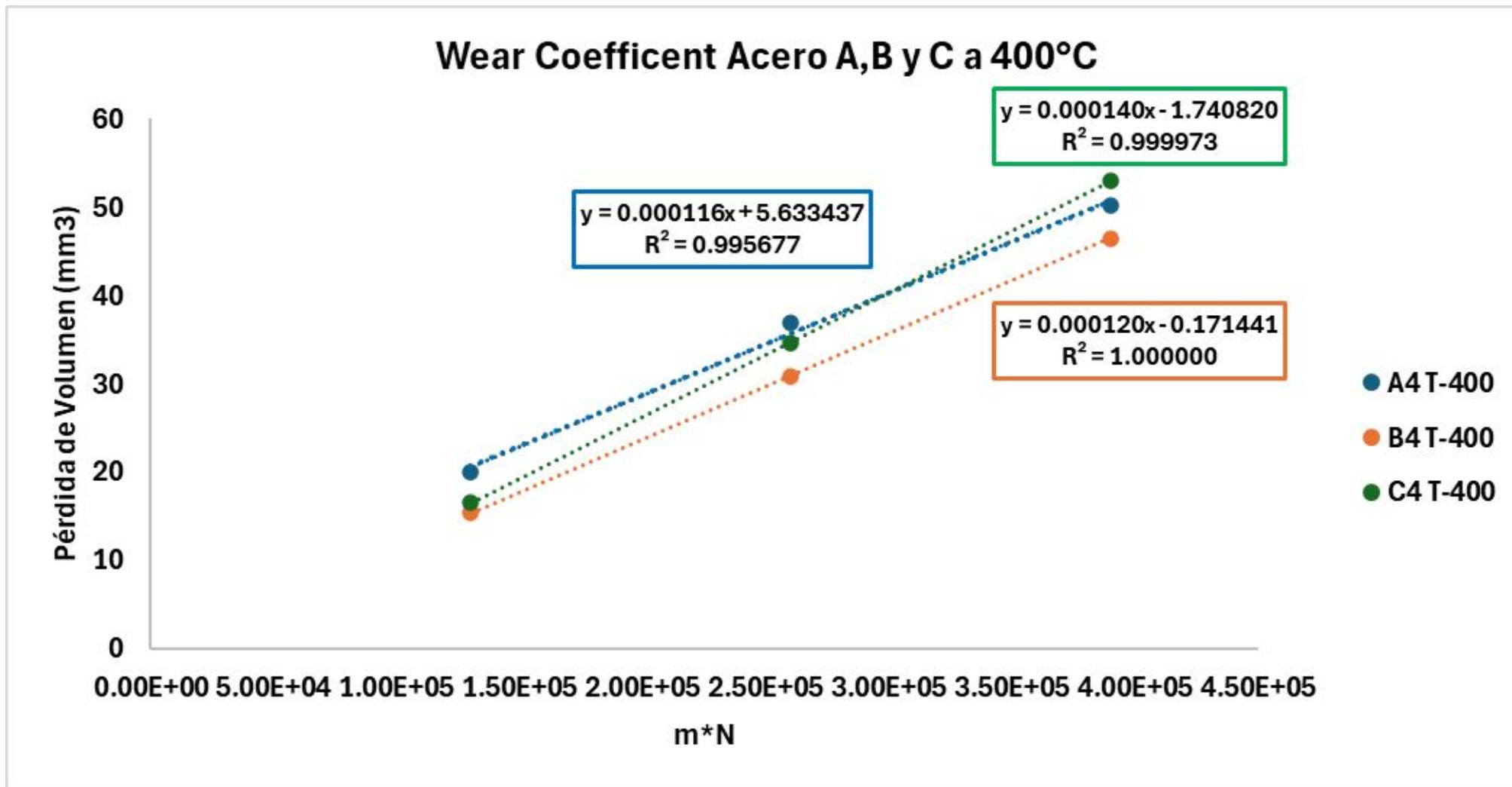
Resultados Obtenidos – Abrasividad (Wear Coefficient)

Wear Coefficent Acero A,B y C a 350°C



Resultados

Resultados Obtenidos – Abrasividad (Wear Coefficient)





Resultados

Resultados Obtenidos – Abrasividad (Wear Coefficient)

WEAR COEFFICIENT (PÉRDIDA PROMEDIO)		
CQ	Temperatura Revenido	Wear Coefficient
A1	250	0.000096
A2	300	0.000104
A3	350	0.000110
A4	400	0.000116
B1	250	0.000111
B2	300	0.000107
B3	350	0.000118
B4	400	0.000120
C1	250	0.000155
C2	300	0.000135
C3	350	0.000148
C4	400	0.000140

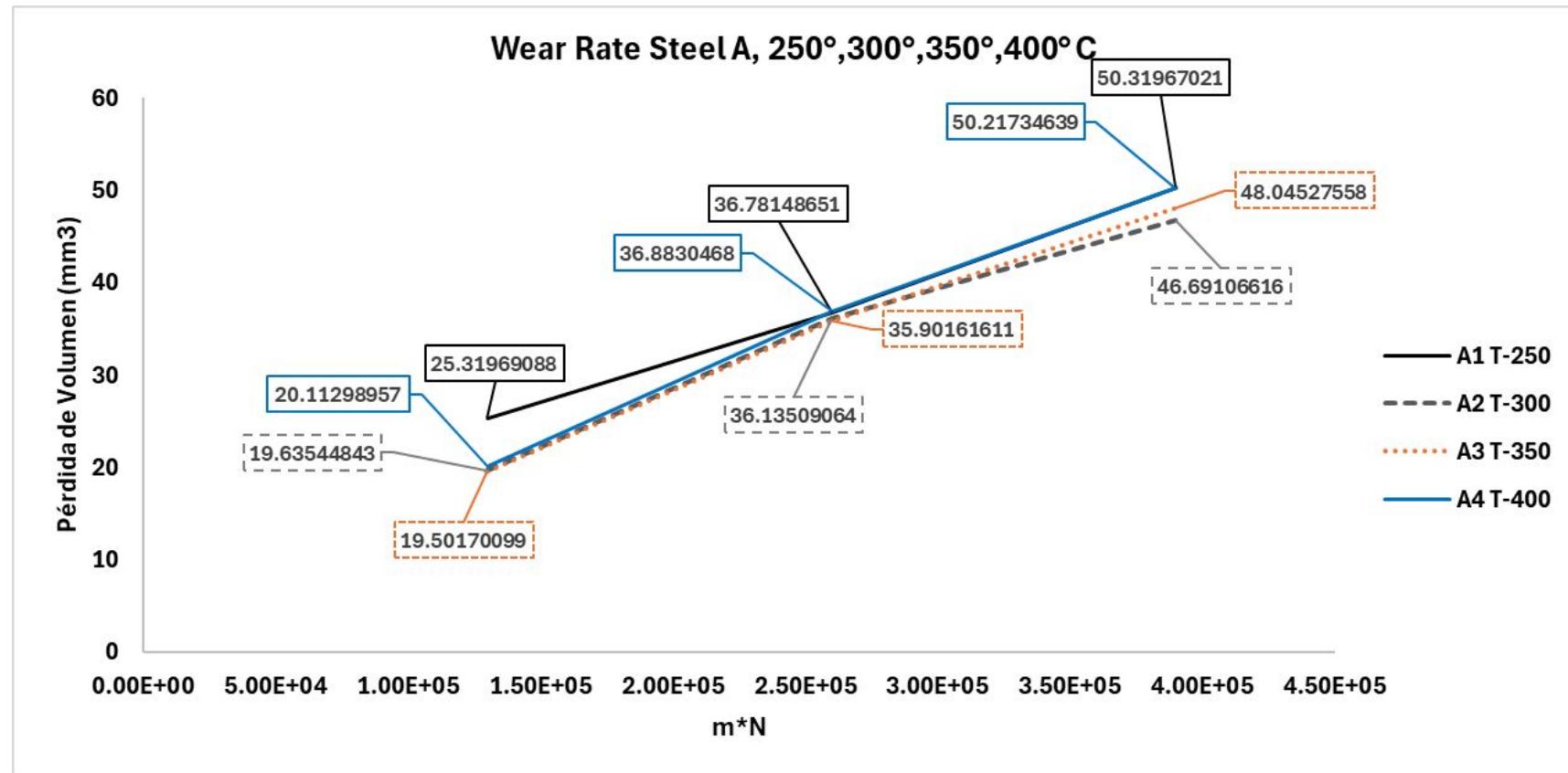
Los aceros A (A1 y A4) presentan los coeficientes de desgaste más bajos, lo que indica una mejor resistencia al desgaste abrasivo comparados con los aceros B y C.

Resultados

Resultados Obtenidos – Abrasividad (Wear Rate – Revenido a 250, 300, 350 y 400 °C)

Dureza Promedio HV (Sección Transversal)				
Acero	250°C	300°C	350°C	400°C
A	513	482	447	416

Condición	130,000 m*N 260,000 m*N 390,000 m*N		
	Pérdida de Volumen (mm³)		
A1-250°C	25.31969088	36.78148651	50.31967021
A2-300°C	19.63544843	36.13509064	46.69106616
A3-350°C	19.50170099	35.90161611	48.04527558
A4-400°C	20.11298957	36.8830468	50.21734639



Resultados

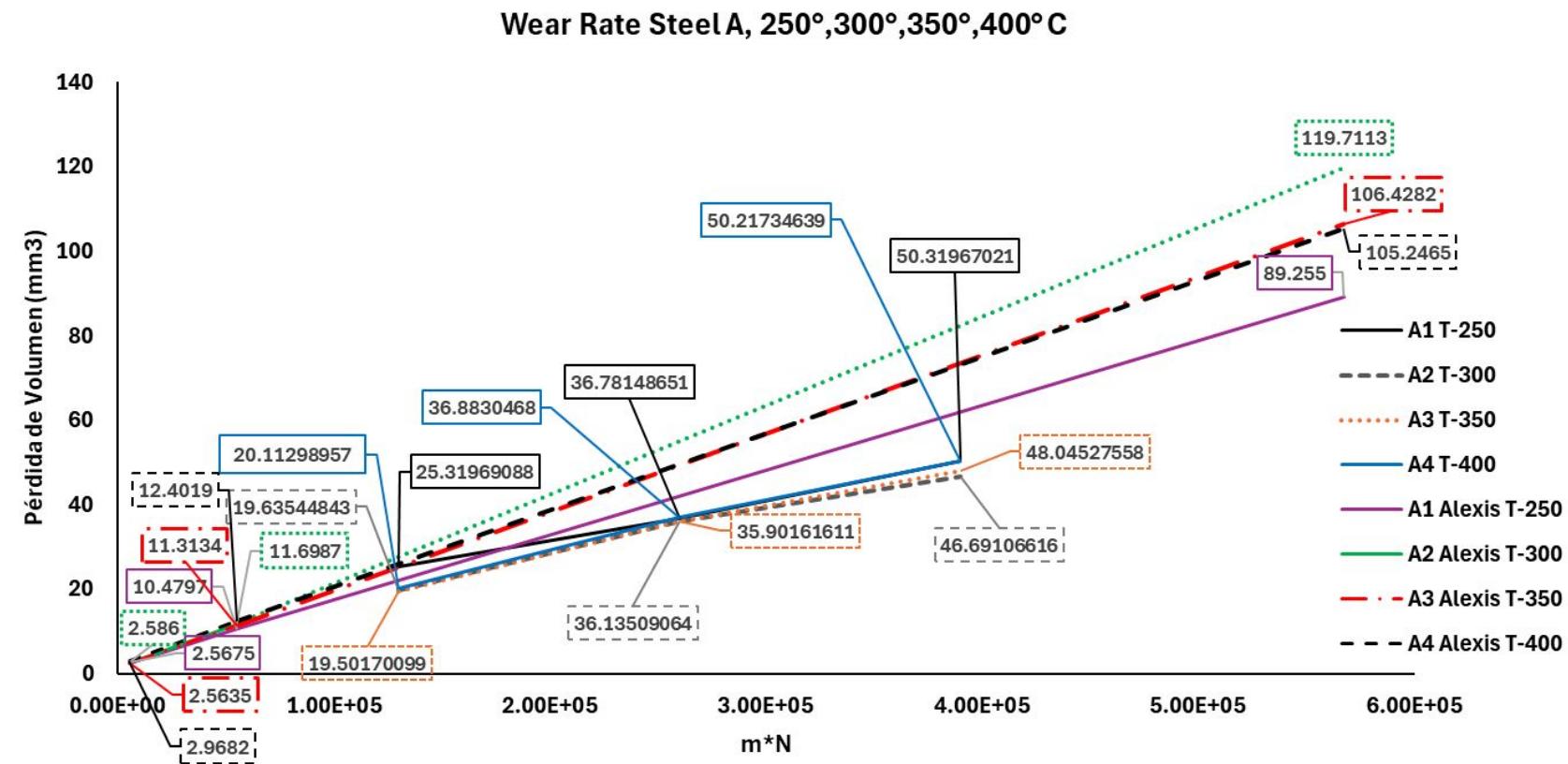
Resultados Obtenidos – Abrasividad (Wear Rate – Revenido a 250, 300, 350 y 400 °C)

Dureza Promedio HV (Sección Transversal)

Acero	250°C	300°C	350°C	400°C
A	513	482	447	416

Condición	5590 m*N	55510 m*N	567320 m*N
Pérdida de Volumen (mm³)			

R1-250°C	2.5675	10.4797	89.2550
R2-300°C	2.5860	11.6987	119.7113
R3-350°C	2.5635	11.3134	106.4282
R4-400°C	2.9682	12.4019	105.2465

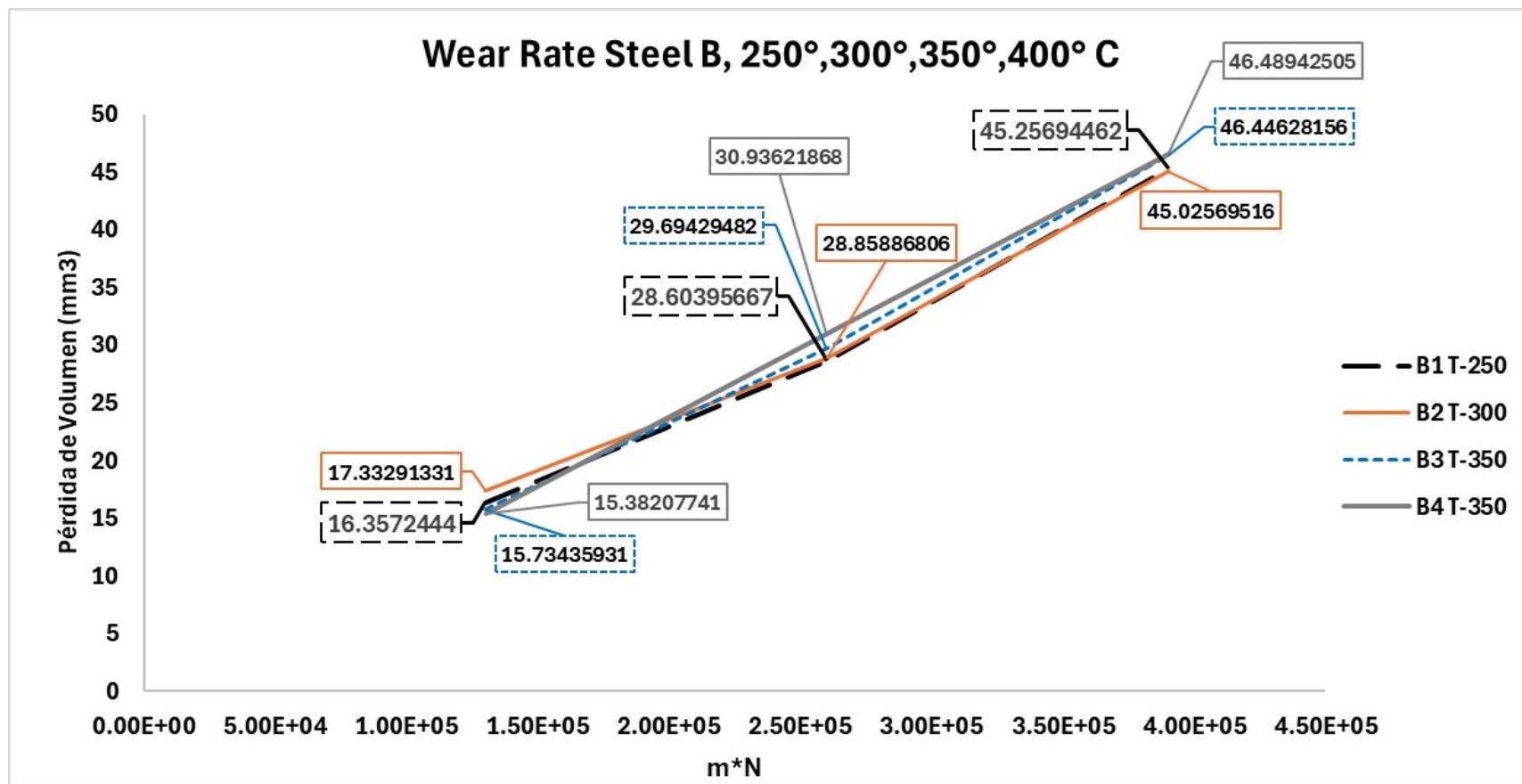


Resultados

Resultados Obtenidos – Abrasividad (Wear Rate – Revenido a 250, 300, 350 y 400 °C)

Dureza Promedio HV (Sección Transversal)				
Acero	250°C	300°C	350°C	400°C
B	461	433	396	372

Condición	130,000 m*N 260,000 m*N 390,000 m*N		
	Pérdida de Volumen (mm³)		
B1-250°C	16.3572444	28.60395667	45.25694462
B2-300°C	17.33291331	28.85886806	45.02569516
B3-350°C	15.73435931	29.69429482	46.44628156
B4-400°C	15.38207741	30.93621868	46.48942505

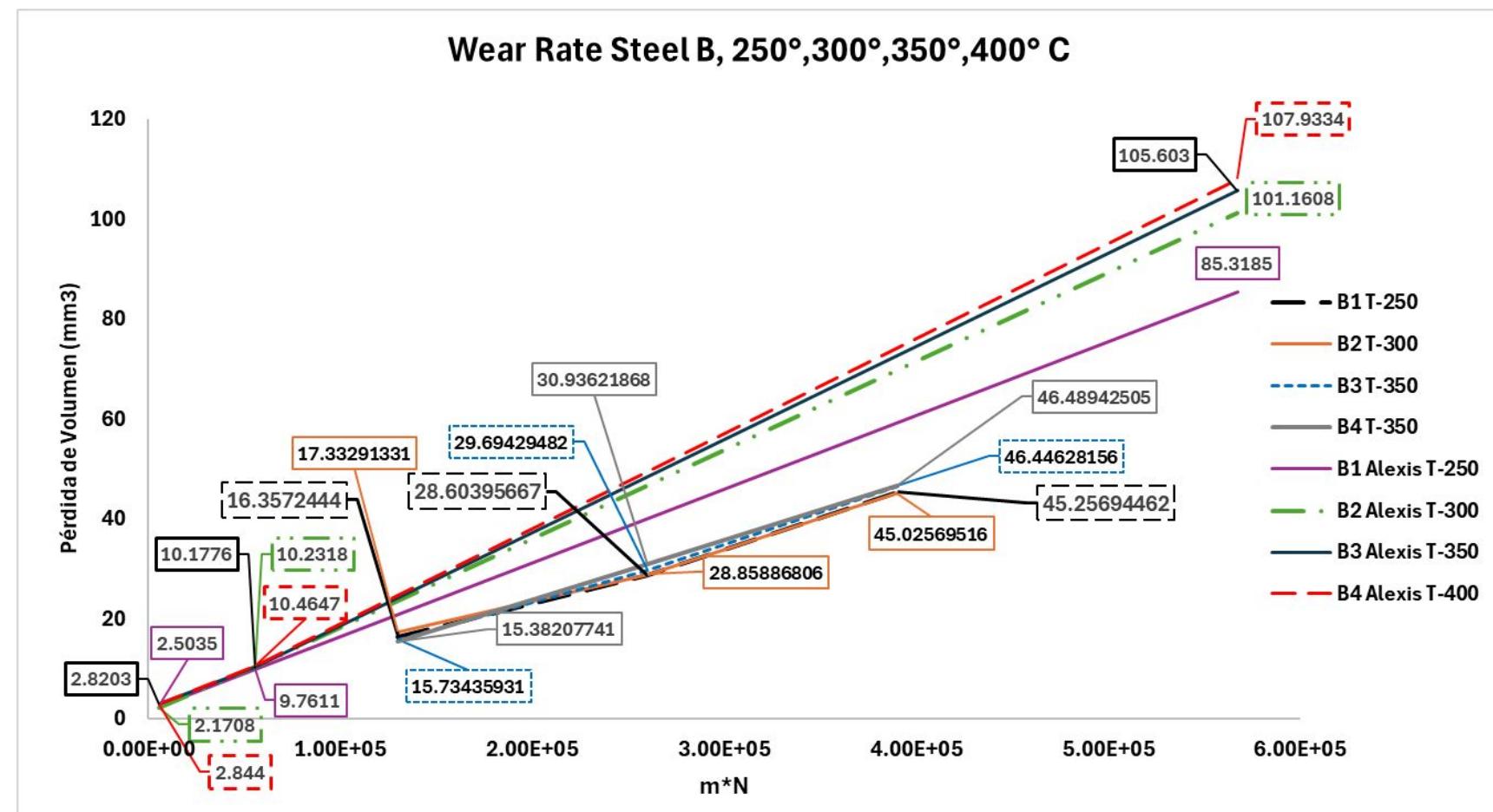


Resultados

Resultados Obtenidos – Abrasividad (Wear Rate – Revenido a 250, 300, 350 y 400 °C)

Dureza Promedio HV (Sección Transversal)				
Acero	250°C	300°C	350°C	400°C
B	461	433	396	372

Condición	5590 m*N	55510 m*N	567320 m*N
	Pérdida de Volumen (mm³)		
B1-250°C	2.5035	9.7611	85.3185
B2-300°C	2.1708	10.2318	101.1608
B3-350°C	2.8203	10.1776	105.6030
B4-400°C	2.8440	10.4647	107.9334

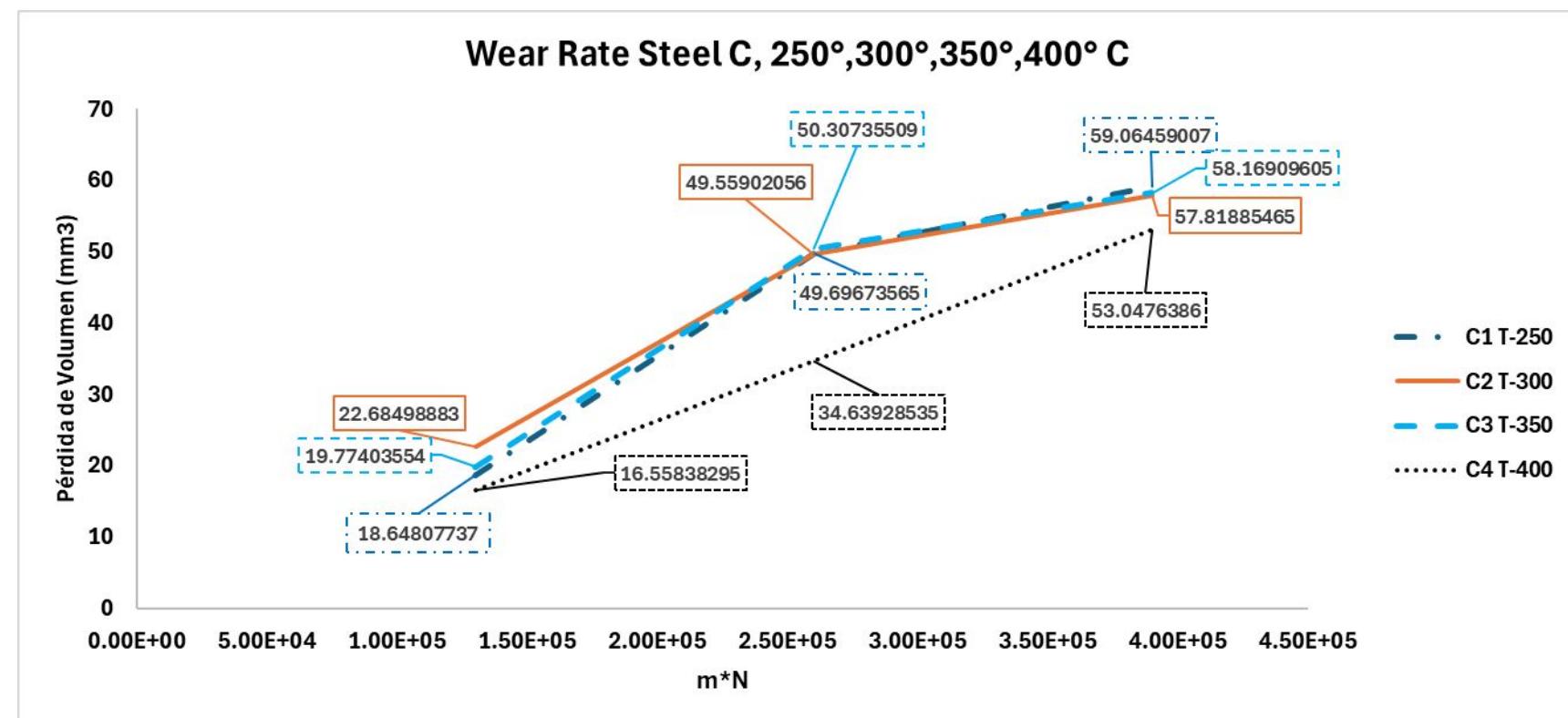


Resultados

Resultados Obtenidos – Abrasividad (Wear Rate – Revenido a 250, 300, 350 y 400 °C)

Dureza Promedio HV (Sección Transversal)				
Acero	250°C	300°C	350°C	400°C
C	547	481	435	387

Condición	130,000 m*N	260,000 m*N	390,000 m*N
Pérdida de Volumen (mm³)			
C1-250°C	18.64807737	49.69673565	45.25694462
C2-300°C	22.68498883	49.55902056	45.02569516
C3-350°C	19.77403554	50.30735509	46.44628156
C4-400°C	16.55838295	34.63928535	46.48942505



Conclusiones

Conclusiones

Criterio	Acer A	Acer B	Acer C
Composición (wt%)	C: 0.34, Mn:1.37, B: 0.0021 y Mo: 0.003	C: 0.24, Mn:1.18, B: 0.0027 y Mo: 0.004	C: 0.312, Mn:1.33, B: 0.0039 y Mo: 0.002
Templabilidad según CCT	Alta (narices desplazadas; martensita accesible)	Media-Alta	Alta pero dominada por bainita
Microestructura predominante en temple (CCT)	Martensita casi completa	Martensita + bainita	Bainita + martensita parcial
Microestructura As Received	Ferrita + perlita	Ferrita predominante	Ferrita + bainita baja
Dureza As Received (HV)	185 HV	150 HV	235 HV (mayor)
Pérdida de volumen As Received	Media	Mayor (peor)	Baja-media
Incremento de dureza en As Quenched	+232% (614 HV)	+239% (500 HV)	+7-20% (235-290 HV)
Pérdida de volumen As Quenched (ASTM G65)	Menor (mejor desempeño)	Mejora (58%)	Ligera mejora
Comportamiento en revenido	Mejor desempeño a 250°C	Mejor a 250°C	Casi sin cambio (estabilidad)
Sensibilidad al tratamiento térmico	Alta	Alta-media	Muy baja
Relación con desgaste	Menor desgaste por martensita completa	Buen balance	Desgaste casi constante
Ventaja principal	Máxima dureza y mínima abrasión	Estabilidad en revenido	Alta dureza inicial sin TT
Limitación principal	Riesgo de fragilidad si se sobre templa	Baja dureza inicial	TT no ofrece beneficios
Uso recomendado	Abrasión severa (minería, cuchillas)	Partes templadas + revenidas	Piezas sin TT, desgaste moderado

Conclusiones

Conclusiones

- El **acero C**, en condición de **as received** presenta la mayor dureza inicial (**235 HV**) de los tres aceros evaluados. Aunque su **contenido de carbono** es ligeramente **menor** que el del **acero A** (**0.312 vs 0.34 wt%**) se beneficia de un **mayor** contenido de elementos aleantes como **Mn, Cr, Si y Mo**, que incrementan la templabilidad y la resistencia al desgaste aún sin tratamiento térmico. En esta misma condición, el **acero B** muestra la **mayor pérdida de volumen** y el **mayor wear coefficient**, lo cual coincide con su dureza inicial más baja (**150 HV**).
- El **acero C**, en condición de **as quenched y después de los revenidos de 250°,300°,350° y 400°C**, presenta **incrementos moderados de dureza**, generalmente entre el **7% y 20%**, alcanzando valores cercanos a **235-290 HV**. Esto se debe a que, de acuerdo con su **curva CCT**, su microestructura dominante después del temple es una mezcla de **bainita y martensita** parcial lo que limita el aumento de dureza. Cabe destacar que, debido a que este incremento no representa una mejora para aplicaciones industriales, el **tratamiento térmico en este acero puede considerarse no necesario**.
- En contraste, los **aceros A y B** presentan **incrementos marcados de dureza después del temple**. El **acero A** pasa de **185 V** a valores superiores a **600 HV**, representando un incremento de **+232%**. El **acero B** pasa de **150 HV** a aproximadamente **500 HV**, con un incremento de **+239%**. Este comportamiento está influenciado por su **mayor contenido de carbono (0.24-0.34 wt%)** y **boro (0.0021-0.0027 wt%)**, elementos que aumentan la templabilidad y reducen la formación de ferrita promoviendo la formación de martensita, conforme a lo reportado por Restrepo & Tobón (2007).

Conclusiones

Conclusiones y Recomendaciones

- En condición **as quenched**, el **acero A** presenta la **menor pérdida de volumen** bajo el estándar ASTM G65 y la **mayor dureza (614 HV)**, siendo así el acero con **mejor resistencia al desgaste abrasivo**. El **acero B**, en esta misma condición, mejora aproximadamente un **58%** su resistencia al desgaste en comparación con su estado inicial.
- Durante el **revenido**, tanto los **aceros A como B** presentan sus **menores pérdidas de volumen a 250°C** lo que es un resultado coherente tomando como referencia sus durezas elevadas en dicho revenido. Por otro lado, el **acero C** mantiene valores de desgaste muy similares entre las cuatro temperaturas de revenido, lo que coincide con su comportamiento estable de dureza y su baja sensibilidad al tratamiento térmico.
- En cuanto al **wear coefficient**, en condición **as received**, el **acero B** muestra los valores más elevados asociado a su baja dureza inicial. Después del temple, el **acero A** presenta el **menor wear coefficient**, asociado a su mayor dureza y menor pérdida de volumen. En condición de **revenido**, los **aceros A y B** muestran nuevamente sus **mejores resultados a 250°C**, presentando las menores tasas de desgaste y manteniendo la relación dureza -pérdida de volumen descrita por el modelo de Archard.
- En general, para los tres aceros evaluados:
 - **Acero A → mejor respuesta al temple y mayor resistencia al desgaste en todas las condiciones.**
 - **Acero B → buen equilibrio entre dureza y desgaste, se puede decir que es estable en el revenido.**
 - **Acero C → dureza inicial alta pero baja sensibilidad al tratamiento térmico por lo que es adecuado para aplicaciones sin TT y con un desgaste abrasivo moderado.**

Conclusiones

Conclusiones y Recomendaciones

Tribómetro:

- Realizar cambio de arena después de un número controlado de pruebas para evitar obstrucciones en el flujo por acumulación de impurezas y asegurar reproducibilidad en las condiciones de abrasión.
- Rediseñar los clamps en una configuración ajustable para probetas de menor espesor (2.5-5 mm) permitiendo una colocación uniforme y un patrón de desgaste más consistente.

Profundidad de análisis:

- Ejecutar ensayos a temperaturas intermedias entre 350-400 °C así como a diferentes tiempos de revenido para observar si el comportamiento del acero C en cuanto a su dureza sigue siendo muy pronunciado o se estabiliza.

Caracterización mecánica complementaria:

- Realizar pruebas de tenacidad e impacto para evaluar la absorción de energía y determinar la viabilidad de los aceros A,B y C en aplicaciones sometidas a cargas dinámicas → describir la fenomenología de la abrasión

Conclusiones

Bibliografía

- ASM International. (2024). 4F Quenchants and Quenching Technology. In G. Totten, R. Otero, X. Luo, & L. Canale (Eds.), *ASM HandbookQuenchants and Quenching Technology* (Vol. 4, pp. 3–42). ASM International.
- Askeland, D., & Wright, W. (2016). *Ciencia e ingeniería de materiales* (7th ed.). Cengage Learning.
- ASQ. (2025). [https://asq.org/quality-resources/dmaic#:~:text=What%20Does%20DMAIC%20Stand%20For,\(internal%20and%20external\)%20requirements](https://asq.org/quality-resources/dmaic#:~:text=What%20Does%20DMAIC%20Stand%20For,(internal%20and%20external)%20requirements).
- Chen, X., & Hou, Y. (2023). Effect of heat treatment on microstructure and properties of 10B21 cold-heading steel for fasteners. *Vibroengineering Procedia*, 50, 213–217. <https://doi.org/10.21595/vp.2023.23479>.
- Denand, B., Esin, V. A., Dehmas, M., Geandier, G., Denis, S., Sourmail, T., & Aeby-Gautier, E. (2020). Carbon content evolution in austenite during austenitization studied by in situ synchrotron X-ray diffraction of a hypoeutectoid steel. *Materialia*, 10. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2020.100664>
- Er, U. (2004). The Abrasive Wear Behaviour of Boron Steels. In Eng.&Arch.Fac.Osmangazi University: Vol. XVII (Issue 2). <https://www.researchgate.net/publication/266497966>
- Feng, Z. (2024). The Role of Molybdenum in Steel Alloys: Enhancing Performance and Applications. *Advanced Materials Science Research Adv. Mate. Sci. Res*, 7(6), 233–234. [https://doi.org/10.37532/aaasmr.2024.7\(6\).233-234](https://doi.org/10.37532/aaasmr.2024.7(6).233-234)
- Imamović, A., Kablar, O., Oruč, M., Purić-Selimović, V., & Sušić, L. (2024). THE INFLUENCE OF MANGANESE ON THE TENSILE STRENGTH OF HIGH CARBON STEEL C66D. *Journal of Sustainable Technologies and Materials*, 4(6), 29–34. <https://doi.org/10.57131/jstm.2024.6.5>
- Mackenzie, S. (2022). Understanding the effect of boron in steels. <https://thermalprocessing.com/understanding-the-effect-of-boron-in-steels/>
- Naderi, M. (2007). Hot Stamping of Ultra High Strength Steels. <https://www.researchgate.net/publication/27560363>
- Restrepo, H. S., & Tobón, D. M. (2007). RESISTENCIA A LA ABRASIÓN vs. RESISTENCIA AL IMPACTO DEL ACERO AISI 15B30, TEMPLADO + REVENIDO WEAR RESISTANCE vs. IMPACT RESISTANCE OF STEEL AISI 15B30, QUENCHED AND TEMPERED. *Año*, 74, 125–133.
- Säglitz, M., Matlock, D. K., & Krauss, G. (2008). Tempering and Mechanical Properties of Low-Carbon Boron-Containing Martensitic Sheet Steel.
- Mercado, R. D., Mata, J. G., Quinones, M. A., Rodriguez, E., & Servín, R. (2017). Micro-scale abrasive wear testing of CrN duplex PVD coating on pre-nitrided tool steel. *Materials Research*, 20(4), 1092–1102. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-MR-2016-0757>
- Jensen, K. M., Santos, I. F., & Corstens, H. J. P. (2024). Prediction of brake pad wear and remaining useful life considering varying vehicle mass and an experimental holistic approach. *Wear*, 552–553. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2024.205433>
- Er, U. (2004). The Abrasive Wear Behaviour of Boron Steels. In Eng.&Arch.Fac.Osmangazi University: Vol. XVII (Issue 2). <https://www.researchgate.net/publication/266497966>
- Naderi, M., Katabchi, M., Abbasi, M., & Bleck, W. (2011). Analysis of microstructure and mechanical properties of different boron and non-boron alloyed steels after being hot stamped. *Procedia Engineering*, 10, 460–465. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.04.078>
- Wróbel, I., Skowronek, A., & Grajcar, A. (2022). A Review on Hot Stamping of Advanced High-Strength Steels: Technological-Metallurgical Aspects and Numerical Simulation. *Symmetry*, 14(5). <https://doi.org/10.3390/sym14050969>
- Tang, Z., Gu, Z., Li, Y., Li, X., Yu, G., & Yi, L. (2023). Study on the Effect of the Pre-Forming of 22MnB5 Steel in Indirect Hot Stamping. *Materials*, 16(10). <https://doi.org/10.3390/ma16103739>
- Willse, B. (2025, 16 septiembre). Boron-Treated Steel: Why does boron affect steel hardening response? — Jade Sterling Steel. Jade Sterling Steel. <https://www.jadesterling.com/ask-the-metallurgist/blog-post-boron-treated-steel>



¡GRACIAS!



ANEXOS

ANEXOS

Resultados Obtenidos – Durezas (Después de Temple-As Quenched) – HV y HRC

Dureza Promedio (Sección Longitudinal)

Temperatura (°C)	A		B		C	
	HV	HRC	HV	HRC	HV	HRC
825	619	56	514	50	302	30
850	591	55	503	49	312	31
875	615	56	511	50	363	37

Dureza Promedio (Sección Transversal)

Temperatura (°C)	A		B		C	
	HV	HRC	HV	HRC	HV	HRC
825	599	55	516	50	293	29
850	614	56	508	50	315	32
875	613	56	504	49	354	36

ANEXOS

Resultados Obtenidos – Durezas (Después de Revenido a 250, 300, 350 y 400 °C)-HV y HRC

Dureza Promedio (Sección Longitudinal)

Temperatura (°C)	A		B		C	
	HV	HRC	HV	HRC	HV	HRC
250	513	50	466	47	323	33
300	485	48	435	44	293	29
350	442	45	395	40	304	30
400	409	42	372	38	288	28

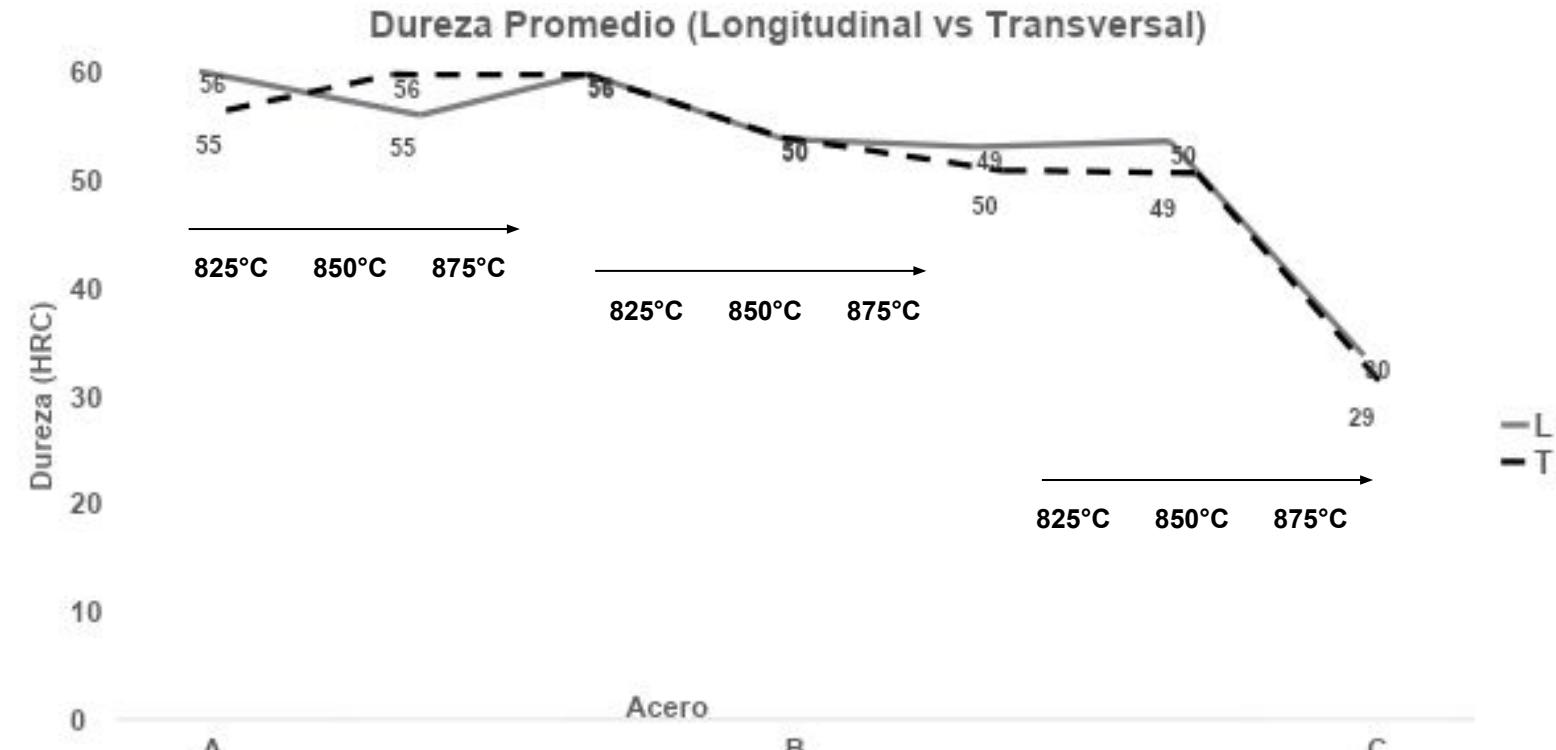
Dureza Promedio (Sección Transversal)

Temperatura (°C)	A		B		C	
	HV	HRC	HV	HRC	HV	HRC
250	513	50	461	46	320	32
300	482	48	433	44	295	29
350	447	45	396	40	306	31
400	416	42	372	38	297	29

ANEXOS

Resultados Obtenidos – Durezas (Después de Temple-As Quenched) - HRC

	L	T	Austenizado (°C)
A	56	55	825
	55	56	850
	56	56	875
B	50	50	825
	49	50	850
	50	49	875
C	30	29	825
	31	32	850
	37	36	875



*Nota:

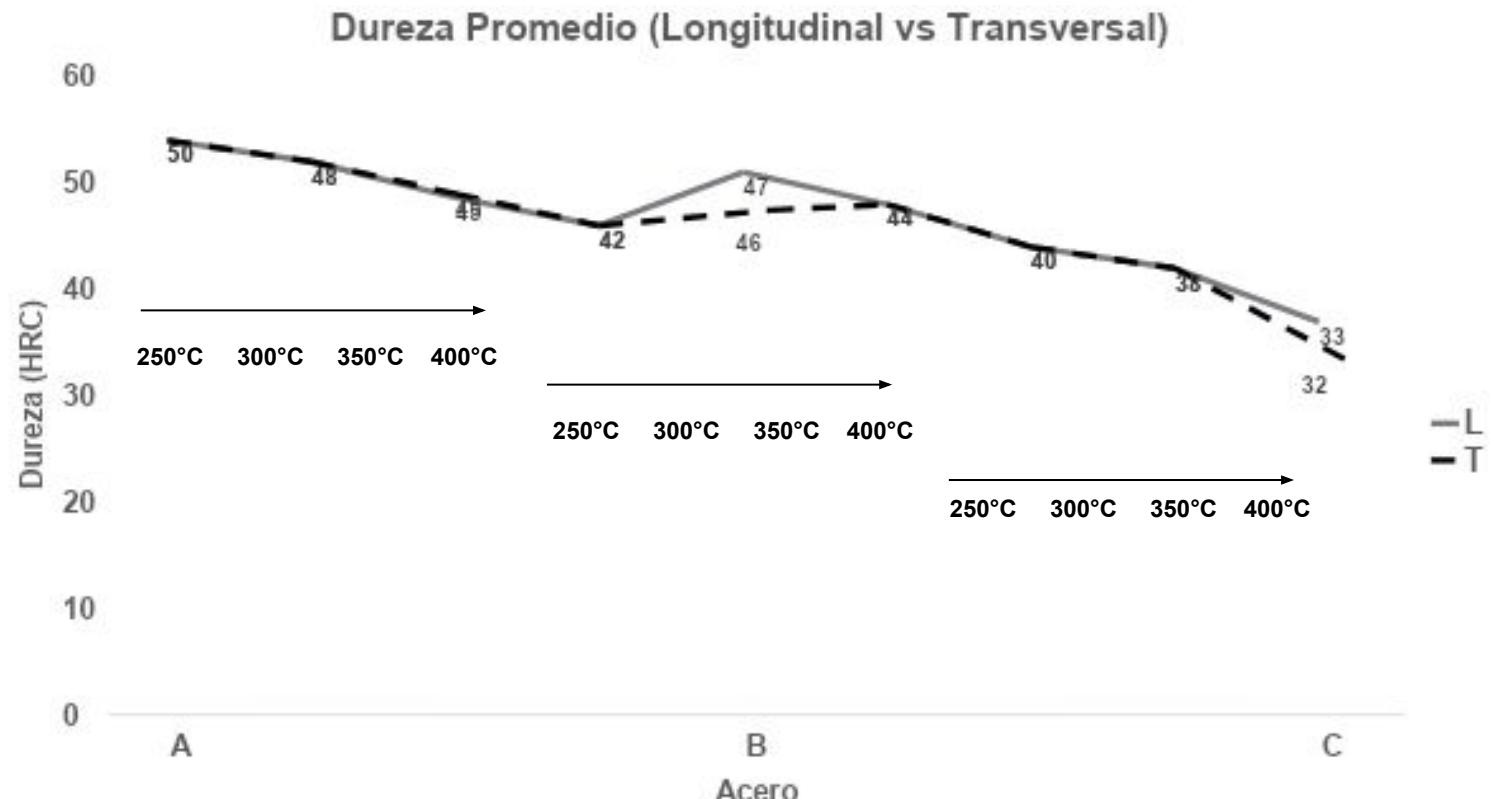
“L” denota la sección/corte longitudinal de la pieza con respecto al sentido de laminación.

“T” denota la sección/corte transversal de la pieza con respecto al sentido de laminación.

ANEXOS

Resultados Obtenidos – Durezas (Después de Revenido a 250, 300, 350 y 400 °C) - HRC

	L	T	Revenido (°C)
A	50	50	250
	48	48	300
	45	45	350
	42	42	400
	47	46	250
B	44	44	300
	40	40	350
	38	38	400
	33	32	250
	29	29	300
C	30	31	350
	28	29	400



*Nota:

“L” denota la sección/corte longitudinal de la pieza con respecto al sentido de laminación.

“T” denota la sección/corte transversal de la pieza con respecto al sentido de laminación.

Experimentación

Metalografía (Después de Revenido a 250, 300, 350 y 400 °C) - HV

Experimentación

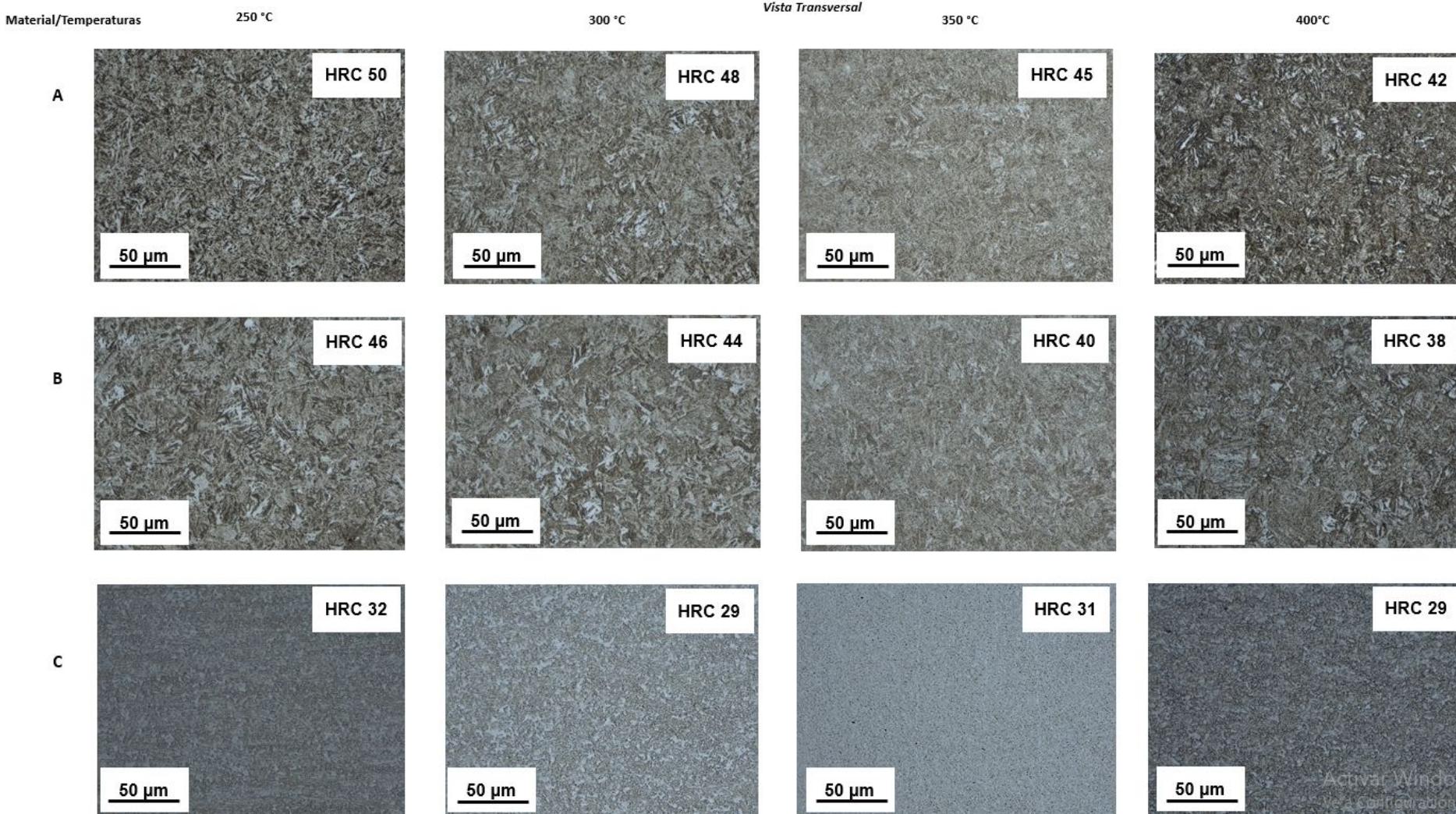
Metalografía (Después de Revenido a 250, 300, 350 y 400 °C) - HRC

The figure displays a 3x4 grid of optical micrographs, labeled A, B, and C, representing longitudinal views of materials at different temperatures. The columns represent temperatures: 250 °C, 300 °C, 350 °C, and 400 °C. The rows represent material types: A, B, and C. Each micrograph includes an HRC value label and a 50 µm scale bar.

Material	250 °C	300 °C	350 °C	400 °C
A	HRC 50	HRC 48	HRC 45	HRC 42
B	HRC 47	HRC 44	HRC 40	HRC 38
C	HRC 33	HRC 29	HRC 30	HRC 28

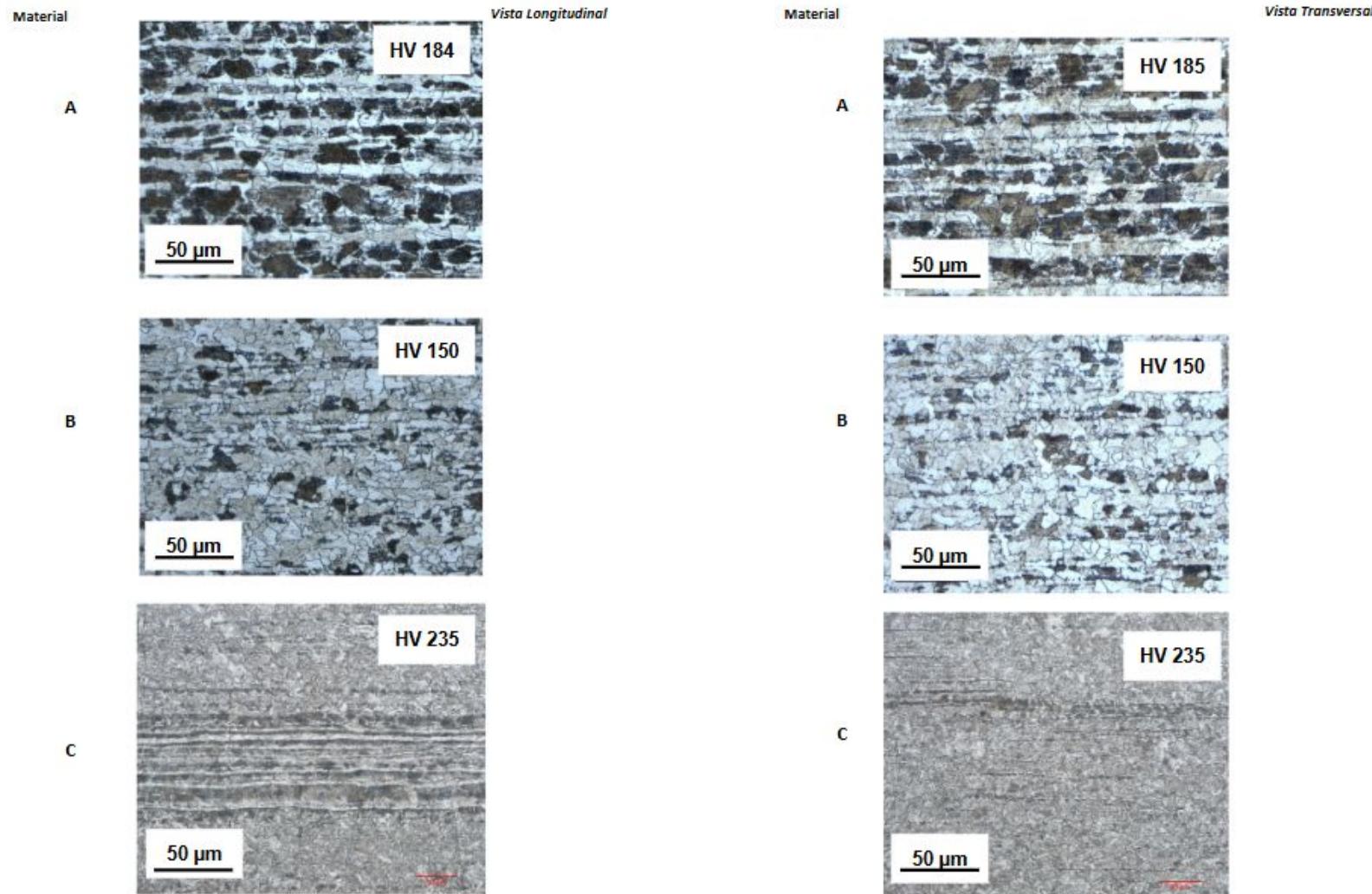
Experimentación

Metalografía (Después de Revenido a 250, 300, 350 y 400 °C) - HRC



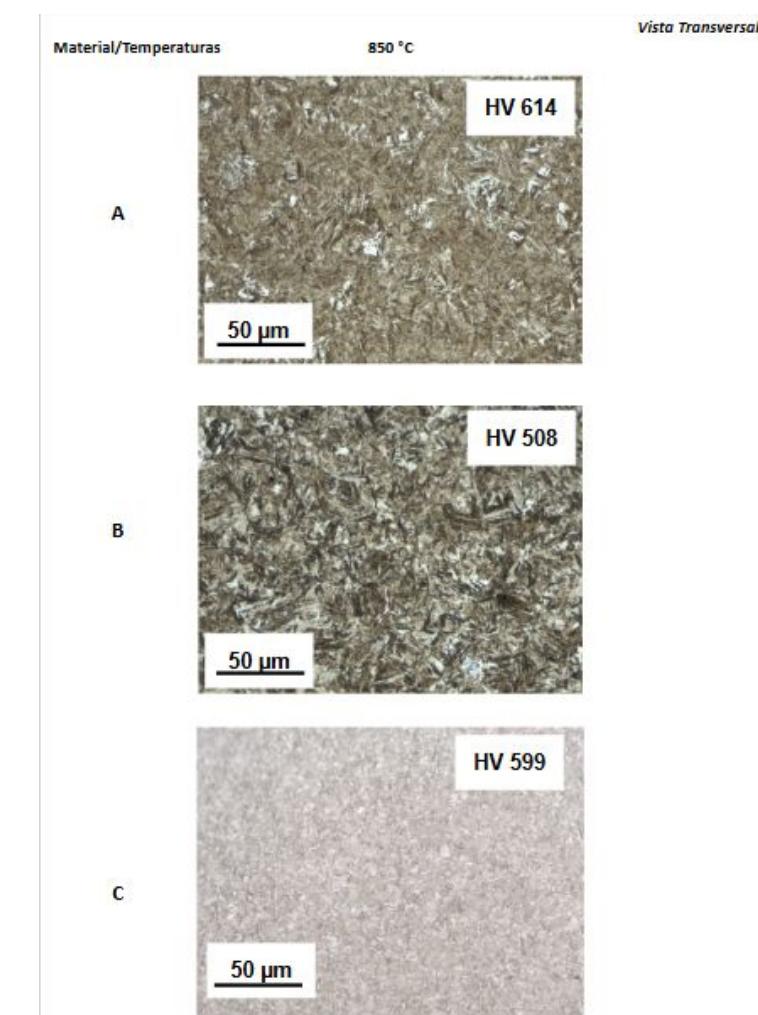
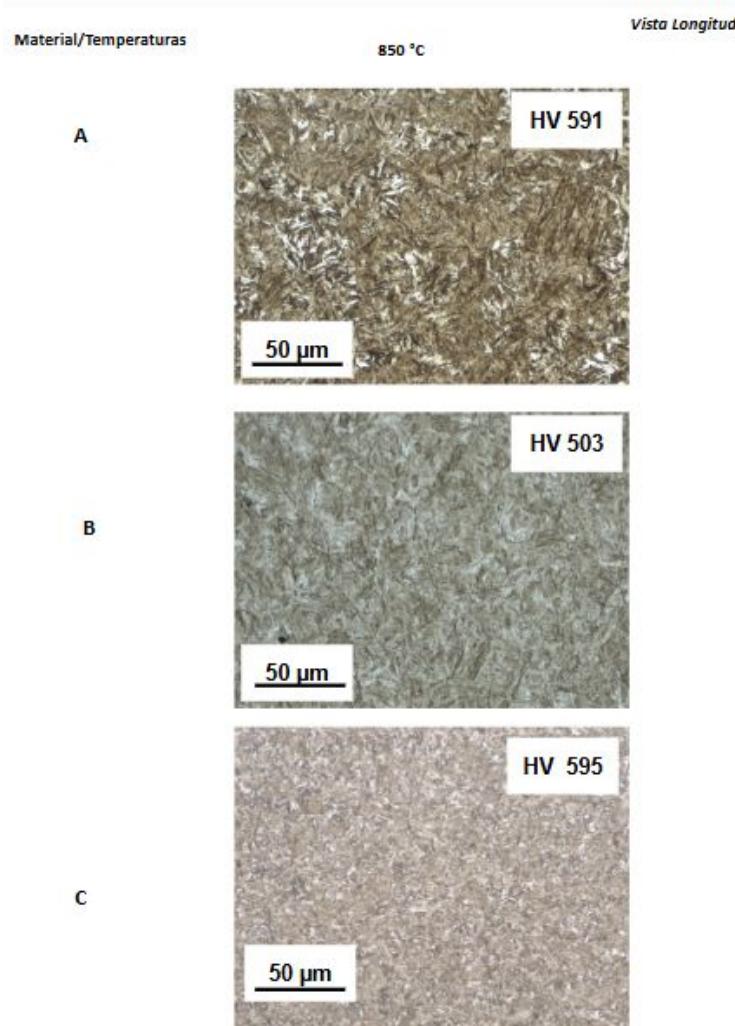
Experimentación

Metalografía (As Received – Antes de Temple) - HV



Experimentación

Metalografía (As Quenched) - HV



Metodología y Estándar Utilizado

DMAIC

Estándares para Experimentación

D

DEFINIR

M

MEDIR

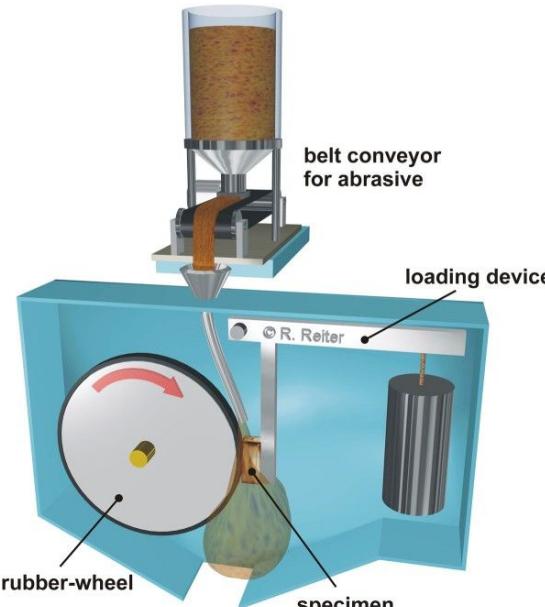
A

ANALIZAR

I

MEJORAR

C

CONTROLAR**ASTM G65**

Quenchants and Quenching Technology

- **ASTM G65:** mide resistencia al desgaste abrasivo en aceros.
- **ASM Handbook:** señala que temple + revenido incrementa dureza y mejora desempeño frente a abrasión.
- **Aceros al Boro (22MnB5, 30MnB5):** muestran menores pérdidas de volumen bajo ASTM G65 gracias a su microestructura endurecida.
- **Relación:** ASTM define cómo medir, ASM explica el mecanismo metalúrgico, y los aceros al boro son la aplicación práctica con resultados superiores.



Metodología y Estándar Utilizado

ASTM G65

El estándar ASTM G65 registra 'pérdida de volumen' sobre una superficie que ha sido sometida a condiciones de desgaste abrasivo.

Parámetros de prueba (según ASTM G65):

Dimensiones de muestra: 1 x 3 in

Carga aplicada: 30 lb (130 N)

Diámetro de rueda: 9 in (228.6 mm)

Revoluciones: 6000

Abrasión lineal: 4309 m / 14, 138 ft

Flujo de arena: 300 – 400 g/min

Tiempo de prueba: 30 min

Velocidad de rueda: 200 RPM

Arena sílica como elemento abrasivo (AFS 50-70)

$$\text{Adjusted Volume loss}(\text{mm}^3) = \text{Measured Volume Loss} * \left(\frac{228.6 \text{ mm}}{\text{Wheel Diameter After Use}} \right)$$

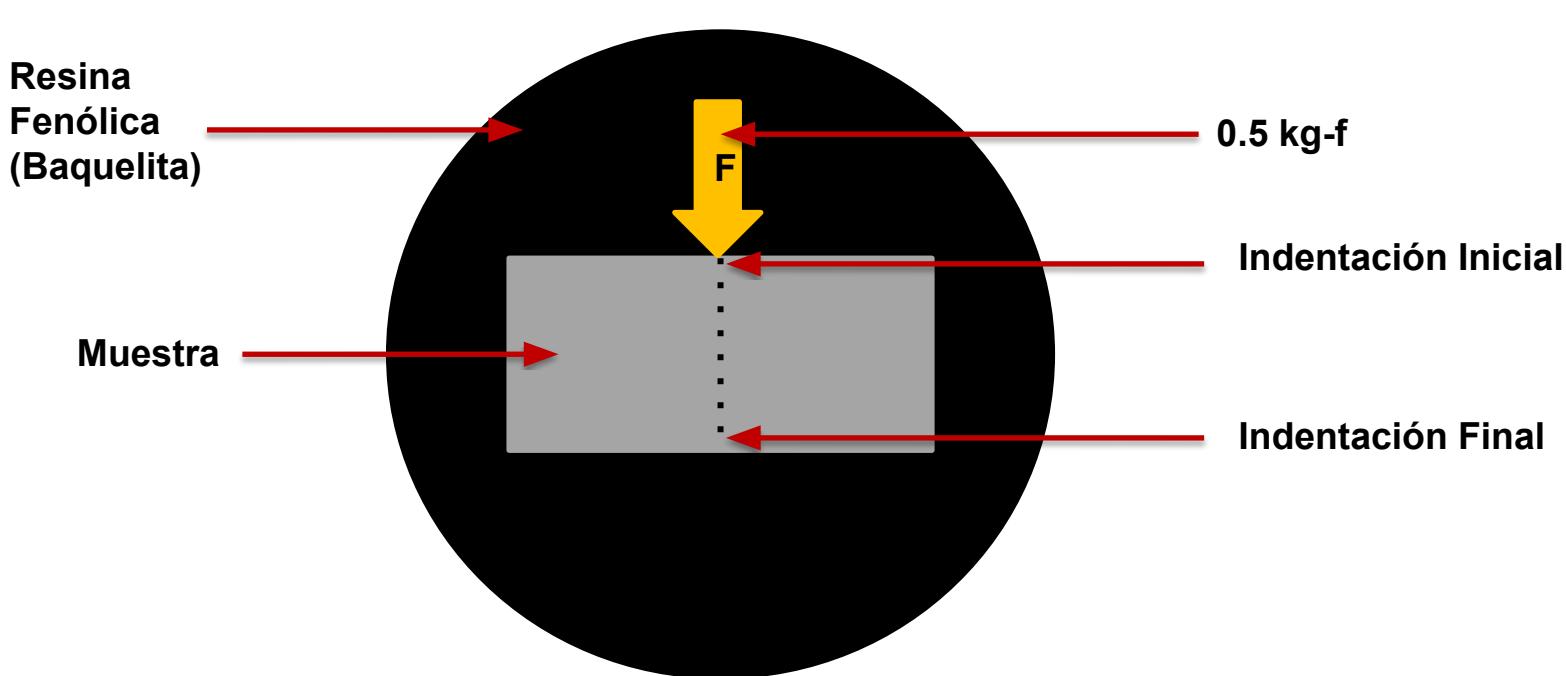
$$\text{Wear Rate}(\text{mm}^3/\text{m}) = \left(\frac{\text{Volume Loss} (\text{mm}^3)}{\text{Linear Abrasion } (\text{m})} \right)$$

$$\text{Volume Loss}(\text{mm}^3) = \left(\frac{\text{Mass Loss} (\text{g})}{\text{Density } \left(\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right)} \right) * 1000 (\text{mm}^3)$$



Microdureza

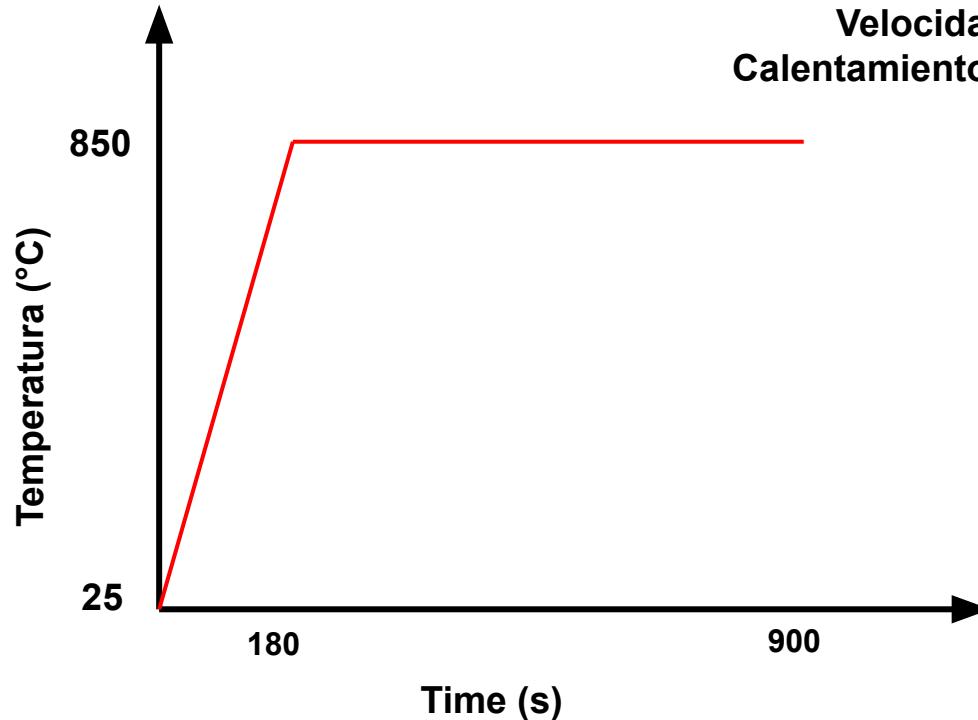
Perfil de Microdureza



Norma ASTM E384
Separación entre
huellas es 2.5 veces
la diagonal mayor de
la huella

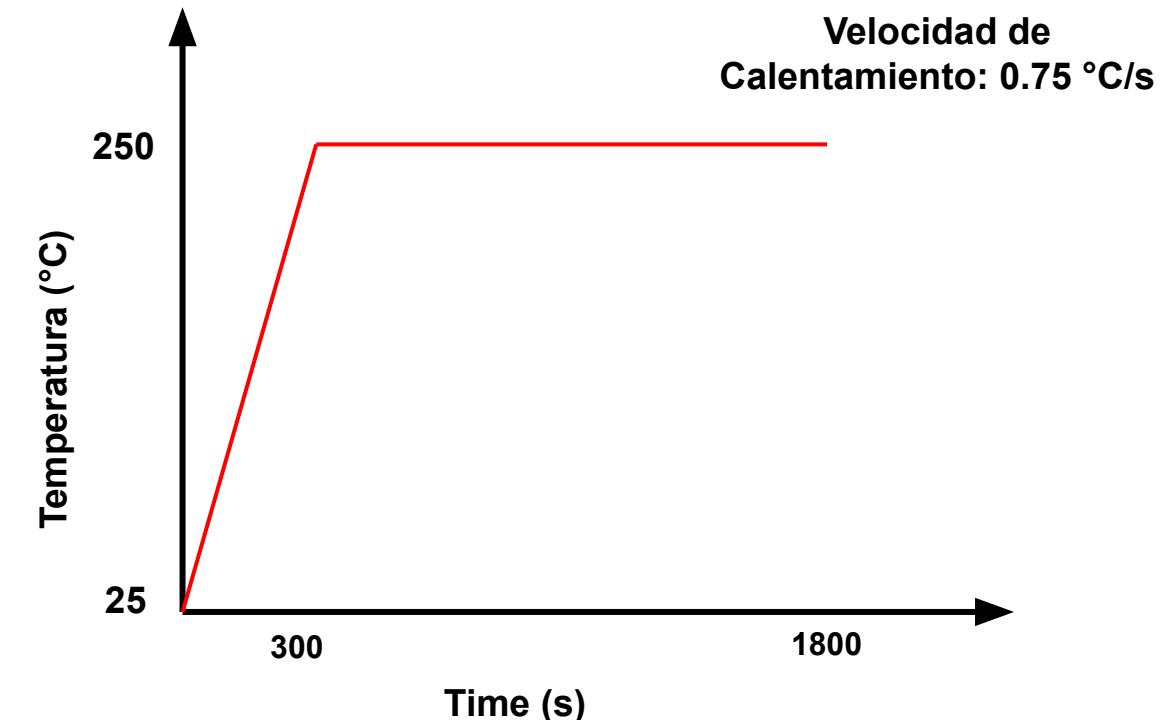
Perfiles de Calentamiento

Curva de Austenizado



Velocidad de
Calentamiento: 4.58 °C/s

Curva de Revenido

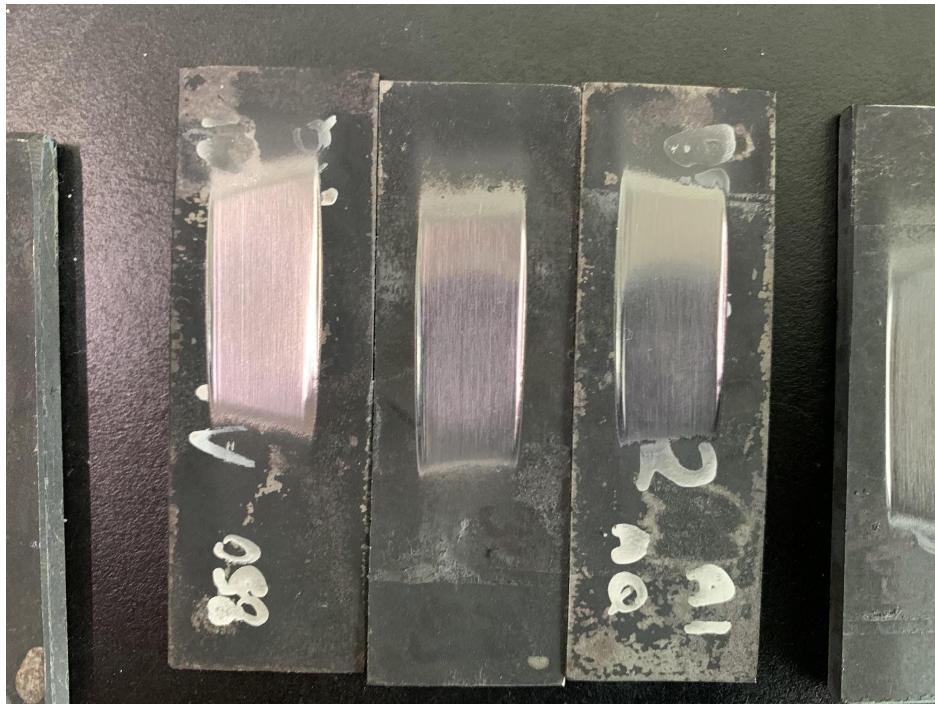


Velocidad de
Calentamiento: 0.75 °C/s

Agua como medio de temple se debe a la velocidad de enfriamiento. Es un medio de enfriamiento severo; accesible, no requiere de una preparación compleja.

Metodología y Estándar Utilizado

Aclaración: Muestras Desgastadas con Óxido en Superficie



**Si bien las muestras fueron probadas con óxido en su superficie, se podría compensar la cuantificación de pérdida de volumen al pesar nuevamente la muestra después de un proceso de decapado.

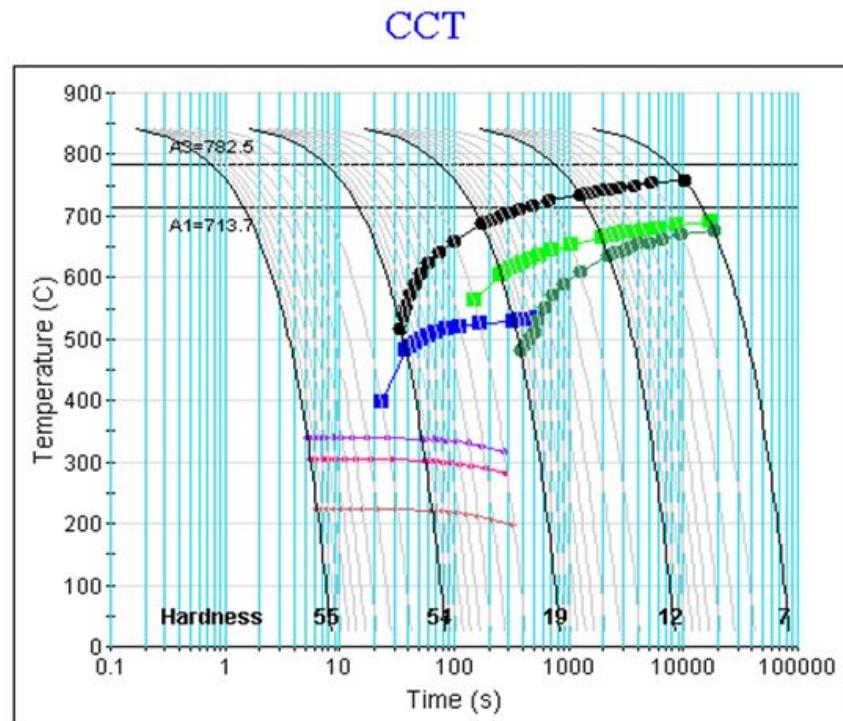
Ya se cuenta con masa inicial (con óxido); ya se cuenta con masa final (después de desgaste); se puede cuantificar masa final después de decapado.

Asimismo, en la literatura no se detallan procesos de decapado en las probetas.

Explorar remoción de óxido con láser para evitar uso de químicos. Estudiar los posibles efectos en microestructura del laser sobre las piezas.

Composición Química

Acero A



COMPOSITION (Wt%)

Fe: 97.838
Al: 0.039
Cr: 0.11
Cu: 0.037
Mn: 1.37
Mo: 0.003
Nb: 0.001
Ni: 0.006
Si: 0.2
Ti: 0.029
V: 0.001
B: 0.0021
C: 0.34
N: 0.0059
P: 0.014
S: 0.004
TRANSITIONS: (C)
A3: 782.5
Pearlite: 713.7
Bainite: 578.2

Química JmatPro

Fe	97.838
Al	0.039
Cr	0.110
Cu	0.037
Mn	1.37
Mo	0.003
Nb	0.001
Ni	0.006
Si	0.200
Ti	0.029
V	0.001
B	0.002
C	0.340
N	0.0059
P	0.014
S	0.004

Química determinada en UDEM

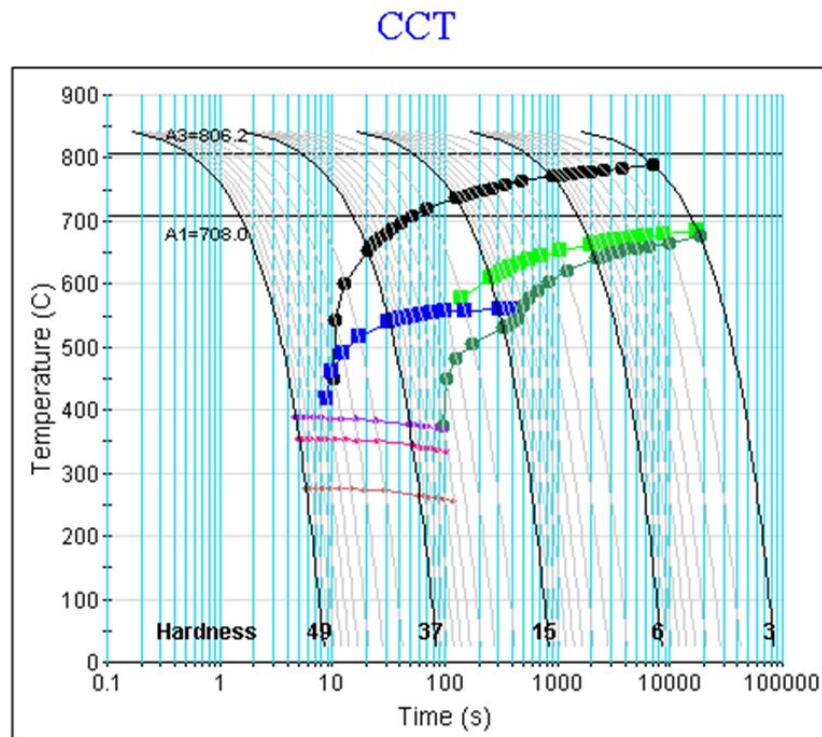
Fe	96.500
Al	0.051
Cr	0.111
Cu	0.039
Mn	1.380
Mo	0.002
Nb	0.001
Ni	0.010
Si	0.209
Ti	0.033
V	0.002
B	0.003
C	0.334
N	
P	0.014
S	0.018

Nota:

*Elemento “N” no viene configurado en el espectrómetro de UDEM

Composición Química

Acero B



COMPOSITION (Wt%)
 Fe: 98.2713
 Al: 0.033
 Cr: 0.018
 Cu: 0.039
 Mn: 1.18
 Mo: 0.004
 Nb: 0.001
 Ni: 0.036
 Si: 0.127
 Ti: 0.025
 V: 0.001
 B: 0.0027
 C: 0.24
 N: 0.005
 P: 0.015
 S: 0.002
 TRANSITIONS: (C)
 A3: 806.2
 Pearlite: 708.0
 Bainite: 606.0

Química JmatPro

Fe	98.271
Al	0.033
Cr	0.018
Cu	0.039
Mn	1.18
Mo	0.004
Nb	0.001
Ni	0.036
Si	0.127
Ti	0.025
V	0.001
B	0.0027
C	0.24
N	0.0050
P	0.015
S	0.002

Química determinada en UDEM

Fe	98.2000
Al	0.0347
Cr	0.0184
Cu	0.0403
Mn	1.2100
Mo	0.0009
Nb	0.0010
Ni	0.0389
Si	0.1360
Ti	0.0277
V	0.0034
B	0.0017
C	0.2020
N	
P	0.0101
S	0.0036

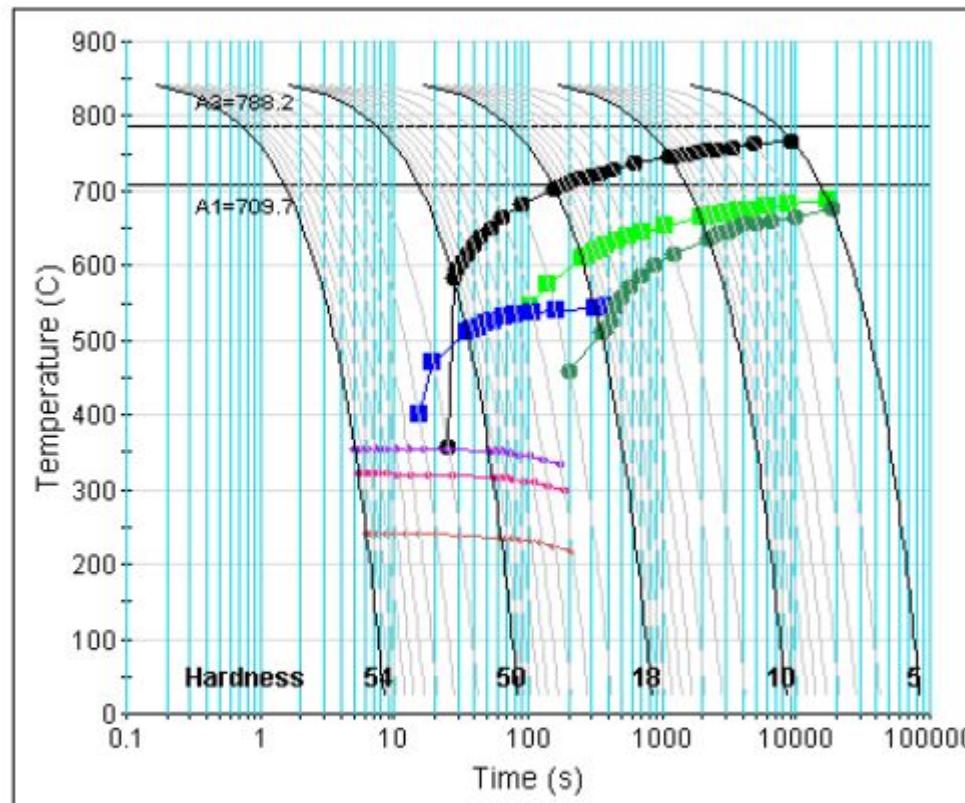
Nota:

*Elemento “N” no viene configurado en el espectrómetro de UDEM

Composición Química

Acero C

CCT



Austenitisation temperature (C) : 860.0
Grain size : 15.0 microns

COMPOSITION (Wt%)

Fe: 98.0725
Al: 0.037
Cr: 0.017
Cu: 0.011
Mn: 1.33
Mo: 0.002
Nb: 0.0015
Ni: 0.017
Si: 0.14
Ti: 0.035
V: 0.0022
B: 0.0039
C: 0.312
N: 0.0049
P: 0.012
S: 0.002
TRANSITIONS: (C)
A ₃ : 788.2
Pearlite: 709.7
Bainite: 589.8

Composición Química

Químicas Aceros A-B-C

A

Fe	97.8380
Al	0.0390
Cr	0.1100
Cu	0.0370
Mn	1.3700
Mo	0.0030
Nb	0.0010
Ni	0.0060
Si	0.2000
Ti	0.0290
V	0.0010
B	0.0021
C	0.3400
N	0.0059
P	0.0140
S	0.0040

B

Fe	98.2713
Al	0.0330
Cr	0.0180
Cu	0.0390
Mn	1.1800
Mo	0.0040
Nb	0.0010
Ni	0.0360
Si	0.1270
Ti	0.0250
V	0.0010
B	0.0027
C	0.2400
N	0.0050
P	0.0150
S	0.0020

C*Química determinada en UDEM*

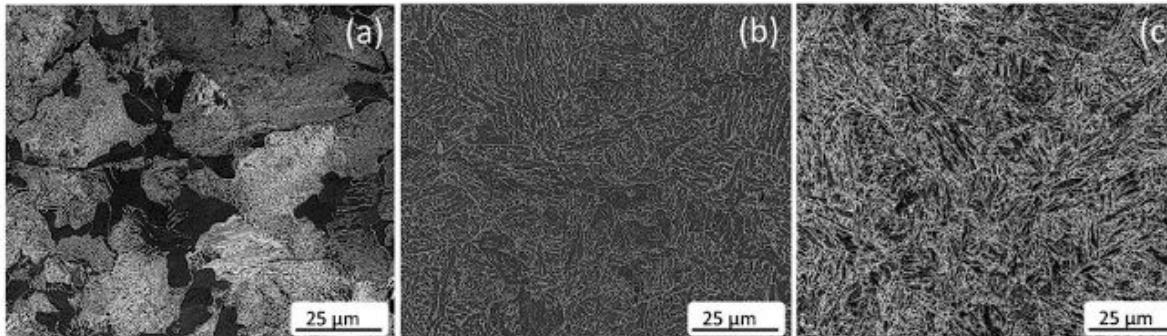
Fe	96.3000
Al	0.0428
Cr	0.6750
Cu	0.0089
Mn	1.7900
Mo	0.2820
Nb	0.0630
Ni	0.1580
Si	0.5170
Ti	0.0143
V	0.0025
B	0.0005
C	0.0910
N	
P	0.0104
S	0.0036

Nota 1:

*Elemento "N" no viene configurado en el espectrómetro de
UDEM

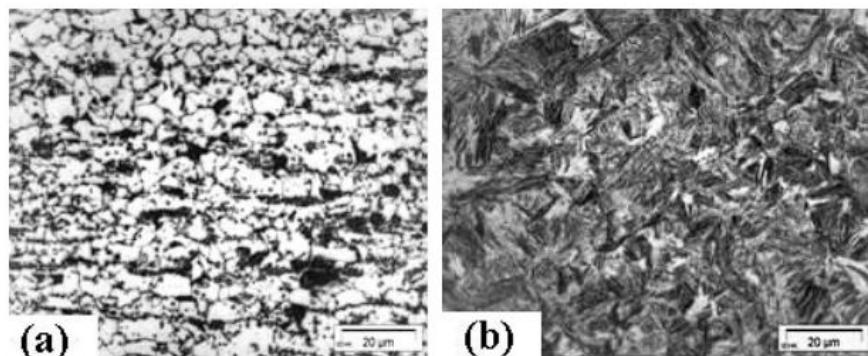
Metalografías

Fases del Acero



(Denand et al., 2020)

Fig. 1. Initial (a) ferrite-pearlite, (b) bainite and (c) tempered martensite microstructures of the investigated steel as observed by SEM (standard metallography preparation and 2% Nital etching).



(Naderi, 2007)

Figure 5 Microstructure of typical boron steel before and after treatment,
a) Ferrite, Pearlite and carbides, b) Martensite.

Resultados

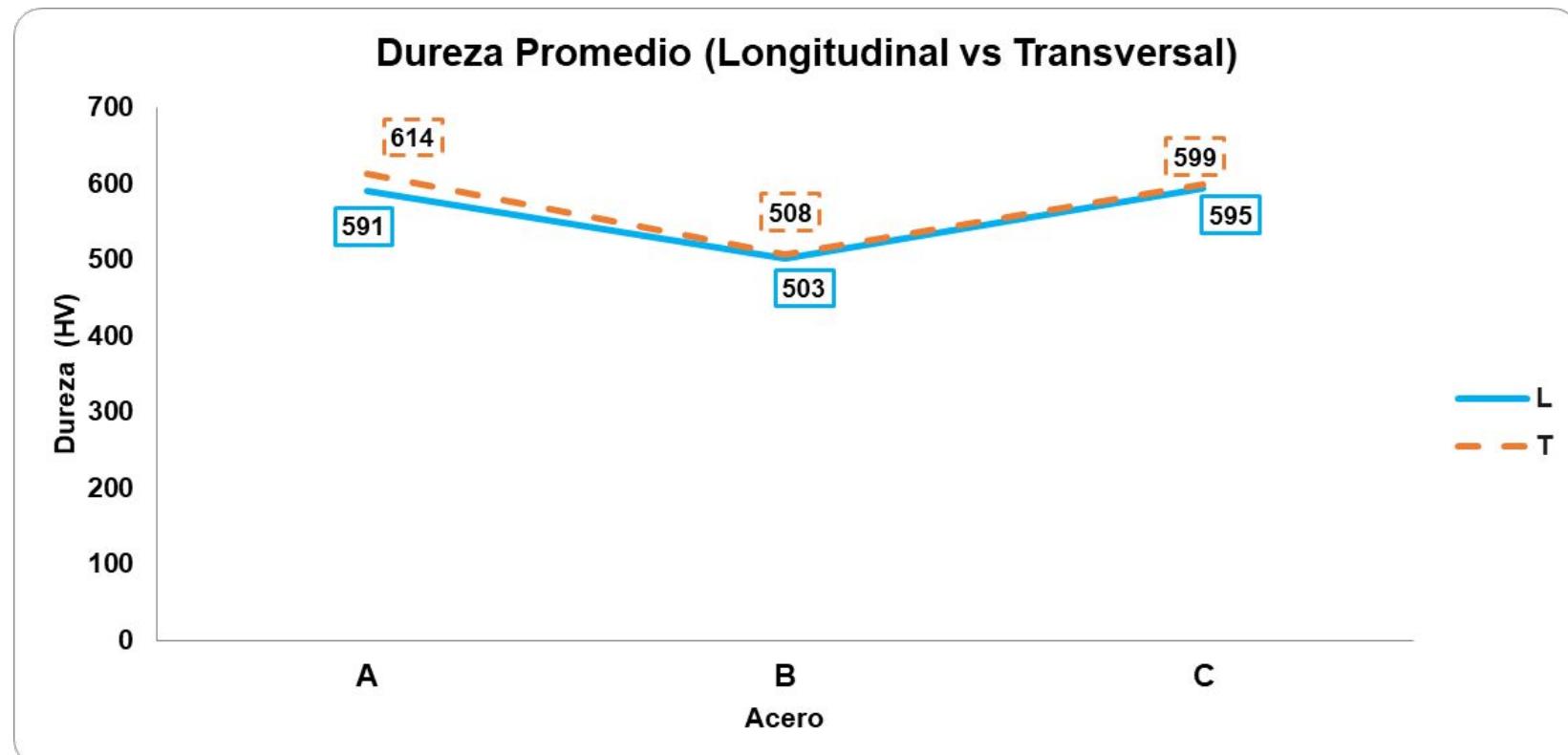
Resultados Obtenidos – Durezas (Después de Temple-As Quenched)

Acero	L	T	Austenizado (°C)
A	591	614	850
B	503	508	850
C	595	599	850

*Nota:

“L” denota la sección/corte longitudinal de la pieza con respecto al sentido de laminación.

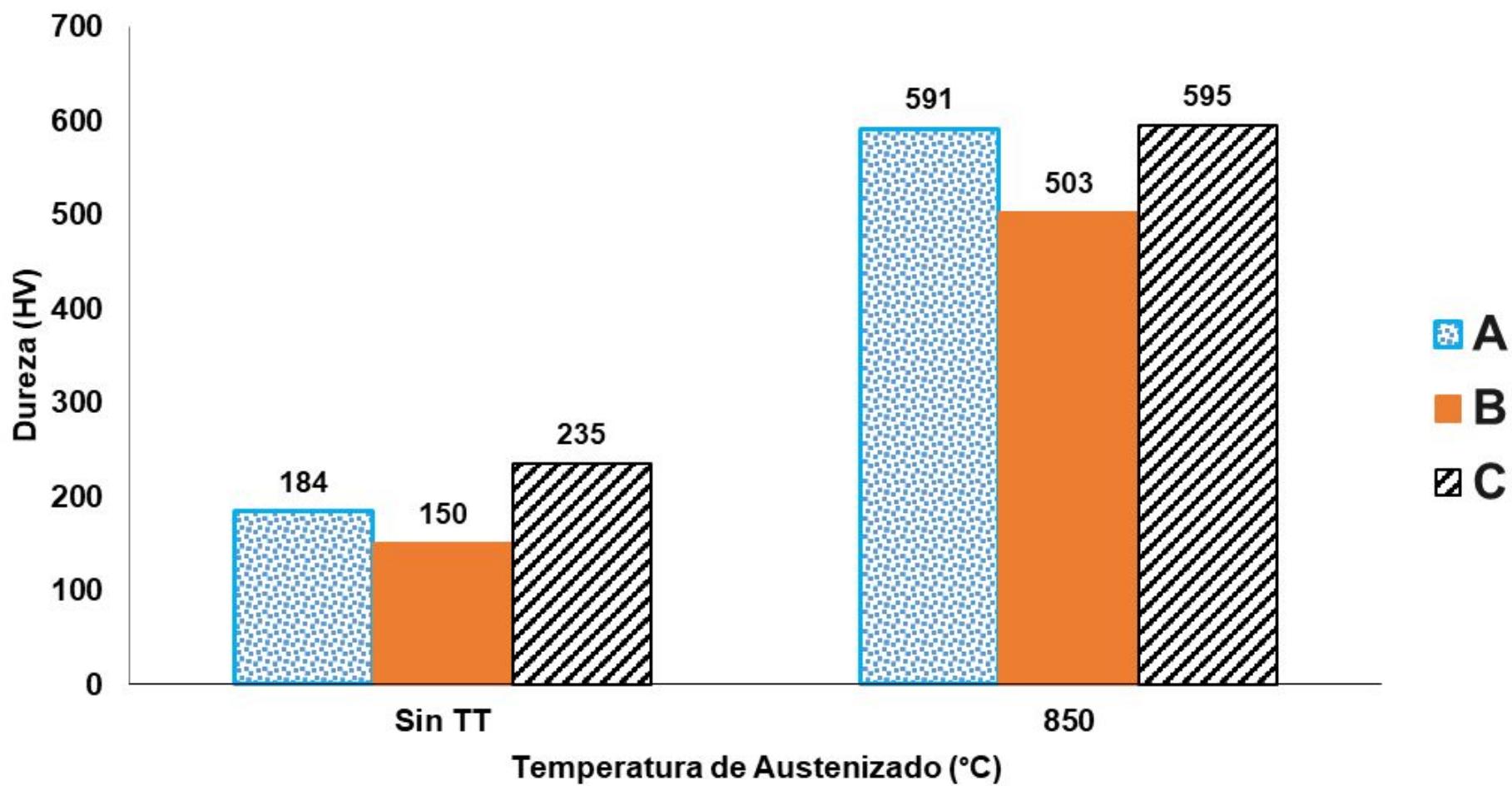
“T” denota la sección/corte transversal de la pieza con respecto al sentido de laminación.



Resultados

Resultados Obtenidos – Durezas (Sin TT vs Con Temple-As Quenched)

Dureza sin TT vs Dureza con Temple (Longitudinal)



Resultados

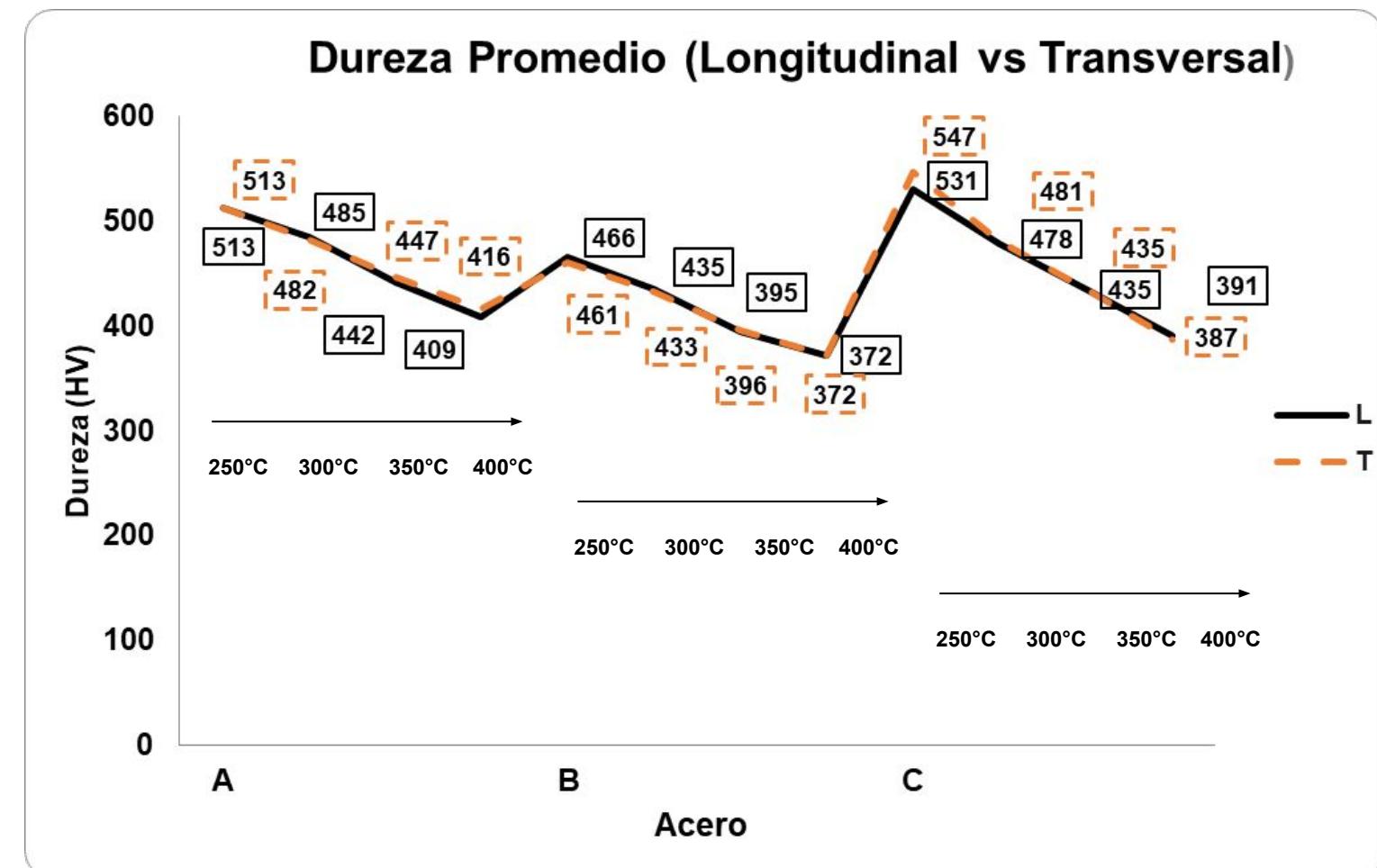
Resultados Obtenidos – Durezas (Después de Revenido a 250, 300, 350 y 400 °C)

Acero	L	T	Revenido (°C)
A	513	513	250
	485	482	300
	442	447	350
	409	416	400
B	466	461	250
	435	433	300
	395	396	350
	372	372	400
C	531	547	250
	478	481	300
	435	435	350
	391	387	400

*Nota:

“L” denota la sección/corte longitudinal de la pieza con respecto al sentido de laminación.

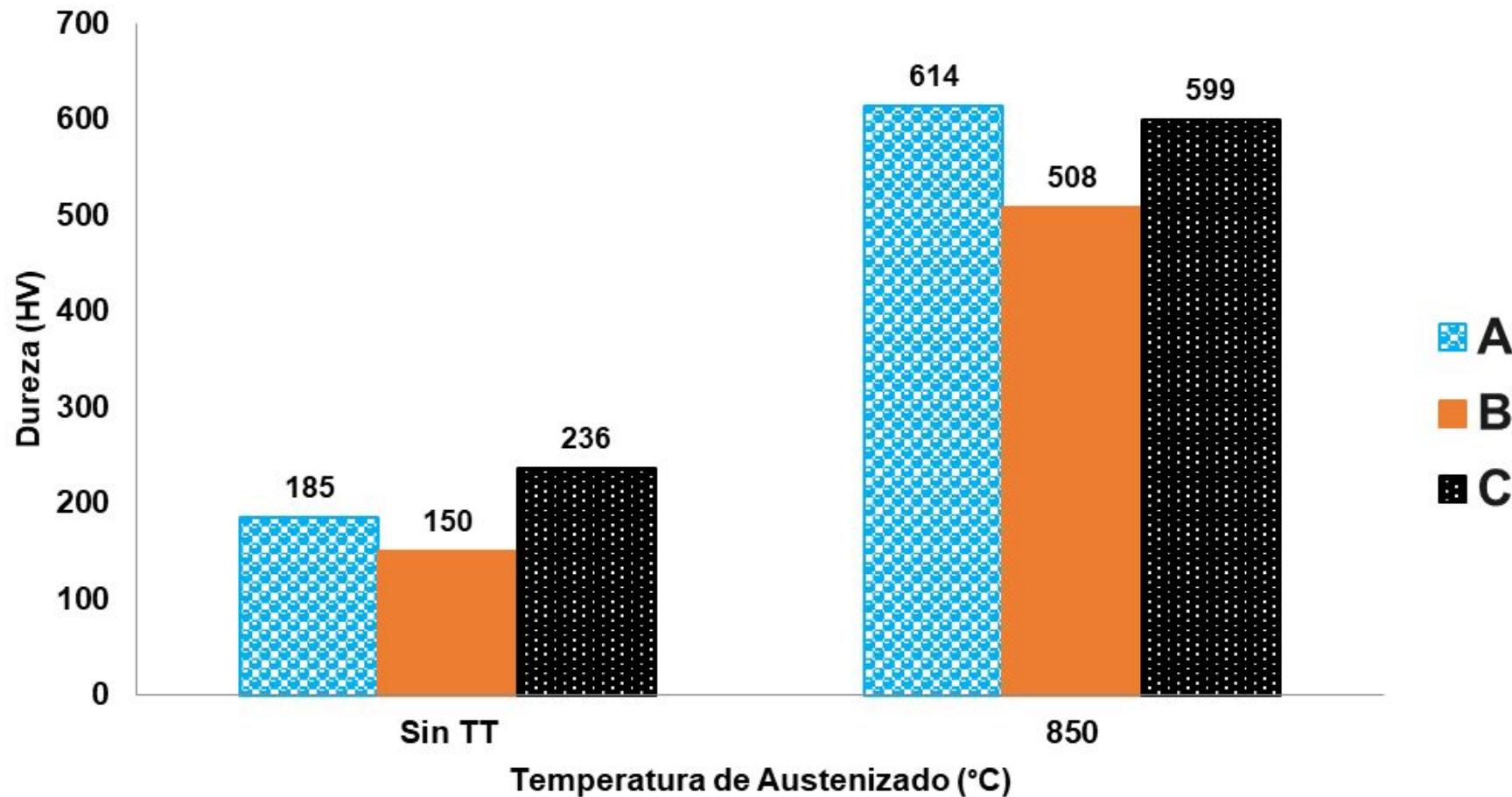
“T” denota la sección/corte transversal de la pieza con respecto al sentido de laminación.



Resultados

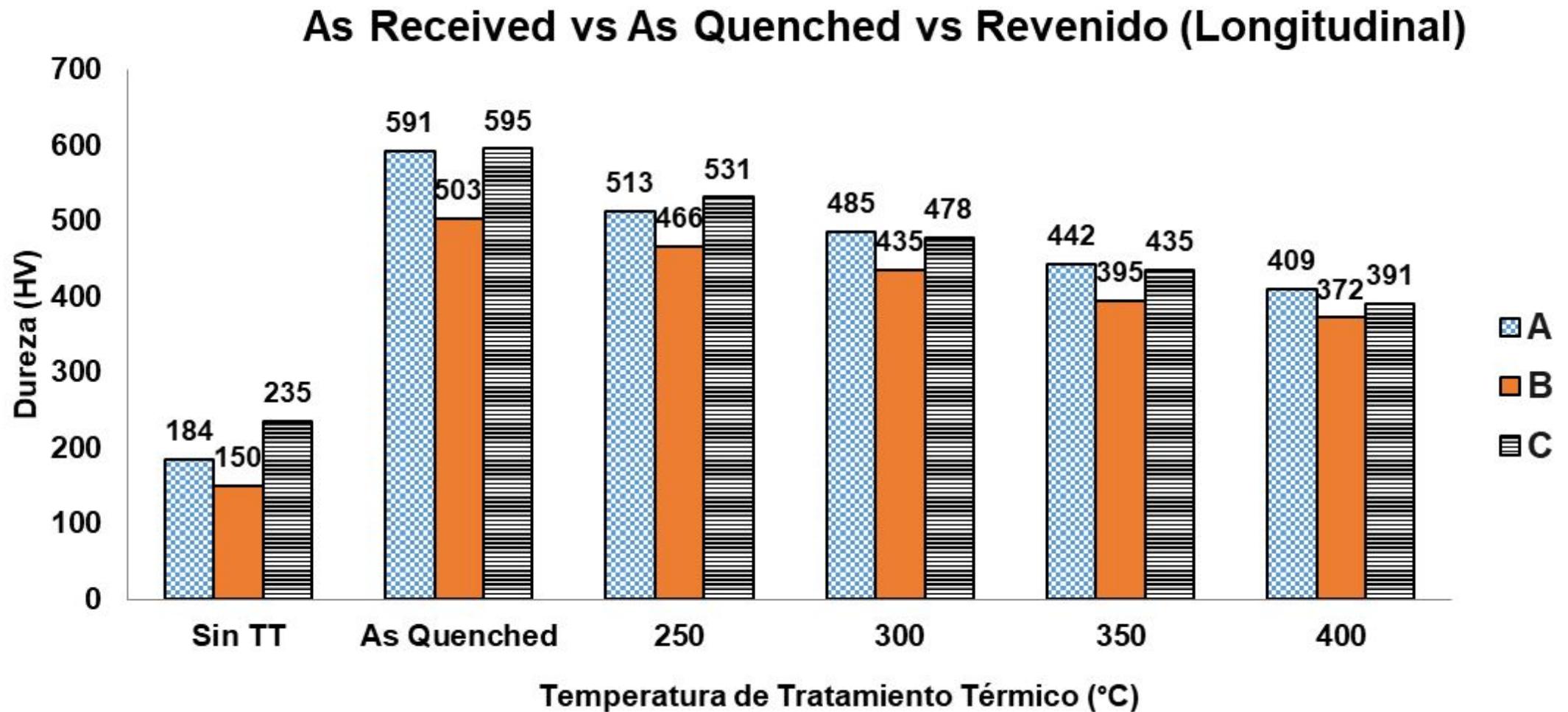
Resultados Obtenidos – Durezas (Sin TT vs Con Temple-As Quenched)

Dureza sin TT vs Dureza con Temple (Transversal)



Resultados

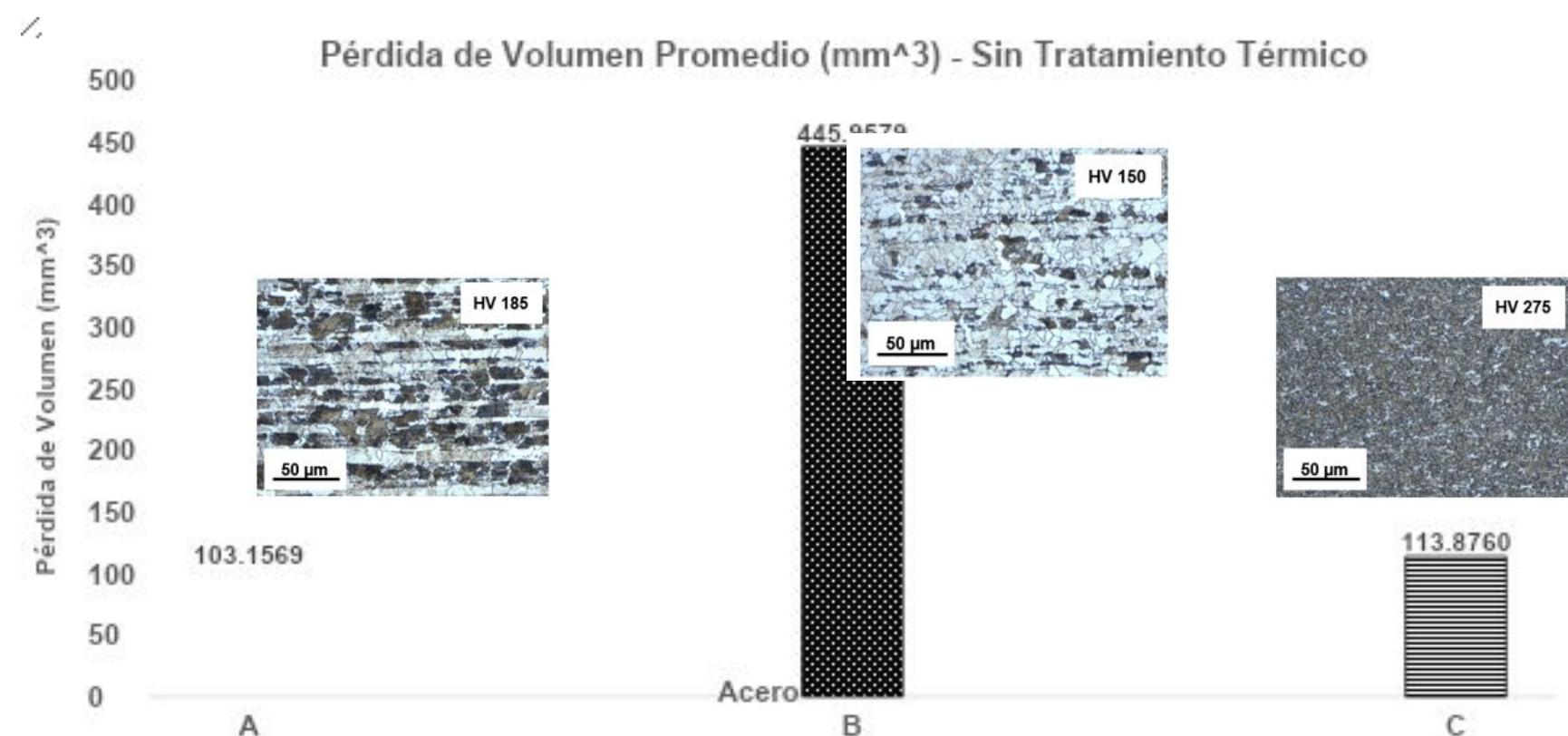
Resultados Obtenidos – Durezas (Sin TT; As Quenched; Revenido a 250, 300, 350 y 400 °C)



Resultados

Resultados Obtenidos – Abrasividad (Sin Tratamiento Térmico)

Dureza Promedio (HV)	
Acero	Sección Transversal
A	185
B	150
C	235



Resultados

Resultados de Wear Coefficient [Sin TT/As Received – en mm³/m*N] – Acero A



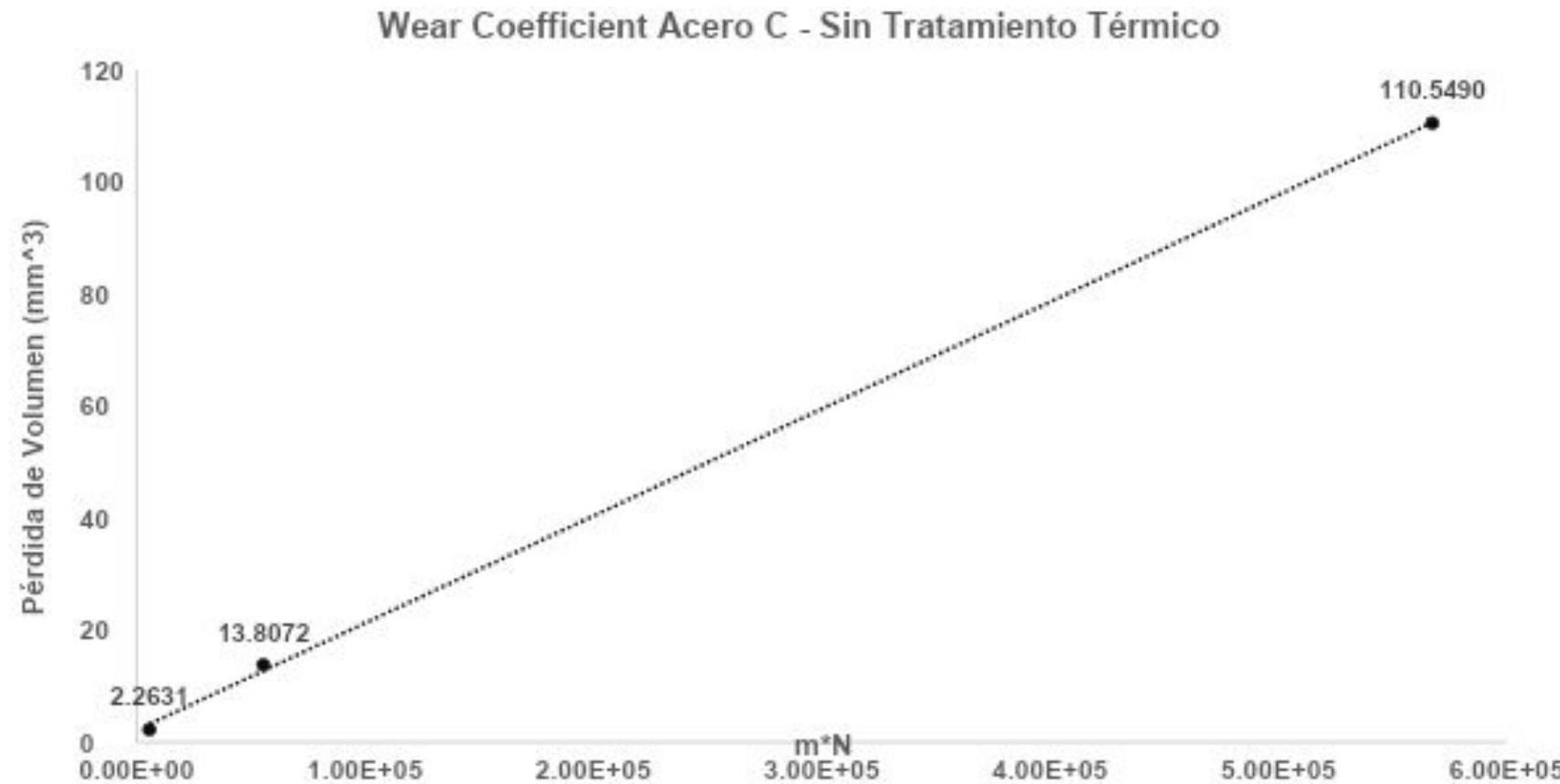
Resultados

Resultados de Wear Coefficient [Sin TT/As Received – en mm³/m*N] – Acero B



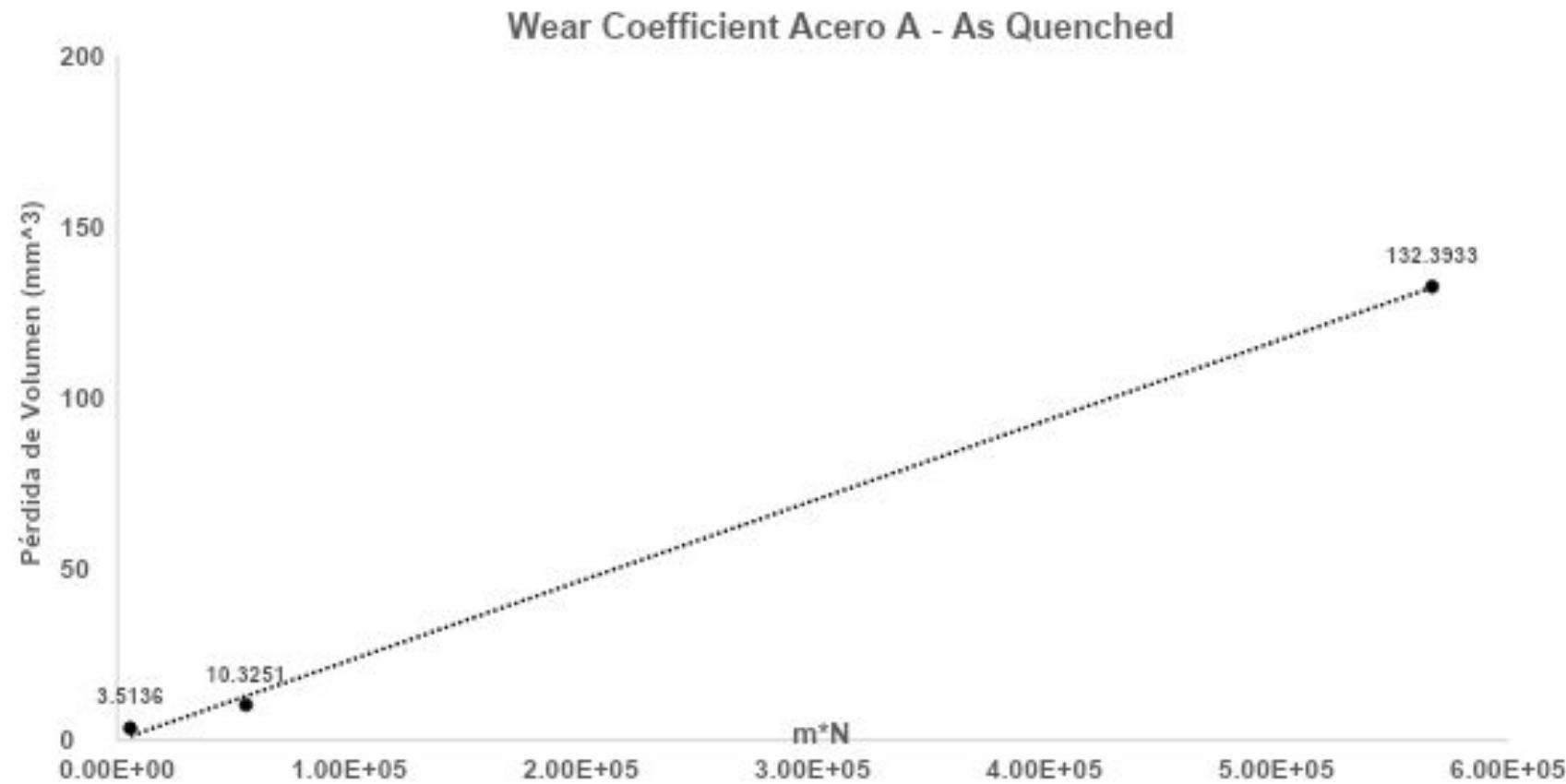
Resultados

Resultados de Wear Coefficient [Sin TT/As Received – en mm³/m*N] – Acero C



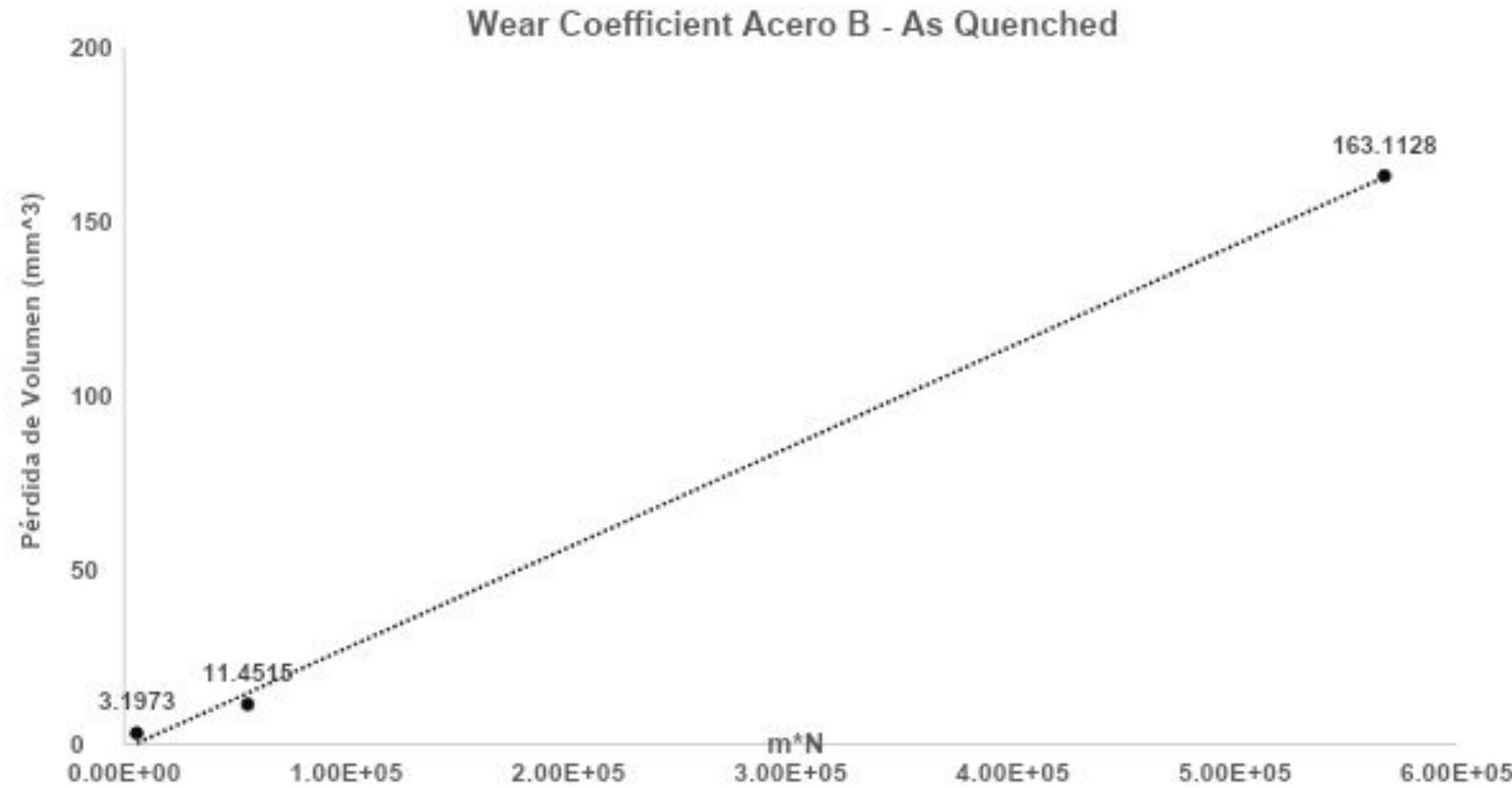
Resultados

Resultados de Wear Coefficient [As Quenched – en mm³/m*N] - Acero A



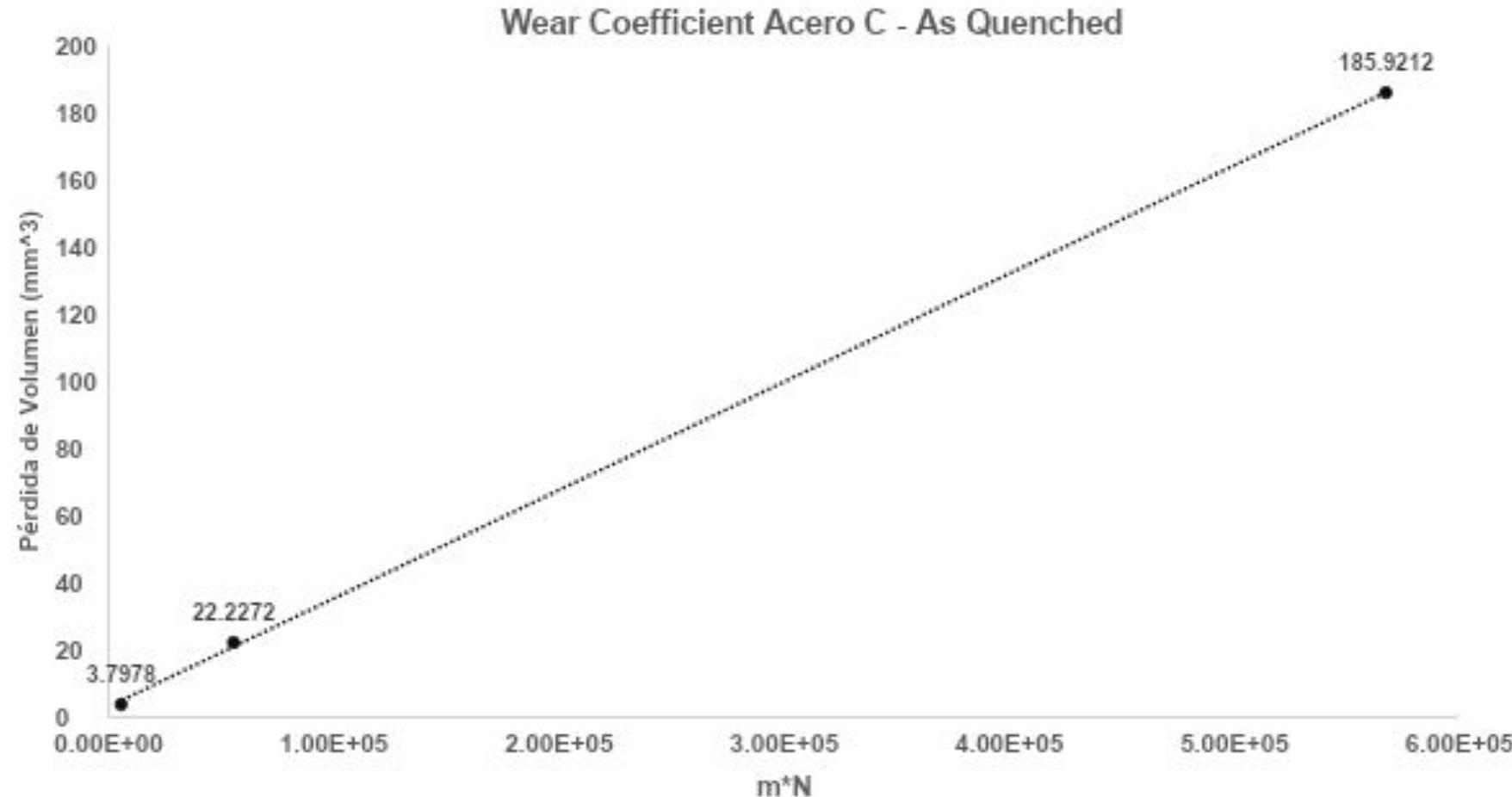
Resultados

Resultados de Wear Coefficient [As Quenched – en mm³/m*N] - Acero B



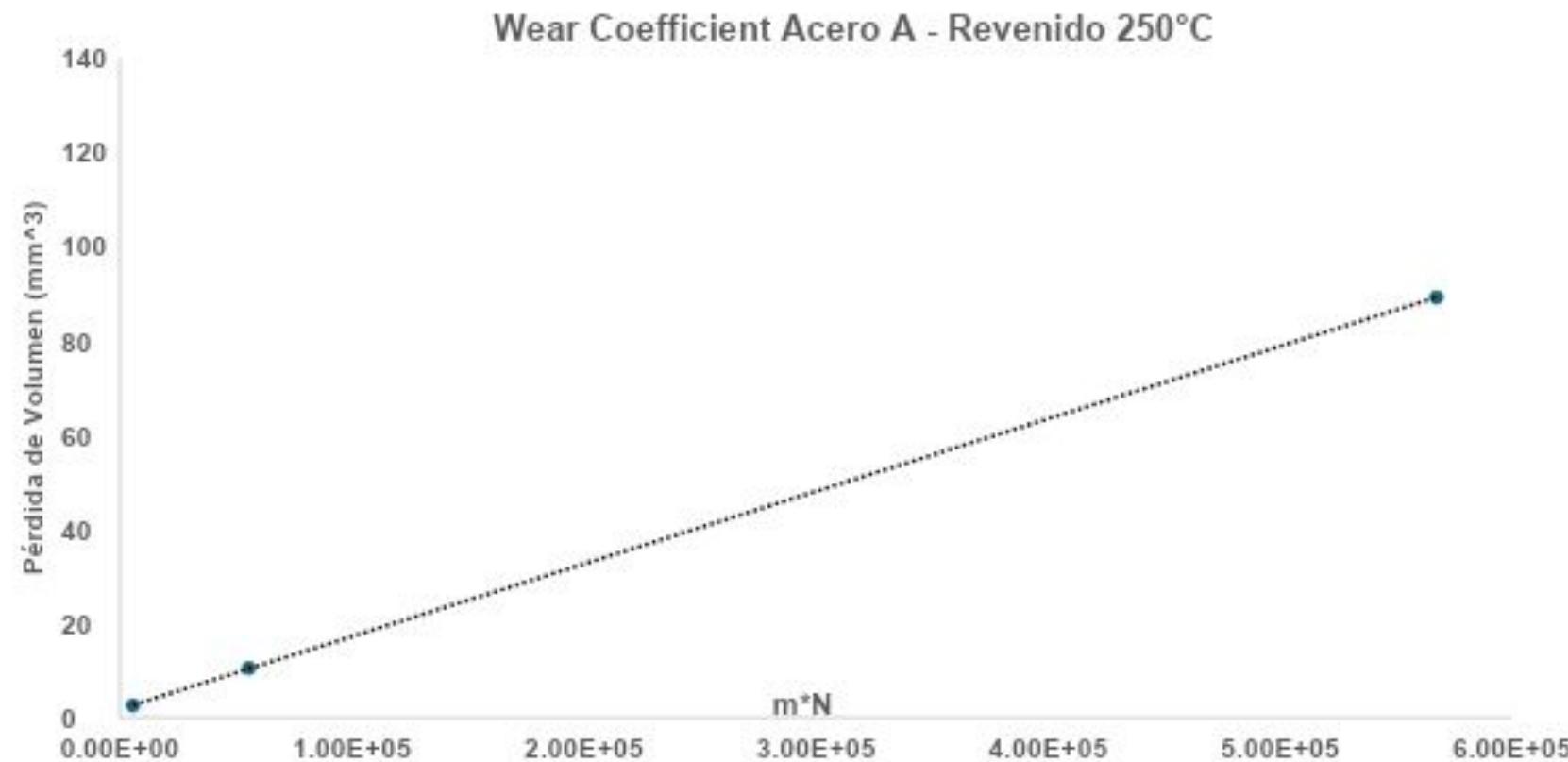
Resultados

Resultados de Wear Coefficient [As Quenched – en mm³/m*N] - Acero C



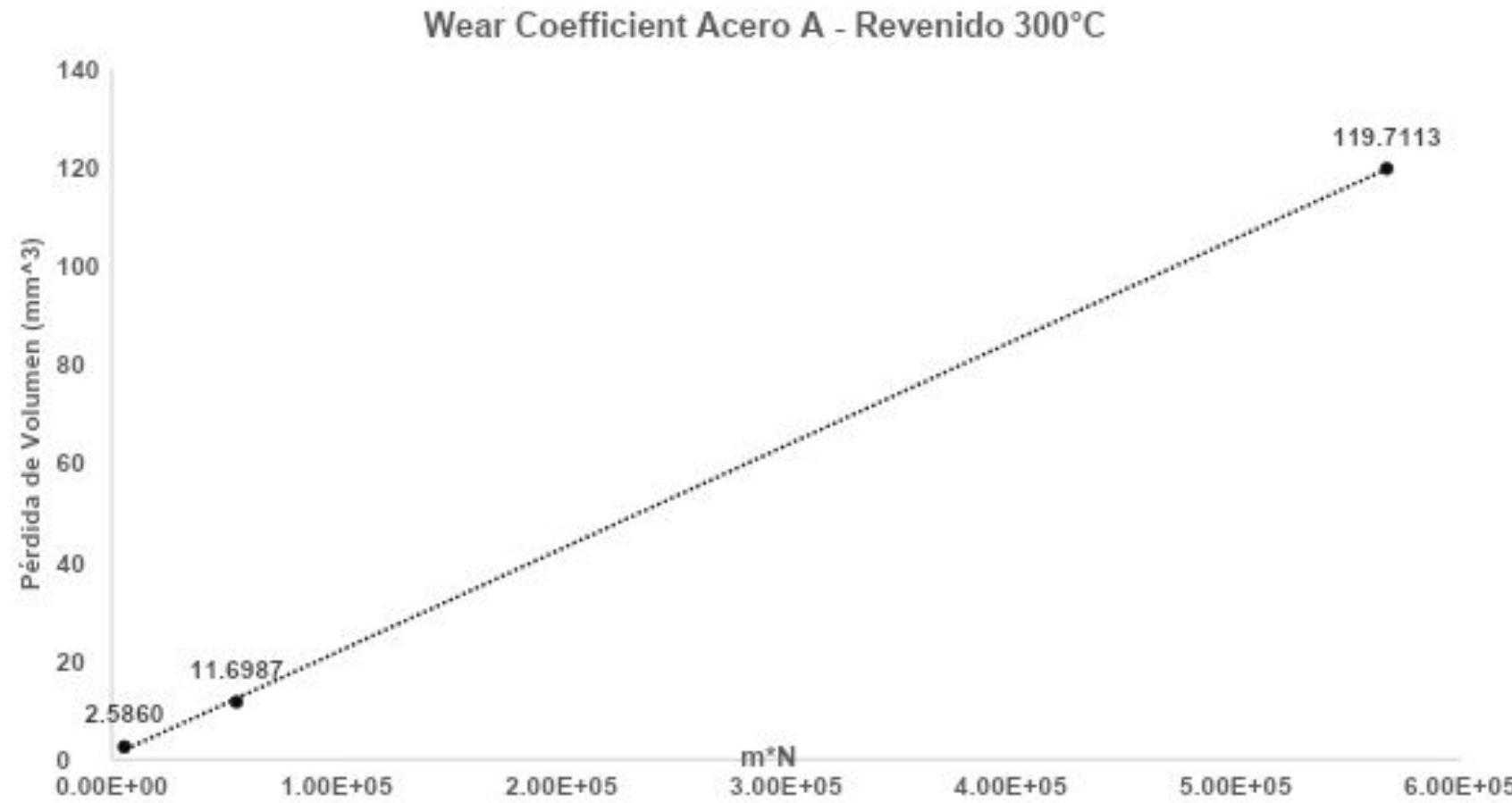
Resultados

Resultados de Wear Coefficient [Revenidos 250°C – en mm^3/m*N] - Acero A



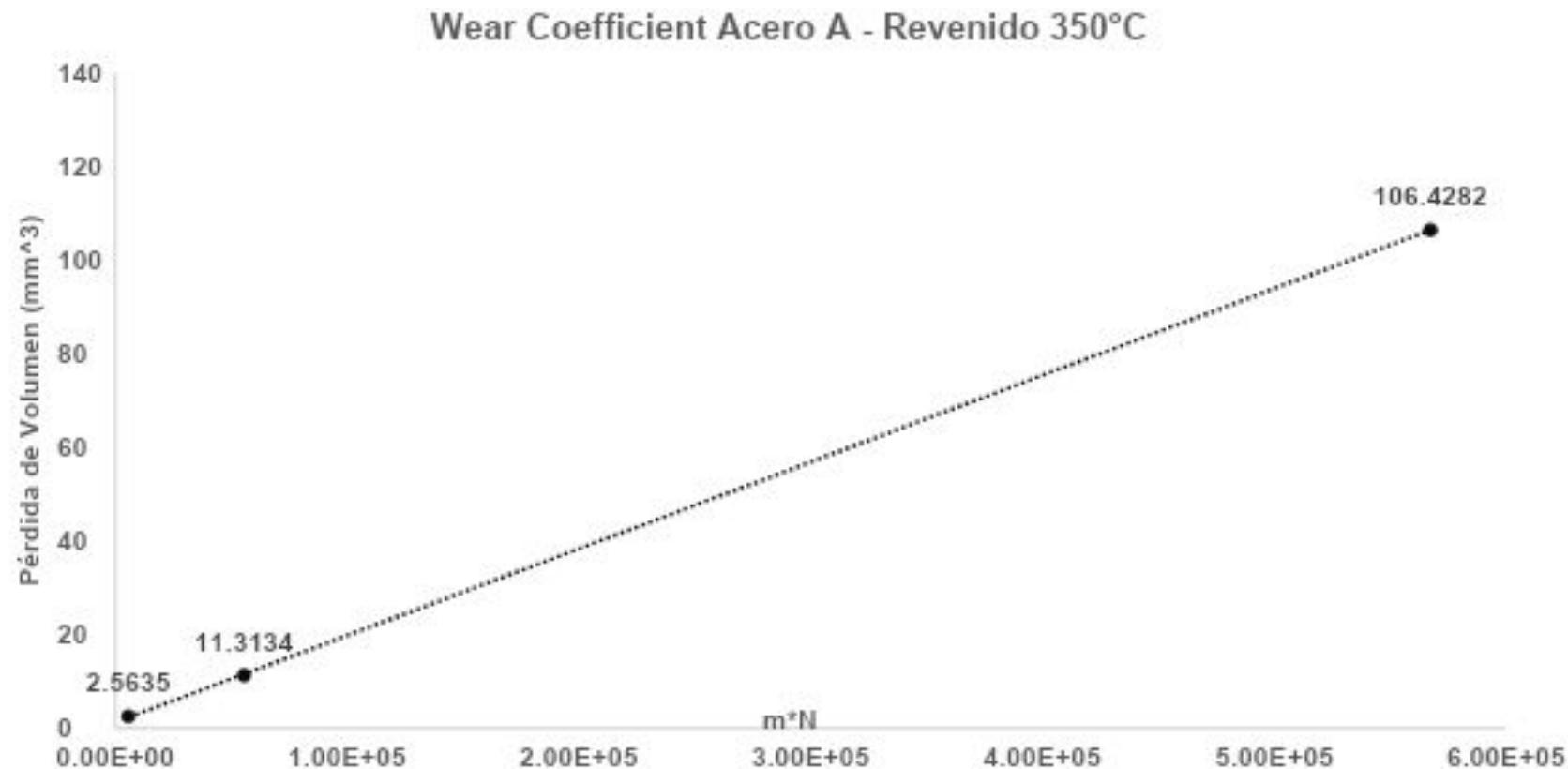
Resultados

Resultados de Wear Coefficient [Revenidos 300°C – en mm^3/m*N] - Acero A



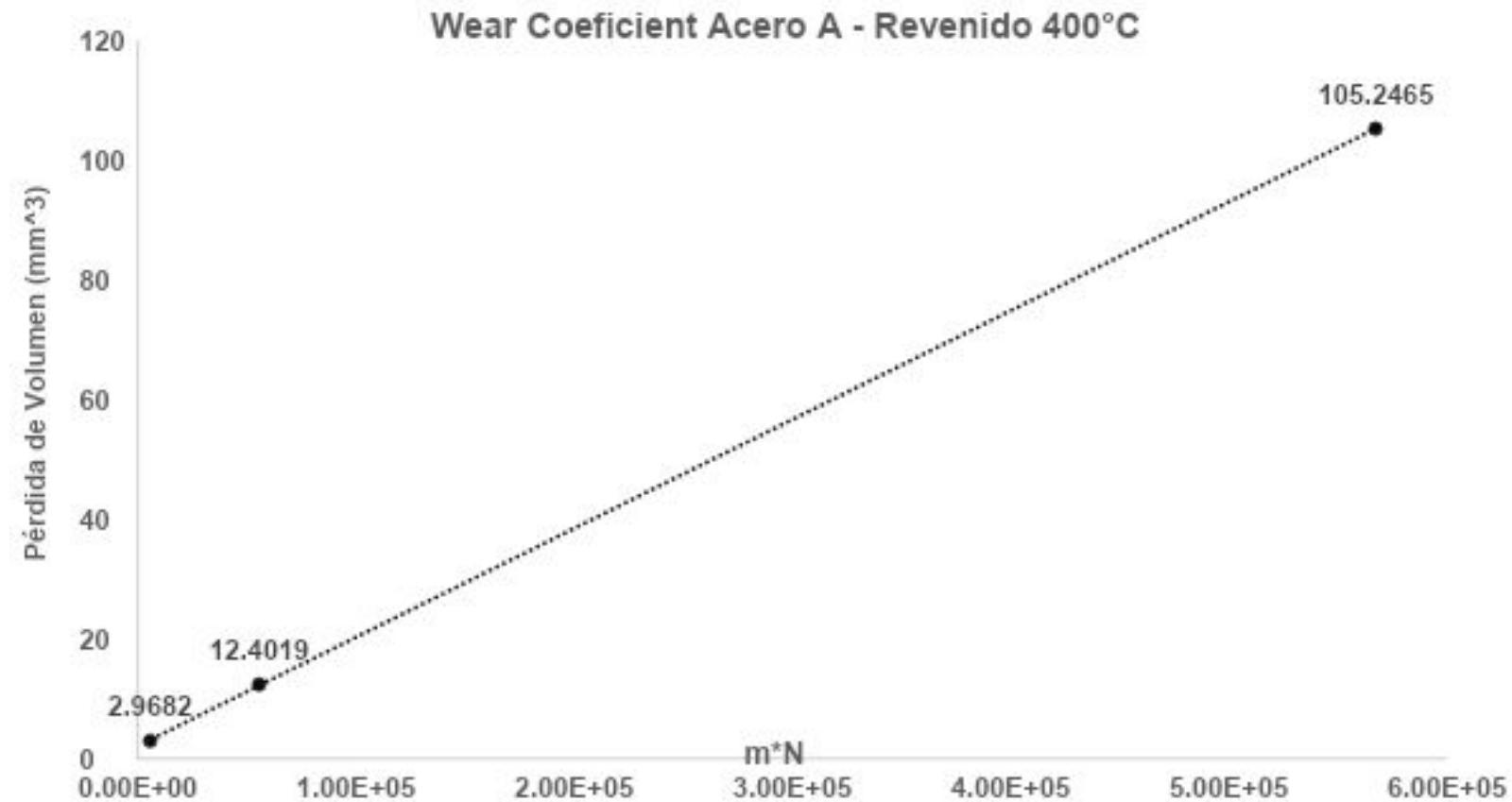
Resultados

Resultados de Wear Coefficient [Revenidos 350°C – en mm^3/m*N] - Acero A



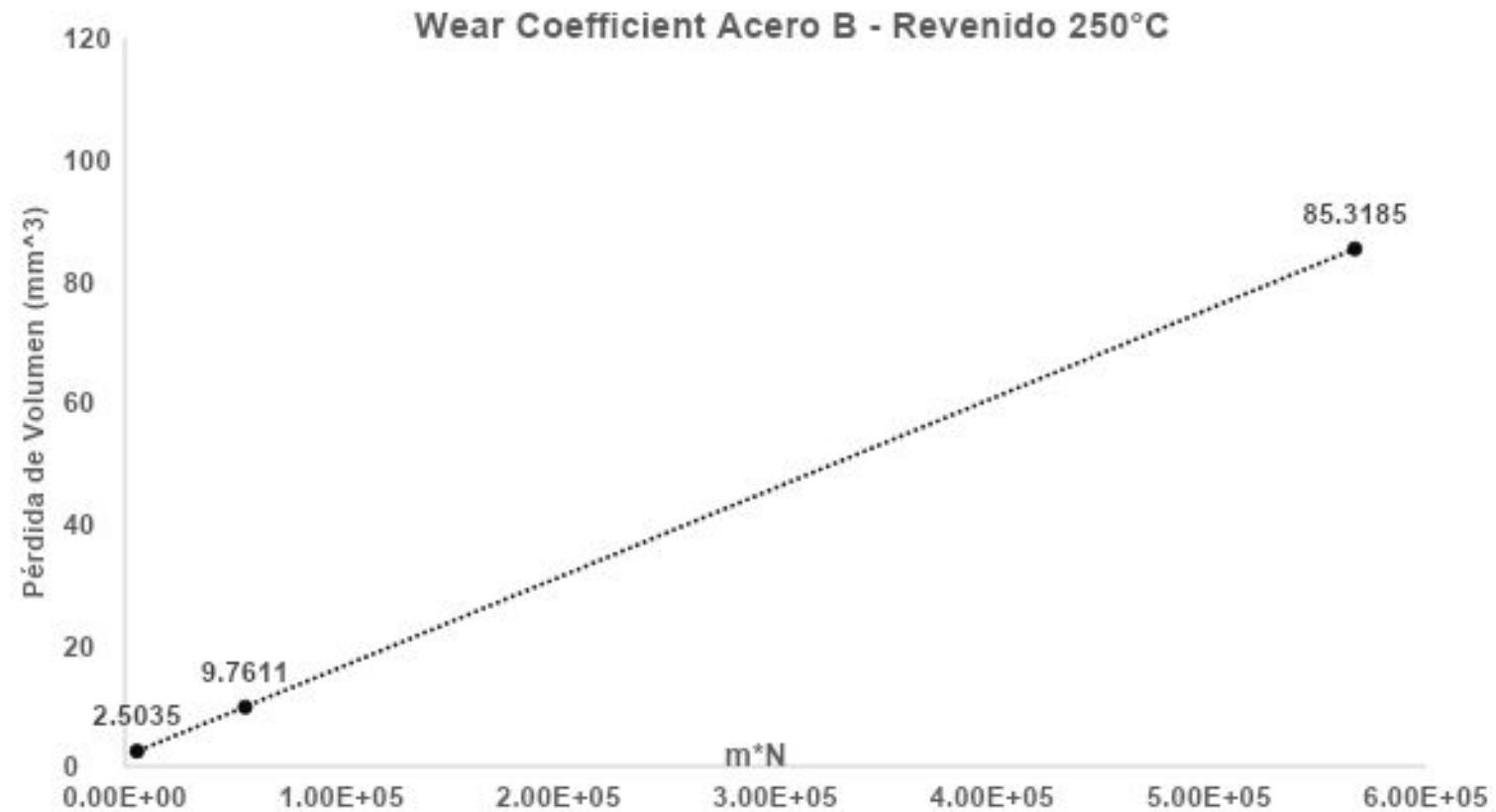
Resultados

Resultados de Wear Coefficient [Revenidos 400°C – en mm³/m*N] - Acero A



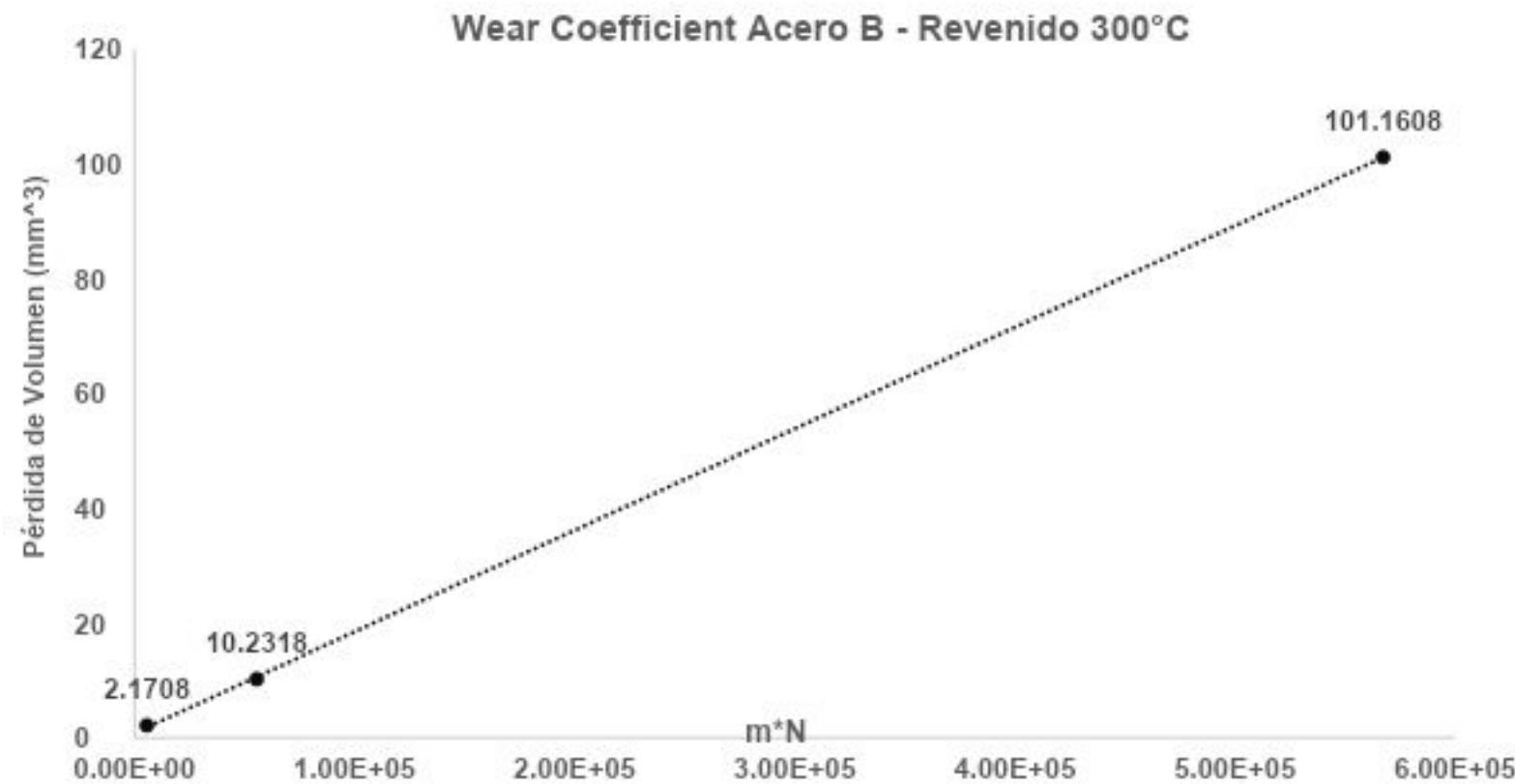
Resultados

Resultados de Wear Coefficient [Revenidos 250°C – en mm^3/m*N] - Acero B



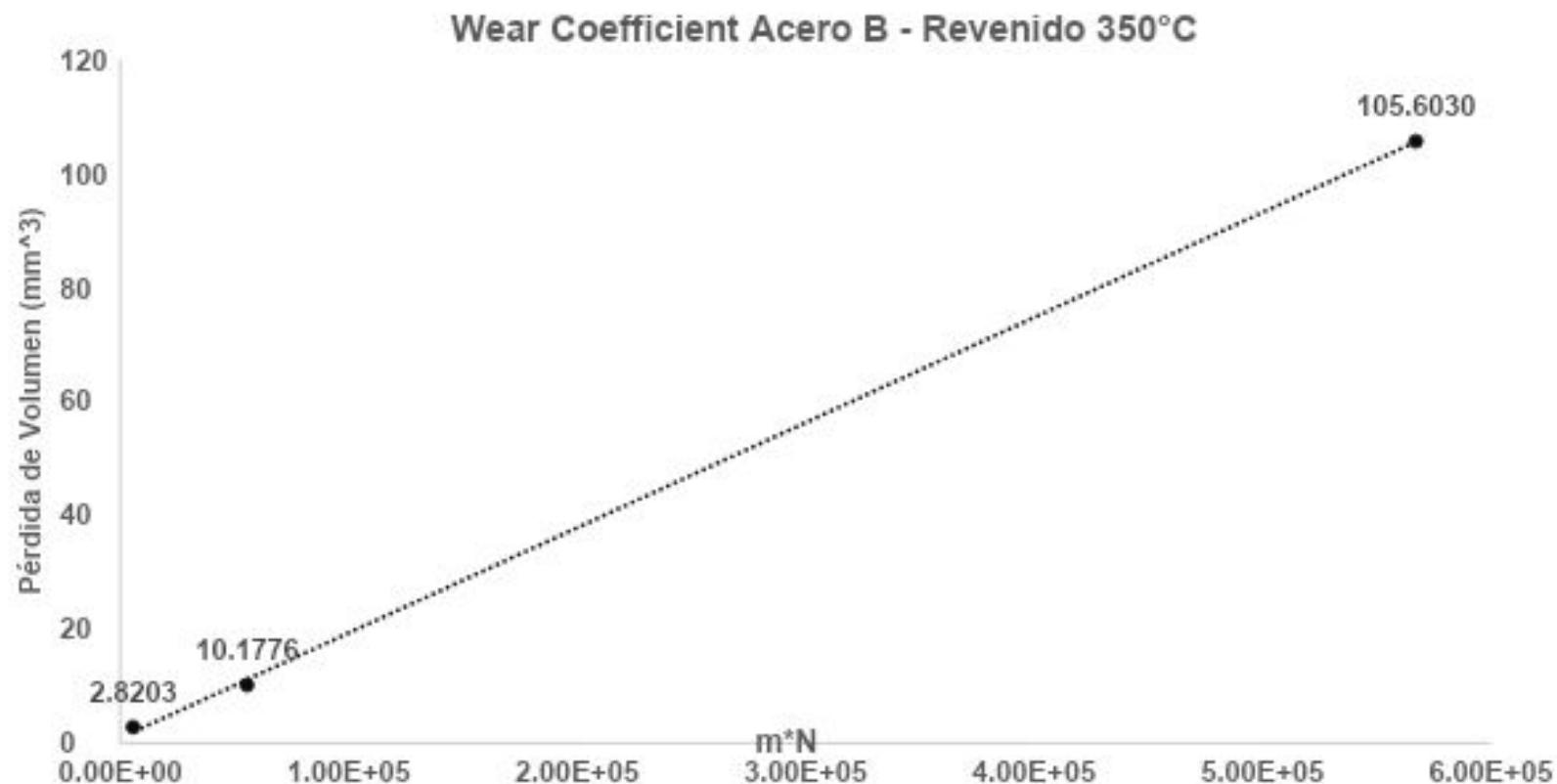
Resultados

Resultados de Wear Coefficient [Revenidos 300°C – en mm³/m*N] - Acero B



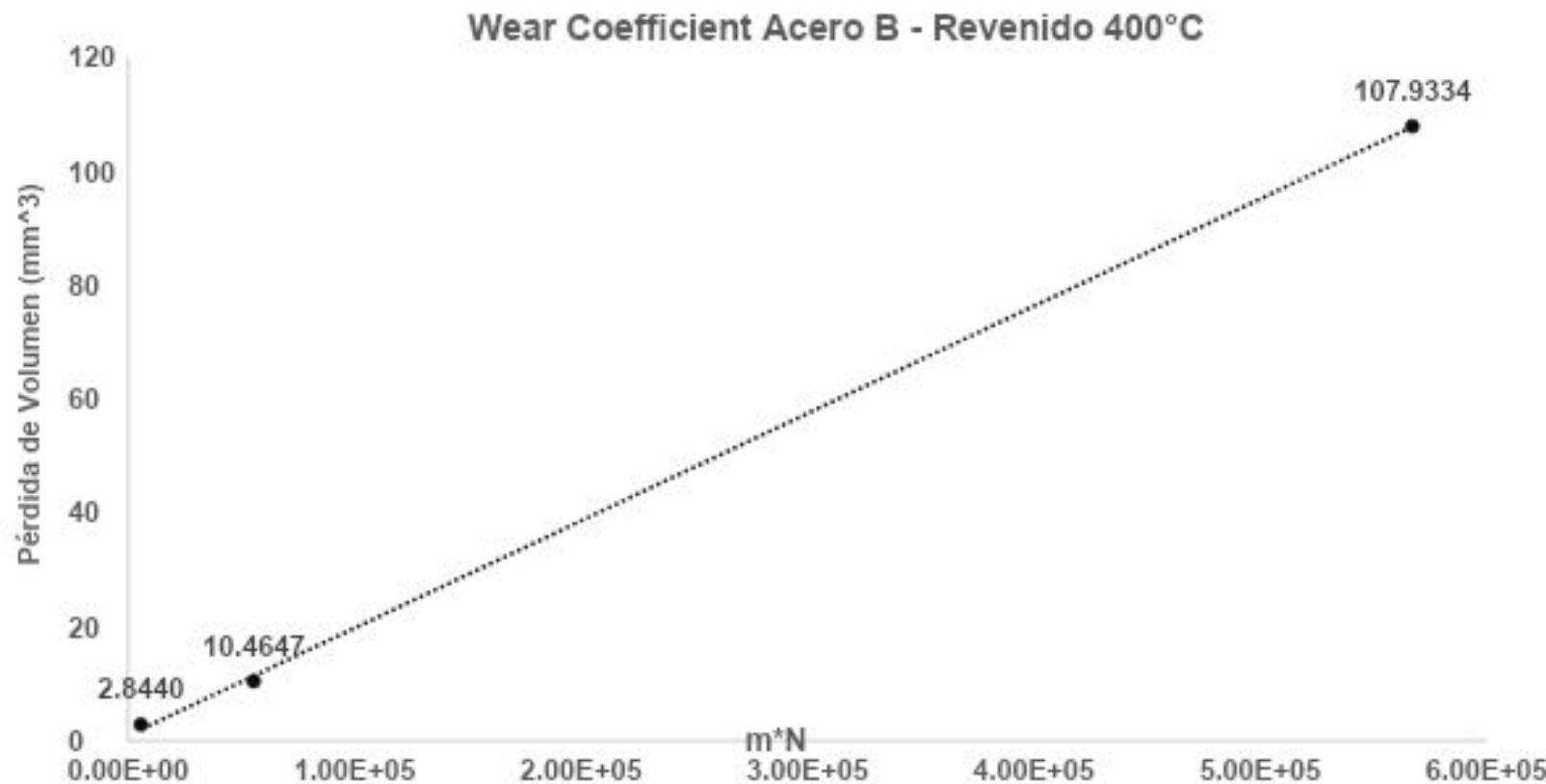
Resultados

Resultados de Wear Coefficient [Revenidos 350°C – en mm³/m*N] - Acero B



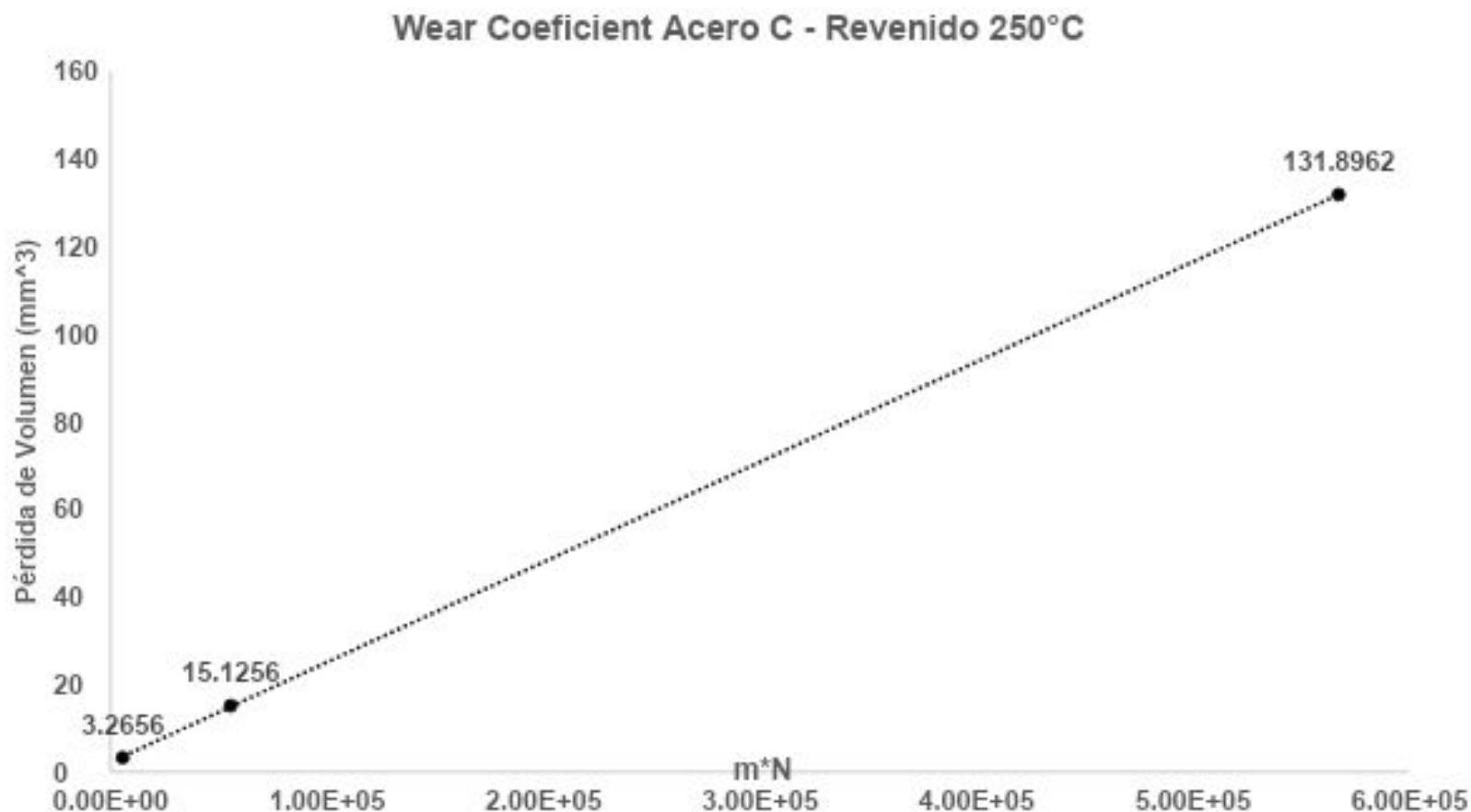
Resultados

Resultados de Wear Coefficient [Revenidos 400°C – en mm³/m*N] - Acero B



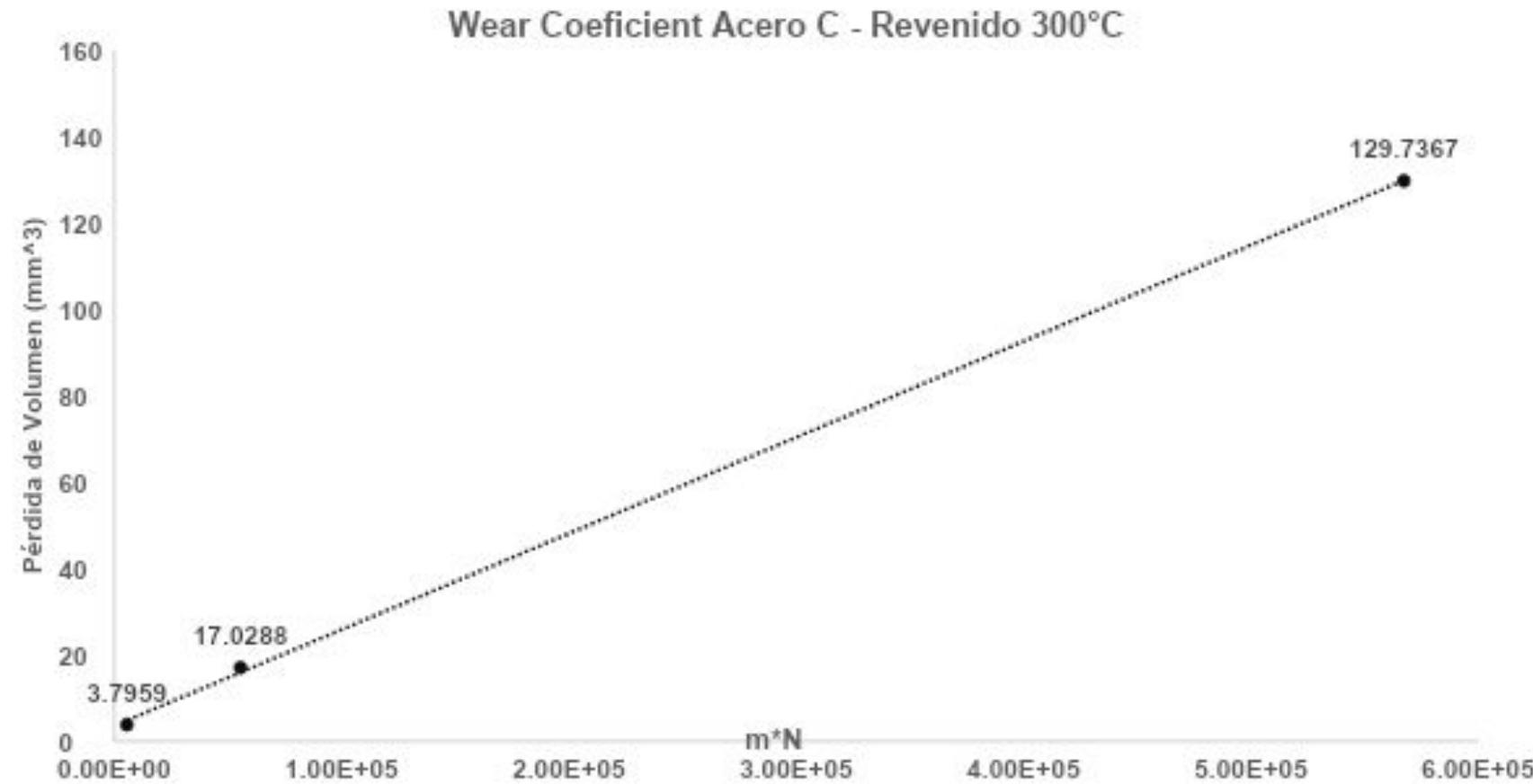
Resultados

Resultados de Wear Coefficient [Revenidos 250°C – en mm^3/m*N] - Acero C



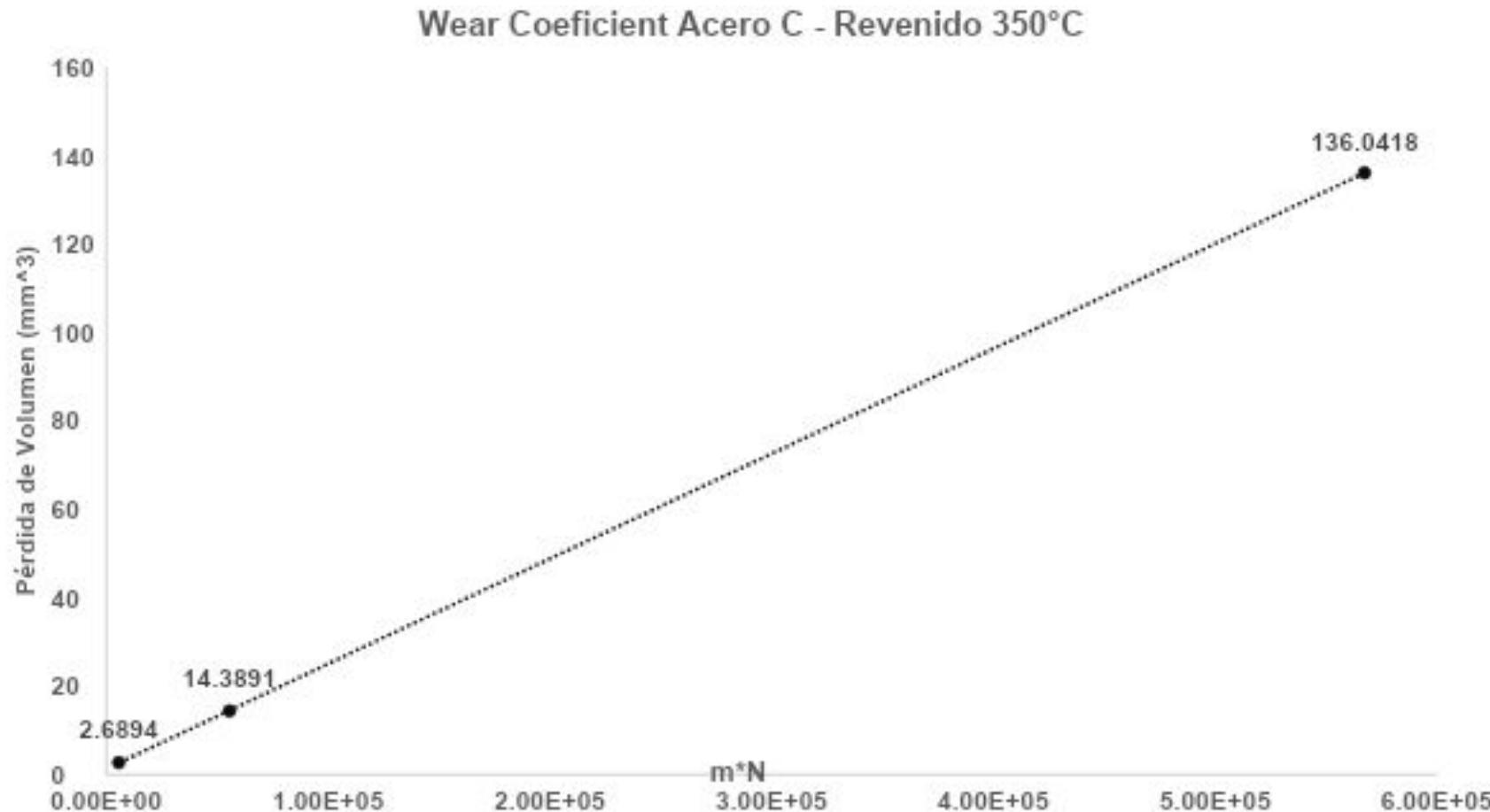
Resultados

Resultados de Wear Coefficient [Revenidos 300°C – en mm^3/m*N] - Acero C



Resultados

Resultados de Wear Coefficient [Revenidos 350°C – en mm^3/m*N] - Acero C



Resultados

Resultados de Wear Coefficient [Revenidos 400°C – en mm^3/m*N] - Acero C

