

Análisis de la relación de los parámetros de dureza y resistencia al desgaste por el ensayo vickers y PIN-ON-DISK de un acero Inoxidable A 316-L soldado por los procesos de SMAW, GMAW y FCAW

Fabio Andrés Pérez Velasco, Didier Hernando Suárez Silva

Trabajo de Grado para Optar al Título de Ingeniero Mecánico

Director

Alberto David Pertuz Comas

PhD. Ingeniería Mecánica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Fisicomecánicas

Escuela de Ingeniería Mecánica

Bucaramanga

2025

Agradecimientos

Agradecemos a nuestro director de tesis, el profesor Alberto Pertuz, por su valioso acompañamiento y orientación durante este proceso, que fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo. Asimismo, expresamos nuestra gratitud al profesor Oscar Bohórquez por su apoyo y conocimientos compartidos, los cuales enriquecieron significativamente este proyecto. Finalmente, agradecemos a la Escuela de Ingeniería Mecánica por brindar las herramientas y recursos necesarios, que permitieron llevar a cabo esta investigación de manera exitosa.

Tabla de Contenido

	Pág.
Introducción	13
1. Objetivos	15
1.1 Objetivo General	15
1.2 Objetivos Específicos.....	15
2. Marco Teórico.....	16
2.1 Dureza	16
2.1.1 Ensayo Vickers	17
2.2 Tribología.....	18
2.2.1 <i>Fricción</i>	19
2.2.2 <i>Rugosidad superficial</i>	19
2.2.3 <i>Desgaste</i>	21
2.2.3.1 Desgaste Adhesivo.....	22
2.2.3.2 Desgaste Abrasivo	23
2.3 Material	24
2.3.1 <i>Acero Inoxidable AISI 316L</i>	24
2.4 Proceso de soldadura.....	25
2.4.1 <i>Soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW)</i>	25
2.4.2 <i>Soldadura por arco metálico con gas (GMAW)</i>	27
2.4.3 <i>Soldadura por arco con núcleo fundente (FCAW)</i>	28
2.4.4 <i>Zona afectada por calor (ZAC)</i>	30
2.5 Ensayos de Pin-On-Disk.....	31

2.5.1 Tasa de desgaste	33
2.5.2 Coeficiente de desgaste	33
2.6 Métodos de análisis estadísticos	34
2.6.1 Método Pearson	34
2.6.2 Método Spearman	34
2.6.3 Método Kendall Tau	35
2.6.4 Método Bootstrap.....	35
2.6.5 Ajuste Exponencial.....	36
2.6.6 Ajuste Potencial	36
3. Metodología Experimental.....	37
3.1 Obtención y generación de probetas	37
3.1.1 Proceso de soldado	38
3.1.2 Preparación de las probetas	40
3.2 Ensayos Pin-On-Disk.....	42
4. Resultados	45
4.1 Ensayos de tracción y dureza	45
4.2 Ensayos de desgaste Pin-On-Disk	48
4.3 Resultados métodos estadísticos	63
4.3.1 Relación entre dureza y desgaste probeta FCAW	63
4.3.2 Relación entre dureza y desgaste probeta SMAW	64
4.3.3 Relación entre dureza y desgaste probeta GMAW	66
4.3.4 Relación entre dureza y desgaste probeta Metal Base	68
5. Análisis de resultados	71

5.1 Análisis de los ensayos de desgaste Pin-On-Disk.....	71
5.2 Análisis Estadístico.....	72
5.2.1 <i>Método Pearson</i>	72
5.2.2 <i>Método Spearman</i>	73
5.2.3 <i>Método Kendall Tau</i>	73
5.2.4 <i>Método Bootstrap</i>	74
5.2.5 <i>Método Ajuste Exponencial</i>	74
5.2.6 <i>Método Ajuste Potencial</i>	75
5.3 Coeficiente de determinación (R^2) y análisis de residuos.....	76
6. Conclusiones.....	82
7. Recomendaciones.....	84
Referencias Bibliográficas.....	85
Apéndices.....	88

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Clasificación de mecanismos de desgaste de la DIN</i>	21
Tabla 2. <i>Composición química de la placa de acero Inoxidable 316L</i>	25
Tabla 3. <i>Parámetros para el proceso de soldadura por arco eléctrico para AISI 316...</i>	38
Tabla 4. <i>Variables Independientes</i>	42
Tabla 5. <i>Variables dependientes</i>	43
Tabla 6. <i>Parámetros obtenidos del ensayo de tracción AISI 316L</i>	46
Tabla 7. <i>Datos de desgaste de las probetas FCAW</i>	48
Tabla 8. <i>Datos de desgaste de las probetas SMAW</i>	49
Tabla 9. <i>Datos de desgaste de las probetas GMAW</i>	49
Tabla 10. <i>Datos de desgaste de las probetas Metal Base</i>	50
Tabla 11. <i>Valores de los métodos estadísticos</i>	76

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1. <i>Indentador Vickers</i>	17
Figura 2. <i>Representación pictórica de la textura superficial.</i>	20
Figura 3. <i>Ejemplo de desgaste adhesivo.</i>	22
Figura 4. <i>Ejemplo de desgaste abrasivo.</i>	23
Figura 5. <i>Proceso de soldadura por arco metálico protegido.</i>	27
Figura 6. <i>Proceso de soldadura por arco metálico con gas</i>	28
Figura 7. <i>Proceso soldadura por arco con núcleo fundente.</i>	29
Figura 8. <i>Zonas de unión soldada.</i>	31
Figura 9. <i>Esquema de un sistema de desgaste Pin-On-Disk.</i>	32
Figura 10. <i>Medidas para soldeo de placas norma UNE EN ISO 15614-1:18 Medidas para soldeo de placas norma UNE EN ISO 15614-1:18.</i>	37
Figura 11. <i>Cordón de soldadura.</i>	39
Figura 12. <i>Planos de la probeta.</i>	40
Figura 13. <i>Pulidora metaserv 250 del laboratorio de metalografía.</i>	41
Figura 14. <i>Probetas pulidas a espejo.</i>	41
Figura 15. <i>Curva promedio esfuerzo contra deformación unitaria para AISI 316L sometida a procesos de soldadura y material base.</i>	45
Figura 16. <i>Perfiles de dureza vs posición para AISI 316L.</i>	47
Figura 17. <i>Pérdida volumétrica en la probeta SMAW.</i>	51
Figura 18. <i>Pérdida volumétrica en la probeta FCAW.</i>	52
Figura 19. <i>Pérdida volumétrica en la probeta GMAW.</i>	53

Figura 20. <i>Pérdida volumétrica en la probeta Metal Base.</i>	54
Figura 21. <i>Coefficiente de desgaste en la probeta SMAW.</i>	55
Figura 22. <i>Coefficiente de desgaste en la probeta FCAW.</i>	56
Figura 23. <i>Coefficiente de desgaste en la probeta GMAW.</i>	57
Figura 24. <i>Coefficiente de desgaste en la probeta Metal Base.</i>	58
Figura 25. <i>Tasa de desgaste en la probeta SMAW.</i>	59
Figura 26. <i>Tasa de desgaste en la probeta FCAW.</i>	60
Figura 27. <i>Tasa de desgaste en la probeta GMAW.</i>	61
Figura 28. <i>Tasa de desgaste en la probeta Metal Base.</i>	62
Figura 29. <i>Ajuste potencial entre dureza y desgaste para probeta FCAW.</i>	64
Figura 30. <i>Ajuste potencial entre dureza y desgaste para probeta SMAW.</i>	66
Figura 31. <i>Ajuste potencial entre dureza y desgaste para probeta GMAW.</i>	68
Figura 32. <i>Ajuste potencial entre dureza y desgaste para probeta METAL BASE.</i>	70
Figura 33. <i>Análisis de residuos para FCAW.</i>	79
Figura 34. <i>Análisis de residuos para SMAW.</i>	79
Figura 35. <i>Análisis de residuos para GMAW.</i>	80
Figura 36. <i>Análisis de residuos para MB.</i>	81

Lista de Apéndices

	pág.
Apéndice A. Norma ASTM G99	88
Apéndice B. Código análisis estadístico método Pearson y Spearman	94
Apéndice C. Código análisis estadístico método Kendall Tau.	96
Apéndice D. Código análisis estadístico método Bootstrap.	98
Apéndice E. Código análisis estadístico método Ajuste Exponencial.....	101
Apéndice F. Código análisis estadístico método Ajuste Potencial.	103

Glosario

DC: corriente directa

FCAW: flux metal arc welding

GMAW: gas metal arc welding

MB: metal base

SMAW: shielded metal arc welding

ZAC: zona afectada por calor

ZF: zona de fusión

Resumen

Título: “Análisis de la relación de los parámetros de dureza y resistencia al desgaste por el ensayo Vickers y PIN-ON-DISK de un acero inoxidable AISI 316L por los procesos de SMAW, GMAW y FCAW”.*

Autor: Fabio Andrés Pérez V., Didier Hernando Suárez S.**

Palabras Clave: Acero inoxidable AISI 316L, SMAW, GMAW, FCAW, resistencia al desgaste, dureza, PIN-ON-DISK.

Descripción: En este proyecto de grado se estudia la relación entre la dureza y la resistencia al desgaste de un acero inoxidable AISI 316L, soldado mediante los procesos SMAW, GMAW y FCAW. Se usaron ensayos de dureza Vickers (ASTM E384) y de desgaste por deslizamiento (PIN-ON-DISK, ASTM G-99). Las probetas, obtenidas del proyecto de doctorado titulado “Modelo matemático para selección de proceso de soldadura por arco eléctrico basado en características estáticas y dinámicas”, se prepararon por corte a chorro de agua para preservar la zona soldada. Las pruebas de desgaste se realizaron a una carga de 5N a distancias de 150, 200, 250 y 300 m, determinando el volumen desgastado mediante el cambio de peso según la norma ASTM G-99. El análisis estadístico incluyó métodos como Pearson (Restrepo & González. 2007), Spearman (Restrepo & González. 2007), Kendall Tau (Kendall, 1955), Bootstrap (Ledesma, 2008) y ajustes exponenciales (Pinilla & Gil, 2014) y potenciales (Pinilla & Gil, 2014). En los resultados se evidenció una correlación inversa significativa entre dureza y desgaste, destacando FCAW como el proceso con mayor dureza y menor desgaste, seguido de GMAW y SMAW y por último el metal base. El análisis estadístico por ajuste potencial mostro la relación más clara, mientras que los ajustes exponenciales no se evidenció tendencias relevantes. Este comportamiento se relaciona con la influencia de la microestructura en la resistencia al desgaste. Los hallazgos ofrecen un aporte práctico para optimizar procesos de soldadura en aplicaciones industriales, ampliando el conocimiento técnico sobre aceros inoxidables soldados y su desempeño bajo desgaste.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Fisicomecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Alberto David Pertuz

Comas. PhD Ingeniería Mecánica

Abstract

Title: “Analysis of the relationship between hardness and wear resistance parameters by the Vickers and PIN-ON-DISK tests of an AISI 316L stainless steel by the SMAW, GMAW and FCAW processes.”*

Author(s): Fabio Andrés Pérez V., Didier Hernando Suárez S.**

Key Words: AISI 316L stainless steel, SMAW, GMAW, FCAW, wear resistance, hardness, PIN-ON-DISK.

Description: This research project aimed to establish the relationship between hardness and wear resistance of AISI 316L stainless steel welded using SMAW, GMAW, and FCAW processes. Vickers hardness tests (ASTM E384) and sliding wear tests (PIN-ON-DISK, ASTM G-99) were conducted. Specimens, obtained from Professor Oscar Bohórquez's PhD project, were prepared using waterjet cutting to preserve the weld zone. Wear tests applied a 5N load over distances of 150, 200, 250, and 300 m, determining wear volume by weight change. Microhardness and tensile data were complemented with the original project's results. Statistical analysis included Pearson (Restrepo & González. 2007), Spearman (Restrepo & González. 2007), Kendall Tau (Kendall, 1955), Bootstrap (Ledesma, 2008), exponential (Pinilla & Gil, 2014), and potential fittings (Pinilla & Gil, 2014). Results showed a significant inverse correlation between hardness and wear, with FCAW exhibiting the highest hardness and lowest wear, followed by GMAW and SMAW and finally the base metal. Potential models demonstrated the clearest relationship, while exponential fittings showed no relevant trends. Findings highlight the microstructure's influence on wear resistance, providing practical insights for optimizing welding processes in industrial applications and advancing technical knowledge on welded stainless steels under wear conditions.

* Degree Work

** Faculty of Physical Mechanic. School of Mechanical Engineering Director: Alberto David Pertuz Comas.

PhD Mechanical Engineering

Introducción

La soldadura es un proceso de unión de dos o más piezas metálicas mediante la fusión de los materiales base y/o el aporte de material de aporte, con un metal de base homogéneo. Es una técnica ampliamente utilizada en una gran variedad de industrias, esta desempeña un papel fundamental en la integridad estructural de numerosos componentes, por lo que es crucial comprender cómo afecta el desgaste por fricción en estas uniones.

A pesar de la importancia de este fenómeno, existe una brecha en el conocimiento sobre el comportamiento tribológico específico de soldaduras FCAW, GMAW, y SMAW, especialmente cuando se trata de acero inoxidable AISI 316-L. Este vacío de información impide una toma de decisiones informada en la selección y diseño de materiales en aplicaciones críticas.

Investigaciones previas han abordado el desgaste de materiales y la influencia de diferentes procesos de soldadura, pero pocos han explorado a fondo la interacción específica entre estos factores en el contexto de los diferentes procesos de soldadura. Un ejemplo es la tesis de Paúl Escobar (Escobar Peñafiel, 2018) donde se realizaron ensayos de desgaste con pines de hierro fundido nodular sobre discos de acero AISI 1018 y pines de acero AISI 1018 sobre discos de hierro fundido nodular, para obtener datos reales de la tasa de desgaste entre estos dos materiales y compararlos con la tasa de desgaste de los pines con rellenos de soldadura SMAW, pero en este caso se limitan a un solo proceso de soldadura. Existen varios proyectos investigativos dedicados al Pin-On-Disk, pero no necesariamente a uniones soldadas, como el artículo investigativo de López Andrés, Marín Juan y demás autores, donde realizan ensayos Pin-On-Disk solamente en el acero AISI 1045 con el propósito de determinar su comportamiento al desgaste, así como la influencia que tiene la carga y la velocidad sobre estos mismos.

La industria enfrenta constantes desafíos en la optimización de sus procesos y la mejora de la eficiencia de los materiales utilizados. Uno de los problemas recurrentes es la inevitable degradación de materiales debido al desgaste, un fenómeno que afecta no solo la vida útil de los componentes, sino también la seguridad y la economía de los procesos industriales. Entender los mecanismos por los cuales los materiales se deterioran bajo condiciones de desgaste es esencial para abordar estos problemas de manera efectiva

El propósito principal de este proyecto es investigar y analizar el comportamiento tribológico de las soldaduras FCAW, GMAW, y SMAW sobre el metal base de acero inoxidable AISI 316-L mediante ensayos Pin-On-Disk. Se busca identificar y analizar los parámetros de desgaste para luego relacionarlos con los parámetros de ensayos de dureza, con el fin de proporcionar datos valiosos para mejorar la selección de materiales y los procesos de soldadura en aplicaciones prácticas, lo que puede llevar a una reducción de costos y mejorar la seguridad de procesos mecánicos en la industria.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Determinar los parámetros de desgaste a través de un sistema mecánico Pin-On-Disk para establecer la influencia del desgaste abrasivo en el relleno de soldadura SMAW, GMAW, FCAW sobre acero inoxidable AISI 316L.

1.2 Objetivos Específicos

- Analizar los resultados de los ensayos mecánicos de tracción y dureza Vickers del acero AISI 316L y sus juntas soldadas mediante diferentes procesos SMAW, GMAW y FCAW, a partir del trabajo doctoral "Modelo matemático para selección de proceso de soldadura por arco eléctrico basado en características estáticas y dinámicas" de (Bohórquez, 2023).
- Realizar ensayo de Pin-On-Disk, bajo los parámetros establecidos por la norma ASTM G-99, sobre el acero inoxidable AISI 316L antes y después de adicionar la soldadura mediante los procesos SMAW, GMAW, FCAW.
- Cuantificar el volumen de desgaste, a través del ensayo de Pin-On-Disk, utilizando la ecuación de masa a volumen que establece la norma ASTM G-99.
- Comparar y establecer la relación del comportamiento del acero inoxidable AISI 316L antes y después de aplicar la soldadura SMAW, GMAW, FCAW, durante los ensayos de dureza con respecto a la tasa de desgaste de volumen.

2. Marco Teórico

2.1 Dureza

La dureza es la propiedad mecánica que tienen los materiales de resistir las alteraciones físicas como la abrasión, la penetración y el desgaste. La medición de esta propiedad es importante en aplicaciones industriales, debido a que se relaciona con su resistencia y durabilidad del material, lo cual permite conocer si el material es óptimo para su propósito. Existen diferentes ensayos para medir la dureza, en los cuales se aplica una carga o fuerza establecida al material de prueba, posteriormente se mide la profundidad de la indentación dejada por el penetrador en la superficie del material. Entre menor sea la huella del penetrador en la muestra, más duro es el material analizado, y entre mayor sea la penetración, más suave es el material (William D. Callister & David G. Rethwish, 2018). Estos ensayos se usan para el control de calidad en la industria porque son simples, rápidos, no destructivos y de bajo costo.

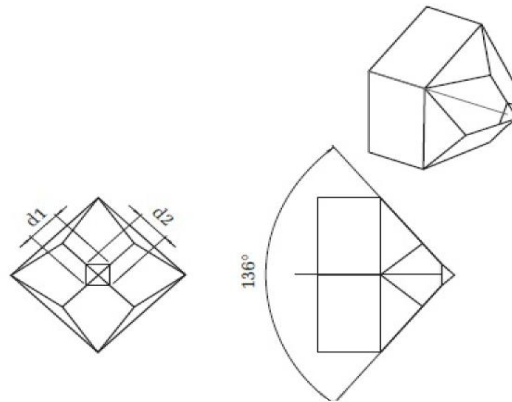
Una de las metodologías para evaluar cuantitativamente la resistencia de un material es a través de pruebas de dureza. Estos ensayos implican la aplicación gradual de una carga que ejerce presión en un ángulo perpendicular sobre un penetrador, el cual es un objeto duro utilizado para realizar una deformación plástica al rayar la superficie pulida de la muestra de prueba. Después de un periodo de aplicación de la carga, ésta se retira y, dependiendo del tipo de prueba, se procede a medir la profundidad de la impresión, el área proyectada de la misma, o el área superficial resultante del contacto del penetrador con la muestra. Posteriormente, se calcula el número, índice o factor de dureza, el cual guarda proporción con la fuerza aplicada al penetrador y es inversamente proporcional al área o profundidad de la deformación plástica experimentada por el material después de la prueba (Norman E. Dowling, 2012).

2.1.1 Ensayo Vickers

Es un ensayo utilizado para macro y micro dureza, que se utiliza esencialmente para determinar la dureza de piezas pequeñas y secciones finas. El indentador o penetrador tiene forma de pirámide de base cuadrada con ángulos entre sus caras de 136° , como se muestra en la figura (Aristizábal Castrillón & Manrique Torres, 2017).

Figura 1.

Indentador Vickers



Nota: Representación del indentador del ensayo Vickers en diferentes perspectivas. Tomado de *Ensayos de dureza* (p. 10) por Aristizábal & Manrique, 2017, Editorial Pontificia Universidad Javeriana.

La dureza Vickers se calcula midiendo ópticamente las longitudes diagonales de la huella producida por el indentador y reemplazando los valores en las siguientes fórmulas.

$$HV = \frac{F}{A_s} g \quad (1)$$

$$A_s = \frac{d^2}{2\text{sen}(\alpha/2)} \quad (2)$$

Donde:

HV: Número de micro dureza Vickers, kgf/mm^2

F: fuerza, kgf

A_s : Área superficial de la impresión, mm^2

d: Promedio de la longitud de las diagonales de la impresión del penetrador, mm.

α : Ángulos de las caras del indentador Vickers (136°)

2.2 Tribología

La tribología es una rama de la ciencia y tecnología que se ocupa de las superficies que interactúan en movimiento relativo y de las cuestiones asociadas, donde se estudian fenómenos como la fricción, lubricación, erosión y el desgaste. Las interacciones superficiales en una interfaz tribológica son muy complejas, y su comprensión requiere conocimientos de disciplinas como la física, la química, las matemáticas aplicadas, la mecánica de sólidos, la mecánica de mecánica de fluidos, termodinámica, transferencia de calor, ciencia de los materiales, reología lubricación, diseño de máquinas, rendimiento y fiabilidad.

El estudio de esta ciencia es fundamental para la optimización de los sistemas mecánicos y la mejora del rendimiento de los componentes, sobre todo es crítico para la maquinaria moderna que dispone de superficies deslizante y rodantes, lo que se puede traducir en ahorro de energía y recursos, reducción de costos y aumento de eficiencia (Bhushan, 2013).

La tribología estudia tres fenómenos: la fricción, que ocurre cuando las superficies de dos cuerpos en movimiento relativo interactúan, el desgaste, que es el resultado natural de este fenómeno, y la lubricación, que es el uso de un material intermedio entre dichas superficies en contacto para evitar el desgaste.

2.2.1 Fricción

La fuerza conocida como fricción o rozamiento se define como la resistencia que ofrece un cuerpo al movimiento de deslizamiento o rodadura que se experimenta cuando dicho cuerpo se desplaza tangencialmente sobre otro con el que está en contacto, es paralela a dicha superficie y en sentido opuesta al movimiento (Blau, Peter, 1992). Esta fuerza surge de la interacción entre las imperfecciones microscópicas entre las superficies en contacto.

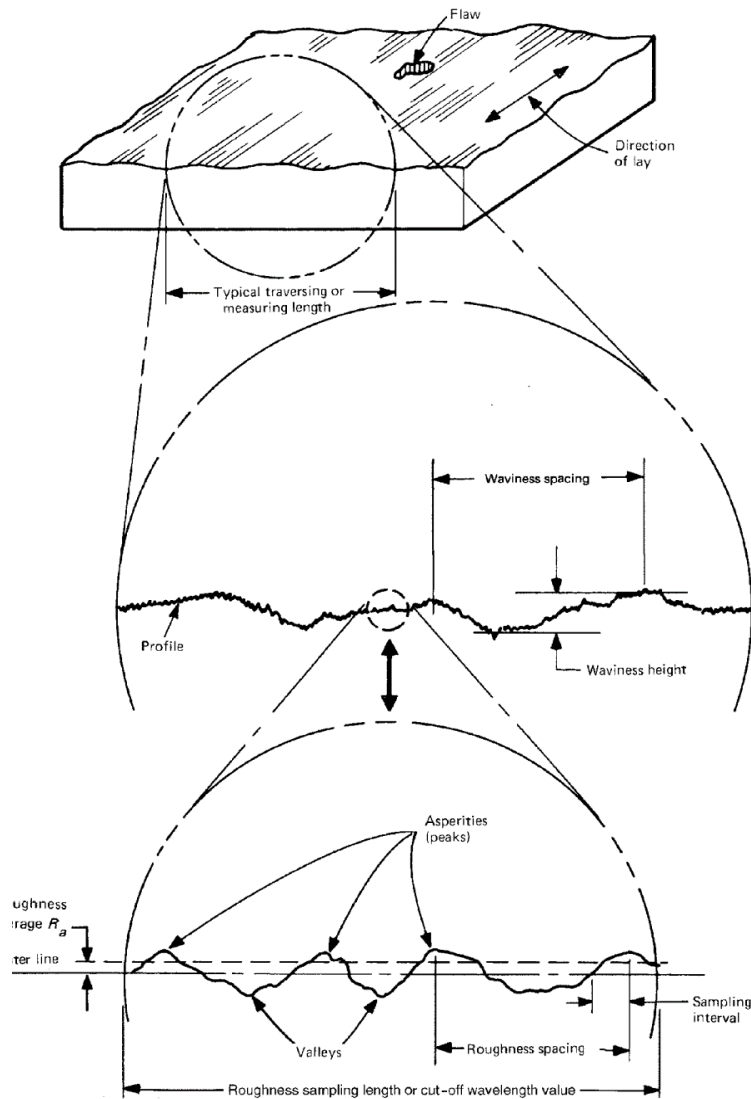
La fricción es una fuerza que impide que dos superficies que se deslizan relativamente entre sí se muevan. Esta fuerza actúa siempre tangencialmente a la superficie en los puntos de contacto y se dirige en sentido opuesto al movimiento entre superficies posible o existente (Zeng, 2013).

2.2.2 Rugosidad superficial

Las irregularidades microscópicas en la superficie de un material que afectan su textura y uniformidad se conocen como rugosidad superficial. La altura media de rugosidad (R_a) y las distancias medias entre picos y valles son algunos de los parámetros utilizados para calcularla. En el campo de los materiales, comprender la rugosidad es fundamental porque afecta directamente características importantes como la resistencia mecánica, la fatiga, la adhesión y la conductividad térmica (Bhushan, Bharat, 2011). El análisis brinda información útil para optimizar los procesos de fabricación y el diseño de materiales con propiedades particulares, lo que mejora el rendimiento y la durabilidad de los productos.

Figura 2.

Representación pictórica de la textura superficial.



Nota: Representación pictórica de la textura superficial. Tomado de *Introduction to tribology* por (Bhushan, Bharat, 2011).

2.2.3 Desgaste

El desgaste es un fenómeno natural que ocurre cuando dos o más superficies se mueven relativas entre sí y experimentan contacto repetido por lo que se genera una pérdida progresiva o un daño de una superficie sólida causado por contacto deslizante forzado con otro sólido. En la mayoría de los casos, el desgaste se produce por interacciones superficiales en las asperezas (Budinski, 2014). El desgaste puede ocurrir debido a la abrasión, la erosión, la fatiga o la corrosión, pero de la misma manera que la fricción, esta no es una propiedad del material, sino una consecuencia del sistema. Las condiciones de funcionamiento afectan al desgaste de las interfaces.

El desgaste puede tener una repercusión notable en la vida útil y el rendimiento de los componentes mecánicos, y puede provocar una serie de problemas, como el aumento de la fricción, la pérdida de precisión, la falla mecánica y la disminución del rendimiento. Por esta razón, es importante controlar y minimizar el desgaste en los sistemas mecánicos.

La Tabla 1 muestra la clasificación del desgaste por los mecanismos que sufren los materiales según la norma DIN 50320. Pero no tiene en cuenta la corrosión o la erosión.

Tabla 1.

Clasificación de mecanismos de desgaste de la DIN

Tipo de desgaste	Mecanismo de desgaste
Adhesivo	Formación de juntas interfaciales adhesivas(“soldadas”) por acción de fuerzas moleculares
Abrasivo	Ranurado por rayaduras, procesos de cortes microscópicos
Fatiga de la superficie	Grietas en la superficie debido a esfuerzos que varían en magnitud o dirección

 Reacción tribológica

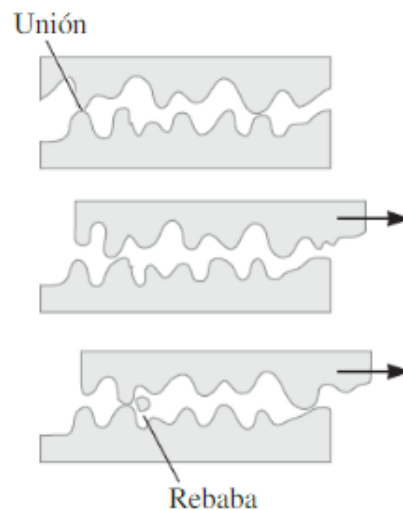
 Formación de productos de una reacción por el efecto combinado de acción tribológica entre los materiales en contacto y la reacción química con el ambiente

Nota: Tomado de *Verschleiß; Begriffe, Systemanalyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebiete,, por* (Deutsches Institut für Normung, 1979)

2.2.3.1 Desgaste Adhesivo. Cuando se aplica presión sobre dos superficies sólidas, ocurre el desgaste adhesivo, también conocido como rayado, excoriación o agarrotamiento. Las salientes o asperezas de una superficie se deforman plásticamente antes de quedar soldadas entre sí por altas presiones locales. Los enlaces se rompen a medida que continúa el deslizamiento, creando cavidades en una superficie, partículas abrasivas diminutas en la segunda superficie y contribuyendo a un mayor desgaste de las superficies. Cuando se trata de aumentar la resistencia al desgaste de los materiales, deben tenerse en cuenta numerosos factores. (Kalpakjian, S. y Schmid, S, 2002).

Figura 3.

Ejemplo de desgaste adhesivo.

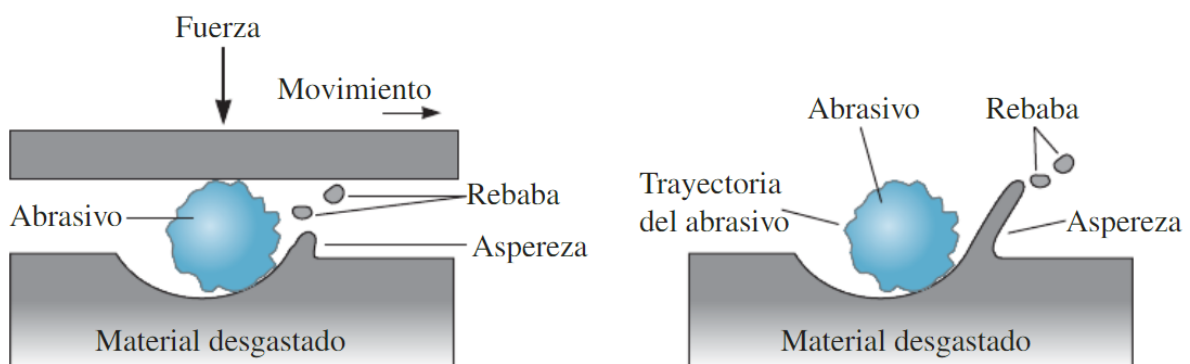


Fuente: Tomado del libro *Ciencia e ingeniería de materiales* de Askeland, Donald & Wright, Wendelin.

2.2.3.2 Desgaste Abrasivo. El desgaste abrasivo se produce cuando el material de una superficie se elimina debido al contacto con partículas duras. Estas partículas pueden estar adheridas a otra superficie o encontrarse libres entre ambas superficies en contacto. Este fenómeno es frecuente en equipos como arados, niveladoras, trituradoras y molinos que procesan materiales abrasivos. Asimismo, puede ocurrir de manera accidental cuando partículas duras penetran en los componentes móviles de la maquinaria. Además, el desgaste abrasivo se utiliza intencionadamente en procesos de maquinado para retirar material. Su estudio es crucial en numerosas aplicaciones automotrices, como en amortiguadores, engranajes, pistones y cilindros, debido a la importancia de controlar este tipo de desgaste en dichos sistemas. (Askeland & Wright, n.d., 2014)

Figura 4.

Ejemplo de desgaste abrasivo.



Fuente: Tomado del libro *Ciencia e ingeniería de materiales* de Askeland, Donald & Wright, Wendelin.

2.3 Material

2.3.1 Acero Inoxidable AISI 316L

El acero inoxidable AISI 316L es una aleación de acero austenítico que se distingue por su excelente resistencia a la corrosión y su alta capacidad de soldadura. Su composición típica incluye un 16-18% de cromo, 10-14% de níquel, 2-3% de molibdeno, y un contenido máximo de 0.03% de carbono, lo cual contribuye a sus propiedades únicas (G F Vander Voort et al., 2010).

El cromo es el principal responsable de la resistencia a la corrosión del acero inoxidable 316L, ya que forma una capa pasiva de óxido de cromo en la superficie del material que protege contra la oxidación y la corrosión siendo precursor de la ferrita en los procesos de soldadura impidiendo la formación de carburos de hierro (Iamboliev et al., 2003). El níquel, por su parte, estabiliza la estructura austenítica, proporcionando una mayor ductilidad y tenacidad, incluso a bajas temperaturas. El molibdeno mejora aún más la resistencia a la corrosión, especialmente en ambientes con cloruros y ácidos, y también aumenta la resistencia a la picadura y a la corrosión por hendidura (DIPAC, 2010).

El bajo contenido de carbono en el AISI 316L es crucial para minimizar la precipitación de carburos de cromo durante el proceso de soldadura, lo cual es una ventaja significativa en aplicaciones que requieren soldaduras de alta calidad. Esta característica reduce el riesgo de corrosión intergranular en la zona afectada por calor (ZAC) y permite mantener las propiedades de resistencia a la corrosión del material después de la soldadura.

La combinación de estos elementos hace que el acero inoxidable AISI 316L sea especialmente adecuado para soldar. Su estructura austenítica permite una fácil soldabilidad, y el

material puede ser soldado sin la necesidad de precalentamiento ni tratamientos térmicos posteriores en la mayoría de los casos. Además, la capacidad de este acero para mantener su resistencia y ductilidad después de la soldadura lo convierte en una elección preferida para aplicaciones en industrias como la farmacéutica, alimentaria, química, y marina, donde la integridad estructural y la resistencia a la corrosión son esenciales (Kalpakjian, S. y Schmid, S, 2002).

Tabla 2.

Composición química de la placa de acero Inoxidable 316L

Composición química lámina de Acero de AISI 316L								
C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Ni%	Mo%	Nb%
0.021	0.5	1.39	0.034	0.001	17.3	10	2.04	0.036

Nota: La composición contiene los datos necesarios para la revisión del material después de soldar. Tomado de *Afectación en la resistencia a la fatiga en aceros inoxidables con juntas soldadas*, (pág. 27), por (González, 2023).

2.4 Proceso de soldadura

2.4.1 Soldadura por arco con electrodo revestido (SMAW)

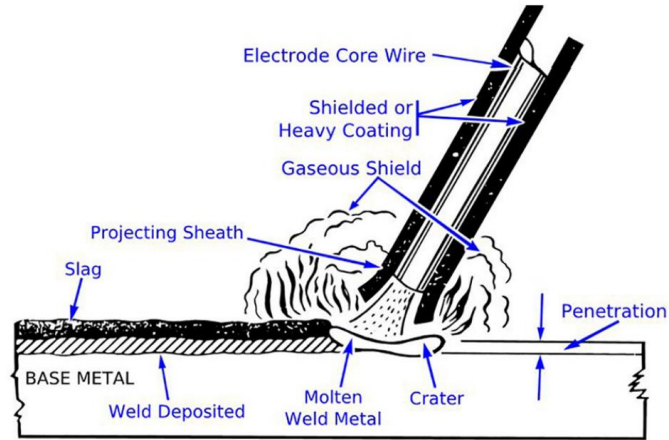
La soldadura de arco con electrodo revestido es el proceso de soldadura por arco más común en todo el mundo y se utiliza desde comienzos del siglo XX. Según la AWS lo definen como proceso de soldadura que genera un arco entre el electrodo cubierto y el baño de soldadura, se realiza con protección contra la descomposición de la cubierta del electrodo, sin aplicación de

presión y con metal de aporte del electrodo (American Welding Society, 2001). Se utiliza corriente eléctrica para crear un arco después de que el electrodo se raspa con la pieza de trabajo. Al fundir el electrodo y vaporizar el fundente, el arco eléctrico protege el material de soldadura de los contaminantes transportados por el aire como se puede observar en la figura 5. El procedimiento requiere una capacitación mínima del operador y utiliza equipos de bajo costo. (Arora et al., 2019). Del mismo modo el electrodo puede producir una escoria protectora que flota en la parte superior del charco de soldadura y se solidifica.

La soldadura SMAW ofrece mayor versatilidad para su uso tanto en el taller como para la fabricación sobre terreno. Es adecuada para una amplia gama de materiales y es uno de los procesos más comunes y arcaicos. Una de las desventajas de este proceso es que el nivel de cualificación del soldador es bastante alto. La productividad es baja, principalmente porque el proceso debe detenerse y reiniciarse continuamente a medida que se consumen y sustituyen los electrodos (López & Vitriago, 2011).

Figura 5.

Proceso de soldadura por arco metálico protegido.



Nota: Tomado de *Thermal and structural modelling of arc welding processes: A literature review*. (pág. 2) por (Arora et al., 2019).

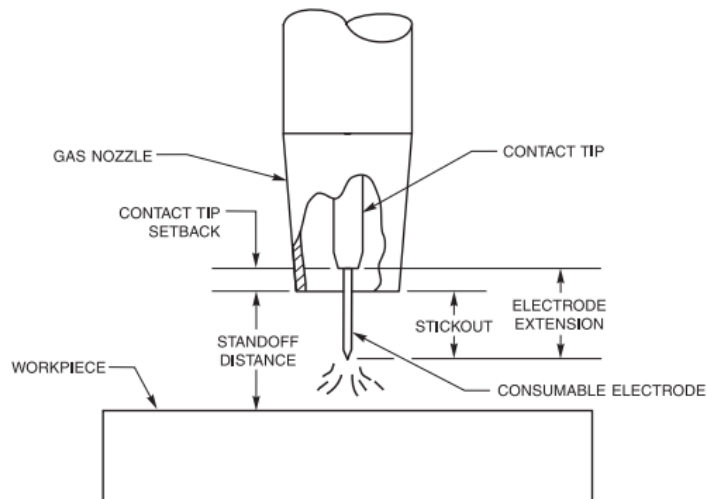
2.4.2 Soldadura por arco metálico con gas (GMAW)

La soldadura por arco metálico con gas utiliza un electrodo de hilo desnudo alimentado continuamente a través de una boquilla que suministra un flujo de gas de protección para proteger el metal base fundido y el metal base caliente circundante mientras se enfría. La protección del arco y del baño de soldadura fundido se obtiene a menudo utilizando gases inertes como el argón y el helio, y es por eso que la GMAW también se denomina proceso de soldadura con gas inerte de metal (MIG). Dado que también se utilizan gases no inertes, en particular el CO₂, GMAW parece un nombre más apropiado (Kou Sindo, 2003). Se considera como un proceso semiautomático debido a que el hilo se alimenta automáticamente mediante un sistema de alimentación de hilo. El alimentador de hilo empuja el electrodo a través de la antorcha de soldadura, donde hace contacto eléctrico con un tubo de contacto de cobre, que suministra la

corriente desde la fuente de alimentación como se puede ver en la figura 6. Dado que la longitud del arco está controlada por la fuente de alimentación, el proceso requiere menos habilidad de soldadura que SMAW o GTAW, y produce mayores tasas de deposición. Este proceso de soldadura se conoce como autorregulable, es decir, la máquina para soldar tiene la capacidad de mantener una longitud de arco constante en todo momento, esto se puede lograr a través del uso de una fuente de alimentación de tensión constante. (Ó Bien, R.L, 1996).

Figura 6.

Proceso de soldadura por arco metálico con gas



Nota: Tomado de *Standard Welding Terms and Definitions AWS A3.0:2001* (pág. 99) por (American Welding Society, 2001)

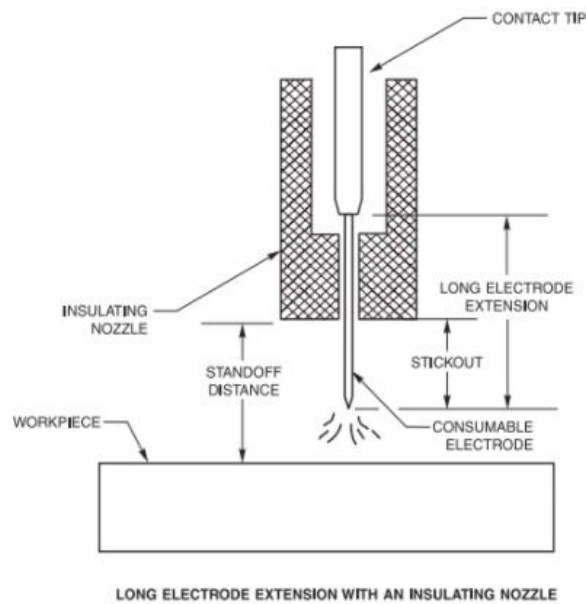
2.4.3 Soldadura por arco con núcleo fundente (FCAW)

La soldadura por arco tubular es muy similar a la GMAW, pero se basa en un alambre tubular relleno con un fundente que puede consistir en una variedad de materiales como metal en

polvo y elementos de aleación, materiales que se descomponen para formar un gas y se funden para formar una escoria, no se necesitan agentes aglutinantes para sujetar el material fundente al alambre, como ocurre con los electrodos SMAW. Por lo que hay más posibilidad de incorporar elementos en el fundente que generen óptimas condiciones para la soldadura, tales como una alta tasa de deposición, buenas propiedades tanto como de la soldadura como del metal de soldadura. Gracias a la flexibilidad que ofrece, además de altas tasas de deposición y las continuas mejoras en los materiales de aportación, FCAW es un proceso de soldadura popular como sucesor de los procesos GMAW y SMAW para muchas aplicaciones. (Phillips, 2016)

Figura 7.

Proceso soldadura por arco con núcleo fundente.



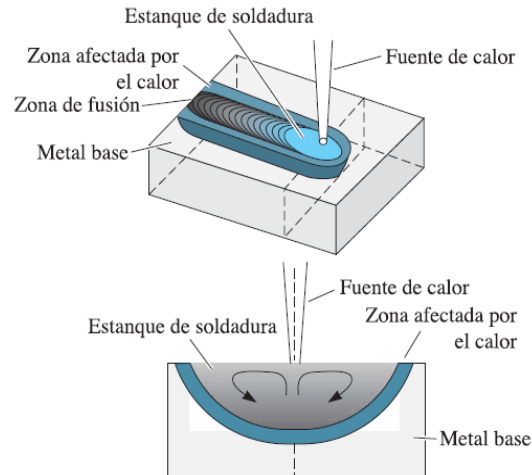
Nota: Tomado de *Standard Welding Terms and Definitions AWS A3.0:2001* (pág. 99) por (American Welding Society, 2001)

2.4.4 Zona afectada por calor (ZAC)

La Zona Afectada por Calor (ZAC) es la región del metal base cuyas propiedades mecánicas o microestructura han sido alteradas por el calor de la soldadura, la soldadura fuerte, la soldadura blanda o el corte térmico, según la AWS (American Welding Society, 2001). Esta área se encuentra adyacente a la zona fundida (o cordón de soldadura), las temperaturas máximas son demasiado bajas como para causar la fusión, pero lo suficientemente altas como para causar cambios significativos en la microestructura y las propiedades de los materiales (Kou Sindo, 2003). La microestructura de la ZAC puede evolucionar de manera compleja, dependiendo de la composición de la aleación, el historial de procesamiento previo y los factores térmicos relacionados con el proceso de soldadura. Las temperaturas máximas, así como las velocidades de calentamiento y enfriamiento, pueden tener efectos microestructurales profundos dentro de la misma aleación o sistema de aleación, y afectarán las reacciones en esta zona. Los cambios en la microestructura de la ZAC pueden incluir la transformación de fases, crecimiento de granos, y precipitación de nuevos compuestos, los cuales pueden afectar significativamente las propiedades mecánicas del material, como la dureza y la resistencia al desgaste (Phillips, 2016).

Figura 8.

Zonas de unión soldada.



Nota: Tomado de *Ciencia e ingeniería de los materiales* (pág. 334) por (Askeland & Wright, 2015)

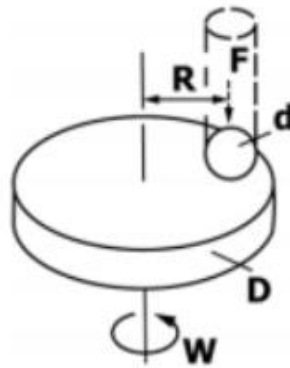
2.5 Ensayos de Pin-On-Disk

La norma ASTM G-99 (ASTM International, 2017) describe el método Pin on Disk como un procedimiento de ensayo utilizado para medir la pérdida volumétrica de material mientras se desliza en condiciones no abrasivas utilizando una máquina que se compone de un pin o pasador sobre un disco. Para realizar este ensayo se necesitan dos muestras: un pasador en posición ortogonal sobre un disco plano circular. El mecanismo hace girar el disco o el pasador, con el fin de realizar una trayectoria de deslizamiento en forma de círculo en la superficie del disco. La disposición del disco puede ser horizontal o vertical, lo cual influirá en la tasa de desgaste. El pin se presiona contra la superficie del disco y se aplica una carga y velocidad determinadas. La

fricción resultante entre el pin y el disco genera una fuerza que produce una zona de contacto y, por lo tanto, un desgaste en la muestra.

Figura 9.

Esquema de un sistema de desgaste Pin-On-Disk.



Nota. En la imagen se muestran los parámetros utilizados en el ensayo Pin-On-Disk.

Tomado de la Norma *ASTM G99-17* (p. 4), por ASTM International, 2017.

Para calcular el grado de desgaste de la muestra se utilizan diversos métodos, como el peso o la profundidad de la huella de desgaste. También pueden examinarse las características mecánicas y tribológicas de la muestra, como su dureza, coeficiente de fricción y tasa de desgaste. En este caso se seguirán los parámetros de la norma y se usará la ecuación de volumen perdido.

$$\text{Volumen perdido [mm}^3] = \frac{\text{masa perdida [g]}}{\text{Densidad [g/cm}^3]} \times 1000 \quad (3)$$

2.5.1 Tasa de desgaste

La tasa de desgaste es la cantidad de material que se erosiona en una superficie sólida como resultado de una acción mecánica en otra superficie. Se puede calcular utilizando la siguiente expresión (*ASTM G99-17* (p. 6), por ASTM International, 2017):

$$Q = \Delta P / L \quad (4)$$

Donde:

Q= Tasa de desgaste [mg/m]

ΔP = Pérdida de peso [mg]

L= Distancia deslizada [m]

2.5.2 Coeficiente de desgaste

$$K = Q / W \quad (5)$$

Dónde:

k= Coeficiente de desgaste

Q= Tasa de desgaste [mg/m]

W= Carga aplicada [N]

2.6 Métodos de análisis estadísticos

Los métodos de análisis estadísticos son herramientas fundamentales, para la identificación de patrones, relaciones y tendencias de un conjunto de datos. Facilitándonos la toma de decisiones y conclusiones.

2.6.1 Método Pearson

La correlación lineal o correlación de Pearson evalúa la relación lineal entre dos variables. Es útil si sospechas que hay una relación lineal entre dureza y desgaste.

- Un valor cerca de 1 indica una correlación positiva (cuando una variable aumenta, la otra también).
- Un valor cerca de -1 indica una correlación negativa (cuando una variable aumenta, la otra disminuye).
- Un valor cercano a 0 indica poca o ninguna correlación.
- El valor p te indica si la correlación observada es estadísticamente significativa, normalmente, un valor p menor a 0.05 se considera estadísticamente significativo, lo cual significa que la correlación no es aleatoria (Restrepo & González. 2007).

2.6.2 Método Spearman

La correlación no lineal o Spearman evalúa la relación monótona entre dos variables y es más adecuada si la relación es no lineal (por ejemplo, una tendencia creciente o decreciente).

- Un valor cerca de 1 indica una correlación positiva (cuando una variable aumenta, la otra también).

- Un valor cerca de -1 indica una correlación negativa (cuando una variable aumenta, la otra disminuye).
- Un valor cercano a 0 indica poca o ninguna correlación.
- El valor p te indica si la correlación observada es estadísticamente significativa, normalmente, un valor p menor a 0.05 se considera estadísticamente significativo, lo cual significa que la correlación no es aleatoria.). (Restrepo & González, 2007).

2.6.3 Método Kendall Tau

El método Kendall Tau es una prueba no paramétrica que evalúa la monotonía en lugar de asumir linealidad, y es más robusta en datos con posibles atipicidades o con distribuciones no normales. Se interpreta de la siguiente forma:

- Si el valor p es mayor que 0.05, indica que no hay evidencia suficiente para afirmar que existe una relación monotónica significativa entre dureza y desgaste. (Kendall, 1955).

2.6.4 Método Bootstrap

El Bootstrap es una técnica de remuestreo no paramétrico ampliamente utilizada en estadística para estimar la incertidumbre de un estimador. En términos más simples, es una forma de crear múltiples conjuntos de datos a partir de un conjunto de datos original, y luego utilizar estos conjuntos simulados para estimar características estadísticas como la media, la desviación estándar o intervalos de confianza. Se puede interpretar de la siguiente forma:

- Si el intervalo de confianza excluye cero, la correlación es estadísticamente

significativa.

- Este método te permite evaluar la consistencia de la correlación obtenida y agregar rigor al análisis. (Ledesma, 2008)

2.6.5 Ajuste Exponencial

El ajuste exponencial consiste en modelar la relación entre dureza y desgaste utilizando una ecuación de la forma:

$$y = a \cdot e^{b \cdot x} + c \quad (6)$$

El modelo evalúa si los datos siguen un comportamiento exponencial creciente o decreciente. El parámetro a controla la escala inicial, b determina la tasa de cambio (positivo o negativo), y c representa el desplazamiento vertical. (Pinilla & Gil, 2014).

2.6.6 Ajuste Potencial

El ajuste exponencial modela la relación entre dureza y desgaste mediante una ecuación de la forma:

$$y = a \cdot x^b \quad (7)$$

Parámetros:

- a : Escala inicial o coeficiente que ajusta la magnitud general del modelo.
- b : Define la pendiente de la relación, indicando como varia "y" (tasa de desgaste) con "x" (dureza Vickers). (Pinilla & Gil, 2014).

3. Metodología Experimental

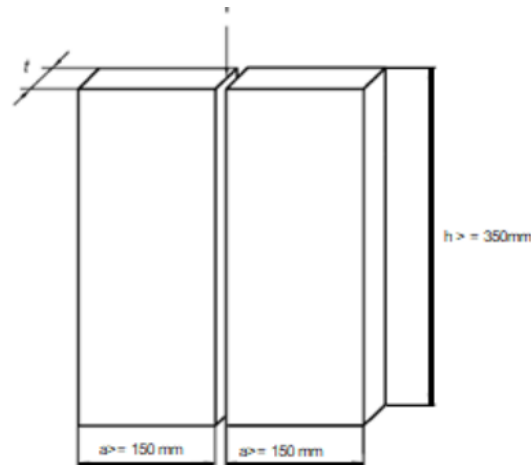
3.1 Obtención y generación de probetas

Las probetas se elaboraron con láminas de acero inoxidable AISI 316L utilizadas en el proyecto “Afectación en la resistencia a la fatiga en aceros inoxidables con juntas soldadas” (González, 2023). En este, nos explican cómo cortaron las placas, las soldaron y las ajustaron a probetas en forma de disco.

El material principal utilizado fue una lámina de acero de dimensiones 1524 x 3048 mm y un espesor de 4,5mm. Para placas de 150 x 505 mm, se requieren cortes de cizallamiento hidráulico de acuerdo con las especificaciones de la UNE-EN ISO 15614-1:18, como se muestra en la Figura 10. Además, se aseguró de que las láminas a soldar fueran consecutivas respecto al corte, marcándose como pares para mantener la uniformidad de las propiedades.

Figura 10.

Medidas para soldeo de placas norma UNE EN ISO 15614-1:18 Medidas para soldeo de placas norma UNE EN ISO 15614-1:18.



Nota: Tomado de UNE-EN-ISO 15614-1:18 Especificación y cualificación de procedimientos de soldeo para materiales metálicos (p.10), por (AENOR, 2005)

3.1.1 Proceso de soldado

Siguiendo los estándares de la norma AWS D1.6-17 (American Welding Society (AWS), 2017) se realizó una junta plana a tope precalificada con penetración completa acorde a la norma y con los parámetros establecidos en la tabla 2.

El material de aporte para la soldadura debía tener características similares o superiores a las del material base. El proceso de soldadura se llevó a cabo con un sistema electromecánico automático con desplazamiento constante y una velocidad de avance constante de 120 mm/min. Como resultado, se utilizó alambre de acero inoxidable 316L y se utilizó una mezcla de gas entre Ar-CO₂.

Tabla 3.

Parámetros para el proceso de soldadura por arco eléctrico para AISI 316

Proceso de soldadura	Potencial [V]	Amperaje [A]	Polaridad	Flujo de gas [lpm]	Técnica de movimiento de la antorcha	Velocidad de avance [mm/min]
SMAW	63.00	99.00		No aplica		150
GMAW	22.50	130.00	DCEP	15.00	Arrastre	120.00
FCAW	23.60	220.00		10.00		150.00

Nota: Tomado de *Modelo matemático para selección de proceso de soldadura por arco eléctrico basado en características estáticas y dinámicas*, (pág. 63), por (Bohórquez, 2023).

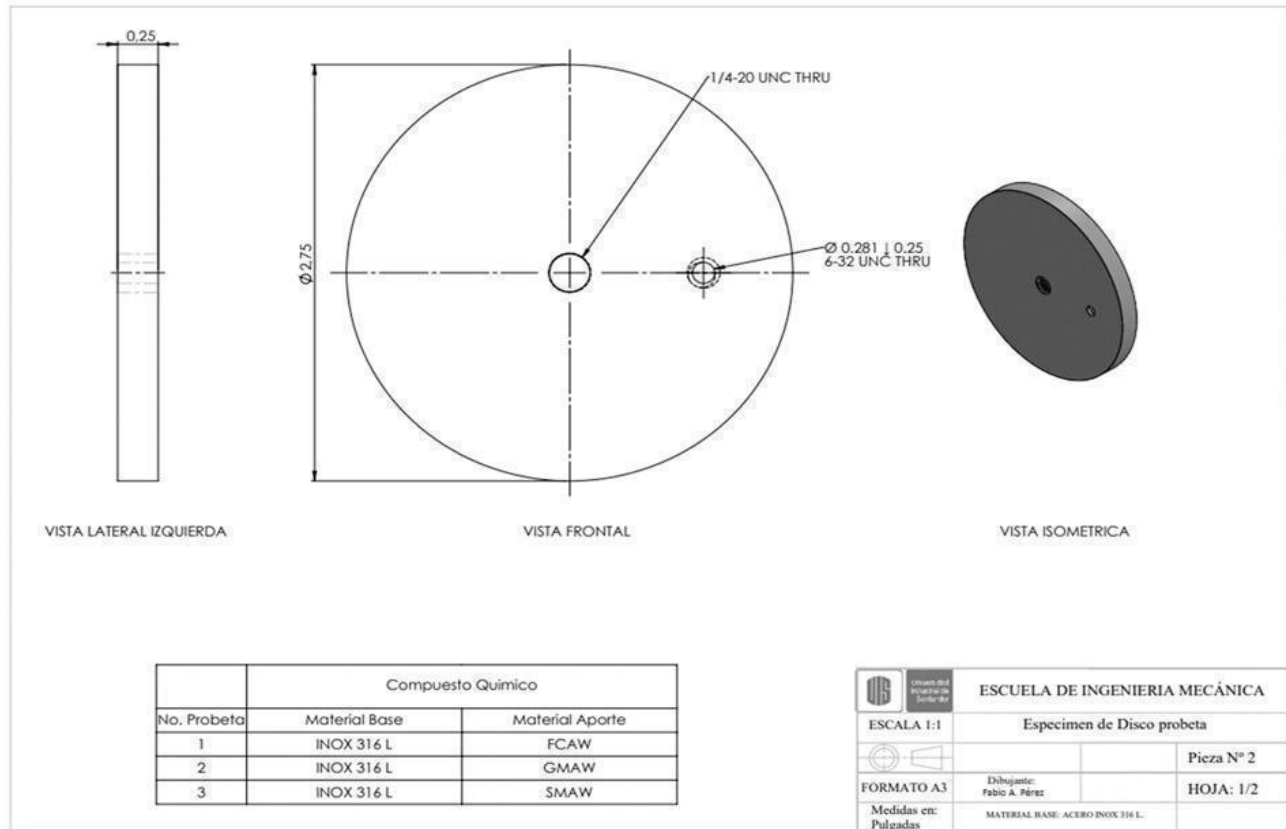
Figura 11.

Cordón de soldadura.



Nota: Tomado de *Afectación en la resistencia a la fatiga en aceros inoxidable con juntas soldadas*, (pág. 29), por (González, 2023).

Para el corte de las muestras, se buscó evitar el impacto térmico, por lo que se utilizó el método de corte por chorro de agua, que es de alta calidad y precisión. Las probetas se cortaron según las normas ASTM E466:21 y E8/E8M:22. (González, 2023)

Figura 12.*Planos de la probeta.*

Fuente: Autores

3.1.2 Preparación de las probetas

Para poder realizar los ensayos de Pin-On-Disk se necesita pulir a una superficie tipo espejo la probeta, para esto se utilizó la Pulidora Metaserv 250 con doble plato del laboratorio de metalografía de ingeniería mecánica. Para conseguir este acabado es necesario pasar las probetas por diferentes lijas, empezando con las lijas de grano grueso para devastar y de esta forma aplanar

lo máximo posible para luego cambiar a una lija de grano más delgado. Por lo que se empezó con #60 hasta #1200 según la norma ASTM E3.

Figura 13.

Pulidora metaserv 250 del laboratorio de metalografía.



Fuente: Autores

Figura 14.

Probetas pulidas a espejo.



Fuente: Autores.

3.2 Ensayos Pin-On-Disk

Antes de realizar los respectivos ensayos se debe tener claro cuáles son las variables dependientes e independientes que estarán involucradas en las pruebas, por lo que se hace un análisis de los parámetros de un sistema Pin-On-Disk bajo norma ASTM G-99 (ASTM International, 2017).

Tabla 4.

Variables Independientes.

Conceptualización	Dimensiones	Indicadores	Ítems
A través del método Pin-On-Disk se puede analizar los parámetros relacionados a los mecanismos de desgaste. Dichos parámetros a tener en cuenta son la distancia, carga, velocidad, temperatura, entre otros.	Distancia	¿Qué distancia de recorrido debe durar la prueba?	150m 200m 250m 300m
	Carga	¿Cuál es la carga aplicada en el pin sobre el disco?	5N
	Velocidad	¿Cuál es la velocidad de rotación del disco?	150 rpm
	Temperatura	¿A que temperatura se trabajará en el laboratorio?	20-27°C
	Ambiente atmosférico	¿Cuál es flujo del aire?	Estático.

Lubricación	¿Qué tipo de lubricación se va a usar?	Ninguna
-------------	--	---------

Nota: Esta tabla muestra las variables independientes en el ensayo Pin-On-Disk bajo la norma ASTM G-99 (ASTM International, 2017).

Tabla 5.

Variables dependientes.

Conceptualización	Dimensiones	Indicadores	Ítems
El desgaste sucede cuando dos superficies entran en contacto	Desgaste	¿Cuál es la pérdida volumétrica del acero inoxidable 316L soldado con tres procesos diferentes?	0.1718 mm ³ a 1.5060 mm ³
	Tasa de desgaste	¿Cuál es la tasa de desgaste del material?	0.00916 mg/m a 0.04819 mg/m

Nota: Esta tabla nos muestra las variables dependientes del ensayo Pin-On-Disk bajo la norma ASTM G-99 (ASTM International, 2017).

Para la realización de los ensayos de desgaste, se utilizó la máquina UMT Tribolab de Bruker, localizada en el laboratorio 312 de metalografía del edificio de Ingeniería Mecánica. En total, se realizaron 32 ensayos, distribuidos en 8 ensayos por cada una de las 4 probetas. Los

parámetros establecidos para el desarrollo de las pruebas fueron cuidadosamente seleccionados teniendo en cuenta la norma para garantizar la repetitividad y precisión de los resultados.

El valor de la fuerza aplicada en todos los ensayos fue de 5 N, mientras que la distancia de deslizamiento se varió en incrementos de 150, 200, 250 y 300 metros para cada probeta realizando 2 ensayos por cada distancia, permitiendo así evaluar el comportamiento del desgaste a diferentes distancias. La velocidad de rotación se mantuvo en un rango de 150 rpm, y todas las pruebas se realizaron a temperatura ambiente, en una atmósfera estática sin influencia de corrientes de aire.

Antes de iniciar los ensayos, las probetas fueron preparadas mediante un proceso de pulido a espejo para asegurar la uniformidad de la superficie. Posteriormente, se realizó una limpieza y secado meticulosos de las muestras, siguiendo las recomendaciones de la norma, que estipulan el uso de agentes de limpieza no coloreados y solventes que no formen película. Además, se emplearon materiales secos con granos abiertos para eliminar cualquier rastro de fluidos de limpieza que pudieran quedar atrapados en la superficie del material.

El procedimiento experimental inició con la colocación del disco en el portadiscos, asegurándose de que el disco estuviera perpendicular al eje de rotación. Para garantizar su sujeción y evitar cualquier movimiento durante el ensayo, se utilizó cinta doble faz y los pines de sujeción correspondientes, lo que evitó rotaciones no deseadas o desplazamientos.

Una vez completada cada prueba, se retiró cuidadosamente la probeta del portadiscos, se limpió nuevamente y se procedió a su pesaje. Para este paso, se utilizó una balanza analítica Ohaus del laboratorio de combustión, con la sensibilidad necesaria para detectar variaciones de peso en el orden de milésimas de gramo, permitiendo así cuantificar con precisión la pérdida de material debida al desgaste. Los pesos iniciales y finales de cada probeta fueron registrados para su posterior

análisis, repitiendo el mismo procedimiento con las demás probetas hasta completar el conjunto de ensayos.

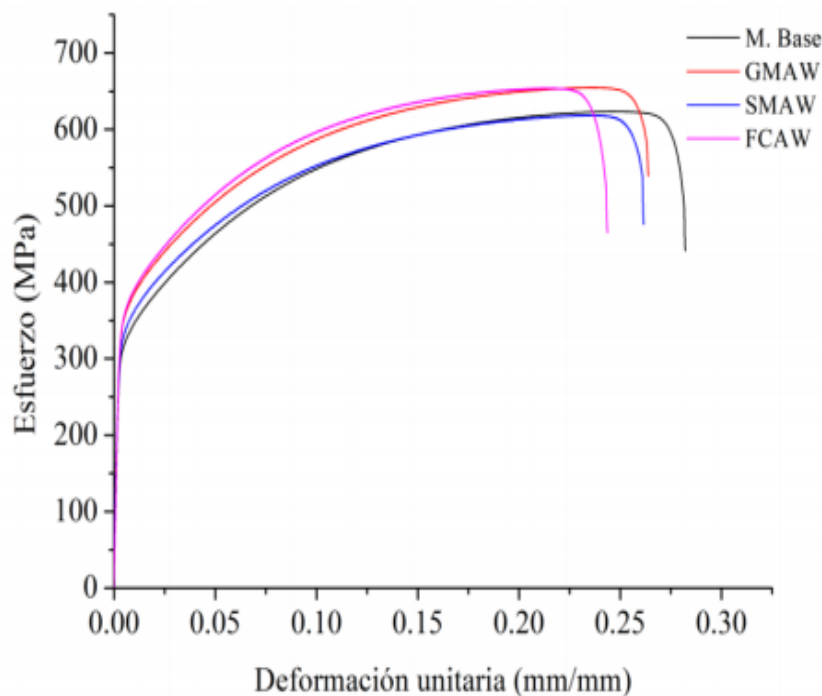
4. Resultados

4.1 Ensayos de tracción y dureza

Los ensayos de tracción al igual que los de dureza fueron realizados por el profesor Oscar Bohórquez en su tesis doctoral titulada “*Modelo matemático para selección de proceso de soldadura por arco eléctrico basado en características estáticas y dinámicas*” (Bohórquez, 2023), aquí se mostrarán los resultados para un posterior análisis y comparación.

Figura 15.

Curva promedio esfuerzo contra deformación unitaria para AISI 316L sometida a procesos de soldadura y material base.



Nota: Tomado de *Modelo matemático para selección de proceso de soldadura por arco eléctrico basado en características estáticas y dinámicas*, (pág. 103), por (Bohórquez, 2023).

Tabla 6.

Parámetros obtenidos del ensayo de tracción AISI 316L.

Proceso	E[GPa]	Sy[Mpa]	Sut[Mpa]	%Al [%]	Tenacidad [MJ/m³]
Control	202.4±12.81	303.25±22.14	626.5±25.63	28.77±32	154.2±8.33
SMAW	199.2±8.77	306.77±8.99	617±17.58	27.4±1.44	142.4±6.37
GMAW	204±11.95	326.74±17.52	655.62±19.88	27.21±2.21	152.6±7.74
FCAW	204.7±6.55	331.56±10.05	658.61±12.24	25.24±0.98	140.06±6.65

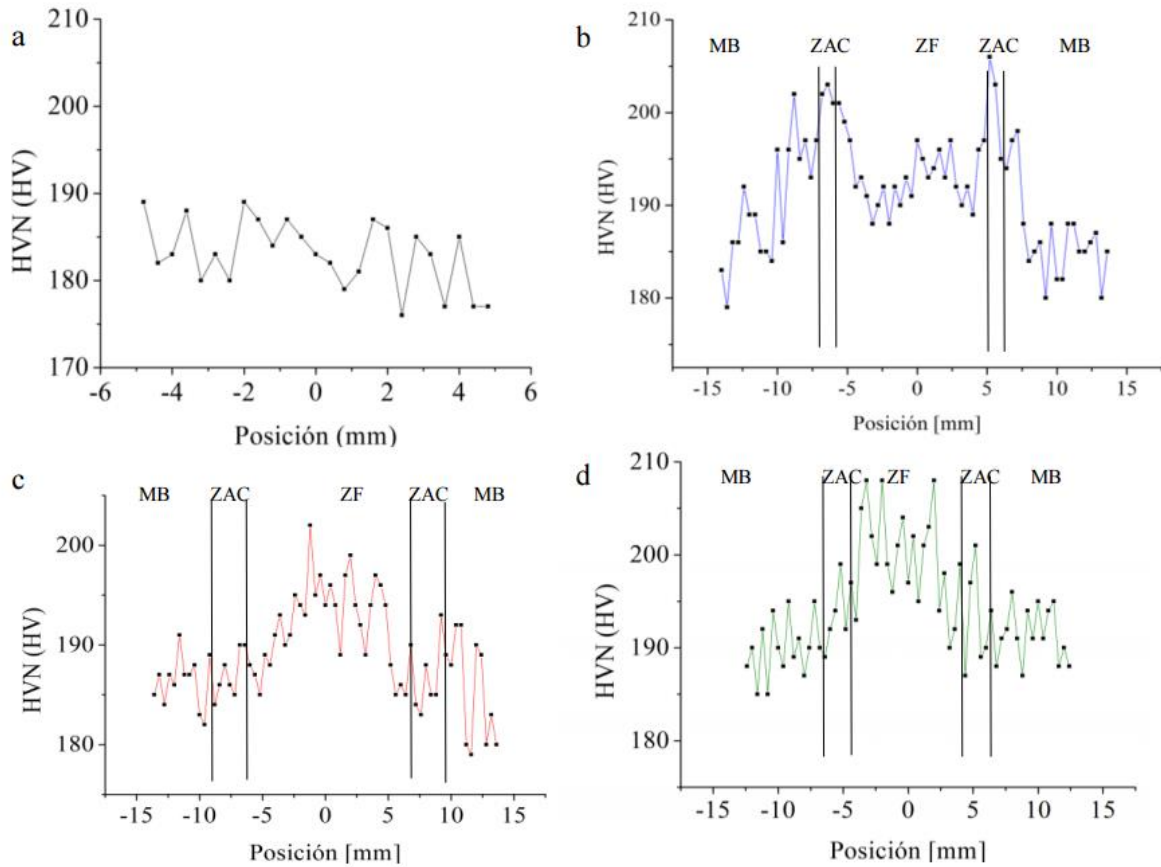
Nota: Tomado de *Modelo matemático para selección de proceso de soldadura por arco eléctrico basado en características estáticas y dinámicas*, (pág. 104), por (Bohórquez, 2023).

De la tabla anterior se puede inferir que el proceso FCAW resulta en un acero con mayor límite elástico (S_y) y resistencia a la tracción (S_{ut}) en comparación con el material base y los otros procesos de soldadura. Este comportamiento puede ser atribuido a la influencia del gas de protección en la reducción de formación de óxidos en los depósitos del material de aporte, como se observa en otros estudios. Aunque el proceso FCAW muestra mayor resistencia, la zona de falla en los ensayos de tracción se ubica en el material base, cerca de la transición con la ZAC. Esto sugiere que la resistencia de la soldadura en sí misma es superior a la del material base.

Los valores de módulo de elasticidad (E) se mantienen relativamente constantes en todos los procesos, mostrando poca influencia de la soldadura en este parámetro.

Figura 16.

Perfiles de dureza vs posición para AISI 316L.



Nota: Tomado de *Modelo matemático para selección de proceso de soldadura por arco eléctrico basado en características estáticas y dinámicas* (pág. 92), por (Bohórquez, 2023).

Examinando los gráficos y los resultados del ensayo de dureza Vickers del acero inoxidable AISI 316L expuesto a los tres métodos de soldadura por arco eléctrico (SMAW, GMAW y FCAW) se pueden extraer las siguientes conclusiones:

La mayor dureza en la zona de fusión se produce con el proceso FCAW, seguido de GMAW y SMAW. Esto está en consonancia con la menor tensión de potencia y la mayor

intensidad de corriente de FCAW, que pueden repercutir en los periodos de solidificación y las velocidades de enfriamiento. También se aprecia un aumento gradual de la dureza desde el material base hacia la zona de fusión en los tres procesos, lo que indica un endurecimiento por la influencia del calor de la soldadura.

4.2 Ensayos de desgaste Pin-On-Disk

En las siguientes tablas se muestran los pesos finales de las probetas de acero AISI 316L sacados de los ensayos de Pin-On-Disk y los parámetros tribológicos sacados a partir de estos a partir de las ecuaciones otorgadas por la norma ASTM G-99 (ASTM International, 2017).

Tabla 7.

Datos de desgaste de las probetas FCAW.

FCAW								
	Pesos (g)	Δ Peso (g)	Δ Peso (mg)	Volumen perdido (mm ³)	Distancia (m)	Tasa de desgaste (mg/m)	Fuerza (N)	Coefficiente de desgaste (mg/Nm)
0	51.6853							
1	51.6831	0.0022	2.20	0.2750	150	0.01467	5	0.00293
2	51.6812	0.0019	1.90	0.2375	150	0.01267	5	0.00253
3	51.6776	0.0036	3.60	0.4501	200	0.01800	5	0.00360
4	51.6730	0.0046	4.60	0.5751	200	0.02300	5	0.00460
5	51.6663	0.0067	6.70	0.8376	250	0.02680	5	0.00536
6	51.6613	0.0050	5.00	0.6251	250	0.02000	5	0.00400
7	51.6546	0.0067	6.70	0.8376	300	0.02233	5	0.00447
8	51.6440	0.0106	10.60	1.3252	300	0.03533	5	0.00707

Tabla 8.*Datos de desgaste de las probetas SMAW.*

SMAW								
Pesos (g)	Δ Peso (g)	Δ Peso (mg)	Volumen perdido (mm ³)	Distancia (m)	Tasa de desgaste (mg/m)	Fuerza (N)	Coefficiente de desgaste (mg/Nm)	
0	61.3288							
1	61.3274	0.0014	1.40	0.1750	150	0.00933	5	0.00187
2	61.3258	0.0016	1.60	0.2000	150	0.01067	5	0.00213
3	61.3201	0.0057	5.70	0.7126	200	0.02850	5	0.00570
4	61.3147	0.0054	5.40	0.6751	200	0.02700	5	0.00540
5	61.3027	0.0120	12.00	1.5002	250	0.04800	5	0.00960
6	61.2955	0.0072	7.20	0.9001	250	0.02880	5	0.00576
7	61.2845	0.0110	11.00	1.3752	300	0.03667	5	0.00733
8	61.2729	0.0116	11.60	1.4502	300	0.03867	5	0.00773

Tabla 9.*Datos de desgaste de las probetas GMAW.*

GMAW								
Pesos (g)	Δ Peso (g)	Δ Peso (mg)	Volumen perdido (mm ³)	Distancia (m)	Tasa de desgaste (mg/m)	Fuerza (N)	Coefficiente de desgaste (mg/Nm)	
0	56.5900							
1	56.5875	0.0025	2.50	0.31254	150	0.01667	5	0.00333
2	56.5851	0.0024	2.40	0.30004	150	0.01600	5	0.00320
3	56.5813	0.0038	3.80	0.47506	200	0.01900	5	0.00380
4	56.5781	0.0032	3.20	0.40005	200	0.01600	5	0.00320
5	56.5723	0.0058	5.80	0.72509	250	0.02320	5	0.00464
6	56.5645	0.0078	7.80	0.97512	250	0.03120	5	0.00624
7	56.5551	0.0094	9.40	1.17515	300	0.03133	5	0.00627
8	56.5450	0.0101	10.10	1.26266	300	0.03367	5	0.00673

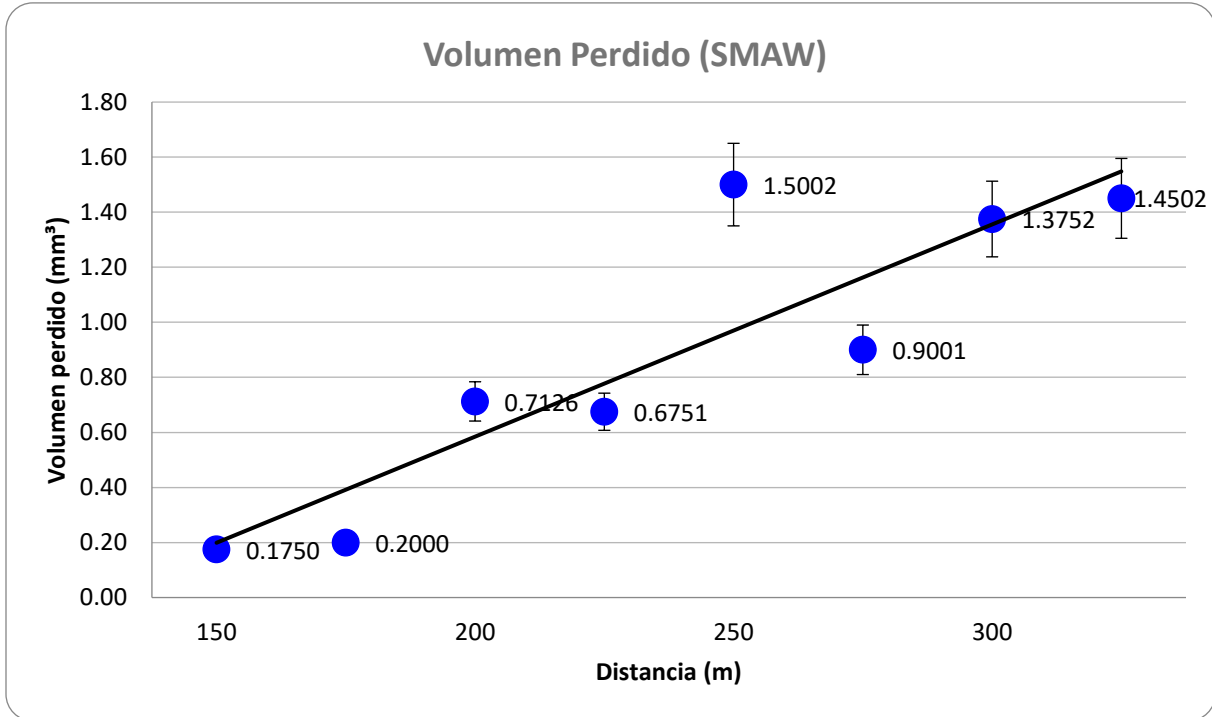
Tabla 10.*Datos de desgaste de las probetas Metal Base.*

Metal Base								
Pesos (g)	Δ Peso (g)	Δ Peso (mg)	Volumen perdido (mm^3)	Distancia (m)	Tasa de desgaste (mg/m)	Fuerza (N)	Coeficiente de desgaste (mg/Nm)	
0	125.1357							
1	125.1322	0.0035	3.50	0.43755	150	0.02333	5	0.00467
2	125.1282	0.0040	4.00	0.50006	150	0.02667	5	0.00533
3	125.1223	0.0059	5.90	0.73759	200	0.02950	5	0.00590
4	125.1139	0.0084	8.40	1.05013	200	0.04200	5	0.00840
5	125.1044	0.0095	9.50	1.18765	250	0.03800	5	0.00760
6	125.0965	0.0079	7.90	0.98762	250	0.03160	5	0.00632
7	125.0867	0.0098	9.80	1.22515	300	0.03267	5	0.00653
8	125.0757	0.0110	11.00	1.37517	300	0.03667	5	0.00733

En la figura 17, se muestra el volumen perdido el cual tiene un rango de (0.1750-1.5002) en mm^3 de la probeta SMAW contra distancias recorridas de 150, 200, 250 y 300 m. (Para cada distancia recorrida se hicieron dos pruebas). Se puede observar en azul los puntos experimentales por los cuales pasa una línea negra la cual nos indica la mejor recta entre todos los puntos experimentales. la cual tiene una tendencia ascendente, dándonos a entender que el volumen perdido es proporcional a la distancia recorrida. Sin embargo, el valor atípico registrado de volumen perdido es de 1,5002 mm^3 a una distancia de 250 m. Se podría aludir a un fallo durante la prueba, como un aumento brusco de la carga, sobrepasando los 5N.

Figura 17.

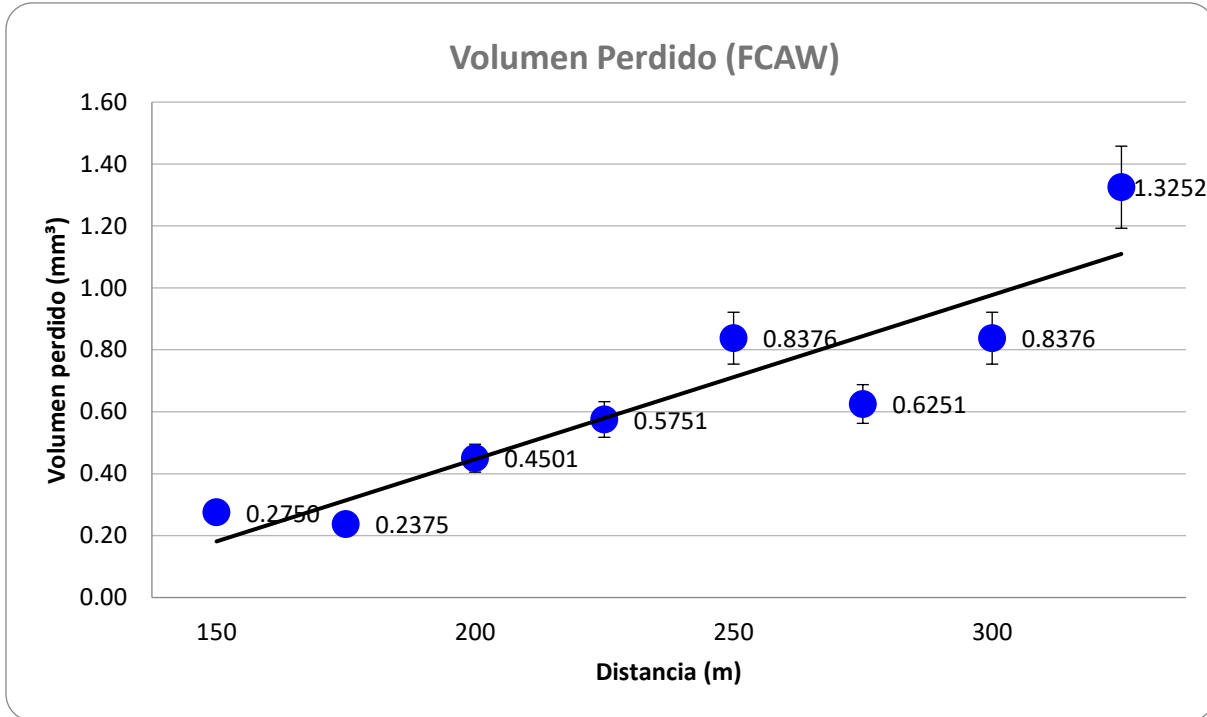
Pérdida volumétrica en la probeta SMAW.



La figura 18, presenta los resultados obtenidos de volumen de desgaste [mm^3] mediante el ensayo de desgaste Pin-On-Disk para probetas soldadas por FCAW en función de las distancias recorridas [m]. (Para cada distancia recorrida se hicieron dos pruebas, empezando a un desplazamiento de 150 a 300 m). Los datos experimentales, representados por puntos azules, muestran una variación en el volumen perdido, el cual oscila entre 0.2750 y 1.3252 mm^3 . Al ajustar una recta de regresión a estos puntos, se observa una tendencia lineal ascendente, lo que indica una relación directamente proporcional entre el volumen erosionado y el desplazamiento.

Figura 18.

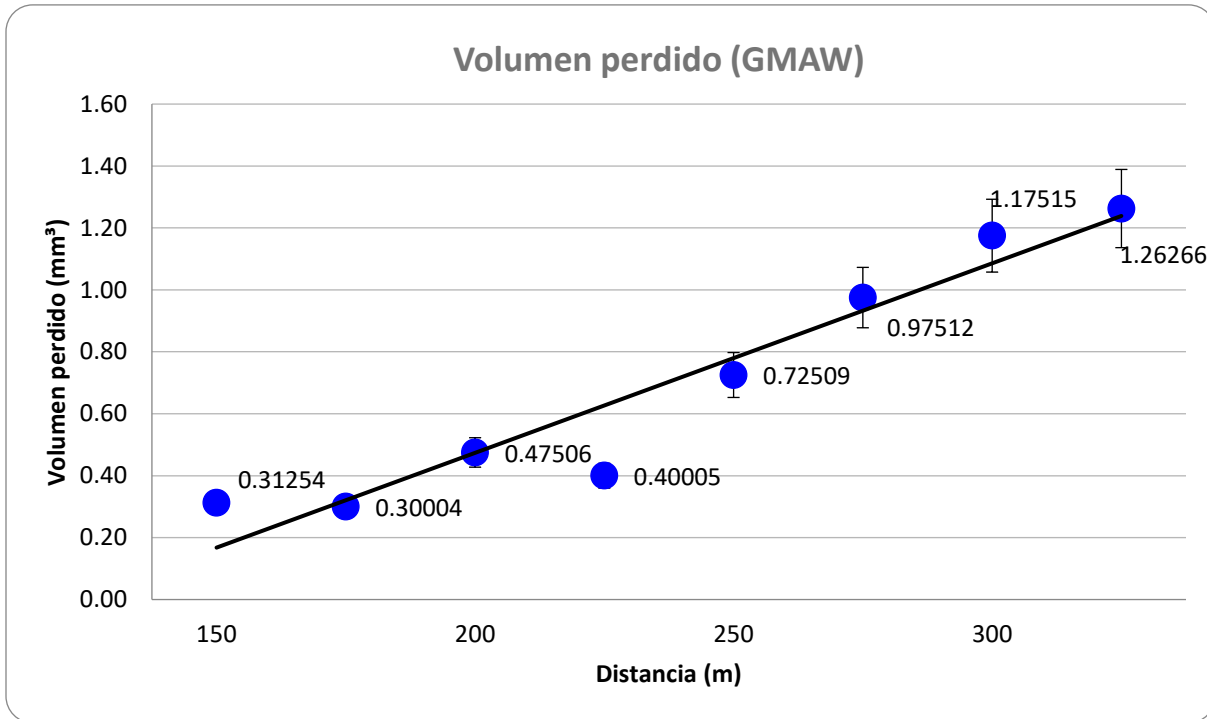
Pérdida volumétrica en la probeta FCAW.



En la figura 19, se observa una relación directa entre la distancia recorrida en metros [m] y el volumen de desgaste dado en [mm^3], en las probetas de GMAW. Los datos experimentales, representados por puntos azules dispersos, evidencian una tendencia lineal ascendente en color negro. Donde se aprecia una irregularidad en el volumen perdido, disminuyen este durante la segunda prueba a 200 m de desplazamiento. Comparando las tres gráficas de las diferentes soldaduras, en esta última vemos un menor cambio en la tasa de desgaste. Teniendo en cuenta la cantidad de volumen perdido al comenzar el ensayo con el de la última prueba de cada soldadura.

Figura 19.

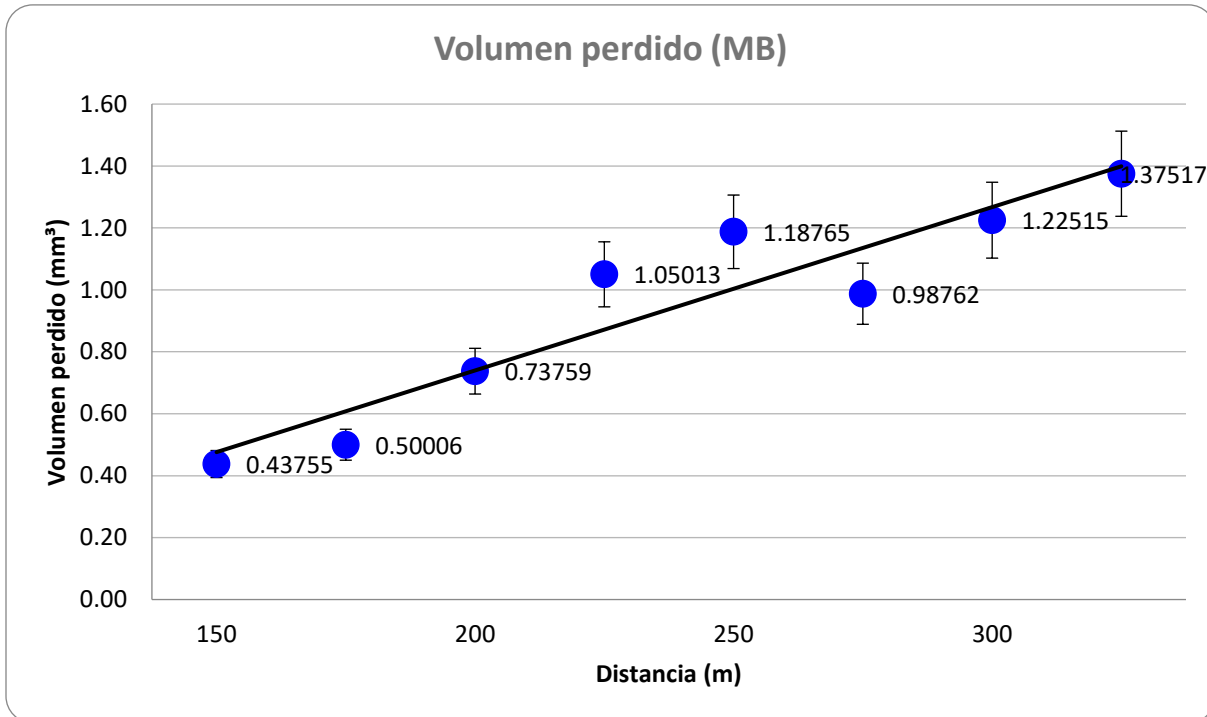
Pérdida volumétrica en la probeta GMAW.



En la figura 20, se aprecia la comparativa entre volumen perdido en [mm^3] estas con un rango de (0.43755-1.37517 mm^3) y distancia de desplazamiento [m] está variando de 150 a 300 m, durante el ensayo para el metal base. Donde vemos una relación positiva en entre los dos datos proporcionados marcados por puntos azules, hasta la primera prueba de 200 m (0.47506 mm^3), donde en la segunda prueba de 200 m se baja considerablemente el volumen de desgaste (0.40005 mm^3). Para después seguir con la relación positiva, dada por la línea negra.

Figura 20.

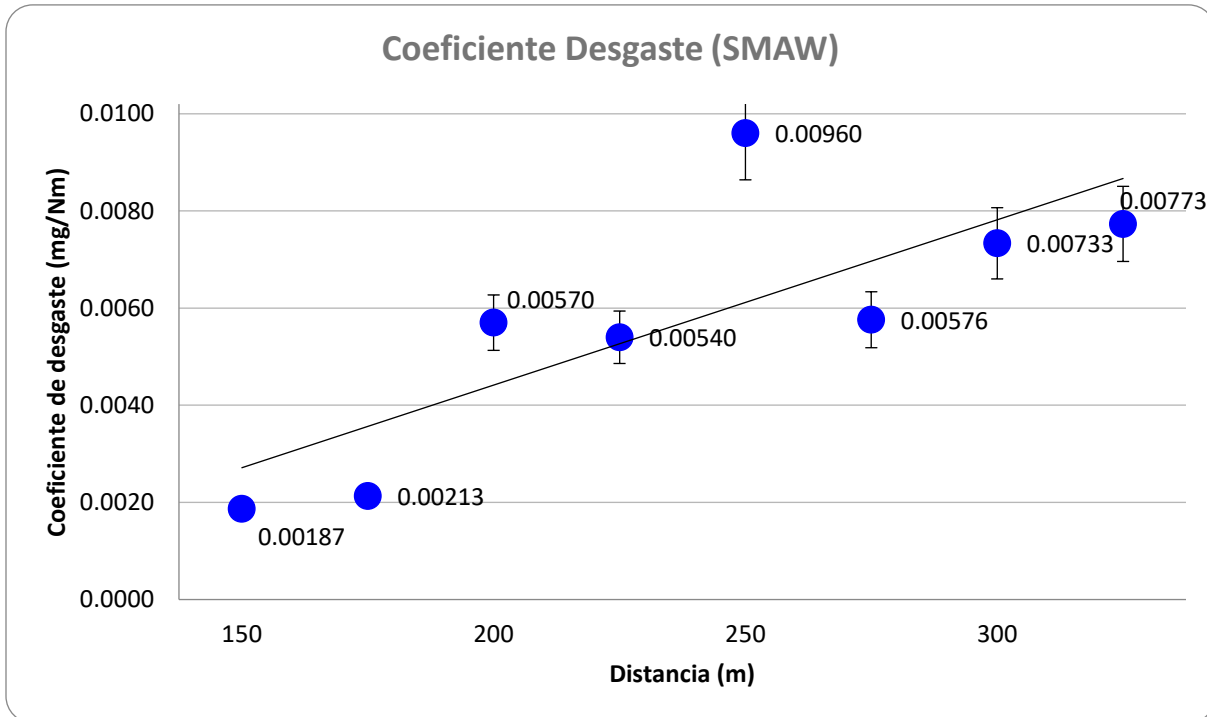
Pérdida volumétrica en la probeta Metal Base.



En el gráfico de coeficiente de desgaste en función de la distancia recorrida en la probeta de SMAW dado en la figura 21. El coeficiente de desgaste [mg/Nm] se comporta diferente para cada distancia recorrida, adoptando una forma ascendente donde como en la gráfica de volumen perdido se ve en la distancia de 250 m un abrupto incremento en volumen perdido, esto hace que también se refleje en la gráfica de coeficiente de desgaste.

Figura 21.

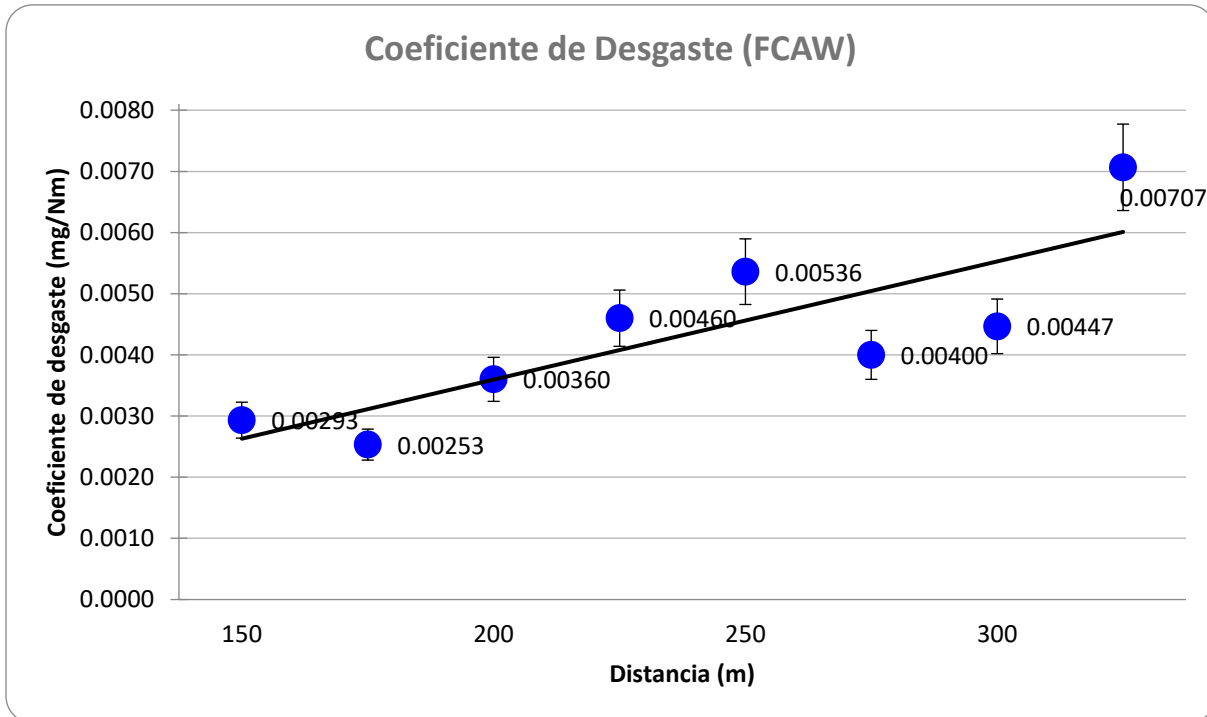
Coefficiente de desgaste en la probeta SMAW.



El coeficiente de desgaste dado en mg/Nm contra el desplazamiento [m] en la probeta de FCAW, mostrado en la figura 22, presenta un comportamiento variable a lo largo de las distancias recorridas durante las pruebas hechas, mostrado mediante los puntos azules. A medida que aumenta la distancia el coeficiente muestra una tendencia ascendente, con unas pequeñas fluctuaciones, lo que indica que el desgaste de material incrementa con respecto a la distancia recorrida.

Figura 22.

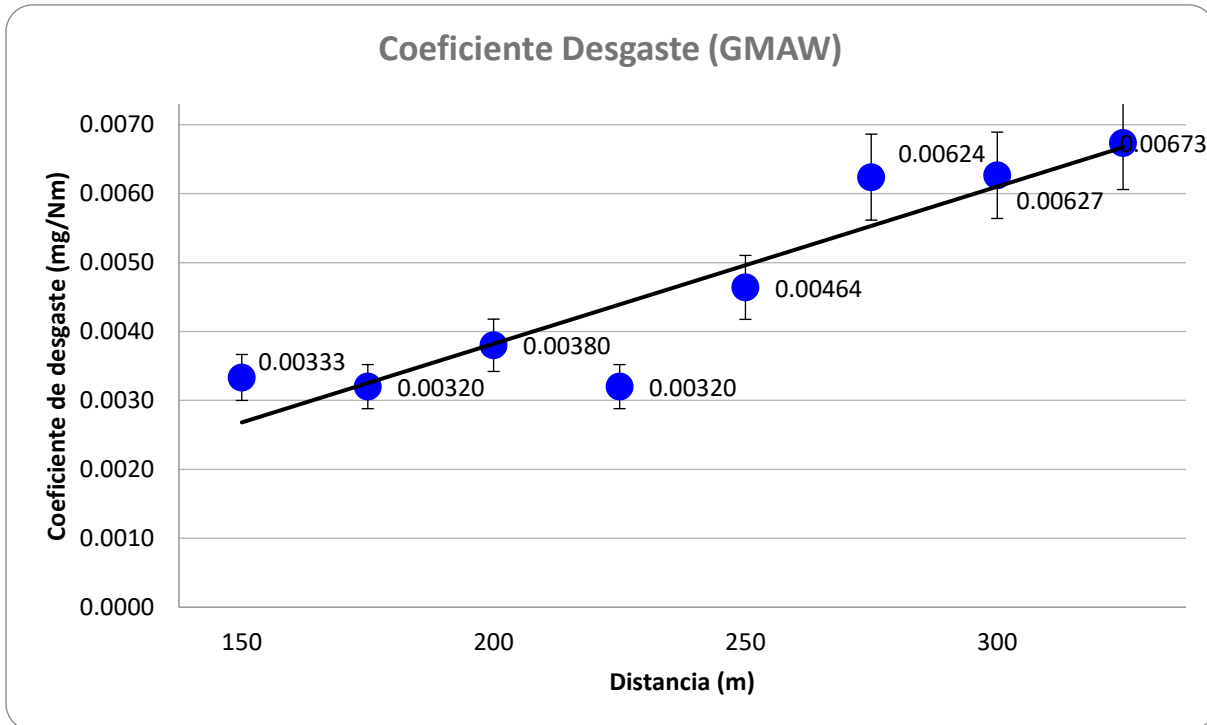
Coefficiente de desgaste en la probeta FCAW.



Como se evidencia en la figura 23, donde se muestra la gráfica de coeficiente de desgaste [mg/Nm] contra distancia recorrida [m] en las probetas con soldadura GMAW, aumenta a medida que aumenta la distancia recorrida. Habiendo una relación positiva como se puede ver en la línea negra, la cual relaciona los puntos experimentales mostrados en azul. Teniendo el menor resultado de coeficiente de desgaste en comparación con las demás soldaduras. Al no variar la Fuerza de 5N, todo esto se atribuye a la tasa de desgaste.

Figura 23.

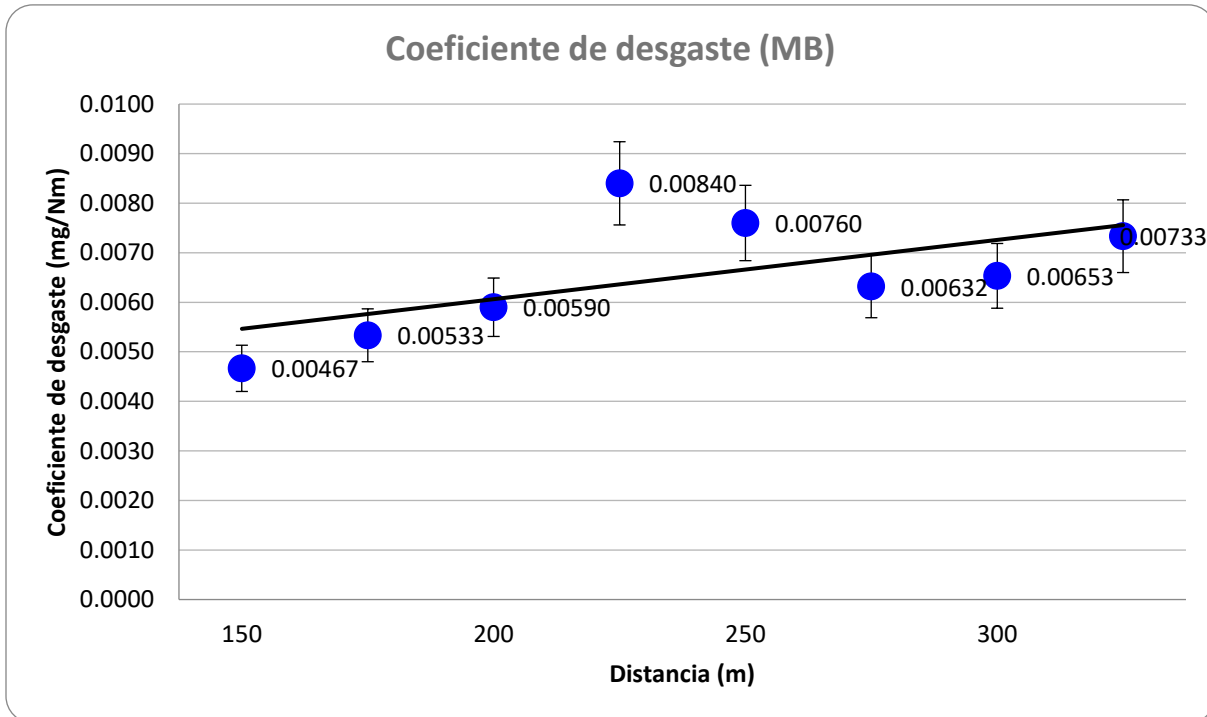
Coefficiente de desgaste en la probeta GMAW.



La relación entre la distancia recorrida y el coeficiente de desgaste del metal base es proporcional, como se aprecia en la figura 24. Es decir, a mayor distancia, mayor desgaste. La cual nos muestra que el coeficiente de desgaste se da en mg/Nm y el desplazamiento en m. Mostrando los puntos experimentales los cuales están en azul y su correspondiente línea de tendencia. El incremento observado en la tendencia fue menos significativo en comparación con el de la soldadura, atribuido a la misma falta de estos en este último ensayo.

Figura 24.

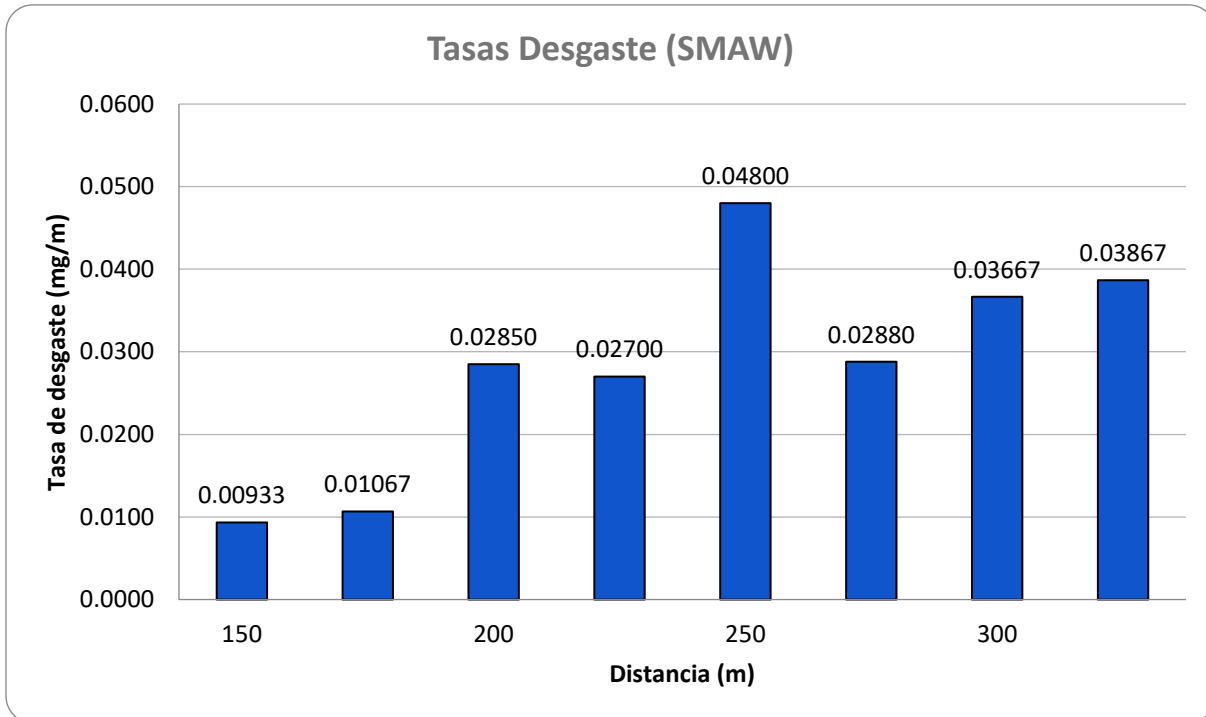
Coefficiente de desgaste en la probeta Metal Base.



En la figura 25, se muestra la tasa de desgaste [mg/m] contra la distancia recorrida [m] en la prueba que se produce en la probeta con soldadura SMAW. Viendo el mayor pico de desgaste obtenido durante todas las pruebas el cual es de 0.04800 mg/m a una distancia recorrida de 250 m. El cual va encontrar de la tendencia que tenía la gráfica la cual estaba teniendo un incremento mínimo, pero al llegar a la prueba de 250 m se tiene un incremento abrupto. Para después volver a su normalidad

Figura 25.

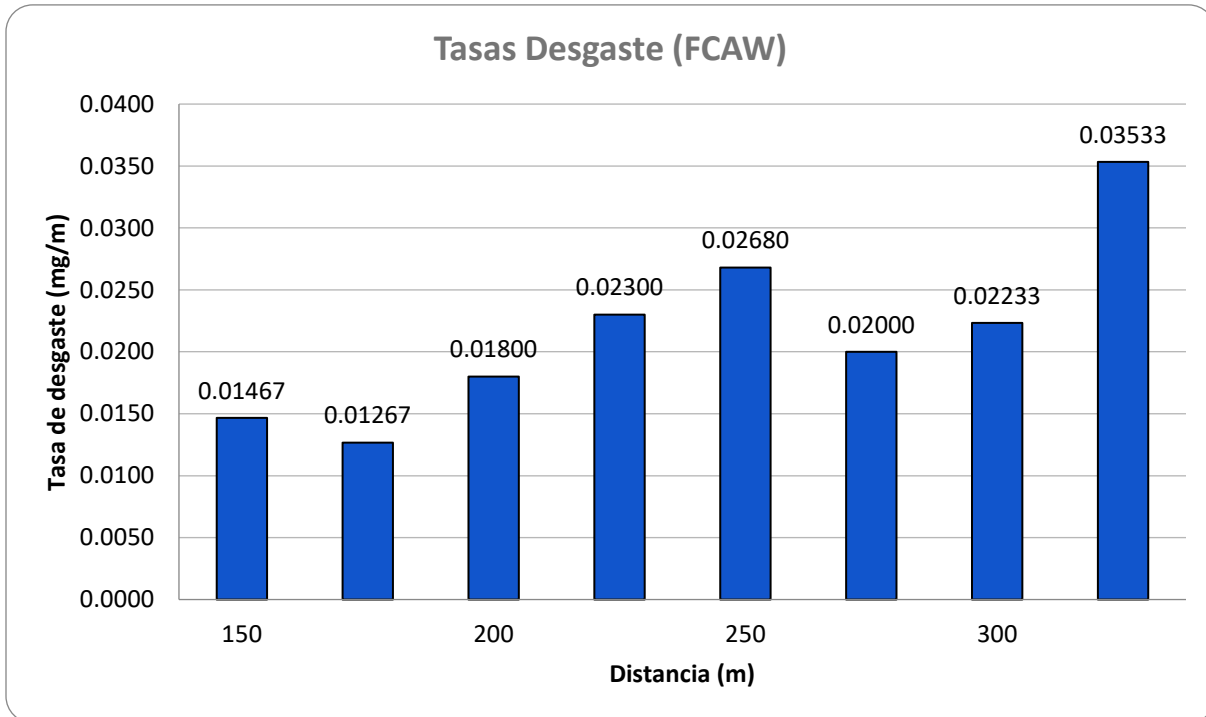
Tasa de desgaste en la probeta SMAW.



La figura 26, nos presenta la gráfica de tasa de desgaste [mg/m] en función de la distancia [m] presentada en la probeta con FCAW, se ve un incremento 0.03533 mg/m a la mayor distancia recorrida de 300 m, y siendo la menor tasa de desgaste 0.01267 mg/m en la menor distancia recorrida (150 m). Este incremento se ve con una tendencia positiva hasta llegar a la prueba de 250 m en la cual se presenta un decrecimiento de la tasa para ya en la siguiente prueba volver a su tendencia.

Figura 26.

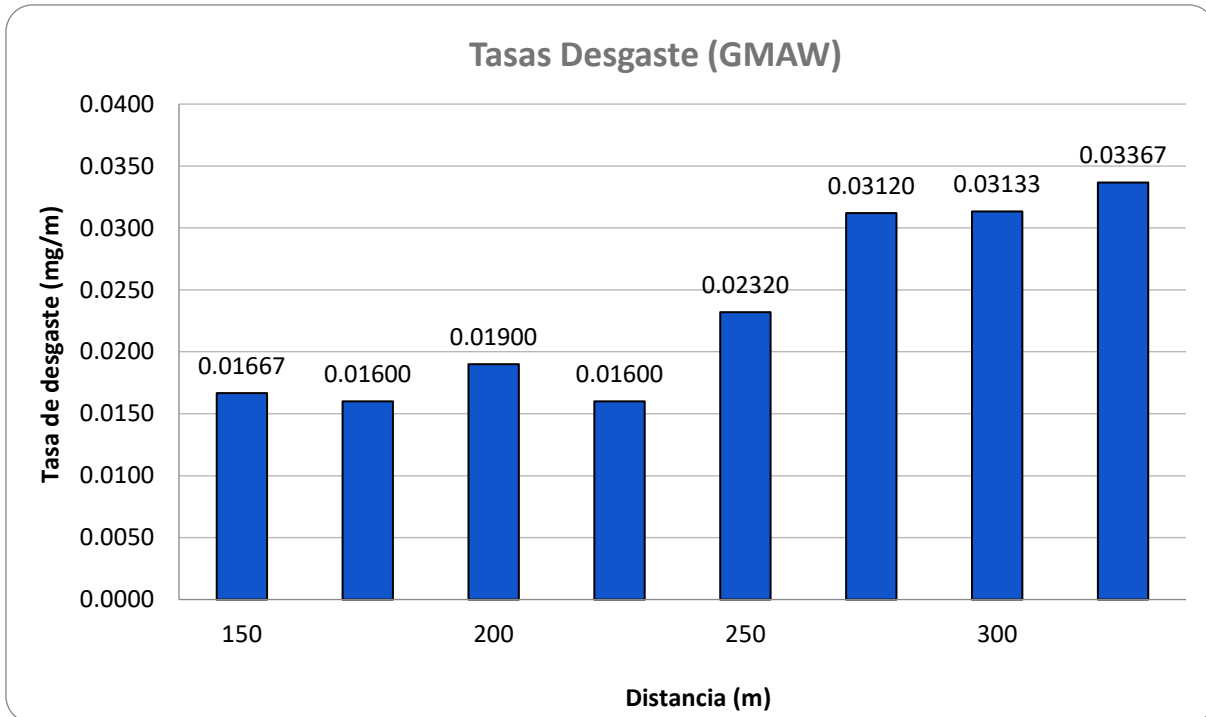
Tasa de desgaste en la probeta FCAW.



La figura 27, revela la tasa de desgaste [mg/m] versus desplazamiento [m] de la probeta con GMAW, teniendo un comportamiento normal en la cual los mayores picos de desgaste se presentan en las dos pruebas de 300 m, como se puede apreciar a mayor distancia recorrida mayor tasa de desgaste

Figura 27.

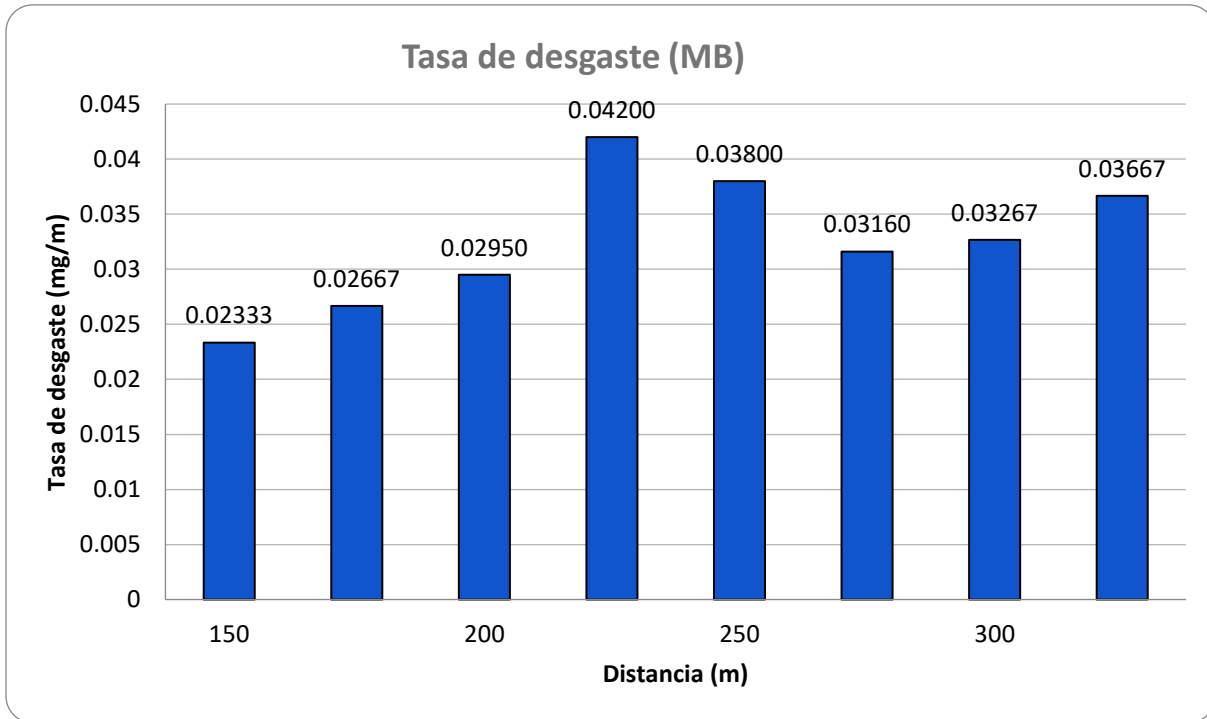
Tasa de desgaste en la probeta GMAW.



En la figura 28, se observa la tasa de desgaste [mg/m] del metal base contra la distancia recorrida [m]. Ya comparando las 4 gráficas vemos que el metal base en general es el que presenta una mayor tasa de desgaste. Con esto se podría decir que es el menos duro de las cuatro probetas. Viéndose en esta una menor variación de la tasa de la primera prueba con respecto a las otras.

Figura 28.

Tasa de desgaste en la probeta Metal Base.



4.3 Resultados métodos estadísticos

A continuación, se presentan los resultados obtenidos por los diferentes métodos estadísticos usando códigos de Python apoyándonos con las librerías NumPy, SciPy y Matplotlib.

4.3.1 Relación entre dureza y desgaste probeta FCAW

Parámetros Pearson, Spearman y Kendall Tau.

- Coeficiente de correlación de Pearson: -0.7853080156015534
- Valor p (Pearson): 0.020926852362842495
- Coeficiente de correlación de Spearman: -0.7380952380952381
- Valor p (Spearman): 0.03655276105286081
- Coeficiente de correlación de Kendall Tau: -0.6428571428571428
- Valor p (Kendall Tau): 0.03115079365079365

Parámetros Bootstrap

- Correlación media: -0.7929560519293154
- Intervalo de confianza del 95%: (-0.9710056640514498, -0.44933551649153763)

Ajuste exponencial

Parámetros del modelo exponencial:

- $a = 1.0$
- $b = 1.0$
- $c = 0.02158749999786591$

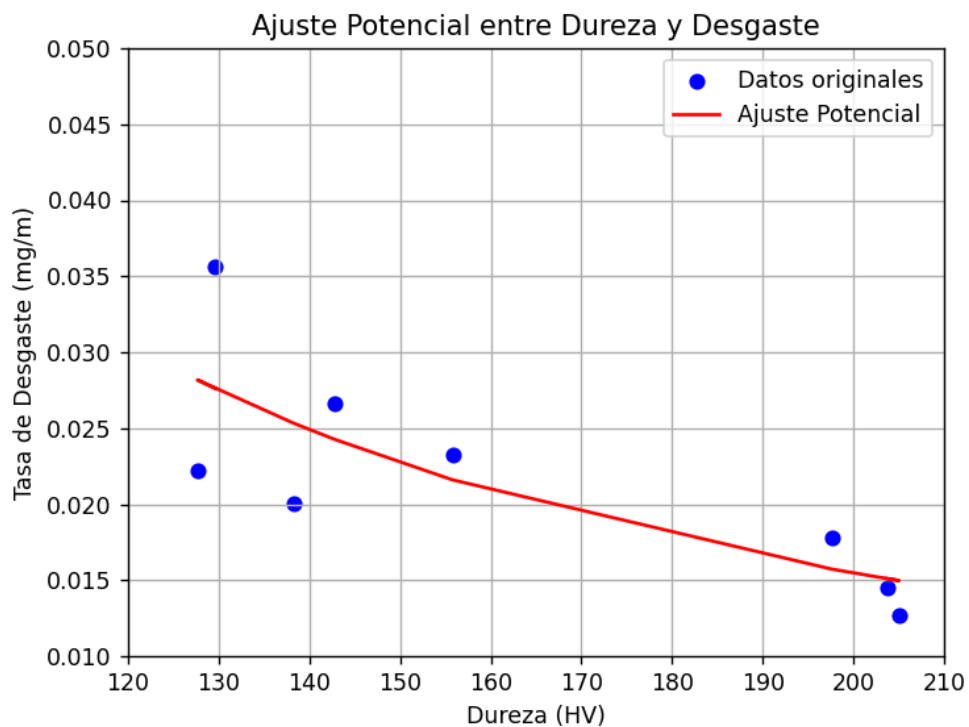
Ajuste potencial

Parámetros del modelo potencial:

- $a = 18.20947345435913$
- $b = -1.3344522195405604$

Figura 29.

Ajuste potencial entre dureza y desgaste para probeta FCAW



4.3.2 Relación entre dureza y desgaste probeta SMAW

Parámetros Pearson, Spearman y Kendall Tau.

- Coeficiente de correlación de Pearson: -0.8295938501395734
- Valor p (Pearson): 0.010843589118696194

- Coeficiente de correlación de Spearman: -0.7380952380952381
- Valor p (Spearman): 0.03655276105286081
- Coeficiente de correlación de Kendall Tau: -0.4999999999999999
- Valor p (Kendall Tau): 0.10868055555555556

Parámetros Bootstrap

- Correlación media: -0.7807038082577828
- Intervalo de confianza del 95%: (-0.9800535705842218, -0.18787768201625116)

Ajuste exponencial

Parámetros del modelo exponencial:

- $a = 1.0$
- $b = 1.0$
- $c = 0.028416249997880283$

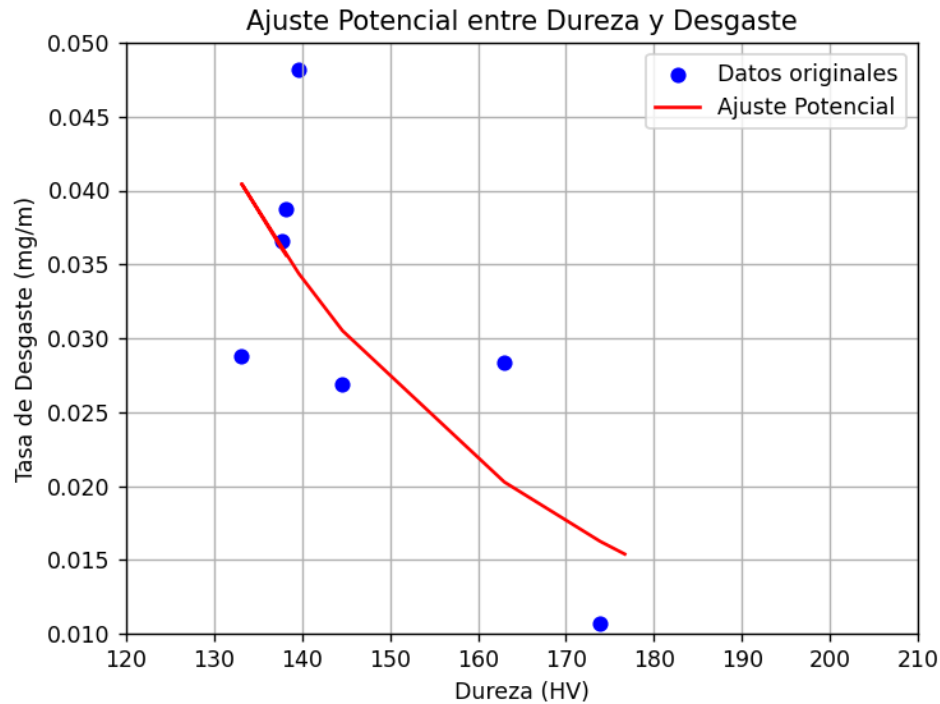
Ajuste potencial

Parámetros del modelo potencial:

- $a = 726372.6006504267$
- $b = -3.414919765882186$

Figura 30.

Ajuste potencial entre dureza y desgaste para probeta SMAW



4.3.3 Relación entre dureza y desgaste probeta GMAW

Parámetros Pearson, Spearman y Kendall Tau.

- Coeficiente de correlación de Pearson: -0.893186581497315
- Valor p (Pearson): 0.0028077635530072897
- Coeficiente de correlación de Spearman: -0.7380952380952381
- Valor p (Spearman): 0.03655276105286081
- Coeficiente de correlación de Kendall Tau: -0.5714285714285714
- Valor p (Kendall Tau): 0.06101190476190476

Parámetros Bootstrap

- Correlación media: -0.8813894957040582
- Intervalo de confianza del 95%: (-0.9738994779366009, -0.7276017682762178)

Ajuste Exponencial**Parámetros del modelo exponencial:**

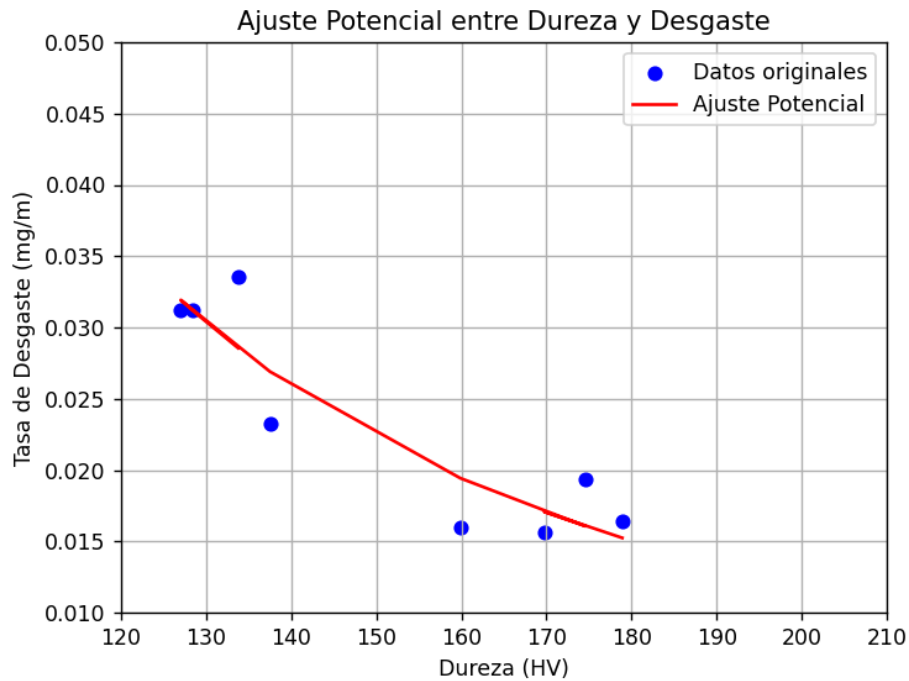
- $a = 1.0$
- $b = 1.0$
- $c = 0.023321249997869442$

Ajuste Potencial**Parámetros del modelo potencial:**

- $a = 1109.5753556984344$
- $b = -2.1584239783579795$

Figura 31.

Ajuste potencial entre dureza y desgaste para probeta GMAW



4.3.4 Relación entre dureza y desgaste probeta Metal Base

Parámetros Pearson, Spearman y Kendall Tau.

- Coeficiente de correlación de Pearson: -0.10568491629190445
- Valor p (Pearson): 0.8033113711212959
- Coeficiente de correlación de Spearman: -0.023809523809523815
- Valor p (Spearman): 0.9553740118158807
- Coeficiente de correlación de Kendall Tau: -0.07142857142857142
- Valor p (Kendall Tau): 0.9048611111111111

Parámetros Bootstrap

- Correlación media: -0.10915850616948339
- Intervalo de confianza del 95%: (-0.8486324518790754, 0.678179913177617)

Ajuste Exponencial**Parámetros del modelo exponencial:**

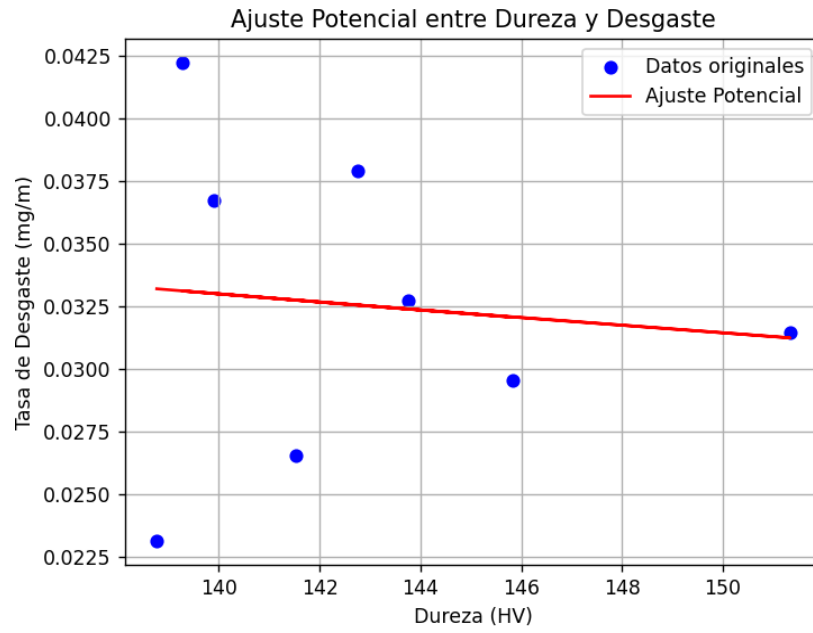
- $a = 1.0$
- $b = 1.0$
- $c = 0.03254249999788983$

Ajuste Potencial**Parámetros del modelo potencial:**

- $a = 1.0573252813466965$
- $b = -0.701596233629147$

Figura 32.

Ajuste potencial entre dureza y desgaste para probeta METAL BASE.



5. Análisis de resultados

5.1 Análisis de los ensayos de desgaste Pin-On-Disk

El análisis de los resultados obtenidos en los ensayos de pérdida de volumen, coeficiente de desgaste y tasa de desgaste refleja tendencias ascendentes, indicando que, a mayor distancia recorrida, mayor es el desgaste, un comportamiento predecible. El proceso FCAW presentó el menor desgaste, seguido por GMAW, SMAW y, finalmente, el metal base, una tendencia que coincide con los resultados de dureza reportados en el trabajo de doctorado "*Modelo matemático para selección de proceso de soldadura por arco eléctrico basado en características estáticas y dinámicas*" (Bohórquez, 2023), donde FCAW fue el proceso con mayor dureza, seguido de GMAW y SMAW, siendo el metal base el de menor dureza, esto se debe a que FCAW tiene un tamaño de grano más fino que las otras probetas soldadas (SMAW y GMAW). Esto se debe a que la tasa de enfriamiento es más alta en el proceso FCAW. Un tamaño de grano más fino generalmente resulta en una mayor dureza, porque los límites de grano actúan como barreras para la deformación plástica. El trabajo de doctorado también se menciona que la morfología dendrítica en la zona de fusión del AISI 316L es más marcada en la probeta FCAW que en las otras dos. La intensidad de las líneas dendríticas se relaciona con la tasa de enfriamiento. Esto podría haber contribuido también a la mayor dureza de la probeta FCAW.

En las pruebas de desgaste se observó que la probeta SMAW hay una variación abrupta fuera de la tendencia $1,5002 \text{ mm}^3$ a una distancia de 250 m, posiblemente asociada a errores de medición, mientras que los valores obtenidos para GMAW y FCAW mostraron una mejor coherencia con las tendencias establecidas. Por otro lado, la pendiente menos pronunciada de la probeta de metal base puede atribuirse a su composición homogénea, en contraste con las probetas

soldadas, que presentaron transiciones de material entre el metal base, la zona afectada por calor y la zona de fusión, lo que influye directamente en el comportamiento frente al desgaste.

5.2 Análisis Estadístico

A continuación, se realizará un análisis detallado con el objetivo de establecer una relación entre la tasa de desgaste obtenida en las pruebas Pin-on-Disk y los valores de micro dureza obtenidos del trabajo de maestría “*Modelo matemático para selección de proceso de soldadura por arco eléctrico basado en características estáticas y dinámicas*” (Bohórquez, 2023). Para ello, se emplearán diversos métodos estadísticos presentados a continuación:

5.2.1 Método Pearson

De lo anterior se puede inferir lo siguiente, en el proceso FCAW con el método Pearson se evidencia una correlación negativa fuerte y significativa -0.7853 , $p = 0.02092$, mientras que Spearman también indica una correlación negativa moderada pero no significativa $p = 0.160$. Esto indica que existe una tendencia inversa entre dureza y desgaste, pero los resultados no son consistentes. En cuanto al proceso SMAW se puede decir que ambos métodos muestran correlaciones negativas fuertes y significativas en Pearson -0.82959 , $p = 0.01084$ y en Spearman -0.7381 , $p = 0.03655$, lo que sugiere que hay una relación inversa clara entre dureza y desgaste. Con respecto al proceso GMAW con el método Pearson se sugiere una correlación muy fuerte e inversa, tanto con Pearson -0.8932 , $p = 0.0028$ como con Spearman -0.7381 , $p = 0.0366$. Ambos métodos indican que la relación es clara y significativa. Finalmente, tenemos el metal base en Pearson el coeficiente de correlación es muy bajo -0.1057 y no significativo $p = 0.8033$, indicando una relación casi inexistente entre dureza y desgaste.

5.2.2 Método Spearman

En Spearman también indica una correlación negativa moderada pero no significativa, ya que el coeficiente más bajo es de -0.0238 y el valor $p = 0.9554$ perteneciente a la probeta de metal base, mientras que para las probetas soldadas es de -0.73809 y un valor $p = 0.03655$, un valor que se repite para las 3. Esto refuerza que no hay una tendencia clara entre las variables. También se evidencia que en las tres probetas soldadas tanto los coeficientes de correlación de Spearman como el valor p son iguales, en cambio el de la probeta de solo metal base es diferente, esto se debe a que en este método, las correlaciones se calculan sobre los rangos de los datos, y si los valores tienen el mismo orden relativo para las tres probetas soldadas, los rangos y por ende los coeficientes de correlación serán idénticos, a pesar de las diferencias en valores absolutos, el orden relativo entre dureza y desgaste no cambia significativamente entre las probetas, puesto que Spearman mide la relación monótonica usando rangos en lugar de valores absolutos. Solo importa el orden relativo de los datos, por eso las 3 probetas soldadas tienen valores semejantes entre si a diferencia de la probeta de solo metal base.

5.2.3 Método Kendall Tau

Mientras que para el método Kendall Tau tenemos que la probeta con el proceso FCAW la correlación moderada e inversa es -0.643 con un valor $p = 0.0312$, lo que lo hace significativo. Para la probeta con el proceso de soldadura SMAW los valores de correlación inversa son -0.500 , pero no significativa $p = 0.1087$. Mientras que la probeta GMAW tiene un valor de correlación moderada e inversa de -0.5714 con un $p = 0.0610$, lo que lo hace cercano a significativo. Por último, en el metal base el coeficiente de correlación es muy bajo -0.0714 y el $p = 0.9049$ indica

que no hay evidencia de relación entre las variables. Kendall Tau confirma tendencias similares a Spearman, aunque su capacidad de detectar significancia es limitada. Es más concluyente en FCAW.

5.2.4 Método Bootstrap

De lo expuesto anteriormente se puede decir para FCAW la correlación media es de -0.793 con un IC del 95% estrecho $(-0.9710, -0.4493)$, lo que refuerza la confianza en la relación inversa. Para el proceso SMAW la correlación media es de -0.7807 , y el IC $(-0.9800, -0.1878)$ indicando alta confianza en una relación inversa. En el proceso GMAW tenemos que la correlación media es de -0.8813 con un intervalo de confianza de $(-0.9738, -0.7276)$ lo que muestra una correlación inversa muy fuerte y significativa. Ultimadamente tenemos al metal base, el cual tiene un valor medio de -0.1107 lo cual es bajo y su intervalo de confianza $(0.8351, 0.7148)$ es amplio, abarcando valores positivos y negativos. Esto sugiere alta incertidumbre en la relación.

Bootstrap es consistente con Pearson y Spearman, destacando relaciones inversas fuertes en todos los procesos especialmente en GMAW y SMAW, pero para el metal base es poco concluyente.

5.2.5 Método Ajuste Exponencial

Se puede inferir de lo presentado previamente lo siguiente, la línea de ajuste es prácticamente horizontal en todos los casos. Esto implica que el modelo exponencial no logra capturar ninguna relación significativa entre dureza y desgaste por lo se optó por ni siquiera mostrar las gráficas ya que no aportaban nada, pero igual se incluye para dar más soporte a la investigación.

Los parámetros del modelo ($a = 1$, $b = 1$, $c \approx$ valores constantes) reflejan una falta de sensibilidad del modelo a las variaciones de los datos. Este comportamiento sugiere que el modelo exponencial no es adecuado para estos conjuntos de datos, probablemente porque la relación entre las variables no sigue una tendencia exponencial.

5.2.6 Método Ajuste Potencial

El ajuste potencial es el más óptimo para percibir una relación entre estos dos parámetros, la línea de ajuste tiene una inclinación negativa con una curvatura significativa, indicando una relación inversa entre dureza y desgaste. Esto concuerda con la teoría que sugiere que, a mayor dureza, menor desgaste.

Para el proceso SMAW el valor de “a” (726372.6) es extremadamente alto en comparación con FCAW y GMAW. Esto ocurre porque el modelo potencia tiende a exagerar los coeficientes cuando los datos presentan alta dispersión o grandes diferencias en escala, como es en este caso que trabajamos valores demasiado pequeños para la tasa de desgaste en comparación con los valores de dureza.

El parámetro “b” (exponente negativo) refuerza la relación inversa entre dureza y desgaste para todos los procesos, siendo más pronunciado en SMAW (-3.4149). Para el metal base se puede apreciar una pequeña inclinación en la línea lo que muestra una leve relación inversa pero no es muy concluyente.

Una de las razones por la cual el metal base no parece tener una relación clara en los análisis estadísticos a diferencia de los procesos de soldadura es que en el metal base, la microestructura es uniforme, sin cambios significativos en las propiedades mecánicas como la dureza. Esto genera datos más constantes, reduciendo la variabilidad necesaria para identificar una correlación clara

entre dureza y desgaste a diferencia de las probetas soldadas, ya que la dureza varía debido a las zonas afectadas térmicamente (HAZ) y las zonas de fusión, donde los procesos de soldadura introducen microestructuras endurecidas. Esta variación permite observar tendencias más marcadas.

Tabla 11.

Valores de los métodos estadísticos

		FCAW	SMAW	GMAW	MB
Pearson	Coef. de correlación:	-0.7853	-0.82959	-0.89318	-0.10568
	Valor p:	0.02092	0.01084	0.00280	0.80331
Spearman	Coef. de correlación:	-0.73809	-0.73809	-0.73809	-0.02380
	Valor p:	0.03655	0.03655	0.03655	0.95537
Kendall Tau	Coef. de correlación:	-0.64285	-0.49999	-0.57142	-0.07142
	Valor p:	0.03115	0.10868	0.06101	0.90486
Bootstrap	Correlación media:	-0.79295	-0.7807	-0.88138	-0.10915
	Intervalo de confianza:	(-0.9710, -0.4493)	(-0.9800, -0.1878)	(-0.9738, -0.7276)	(-0.8486, 0.6781)
Ajuste Exponencial	a:	1	1	1	1
	b:	1	1	1	1
	c:	0.02158	0.02841	0.02332	0.03254
Ajuste Potencial	a:	18.20947	726372.6007	1109.57535	1.05732
	b:	-1.33445	-3.41491	-2.15842	-0.70159

5.3 Coeficiente de determinación (R^2) y análisis de residuos

El coeficiente de determinación, denotado como R^2 , es una métrica estadística que evalúa la proporción de la variabilidad en la variable dependiente que es explicada por la variable independiente en un modelo de regresión. Matemáticamente, se expresa como:

$$R^2 = 1 - \frac{SS_{res}}{SS_{tot}} \quad (8)$$

donde:

- SS_{res} es la suma de los cuadrados de los residuos (diferencia entre los valores observados y los valores predichos por el modelo),
- SS_{tot} es la suma de los cuadrados totales (variabilidad total en la variable dependiente).

El valor de R^2 varía entre 0 y 1, donde un valor más cercano a 1 indica que el modelo explica mejor la variabilidad de los datos, mientras que valores cercanos a 0 sugieren que el modelo no es adecuado para describir la relación entre las variables.

El análisis de residuos es una herramienta fundamental en la validación de modelos de regresión, ya que permite evaluar la adecuación del modelo ajustado a los datos. Los residuos son las diferencias entre los valores observados y los valores predichos por el modelo:

$$Residuo = y_{obs} - y_{pred} \quad (9)$$

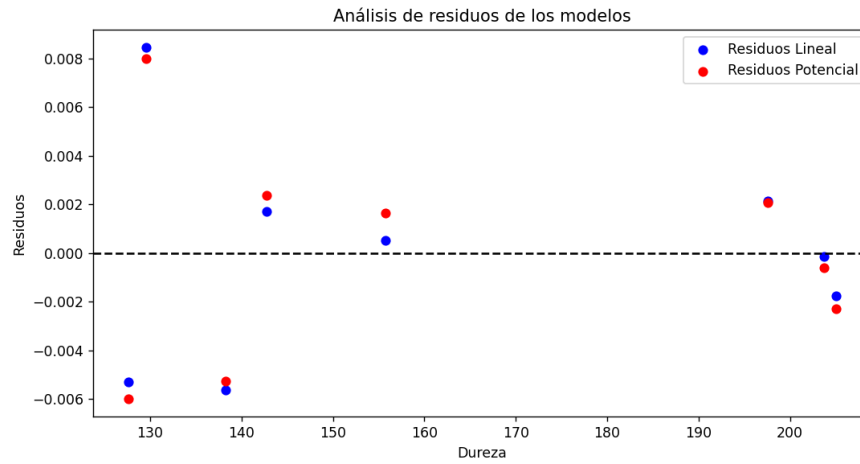
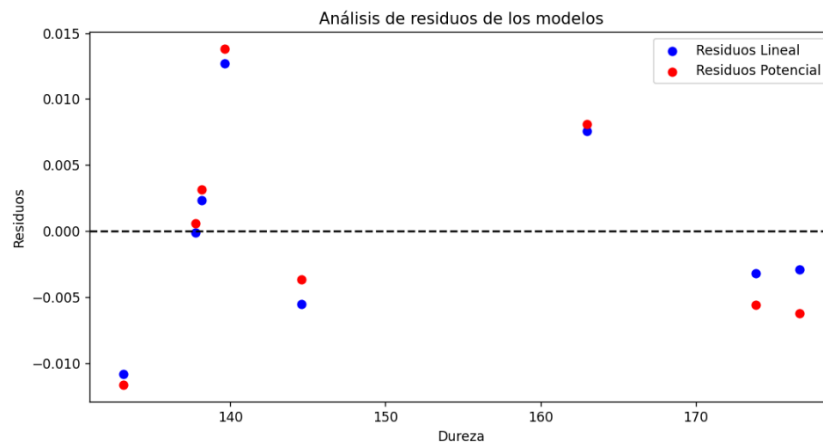
Donde y_{obs} representa los valores observados de la variable dependiente (desgaste) y los valores estimados a partir del modelo.

Un análisis detallado de los residuos permite verificar varios aspectos clave:

- **Distribución aleatoria:** Si los residuos están aleatoriamente distribuidos alrededor de cero, sin patrones evidentes, esto indica que el modelo se ajusta bien a los datos.

- **Normalidad:** La normalidad de los residuos se evalúa mediante pruebas estadísticas (como Shapiro-Wilk o Kolmogorov-Smirnov) y gráficos de cuantiles normales (Q-Q plot). La normalidad es un supuesto importante en muchos modelos de regresión.
- **Homocedasticidad:** Si la varianza de los residuos es constante a lo largo del rango de valores de la variable independiente, el modelo es homocedástico. Si, en cambio, los residuos muestran un patrón donde la variabilidad aumenta o disminuye con la variable independiente, hay heterocedasticidad, lo que indica que el modelo puede no ser adecuado.
- **Autocorrelación:** Se verifica si los residuos presentan correlación entre sí, lo que podría indicar que la estructura del modelo no es la correcta.

El coeficiente de determinación y el análisis de residuos son herramientas fundamentales para evaluar la calidad de un modelo de regresión. En el estudio de la relación entre dureza y desgaste en aceros inoxidables AISI 316L soldados, la combinación de ambos métodos permite seleccionar el modelo más adecuado, garantizando no solo un buen ajuste estadístico sino también una representación fiel de la relación física entre las variables. La correcta aplicación de estos análisis es crucial para obtener conclusiones confiables y fundamentadas en la comparación entre dureza y desgaste, lo que permitirá mejorar la comprensión de los mecanismos de deterioro en materiales soldados. Principalmente se hizo solo con los modelos lineal y potencial, ya que el modelo exponencial no mostró ningún tipo de relación por lo que se descartó de una vez. (Lani, 2025)

Figura 33 .*Análisis de residuos para FCAW***Coefficiente de determinación para FCAW:****R² Lineal: 0.6067****R² Potencial: 0.6565****Figura 34.***Análisis de residuos para SMAW*

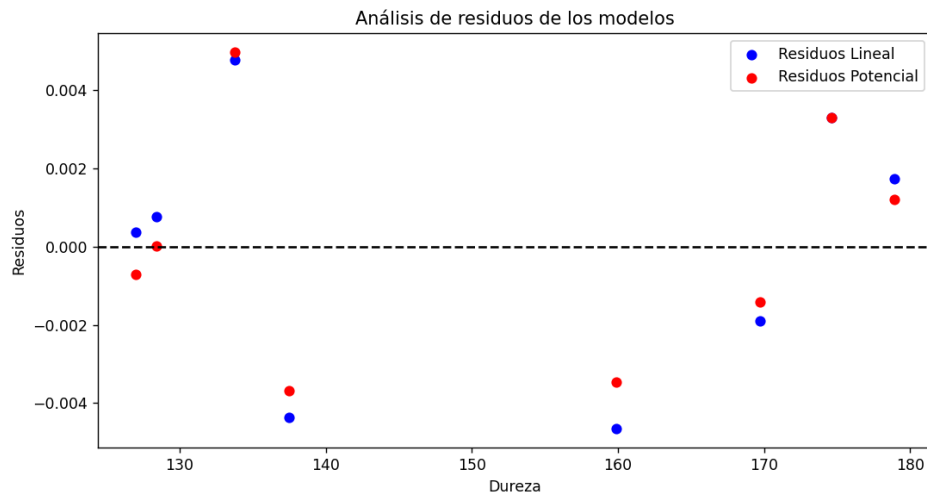
Coefficiente de determinación para SMAW:

R² Lineal: 0.6182

R² Potencial: 0.6823

Figura 35.

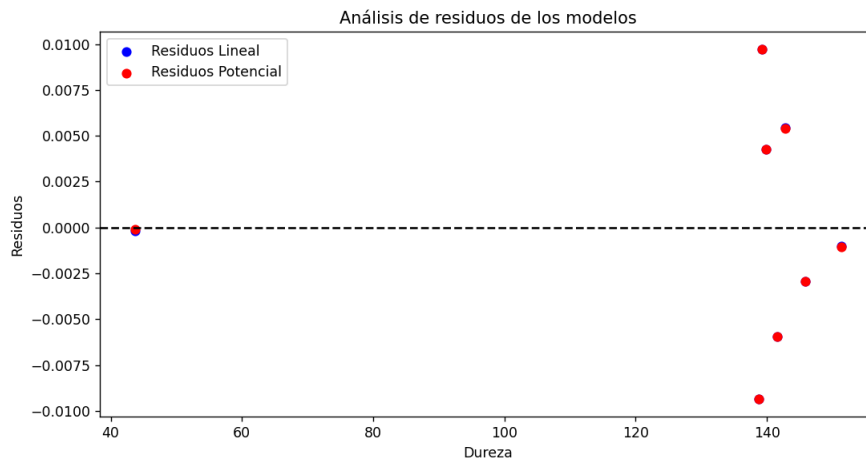
Análisis de residuos para GMAW



Coefficiente de determinación para GMAW:

R² Lineal: 0.7978

R² Potencial: 0.8394

Figura 36.*Análisis de residuos para MB***Coefficiente de determinación para MB:****R² Lineal:** 0.0006**R² Potencial:** 0.0004

De acuerdo con los resultados, el modelo potencial mostró el mayor coeficiente de determinación (R^2) en todos los casos, excepto en el metal base, confirmando que es el ajuste más adecuado para describir la relación entre dureza y desgaste en los materiales soldados.

En el metal base, el modelo lineal tuvo un desempeño similar o superior, y los coeficientes de determinación fueron bajos, indicando una mayor dispersión de los datos. Esto sugiere que, a diferencia de las zonas soldadas, la relación dureza-desgaste en el metal base no es tan dominante y puede estar influenciada por otros factores, como su microestructura original o las condiciones del ensayo.

6. Conclusiones

- Los resultados estadísticos confirman que existe una correlación inversa entre la dureza y el desgaste. El proceso FCAW, con la mayor dureza promedio reportada, muestra la menor tasa de desgaste, seguido por GMAW, SMAW y por último el metal base. Este comportamiento es consistente tanto con los datos obtenidos en este trabajo como con los hallazgos previos del trabajo de doctorado “*Modelo matemático para selección de proceso de soldadura por arco eléctrico basado en características estáticas y dinámicas*” (Bohórquez, 2023) lo que valida la metodología empleada.
- Aunque la dureza es un factor determinante, los datos y la literatura revisada resaltan que la microestructura del acero inoxidable AISI 316L, como el tamaño del grano, tiene un impacto significativo en su resistencia al desgaste. La relación no es exclusivamente lineal; características como la dispersión de fases duras y el confinamiento de la deformación plástica también influyen de manera crítica.
- Los ajustes potenciales realizados para cada proceso, particularmente en SMAW y GMAW, evidenciaron una fuerte relación entre dureza y desgaste, destacándose como el modelo más efectivo, confirmado por el coeficiente de determinación, para describir esta relación en comparación con otros modelos empleados. Este resultado resalta tanto la utilidad práctica de los modelos potenciales como su capacidad predictiva en el análisis del comportamiento de materiales, relacionando propiedades mecánicas y microestructurales. Su eficacia subraya su relevancia

como herramienta clave para predecir y optimizar el desempeño de materiales en diversas aplicaciones industriales.

- Las variaciones observadas en las tasas de desgaste y dureza entre los procesos SMAW, GMAW y FCAW son acordes con la literatura científica. Estas diferencias reflejan cómo la combinación de parámetros de soldadura, características térmicas y microestructurales pueden influir tanto en la dureza como en el comportamiento frente al desgaste.
- Este trabajo ofrece un análisis estadístico integral y una comparación empírica entre desgaste y dureza, aportando evidencia para diseñar criterios de selección de procesos de soldadura basados en el rendimiento frente al desgaste. Los resultados son útiles a nivel local y regional, especialmente para aplicaciones industriales que involucran aceros inoxidable en condiciones de desgaste.

7. Recomendaciones

Para garantizar resultados fiables y consistentes en los ensayos de desgaste, es fundamental tomar ciertas precauciones durante la preparación y ejecución de las pruebas. En primer lugar, se debe asegurar que las probetas estén firmemente fijadas en la máquina de ensayo, utilizando mecanismos como cinta adhesiva doble faz y pernos centrales, como se realizó en este estudio. Además, es imprescindible llevar a cabo un rectificado de las probetas en la superficie de apoyo para garantizar una adecuada planicidad, minimizando irregularidades que podrían influir en los resultados.

Otro aspecto clave es el pulido de las probetas hasta obtener un acabado a espejo, avanzando de manera gradual en la granulometría de las lijas y evitando la formación de caras. Esto no solo mejora la calidad del contacto durante las pruebas, sino que asegura una mayor precisión en los datos obtenidos.

Asimismo, durante el lijado, es esencial refrigerar con agua para prevenir el sobrecalentamiento ocasionado por la fricción, ya que el calor podría alterar la microestructura, especialmente en los cordones de soldadura.

Finalmente, es recomendable mantener constantes las condiciones de operación del equipo de ensayo, como la carga y la velocidad angular, y realizar réplicas de las pruebas para validar la consistencia de los resultados. Estas medidas no solo refuerzan la confiabilidad de los ensayos, sino que también facilitan la reproducibilidad en investigaciones futuras.

Referencias Bibliográficas

- AENOR. (2005). UNE-EN ISO 15614-1 Especificación y cualificación de procedimientos de soldeo para materiales metálicos. [https://portal.aenormas.aenor.com/revista/pdf/feb18/\(EX\)UNE-EN_ISO_15614-1=2018.pdf](https://portal.aenormas.aenor.com/revista/pdf/feb18/(EX)UNE-EN_ISO_15614-1=2018.pdf)
- American Welding Society. (2001). *Standard Welding Terms and Definitions from IHS*.
- Aristizábal Castrillón, A., & Manrique Torres, M. R. (2017). *Ensayos de dureza*. (Editorial Pontificia Universidad Javeriana, Ed.; Primera edición).
- Arora, H., Singh, R., & Brar, G. S. (2019). Thermal and structural modelling of arc welding processes: A literature review. *Measurement and Control (United Kingdom)*, 52(7–8), 955–969. <https://doi.org/10.1177/0020294019857747>
- Askeland, D. R., & Wright, W. J. (2011). *Ciencia e ingeniería de materiales* (7 edition). Cengage.
- Bhushan, B. (2013). *Introduction to tribology* (Ltd. John Wiley & Sons, Ed.; 2nd Edition).
- Blau, Peter. (1992) ASM Handbook, volume 18 Friction, Lubrication, and Wear Technology. United States of America : ASM International.
- Bohórquez, O. (2023). *Modelo matemático para selección de proceso de soldadura por arco eléctrico basado en características estáticas y dinámicas*. Universidad Industrial de Santander.
- Budinski, K. G. (2014). *Friction, wear, and erosion atlas* (CRC Press, Ed.). Taylor & Francis Group, LLC.
- Deutsches Institut für Normung. (1979). *Verschleiß; Begriffe, Systemanalyse von Verschleißvorgängen, Gliederung des Verschleißgebietes* (DIN 50320). Recuperado de <https://www.dinmedia.de/en/standard/din-50320/1647273>

Escobar Peñafiel, P. S. (2018). *ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS DE UN SISTEMA MECÁNICO PIN ON DISK BAJO NORMA ASTM G-99 ENTRE ACERO AISI 1018 Y EL RELLENO DE SOLDADURA SMAW CON ELECTRODO AWS ENi-CI SOBRE HIERRO FUNDIDO NODULAR Y SU INFLUENCIA EN EL DESGASTE* [TRABAJO EXPERIMENTAL]. UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO.

González, J. F. (2023). *Afectación en la resistencia a la fatiga en aceros inoxidable con juntas soldadas*. Universidad Industrial de Santander.

Kalpakjian, S. y Schmid, S. (2002). *Manufactura, ingeniería y tecnología*. Cuarta Edición. Pearson Educación. México.

Kendall, M.G., (1955). *Rank Correlation Methods*. New York : Hafner Publishing Co.

Kou Sindo. (2003). *WELDING METALLURGY* (Second). John Wiley & Sons, Inc.

Lani, J. (2025, 6 febrero). *Coefficient of Determination*. Statistics Solutions.

<https://www.statisticssolutions.com/coefficient-of-determination/>

Ledesma, R. (2008). *Introducción al Bootstrap*. Vol. 4. Universidad Nacional de Mar del Plata.

López, J., & Vitriago, J. (2011). *DETERMINACIÓN DE LA MICRODUREZA Y LA METALURGIA DE UNIONES SOLDADAS A TOPE EN FUNCIÓN DEL TIPO DE EVESTIMIENTO DEL ELECTRODO EN ACERO ASTM A-36 Y ASTM A-569*.

Norman E. Dowling. (2012). *Mechanical Behavior of Materials* (Katakam Siva Prasad & R. Narayanasamy, Eds.; 4th Edition). Angshuman Chakraborty.

Ó Bien, R.L (1996). *Manual de soldadura. Soldadura por arco de metal y gas*. American Welding Society. Tomo 1. Octava Edición.

Phillips, D. H. (2016). *Welding engineering an introduciton* (1st Edition). John Wiley & Sons, Ltd.

- Pinilla, J. & Gil, D. (2014) *Transformaciones logarítmicas en regresión simple. Vol. 4 . PP.89-98* Universidad Santo Tomas.
- Restrepo, L. & González, L. (2007) *De Pearson a Spearman*. J. Rev Col Cienc Pec. Universidad de Antioquia
- William D. Callister, Jr., & David G. Rethwish. (2018). *Materials Science and Engineering An Introduction* (10th edition).
- Zeng, H. (2013). Polymer Adhesion, Friction, and Lubrication. In *Polymer Adhesion, Friction, and Lubrication*. John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9781118505175.fmatter>

Apéndices

Apéndice A. Norma ASTM G99

This international standard was developed in accordance with internationally recognized principles on standardization established in the Decision on Principles for the Development of International Standards, Guides and Recommendations issued by the World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee.



Designation: G99 – 23

Standard Test Method for Wear and Friction Testing with a Pin-on-Disk or Ball-on-Disk Apparatus¹

This standard is issued under the fixed designation G99; the number immediately following the designation indicates the year of original adoption or, in the case of revision, the year of last revision. A number in parentheses indicates the year of last reapproval. A superscript epsilon (ϵ) indicates an editorial change since the last revision or reapproval.

1. Scope

1.1 This test method covers a laboratory procedure for determining the wear of materials and friction during sliding using a pin-on-disk apparatus. Materials are tested in pairs under nominally non-abrasive conditions. The principal areas of experimental attention in using this type of apparatus to measure wear are described.

1.2 This test method standard uses a specific set of test parameters (load, sliding speed, materials, etc.) that were then used in an interlaboratory study (ILS), the results of which are given here (Tables 1 and 2). (This satisfies the ASTM form in that “The directions for performing the test should include all of the essential details as to apparatus, test specimen, procedure, and calculations needed to achieve satisfactory precision and bias.”) Any user should report that they “followed the requirements of ASTM G99,” where that is true.

1.3 Now it is often found in practice that users may follow all instructions given here, but choose other test parameters, such as load, speed, materials, environment, etc., and thereby obtain different test results. Such a use of this standard is encouraged as a means to improve wear testing methodology. However, it must be clearly stated in any report that, while the directions and protocol in Test Method G99 were followed (if true), the choices of test parameters were different from Test Method G99 values, and the test results were therefore also different from the Test Method G99 results. This use should be described as having “followed the procedure of ASTM G99.” All test parameters that were used in such case must be stated.

1.4 The values stated in SI units are to be regarded as standard. No other units of measurement are included in this standard.

1.5 *This standard does not purport to address all of the safety concerns, if any, associated with its use. It is the responsibility of the user of this standard to establish appro-*

priate safety, health, and environmental practices and determine the applicability of regulatory limitations prior to use.

1.6 *This international standard was developed in accordance with internationally recognized principles on standardization established in the Decision on Principles for the Development of International Standards, Guides and Recommendations issued by the World Trade Organization Technical Barriers to Trade (TBT) Committee.*

2. Referenced Documents

2.1 ASTM Standards:²

E178 Practice for Dealing With Outlying Observations

G40 Terminology Relating to Wear and Erosion

G115 Guide for Measuring and Reporting Friction Coefficients

G117 Guide for Calculating and Reporting Measures of Precision Using Data from Interlaboratory Wear or Erosion Tests (Withdrawn 2016)³

2.2 DIN Standard:⁴

DIN 50324 Testing of Friction and Wear

3. Terminology

3.1 Definitions:

3.1.1 For definitions of terms used in this test method, refer to Terminology G40.

4. Summary of Test Method

4.1 For the pin-on-disk wear test, two specimens are required. One, a pin with a radiused tip, is positioned perpendicular to the other, usually a flat circular disk. A ball, rigidly held to ensure no rotation about any axis, is often used as the pin specimen. The test machine causes either the disk specimen or the pin specimen to revolve about the disk center. In either

² For referenced ASTM standards, visit the ASTM website, www.astm.org, or contact ASTM Customer Service at service@astm.org. For Annual Book of ASTM Standards volume information, refer to the standard's Document Summary page on the ASTM website.

³ The last approved version of this historical standard is referenced on www.astm.org.

⁴ Available from Beuth Verlag GmbH (DIN-- DIN Deutsches Institut für Normung e.V.), Burggrafenstrasse 6, 10787, Berlin, Germany, <http://www.en.din.de>.

¹ This test method is under the jurisdiction of ASTM Committee G02 on Wear and Erosion and is the direct responsibility of Subcommittee G02.40 on Non-Abrasive Wear.

Current edition approved Nov. 1, 2023. Published November 2023. Originally approved in 1990. Last previous edition approved in 2017 as G99 – 17. DOI: 10.1520/G0099-23.



TABLE 1 Characteristics of the Interlaboratory Wear Test Specimens

NOTE 1—See Note 5 for information.

	Composition (weight%)	Microstructure	Hardness (HV 10)	Roughness ^A	
				R_z (mean) (μm)	R_a (mean) (μm)
Steel ball (100 Cr6) (AISI 52 100) ^B Diameter 10 mm	1.35 to 1.65 Cr ← 0.95 to 1.10 C 0.15 to 0.35 Si 0.25 to 0.45 Mn	martensitic with minor carbides and austenite	838 ± 21	0.100	0.010
Steel disc (100 Cr6) (AISI 52 100) ^C Diameter 40 mm	← <0.030 P ← <0.030 S	martensitic with minor carbides and austenite	852 ± 14	0.952	0.113
Alumina ball, diameter = 10 mm ^D	← 95 % Al ₂ O ₃ (with addi- tives of TiO ₂ , MgO, and ZnO)	equi-granular alpha alumina with very minor secondary phases	1610 ± 101 (HV 0.2)	1.369	0.123
Alumina disc, diameter = 40.6 mm ^D	←		1599 ± 144 (HV 0.2)	0.968	0.041

^A Measured by stylus profilometry. R_z is maximum peak-to-valley roughness. R_a is arithmetic average roughness.^B Standard ball-bearing balls (SKF).^C Standard spacers for thrust bearings (INA).^D Manufactured by Compagnie Industrielle des Ceramiques Electroniques, France.TABLE 2 Results of the Interlaboratory Tests^A

NOTE 1—See Footnote A for test conditions.

NOTE 2—Numbers in parentheses refer to all data received in the tests. In accordance with Practice E178, outlier data values were identified in some cases and discarded, resulting in the numbers without parentheses. The differences are seen to be small.

NOTE 3—Values preceded by ± are one standard deviation.

NOTE 4—Data were provided by 28 laboratories.

NOTE 5—Calculated quantities (for example, wear volume) are given as mean values only.

NOTE 6—Values labeled "NM" were found to be smaller than the reproducible limit of measurement.

NOTE 7—A similar compilation of test data is given in DIN 50324.

Results (ball) (disk)	Specimen Pairs			
	Steel-steel	Alumina-steel	Steel-alumina	Alumina-alumina
Ball wear scar diameter (mm)	2.11 ± 0.27 (2.11 ± 0.27)	NM	2.08 ± 0.35 (2.03 ± 0.41)	0.3 ± 0.06 (0.3 ± 0.06)
Ball wear volume (10 ⁻³ mm ³)	198 (198)	...	186 (169)	0.08 (0.08)
Number of values	102 (102)	...	60 (64)	56 (59)
Disk wear scar width (mm)	NM	0.64 ± 0.12 (0.64 ± 0.12)	NM	NM
Disk wear volume (10 ⁻³ mm ³)	...	480 (480)
Number of values	...	60 (60)
Friction coefficient	0.60 ± 0.11	0.76 ± 0.14	0.60 ± 0.12	0.41 ± 0.08
Number of values	109	75	64	76

^A Test conditions: $F = 10 \text{ N}$; $v = 0.1 \text{ ms}^{-1}$; $T = 23^\circ\text{C}$; relative humidity range 12 to 78 %; laboratory air; sliding distance 1000 m; wear track (nominal) diameter = 32 mm; materials: steel = AISI 52 100; and alumina = α -Al₂O₃.

case, the sliding path is a circle on the disk surface. The plane of the disk may be oriented either horizontally or vertically.

NOTE 1—Wear results may differ for different orientations.

4.1.1 The pin specimen is pressed against the disk at a specified load usually by means of an arm or lever and attached weights. Other loading methods have been used, such as hydraulic or pneumatic.

NOTE 2—Wear results may differ for different loading methods.

4.2 Wear results are reported as volume loss in cubic millimetres for the pin and the disk separately. When two

different materials are tested, it is recommended that each material be tested in both the pin and disk positions.

4.3 The amount of wear is determined by measuring appropriate linear dimensions of both specimens before and after the test, or by weighing both specimens before and after the test. If linear measures of wear are used, the length change or shape change of the pin, and the depth or shape change of the disk wear track (in millimetres) are determined by any suitable metrological technique, such as contact profilometry. Linear measures of wear are converted to wear volume (in cubic millimetres) by using appropriate geometric relations. Linear


TABLE 3 Test Parameters Used for Interlaboratory Tests

Normal Force (N)	10
Sliding Speed (m/s)	0.1
Sliding Distance (m)	1000
Pin-end Diameter, spherical (mm)	10
Environment	air
Temperature, nominal (°C)	23
Humidity, (%RH)	12–78
Track Diameter (mm)	25–35

measures of wear are used frequently in practice since mass loss is often too small to measure precisely. If loss of mass is measured, the mass loss value is converted to volume loss (in cubic millimetres) using an appropriate value for the specimen density.

4.4 Wear results are usually obtained by conducting a test for a selected sliding distance and for selected values of load and speed. One set of test conditions that was used in an interlaboratory measurement series is given in Tables 1-3. Other test conditions may be selected depending on the purpose of the test. In such cases, the user should report their results as “following the procedure of ASTM G99.”

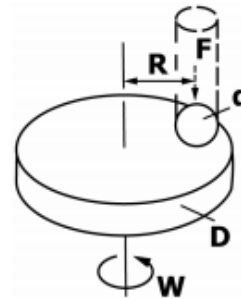
4.5 Wear results may in some cases be reported as plots of wear volume versus sliding distance using different specimens for different distances. Such plots may display non-linear relationships between wear volume and distance over certain portions of the total sliding distance, and linear relationships over other portions. Causes for such differing relationships include initial “break-in” processes, transitions between regions of different dominant wear mechanisms, and so forth. The extent of such non-linear periods depends on the details of the test system, materials, and test conditions.

4.6 It is not recommended that continuous wear depth data obtained from in-situ direct measurement (for example, position-sensing gages, ultrasound) be used because of the complicated effects of wear debris and transfer films present in the contact gap, and interferences from thermal expansion or contraction.

4.7 If required, friction force should be recorded during a test. A tension-compression load cell or similar force-sensing device may be used to measure the friction forces generated during sliding. Calibration of the friction force is required. Modern data acquisition systems capable of sampling frequencies in excess (at least two orders of magnitude is suggested, that is, at least two measurements per revolution) of the rotating frequency of the test being conducted are preferred. The method of sensing and recording friction force during the test shall be described in the testing report. Refer to Guide G115 for further guidance.

5. Significance and Use

5.1 The amount of wear in any system will, in general, depend upon the number of system factors such as the applied load, machine characteristics, sliding speed, sliding distance, the environment, and the material properties. The value of any wear test method lies in predicting the relative ranking of material combinations. Since the pin-on-disk test method does not attempt to duplicate all the conditions that may be



NOTE 1— F is the normal force on the pin, d is the pin or ball diameter, D is the disk diameter, R is the wear track radius, and w is the rotation velocity of the disk.

FIG. 1 Schematic of Pin-on-Disk Wear Test System

experienced in service (for example, lubrication, load, pressure, contact geometry, removal of wear debris, and presence of corrosive environment), there is no insurance that the test will predict the wear rate of a given material under conditions differing from those in the test.

5.2 The use of this test method will fall in one of two categories: (1) the test(s) will follow all particulars of the standard, and the results will have been compared to the ILS data (Table 2), or (2) the test(s) will have followed the procedures/methodology of Test Method G99 but applied to other materials or using other parameters such as load, speed, materials, etc., or both. In this latter case, the results cannot be compared to the ILS data (Table 2). Further, it must be clearly stated what choices of test parameters/materials were chosen.

6. Apparatus

6.1 *General Description*—Fig. 1 shows a schematic drawing of a typical pin-on-disk wear test system.⁵ One type of typical system consists of a driven spindle and chuck for holding the revolving disk, a lever-arm device to hold the pin, and attachments to allow the pin specimen to be forced against the revolving disk specimen with a controlled load. Another type of system loads a pin revolving about the disk center against a stationary disk. In any case the wear track on the disk is a circle, involving multiple wear passes on the same track. The system may have a friction force measuring system, for example, a load cell, that allows the coefficient of friction to be determined.

6.2 *Motor Drive*—A variable speed motor, capable of maintaining constant speed ($\pm 1\%$ of rated full load motor speed) under load is required. The motor should be mounted in such a manner that its vibration does not affect the test. Rotating speeds are typically in the range 1 r/min to 2000 r/min.

6.3 *Revolution Counter*—The machine shall be equipped with a hardware- or software-based revolution counter or its equivalent that will record the number of disk revolutions, and

⁵ Three commercially-built pin-on-disk machines were either involved in the interlaboratory testing for this standard or submitted test data that compared adequately to the interlaboratory test data. Further information on these machines can be found in Research Report RR:G02-1008.



preferably have the ability to shut off the machine after a pre-selected number of revolutions.

6.4 Pin Specimen Holder and Lever Arm—In one typical system, the stationary specimen holder is attached to a lever arm that has a pivot. Adding weights, as one option of loading, produces a test force proportional to the mass of the weights applied. Ideally, the pivot of the arm should be located in the plane of the wearing contact to avoid extraneous loading forces due to the sliding friction. The pin holder and arm must be of substantial construction to reduce vibrational motion during the test.

6.5 Wear Measuring Systems—Instruments to obtain linear measures of wear should have a sensitivity of 2.5 μm or better. Any balance used to measure the mass loss of the test specimen shall have a sensitivity of 0.1 mg or better; in low wear situations greater sensitivity may be needed.

NOTE 3—It is possible to directly measure the wear volume lost from the surface of a flat specimen disk using optical non-contact profilometry methods (for example, focus variation, white light interferometry). These methods may be used here, and the results reported; however, a statement should be provided to indicate that the calculation method is not in accordance with the provisions of this test method because these methods were not used to collect the data presented in [Table 2](#).

7. Test Specimens and Sample Preparation

7.1 Materials—This test method may be applied to a variety of materials. The only requirement is that specimens having the specified dimensions can be prepared and that they will withstand the stresses imposed during the test without failure or excessive flexure. The materials being tested shall be described by dimensions, surface finish, material type, form, composition, microstructure, processing treatments, and indentation hardness (if appropriate).

7.2 Test Specimens—The typical pin specimen is cylindrical or spherical in shape. Typical cylindrical or spherical pin specimen diameters range from 2 mm to 10 mm. The typical disk specimen diameters range from 30 mm to 100 mm and have a thickness in the range of 2 mm to 10 mm. Specimen dimensions used in an interlaboratory test with pin-on-disk systems are given in [Table 1](#).

7.3 Surface Finish—A ground surface roughness of 0.8 μm arithmetic average or less is usually recommended.

NOTE 4—Rough surfaces make wear scar measurement difficult.

7.3.1 Care must be taken in surface preparation to avoid subsurface damage that alters the material significantly. Special surface preparation may be appropriate for some test programs. State the type of surface and surface preparation in the report.

8. Test Parameters

8.1 Load—Values of the force in Newtons at the wearing contact.

8.2 Speed—The relative sliding speed between the contacting surfaces in metres per second.

8.3 Distance—The accumulated sliding distance in meters.

8.4 Temperature—The temperature of one or both specimens at locations close to the wearing contact. It should be

noted that the actual temperature at the contact may be much higher than the temperature of the surroundings, especially when testing materials in dry conditions. Therefore, it is important to provide details of the temperature measurement used.

8.5 Atmosphere—The atmosphere (laboratory air, relative humidity, argon, lubricant, and so forth.) surrounding the wearing contact.

9. Procedure

9.1 Immediately prior to testing, and prior to measuring or weighing, clean and dry the specimens. Take care to remove all dirt and foreign matter from the specimens. Use non-chlorinated, non-film-forming cleaning agents and solvents. Dry materials with open grains to remove all traces of the cleaning fluids that may be entrapped in the material. Steel (ferromagnetic) specimens having residual magnetism should be demagnetized. Report the methods used for cleaning.

9.2 Measure appropriate specimen dimensions to the nearest 2.5 μm or weigh the specimens to the nearest 0.0001 g.

9.3 Insert the disk securely in the holding device so that the disk is fixed perpendicular ($\pm 1^\circ$) to the axis of the resolution.

9.4 Insert the pin specimen securely in its holder and, if necessary, adjust so that the specimen is perpendicular ($\pm 1^\circ$) to the disk surface when in contact, in order to maintain the necessary contact conditions.

9.5 Add the proper mass to the system lever or bale to develop the selected force pressing the pin against the disk.

9.6 Start the motor and adjust the speed to the desired value while holding the pin specimen out of contact with the disk. Stop the motor.

9.7 Set the revolution counter (or equivalent) to the desired number of revolutions.

9.8 Begin the test with the specimens in contact under load. The test is stopped when the desired number of revolutions is achieved. Tests should not be interrupted or restarted.

9.9 Remove the specimens and clean off any loose wear debris. Note the existence of features on or near the wear scar such as: protrusions, displaced metal, discoloration, microcracking, or spotting.

9.10 Remeasure the specimen dimensions to the nearest 2.5 μm or reweigh the specimens to the nearest 0.0001 g, as appropriate.

9.11 Repeat the test with additional specimens to obtain sufficient data for statistically significant results.

10. Calculation and Reporting

10.1 The wear measurements should be reported as the volume loss in cubic millimetres for the pin and disk, separately.

10.1.1 Use the following equations for calculating volume losses when the pin has initially a spherical end shape of radius R and the disk is initially flat, under the conditions that only one of the two members wears significantly:



G99 – 23

pin (spherical end) volume loss, mm³ (1)

$$= \frac{\pi (\text{wear scar diameter, mm})^4}{64 (\text{sphere radius, mm})}$$

assuming that there is *no significant disk wear*. This is an approximate geometric relation that is correct to 1 % for (wear scar diameter/sphere radius) <0.3, and is correct to 5 % for (wear scar diameter/sphere radius) <0.7. The exact equation is given in [Appendix X1](#).

disk volume loss, mm³ (2)

$$= \frac{\pi (\text{wear track radius, mm})(\text{track width, mm})^3}{6 (\text{sphere radius, mm})}$$

assuming that there is *no significant pin wear*. This is an approximate geometric relation that is correct to 1 % for (wear track width/sphere radius) <0.3, and is correct to 5 % for (wear track width/sphere radius) <0.8. The exact equation is given in [Appendix X1](#).

10.1.2 Calculation of wear volumes for pin shapes of other geometries use the appropriate geometric relations, recognizing that assumptions regarding wear of each member may be required to justify the assumed final geometry.

10.1.3 Wear scar measurements should be done at least at two representative locations on the pin surfaces and disk surfaces, and the final results averaged. These positions should be recorded and particular care should be taken when identifying similar measurement points that are considered to be the extremes of the wear scar where significant plastic deformation has caused material pile up at the edges.

10.1.4 In situations where both the pin and the disk wear significantly, it will be necessary to measure the wear depth profile on both members. A suitable method uses stylus profiling. Profiling is the only approach to determine the exact final shape of the wear surfaces and thereby to calculate the volume of material lost due to wear. In the case of disk wear, the average wear track profile can be integrated to obtain the track cross-section area, and multiplied by the average track length to obtain disk wear volume. In the case of pin wear, the wear scar profile can be measured in two orthogonal directions, the profile results averaged, and used in a figure-of-revolution calculated for pin wear volume.

10.1.4.1 If little wear has occurred as evidenced by very small wear scars, or if the wear scars are covered by any solid film formed during wear, it is best practice to use surface profilometry to determine wear volume. Further, if the amount of pin wear is small and the pin wear scar is not flat, profilometry must be used.

10.1.5 While mass loss results may be used internally in laboratories to compare materials of equivalent densities, this test method reports wear as volume loss so that there is no confusion caused by variations in density. Take care to use and report the best available density value for the materials tested when calculating volume loss from measured mass loss.

10.1.6 Use the following equation for conversion of mass loss to volume loss.

$$\text{volume loss, mm}^3 = \frac{\text{mass loss, g}}{\text{density, g/cm}^3} \times 1000. \quad (3)$$

10.2 If the materials being tested exhibit considerable transfer between specimens without loss from the system, volume

loss may not adequately reflect the actual amount or severity of wear. In these cases, this test method for reporting wear should not be used.

10.3 Friction coefficient (defined in Terminology [G40](#)) should be reported when available. Describe the conditions associated with the friction measurements, for example, initial, steady-state, and so forth.

10.4 Adequate specification of the materials tested is important. As a minimum, the report should specify material type, form, processing treatments, surface finish, and specimen preparation procedures. If appropriate, indentation hardness should be reported.

11. Precision and Bias⁶

11.1 Statement of Precision:

11.1.1 The precision of the measurements obtained with this test method will depend upon the test parameters chosen. The reproducibility of repeated tests on the same material will depend upon material homogeneity, machine and material interaction, and careful adherence to the specified procedure by the machine operator. Normal variations in the wear test procedure will tend to reduce the precision of the test method as compared to the precision of such material property tests as hardness or density.

11.1.2 [Table 2](#) contains wear data obtained from interlaboratory tests. Mean and standard deviation values are given for all measured quantities.

11.1.3 Statistical analysis (using Guide [G117](#)) of the steel vs. steel ball wear scar diameter results for 24 laboratories leads to a mean and standard deviation of 2.14 and 0.29 mm, respectively. The 95 % repeatability limit (within-lab) was 0.37 mm, and the 95 % reproducibility limit (between-labs) was 0.81 mm. Statistical analysis of the steel vs. steel ball friction results for 25 laboratories leads to a mean and standard deviation of 0.60 and 0.11, respectively. The 95 % repeatability limit (within-lab) was 0.19, and the 95 % reproducibility limit (between-labs) was 0.32.

11.2 *Statement of Bias*—No bias can be assigned to these results since there are no absolute accepted values for wear.

11.3 *General Considerations*—Participants in the interlaboratory testing that led to the statements of precision and bias given above involved 28 laboratories, 2 different materials (4 material pairs), 1 test condition, and 3 to 5 replicate measurements each (see [Note 5](#)). Subsequent to this testing, data were received from another laboratory that utilized a commercial test machine. These data were found consistent with the results in the interlaboratory study.

NOTE 5—The interlaboratory data given in [Table 1](#) and [Table 2](#) resulted through the cooperation of thirty one institutions in seven countries with the help of national representatives within the Versailles Advanced Materials and Standards (VAMAS) working party on wear test methods.⁷

⁶ Supporting data have been filed at ASTM International Headquarters and may be obtained by requesting Research Report RR:G02-1008.

⁷ Czichos, H., Becker, S., and Lexow, J., *Wear*, Vol 114, 1987, pp. 109–130 and *Wear*, Vol 118, 1987, pp. 379–380.



12. Keywords

12.1 ceramic wear; friction; metal wear; non-abrasive; pin-on-disk; wear

APPENDIX

(Nonmandatory Information)

X1. EQUATIONS

X1.1 Exact equations for determining wear volume loss are as follows for:

X1.1.1 A spherical ended pin:

$$\text{pin volume loss} = (\pi h/6)[3d^2/4 + h^2] \quad (\text{X1.1})$$

where:

h = $r - [r^2 - d^2/4]^{1/2}$
 d = wear scar diameter, and
 r = pin end radius.

Assuming no significant disk wear.

X1.1.2 A disk:

$$\text{disk volume loss} = 2\pi R [r^2 \sin^{-1}(d/2r) - (d/4)(4r^2 - d^2)^{1/2}] \quad (\text{X1.2})$$

where:

R = wear track radius, and
 d = wear track width.

Assuming no significant pin wear.

ASTM International takes no position respecting the validity of any patent rights asserted in connection with any item mentioned in this standard. Users of this standard are expressly advised that determination of the validity of any such patent rights, and the risk of infringement of such rights, are entirely their own responsibility.

This standard is subject to revision at any time by the responsible technical committee and must be reviewed every five years and if not revised, either reapproved or withdrawn. Your comments are invited either for revision of this standard or for additional standards and should be addressed to ASTM International Headquarters. Your comments will receive careful consideration at a meeting of the responsible technical committee, which you may attend. If you feel that your comments have not received a fair hearing you should make your views known to the ASTM Committee on Standards, at the address shown below.

This standard is copyrighted by ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. Individual reprints (single or multiple copies) of this standard may be obtained by contacting ASTM at the above address or at 610-832-9585 (phone), 610-832-9555 (fax), or service@astm.org (e-mail); or through the ASTM website (www.astm.org). Permission rights to photocopy the standard may also be secured from the Copyright Clearance Center, 222 Rosewood Drive, Danvers, MA 01923, Tel: (978) 646-2600; http://www.copyright.com/

Apéndice B. Código análisis estadístico método Pearson y Spearman

```
import numpy as np

from scipy.stats import pearsonr, spearmanr

import matplotlib.pyplot as plt

#Datos FCAW

dureza = [203.71663, 205.04465, 197.60885, 155.79465,
142.76242, 138.25828, 127.65642, 129.59055]

desgaste = [0.01451, 0.01268, 0.01781, 0.02324, 0.02663,
0.02005, 0.02217, 0.03561]

#Datos SMAW

dureza = [176.68764, 173.88501, 162.98959, 144.59298,
139.62811, 133.12275, 137.74055, 138.16486]

desgaste = [0.00916, 0.01066, 0.02834, 0.02684, 0.04819,
0.02878, 0.03659, 0.03877]

#Datos GMAW

dureza = [178.90962, 169.73028, 174.59017, 159.87564,
137.50260, 127.01603, 128.39252, 133.75997]

desgaste = [0.01644, 0.01565, 0.01935, 0.01597, 0.02322,
0.03122, 0.03120, 0.03352]
```

```
#Datos MB

dureza = [138.77099, 141.52046, 145.82815, 139.27419,
142.75623, 151.33183, 43.75593, 139.89769]

desgaste = [0.02314, 0.02656, 0.02956, 0.04223, 0.03792,
0.03144, 0.03274, 0.03675]

# Correlación de Pearson

pearson_corr, p_value_pearson = pearsonr(dureza, desgaste)
print("Coeficiente de correlación de Pearson:", pearson_corr)
print("Valor p (Pearson):", p_value_pearson)

# Correlación de Spearman

spearman_corr, p_value_spearman = spearmanr(dureza,
desgaste)

print("Coeficiente de correlación de Spearman:",
spearman_corr)

print("Valor p (Spearman):", p_value_spearman)

plt.scatter(dureza, desgaste, color="blue")
plt.title("Relación entre Dureza y Desgaste")
plt.xlabel("Dureza (HVN)")
plt.ylabel("Tasa de desgaste (mg/m)")
plt.grid(True)
```

```
plt.show()
```

Apéndice C. Código análisis estadístico método Kendall Tau.

```
import numpy as np

from scipy.stats import kendalltau

import matplotlib.pyplot as plt

#Datos FCAW

dureza = [203.71663, 205.04465, 197.60885, 155.79465,
142.76242, 138.25828, 127.65642, 129.59055]

desgaste = [0.01451, 0.01268, 0.01781, 0.02324, 0.02663,
0.02005, 0.02217, 0.03561]

#Datos SMAW

dureza = [176.68764, 173.88501, 162.98959, 144.59298,
139.62811, 133.12275, 137.74055, 138.16486]

desgaste = [0.00916, 0.01066, 0.02834, 0.02684, 0.04819,
0.02878, 0.03659, 0.03877]

#Datos GMAW

dureza = [178.90962, 169.73028, 174.59017, 159.87564,
137.50260, 127.01603, 128.39252, 133.75997]

desgaste = [0.01644, 0.01565, 0.01935, 0.01597, 0.02322,
0.03122, 0.03120, 0.03352]
```

```
#Datos MB

dureza = [138.77099, 141.52046, 145.82815, 139.27419,
142.75623, 151.33183, 43.75593, 139.89769]

desgaste = [0.02314, 0.02656, 0.02956, 0.04223, 0.03792,
0.03144, 0.03274, 0.03675]

# Prueba de correlación de Kendall Tau

tau_corr, p_value_tau = kendalltau(dureza, desgaste)

print("Coeficiente de correlación de Kendall Tau:", tau_corr)

print("Valor p (Kendall Tau):", p_value_tau)

# Gráfico de dispersión

plt.scatter(dureza, desgaste, color="blue", label="Datos
originales")

plt.title("Relación entre Dureza y Desgaste")

plt.xlabel("Dureza (HVN) ")

plt.ylabel("Tasa de Desgaste (mg/Nm) ")

plt.legend()

plt.grid(True)

plt.show()
```

Apéndice D. Código análisis estadístico método Bootstrap.

```
import numpy as np

from scipy.stats import pearsonr

#Datos FCAW

dureza = [203.71663, 205.04465, 197.60885, 155.79465,
142.76242, 138.25828, 127.65642, 129.59055]

desgaste = [0.01451, 0.01268, 0.01781, 0.02324, 0.02663,
0.02005, 0.02217, 0.03561]

#Datos SMAW

dureza = [176.68764, 173.88501, 162.98959, 144.59298,
139.62811, 133.12275, 137.74055, 138.16486]

desgaste = [0.00916, 0.01066, 0.02834, 0.02684, 0.04819,
0.02878, 0.03659, 0.03877]

#Datos GMAW

dureza = [178.90962, 169.73028, 174.59017, 159.87564,
137.50260, 127.01603, 128.39252, 133.75997]

desgaste = [0.01644, 0.01565, 0.01935, 0.01597, 0.02322,
0.03122, 0.03120, 0.03352]

#Datos MB
```

```
dureza = [138.77099, 141.52046, 145.82815, 139.27419,
142.75623, 151.33183, 43.75593, 139.89769]

desgaste = [0.02314, 0.02656, 0.02956, 0.04223, 0.03792,
0.03144, 0.03274, 0.03675]

# Configuración del bootstrap
num_bootstrap = 1000
bootstrap_correlations = []

# Realizar el bootstrap
for _ in range(num_bootstrap):
    indices = np.random.choice(len(dureza), len(dureza),
replace=True)

    sample_dureza = [dureza[i] for i in indices]
    sample_desgaste = [desgaste[i] for i in indices]

    # Verificar si la muestra es constante
    if len(set(sample_dureza)) == 1 or
len(set(sample_desgaste)) == 1:
        continue # Omite si todos los valores son iguales

# Añadir un pequeño ruido
```

```
        sample_dureza = [x + np.random.normal(0, 0.5) for x in
sample_dureza]

        sample_desgaste = [x + np.random.normal(0, 0.0005) for x
in sample_desgaste]

        # Calcular la correlación
        correlation, _ = pearsonr(sample_dureza, sample_desgaste)
        bootstrap_correlations.append(correlation)

# Calcular el intervalo de confianza
if bootstrap_correlations:
    lower_bound = np.percentile(bootstrap_correlations, 2.5)
    upper_bound = np.percentile(bootstrap_correlations, 97.5)
    mean_correlation = np.mean(bootstrap_correlations)

    print(f"Correlación media: {mean_correlation}")
    print(f"Intervalo de confianza del 95%: ({lower_bound},
{upper_bound})")
else:
    print("No se pudo calcular la correlación con los datos
proporcionados.")
```

Apéndice E. Código análisis estadístico método Ajuste Exponencial.

```
import numpy as np

import matplotlib.pyplot as plt

from scipy.optimize import curve_fit

#Datos FCAW

dureza = [203.71663, 205.04465, 197.60885, 155.79465,
142.76242, 138.25828, 127.65642, 129.59055]

desgaste = [0.01451, 0.01268, 0.01781, 0.02324, 0.02663,
0.02005, 0.02217, 0.03561]

#Datos SMAW

dureza = [176.68764, 173.88501, 162.98959, 144.59298,
139.62811, 133.12275, 137.74055, 138.16486]

desgaste = [0.00916, 0.01066, 0.02834, 0.02684, 0.04819,
0.02878, 0.03659, 0.03877]

#Datos GMAW

dureza = [178.90962, 169.73028, 174.59017, 159.87564,
137.50260, 127.01603, 128.39252, 133.75997]

desgaste = [0.01644, 0.01565, 0.01935, 0.01597, 0.02322,
0.03122, 0.03120, 0.03352]
```

```
#Datos MB

dureza = [138.77099, 141.52046, 145.82815, 139.27419,
142.75623, 151.33183, 43.75593, 139.89769]

desgaste = [0.02314, 0.02656, 0.02956, 0.04223, 0.03792,
0.03144, 0.03274, 0.03675]

# Función para ajuste exponencial
def modelo_exponencial(x, a, b, c):
    return a * np.exp(-b * x) + c

# Ajuste exponencial
params, _ = curve_fit(modelo_exponencial, dureza, desgaste)

# Predicción
x_fit = np.linspace(min(dureza), max(dureza), 100)
y_fit = modelo_exponencial(x_fit, *params)

# Gráfico
plt.scatter(dureza, desgaste, color="blue", label="Datos
originales")

plt.plot(x_fit, y_fit, color="red", label="Ajuste
Exponencial")

plt.xlabel("Dureza (HV)")
```

```
plt.ylabel("Tasa de Desgaste (mg/m)")
plt.title("Ajuste Exponencial entre Dureza y Desgaste")
plt.legend()
plt.grid(True)
plt.show()

# Imprimir parámetros del ajuste
print("Parámetros del modelo exponencial:")
print("a =", params[0])
print("b =", params[1])
print("c =", params[2])
```

Apéndice F. Código análisis estadístico método Ajuste Potencial.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.optimize import curve_fit

#Datos FCAW
dureza = [203.71663, 205.04465, 197.60885, 155.79465,
142.76242, 138.25828, 127.65642, 129.59055]
desgaste = [0.01451, 0.01268, 0.01781, 0.02324, 0.02663,
0.02005, 0.02217, 0.03561]
```

```
#Datos SMAW
```

```
dureza = [176.68764, 173.88501, 162.98959, 144.59298,  
139.62811, 133.12275, 137.74055, 138.16486]  
desgaste = [0.00916, 0.01066, 0.02834, 0.02684, 0.04819,  
0.02878, 0.03659, 0.03877]
```

```
#Datos GMAW
```

```
dureza = [178.90962, 169.73028, 174.59017, 159.87564,  
137.50260, 127.01603, 128.39252, 133.75997]  
desgaste = [0.01644, 0.01565, 0.01935, 0.01597, 0.02322,  
0.03122, 0.03120, 0.03352]
```

```
#Datos MB
```

```
dureza = [138.77099, 141.52046, 145.82815, 139.27419,  
142.75623, 151.33183, 43.75593, 139.89769]  
desgaste = [0.02314, 0.02656, 0.02956, 0.04223, 0.03792,  
0.03144, 0.03274, 0.03675]
```

```
# Definir el modelo potencial
```

```
def modelo_potencial(x, a, b):  
    return a * x**b
```

```
# Ajuste del modelo
```

```
params, _ = curve_fit(modelo_potencial, dureza, desgaste,
maxfev=10000)

# Parámetros

a, b = params

print("Parámetros del modelo potencial:")

print("a =", a)

print("b =", b)

# Gráfica

plt.scatter(dureza, desgaste, color="blue", label="Datos
originales")

plt.plot(dureza, modelo_potencial(dureza, a, b),
color="red", label="Ajuste Potencial")

plt.title("Ajuste Potencial entre Dureza y Desgaste")

plt.xlabel("Dureza (HV)")

plt.ylabel("Tasa de Desgaste (mg/m)")

plt.legend()

plt.grid(True)

plt.show()
```