

Del desgaste a la resistencia: mejorando el magnesio mediante deformación plástica

From Wear to Strength: Improving Magnesium Through Plastic Deformation

Pablo Daniel Martínez-Colmillo¹, Alfredo Márquez-Herrera², Salvador Montesinos-Gonzalez³

¹ División de estudios de posgrado, Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León, Oaxaca, México.

² Departamento de Agricultura e Ingeniería Mecánica, Universidad de Guanajuato, Irapuato, Guanajuato, México.

³ Instituto de Ingeniería Industrial y Automotriz, Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León, Oaxaca, México.

Resumen

En este trabajo se evaluó el efecto del bruñido de bola sobre la aleación de magnesio AZ31B utilizada en aplicaciones biomédicas. Se analizaron propiedades como microdureza, rugosidad y resistencia a la corrosión mediante pruebas electroquímicas de espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS, por sus siglas en inglés) y Tafel. Los resultados mostraron incrementos de hasta 56 % en la microdureza y reducciones cercanas al 60 % en la rugosidad superficial respecto a la muestra virgen. Además, las pruebas EIS y extrapolación de Tafel indicaron una mayor resistencia a la corrosión en las muestras bruñidas, evidenciada por diámetros mayores en los diagramas de Nyquist y menores densidades de corriente de corrosión. Estos resultados demuestran que el bruñido de bola es una técnica efectiva para mejorar el desempeño superficial y electroquímico de la aleación AZ31B.

Palabras clave: Magnesio AZ31B, Microdureza, Rugosidad, Corrosión.

Introducción

La fractura ósea representa un problema de salud pública importante tanto en México como en el resto del mundo, especialmente en personas adultas mayores. La Organización Mundial de la Salud (OMS) estima que cada año ocurren alrededor de 9 millones de fracturas por fragilidad relacionadas con enfermedades como la osteoporosis (*Secretaría de Salud*, 2025). Estas lesiones pueden provocar dolor, pérdida de movilidad e incluso la necesidad de cirugías, afectando seriamente la calidad de vida de los pacientes.

Para tratar estas fracturas se utilizan implantes metálicos como placas, tornillos y clavos, los cuales deben ser resistentes y biocompatibles debido a su contacto directo con el cuerpo humano. Actualmente, el acero inoxidable AISI 316L es uno de los materiales más empleados; sin embargo, algunos estudios han señalado posibles problemas asociados con la liberación de iones metálicos y la necesidad de realizar una segunda cirugía para retirar el implante temporal (*Manam et al.*, 2017).

Ante esta problemática, las aleaciones de magnesio, en especial la conocida como AZ31B, han surgido como una alternativa prometedora para implantes biodegradables ya que estas se degradan gradualmente dentro del cuerpo humano liberando productos no tóxicos que pueden ser absorbidos sin causar daños fisiológicos. Además, presentan propiedades mecánicas similares a las del hueso humano, favoreciendo una mejor integración con el organismo (*Liu et al.*, 2018).

No obstante, las aleaciones de magnesio presentan una desventaja importante: su alta velocidad de corrosión y su baja resistencia al desgaste. Esto puede ocasionar que el implante pierda resistencia antes de que el hueso termine de sanar. Por ello, se han desarrollado distintos tratamientos superficiales para mejorar sus propiedades.

Entre estas técnicas destaca el bruñido de bola, también conocido como “pulido a presión”, un proceso que comprime y alisa la superficie del metal mediante una herramienta con punta esférica. De manera similar a como una plancha elimina irregularidades en una tela, este tratamiento desliza la punta de la herramienta, que normalmente está hecha de algún acero o de diamante, mejorando la dureza y la resistencia a la corrosión del material (*Saldaña Robles et al.*, 2017).

Debido al impacto social y económico que representan las fracturas en México, estudiar el efecto del bruñido de bola sobre la aleación de magnesio AZ31B podría contribuir al desarrollo de implantes temporales más seguros, resistentes y accesibles para aplicaciones biomédicas futuras.

Marco teórico

Bruñido con bola

El bruñido con bola es una técnica utilizada para mejorar la superficie de piezas metálicas sin cortar ni remover material (*Saldaña Robles et al.*, 2017). El proceso consiste en hacer pasar una esfera muy dura sobre la superficie del metal mientras se aplica una fuerza controlada. Al hacerlo, las pequeñas irregularidades de la superficie se “aplastan” y distribuyen de manera más uniforme.

Una forma sencilla de imaginar este proceso es pensar en cómo una cuchara puede alisar la superficie de una plastilina al pasar varias veces sobre ella. Aunque el material no desaparece, la superficie se vuelve más lisa y compacta.

Este tratamiento puede ayudar a que el material sea más resistente al desgaste, a la fatiga y a la corrosión. Además, el bruñido puede realizarse tanto en máquinas de control numérico (CNC, por sus siglas en inglés) como en las convencionales, lo que permite aplicarlo en un gran número de geometrías, controlando las variables más importantes para tener el mejor resultado; dentro de estas variables están la fuerza de bruñido aplicada, la velocidad de avance y el número de pasadas que da la punta sobre la superficie del material.

Microdureza

La dureza es la capacidad de un material para resistir deformaciones, rayaduras o penetraciones. En este trabajo se utilizó la prueba de microdureza Vickers, conocido como el ensayo universal ya que sirve para medir la dureza en materiales gruesos y delgados ya sean metales, plásticos o cerámicos. Esta técnica emplea una pequeña punta de diamante con forma piramidal para dejar una huella microscópica sobre la superficie del material (*Callister y Rethwisch*, 2018). Mientras más pequeña sea la huella generada, mayor será la dureza del material. Esto significa que el material ofrece más resistencia a deformarse.

En este estudio se utilizó la escala Vickers que tiene como nomenclatura HV. Las letras “HV” significan Hardness Vickers o dureza Vickers, mientras que el número “0.3” indica que se aplicó una carga de 0.3 kilogramo-fuerza (kgf) durante la prueba. Esta escala es utilizada para medir superficies pequeñas o capas superficiales modificadas, como las obtenidas después del bruñido.

Por ejemplo, si una muestra tiene un valor de 80 HV_{0.3} y otra alcanza 100 HV_{0.3}, significa que la segunda es más dura y resistente a la deformación. El aumento de dureza después del bruñido ocurre porque la superficie se compacta y endurece debido a la deformación plástica generada por la presión de la bola.

Rugosidad

La rugosidad superficial es una medida que describe qué tan lisa o irregular es una superficie (*Callister y Rethwisch*, 2018). Aunque una pieza metálica pueda verse brillante o lisa a simple vista, al observarla con instrumentos especializados se pueden encontrar pequeños picos y valles microscópicos.

Uno de los parámetros más utilizados para medir esta característica es el Ra, que representa el promedio de todas las irregularidades de la superficie. En otras palabras, el valor Ra indica qué tan “áspera” o “suave” es una pieza.

Mientras menor sea el valor de Ra, más lisa será la superficie. Por ejemplo, una superficie con un Ra de 0.2 µm es más lisa que una con un Ra de 1.0 µm. El bruñido con bola busca precisamente disminuir estos valores, ya que superficies más lisas pueden reducir el desgaste, mejorar el movimiento entre piezas y dificultar la acumulación de agentes corrosivos.

Corrosión

La corrosión es el deterioro gradual de un metal al entrar en contacto con el ambiente que lo rodea, especialmente con humedad, sales o líquidos conductores (*Otero Huerta*, 2012). Un ejemplo cotidiano de corrosión es el óxido que aparece en algunos metales después de estar expuestos al agua y al aire durante mucho tiempo.



En las aleaciones de magnesio, la corrosión es un tema muy importante porque estos materiales tienden a degradarse rápidamente, especialmente en ambientes similares a los fluidos del cuerpo humano. Por ello, es necesario estudiar formas de controlar o disminuir esa degradación.

Para analizar el comportamiento frente a la corrosión se utilizan técnicas electroquímicas como la espectroscopía de impedancia electroquímica (EIS) y las curvas de polarización de Tafel; estas pruebas permiten evaluar qué tan resistente es un material frente a ambientes corrosivos; con ayuda de estas se puede determinar si el bruñido mejoró la protección superficial del material.

Metodología

Para desarrollar esta investigación se siguió una serie de pasos que permitieron evaluar cómo el bruñido superficial mejora las propiedades de la aleación de magnesio AZ31B. Además, se mencionan las tecnologías empleadas que ayudaron en la evaluación de cada propiedad del material.

Selección del diseño experimental y preparación de muestras

Para realizar este trabajo se utilizó un método conocido como diseño de experimentos, una herramienta que ayuda a organizar las pruebas de manera estratégica para obtener resultados confiables sin necesidad de hacer experimentos al azar (*Gutiérrez Pulido y De la Vara Salazar, 2012*) En pocas palabras, funciona como una guía que permite combinar diferentes parámetros y observar cómo afectan las propiedades del material, ahorrando tiempo, costos y material de prueba.

En este estudio se empleó un Diseño Central Compuesto (DCC) para analizar dos variables principales del proceso de bruñido superficial: la fuerza aplicada y el avance de la herramienta. La fuerza se evaluó en niveles de 50 N, 150 N y 250 N, mientras que el avance se probó en 60 mm/min, 70 mm/min y 80 mm/min. La Figura 1 muestra cómo se combinaron estos parámetros.

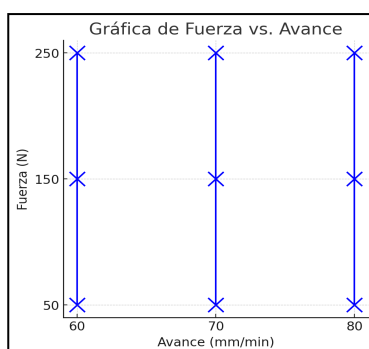


Figura 1. Diseño central compuesto utilizado en este estudio.

El diseño experimental comprende un total de 13 puntos experimentales: cuatro puntos factoriales, cuatro puntos axiales y cinco puntos centrales. Para los puntos factoriales y axiales se consideraron dos réplicas adicionales por tratamiento, por lo que el bloque experimental estuvo conformado por un total de 29 muestras destinadas al proceso de bruñido, las cuales fueron obtenidas a partir de una placa de aleación de magnesio AZ31B con un espesor de 2 mm y dimensiones de 25.4 mm × 25.4 mm. Previamente a la aplicación del tratamiento superficial, las muestras fueron limpiadas con alcohol étílico al 95 % y acondicionadas para garantizar condiciones adecuadas antes del proceso.

Cada punto representa una prueba experimental distinta. Por ejemplo, se realizaron ensayos utilizando una fuerza de 50 N con avances de 60 mm/min, 70 mm/min y 80 mm/min, y posteriormente se repitieron las pruebas con fuerzas mayores, cabe mencionar que una vez teniendo el arreglo de los factores utilizados se requiere hacer una selección aleatoria para enumerar el turno en que serán realizados los experimentos, esto con el fin de evitar errores o resultados influenciados por factores externos. Por ejemplo, si todas las pruebas con una fuerza alta se realizaran primero y las de fuerza baja al final, podrían existir cambios en la máquina, temperatura, desgaste de la herramienta o incluso errores humanos que alteren los resultados. Para evitar

esto, el orden de las pruebas se mezcla de manera aleatoria. Esto permitió comparar el comportamiento del material bajo diferentes condiciones de trabajo y encontrar cuáles generaban mejores resultados en microdureza, rugosidad y resistencia a la corrosión en comparación con la muestra virgen.

Aplicación del bruñido superficial

Una vez teniendo la configuración de los parámetros a utilizar para cada uno de los experimentos a realizar, se realizó la programación de la maquina CNC para la aplicación del proceso de bruñido. Durante el proceso, una punta de diamante presionó la superficie del material para deformarla ligeramente y mejorar su acabado superficial como se puede ver en la Figura 2.

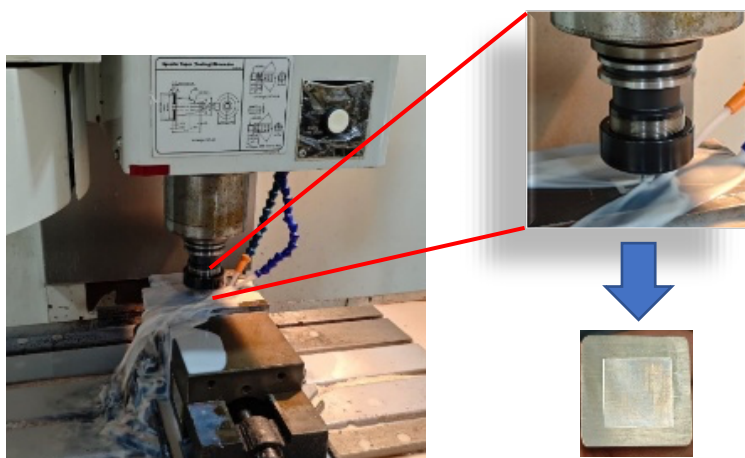


Figura 2. Aplicación del proceso de bruñido.

Tras la aplicación del bruñido se obtiene un acabado conocido como tipo espejo, el cual es característico por el brillo que puede reflejar la superficie, además por la baja rugosidad que alcanza, lo cual es beneficioso en muchas aplicaciones, por ejemplo en mecanismos que están en constante rozamiento de sus componentes, o en implantes biomédicos en donde son necesarias superficies con poca rugosidad para que las bacterias no se alojen en las cavidades que pueda presentar la superficie del material.

Pruebas de rugosidad

Una vez bruñidas las probetas, se realizó la prueba de rugosidad utilizando un rugosímetro de la marca Mitutoyo del modelo Surftest SJ-310 mostrado en la Figura 3. El funcionamiento del equipo es relativamente sencillo. El rugosímetro cuenta con una pequeña punta de diamante que se desplaza sobre la superficie de la muestra. Mientras la punta recorre el material, detecta las pequeñas elevaciones y hundimientos presentes en la superficie, generando un perfil de rugosidad.



Figura 3. Rugosímetro Mitutoyo Surftest SJ-310.

Posteriormente, el equipo procesa esta información y calcula automáticamente el valor de R_a , normalmente expresado en micrómetros (μm). En este trabajo, las mediciones se realizaron después del proceso de bruñido para comparar qué condiciones producían superficies más suaves y uniformes.

Pruebas de dureza

Para evaluar la resistencia superficial de las muestras se utilizó un microdurómetro MATSUZAWA modelo MMT-X, equipo empleado para medir la microdureza de materiales metálicos mediante el método Vickers. El procedimiento consiste en colocar la muestra sobre la base del equipo y aplicar una pequeña carga utilizando un penetrador de diamante con forma piramidal como se puede ver en la Figura 4.

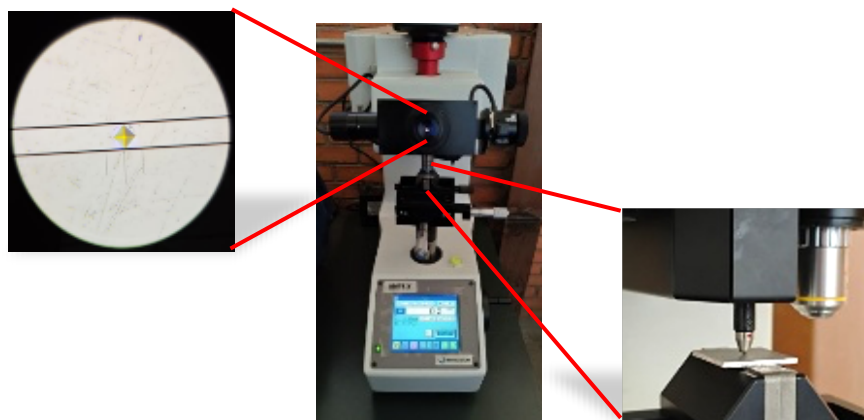


Figura 4. Funcionamiento del microdurómetro MATSUZAWA modelo MMT-X.

Cuando el penetrador presiona la superficie, deja una huella microscópica sobre el material. Después, el equipo utiliza un microscopio integrado para medir las diagonales de esa huella, midiendo de forma horizontal y vertical el largo de las puntas de la indentación como se ve en la figura anterior.

El principio es sencillo:

- Si la huella es grande, el material es más blando.
- Si la huella es pequeña, el material es más duro.

Finalmente, el microdurómetro calcula automáticamente el valor de microdureza Vickers (HV). Estas mediciones permitieron comparar cómo el bruñido superficial modificó la resistencia de la aleación de magnesio AZ31B.

Pruebas de corrosión

Para evaluar la resistencia a la corrosión de las muestras se realizaron pruebas electroquímicas utilizando un potenciostato VersaSTAT 3 y una celda electroquímica de tres electrodos. Estas pruebas permiten conocer qué tan rápido se degrada un material cuando entra en contacto con un medio corrosivo.

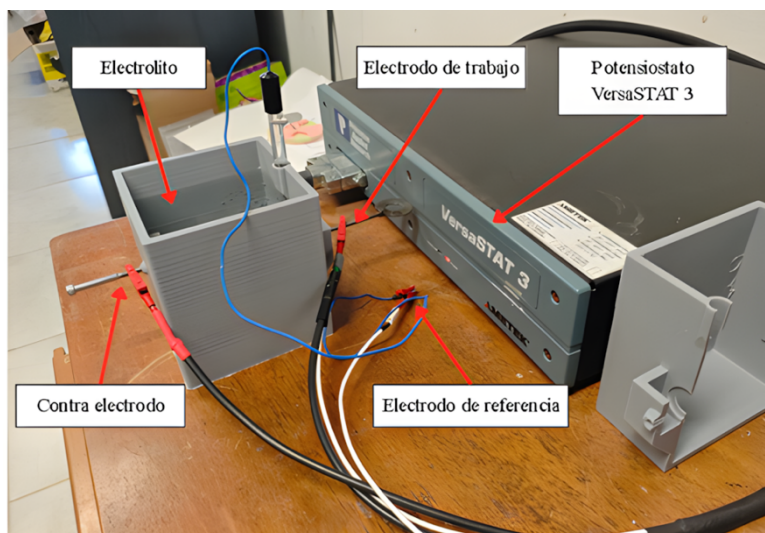


Figura 5. Celda electroquímica conectada al potenciostato.

La celda electroquímica está formada por tres elementos principales:

- Electrodo de trabajo: es la muestra de magnesio que se desea analizar.
- Electrodo de referencia: mantiene un potencial estable para comparar las mediciones.
- Contraelectrodo: ayuda a cerrar el circuito eléctrico durante la prueba.

Todos los electrodos se colocan dentro de una solución electrolítica que simula un ambiente corrosivo.

Prueba de EIS

La prueba de EIS se utiliza para analizar cómo responde el material frente a la corrosión sin dañarlo significativamente.

El procedimiento se realiza de la siguiente manera:

1. La muestra se coloca dentro de la celda electroquímica.
2. Esperar a que el potencial del sistema se estabilice al menos por 30 minutos.
3. El potenciostato VersaSTAT 3 aplica pequeñas señales eléctricas alternas sobre la muestra.
4. El equipo mide la respuesta del material a diferentes frecuencias.
5. Finalmente, el software genera gráficas conocidas como diagramas de Nyquist.

Estas gráficas ayudan a identificar qué tan resistente es la superficie del material frente a la corrosión. Generalmente:

- Semicírculos más grandes indican mayor resistencia a la corrosión.
- Semicírculos más pequeños indican menor protección del material.

Prueba de Tafel

La prueba de Tafel sirve para determinar la velocidad de corrosión del material.

El procedimiento consiste en:

1. Colocar la muestra en la celda electroquímica.
2. Esperar a que el potencial del sistema se estabilice durante 30 minutos.
3. Aplicar un barrido de potencial usando el VersaSTAT 3.
4. Registrar la corriente generada durante el ensayo.

El software genera una gráfica llamada curva de polarización o curva de Tafel, donde se observan las reacciones electroquímicas del material.

A partir de esta curva se obtienen valores importantes como:

- Potencial de corrosión (E_{corr}): indica la tendencia del material a corroerse.
- Densidad de corriente de corrosión (I_{corr}): relacionada con la velocidad de corrosión.

De manera sencilla:

- Valores menores de I_{corr} significan menor velocidad de corrosión y mejor protección del material.
- Valores mayores indican que el material se degrada más rápidamente.

Resultados

Los resultados de las pruebas de microdureza y rugosidad superficial se presentan en la Tabla 1. Para cada muestra se efectuaron cinco mediciones de microdureza y cinco mediciones de rugosidad, y el valor reportado corresponde al promedio de las mediciones realizadas para cada propiedad. Con el propósito de facilitar la presentación y comparación de los resultados, la Tabla 1 incluye únicamente las nueve muestras principales del conjunto experimental, además de la muestra virgen, utilizada como condición de referencia.

Tabla 1. Resultados obtenidos de las pruebas de medición de la microdureza y rugosidad de las muestras bruñidas y virgen.

Muestra	Avance (mm/min)	Fuerza de bruñido (N)	Microdureza (HV _{0.3})	Rugosidad (μ m)
Virgen	--	--	81.34	0.393
1	70	150	119.3	0.165
2	60	250	111.6	0.166
3	60	150	120.1	0.148
4	70	250	126.8	0.162
5	60	50	111.6	0.158
6	80	250	114.8	0.154
7	80	150	127.4	0.175
8	80	50	110.4	0.170
9	70	50	119.5	0.160

La muestra sin tratamiento presentó una dureza de 81.34 HV_{0.3} y una rugosidad de 0.393 μ m. Después del proceso de bruñido superficial, todas las muestras mostraron un incremento importante en la dureza y una disminución considerable en la rugosidad.

Los valores de microdureza obtenidos en las muestras bruñidas variaron entre 110 HV_{0.3} y 127 HV_{0.3}, destacando la muestra trabajada con un avance de 80 mm/min y una fuerza de 150 N, la cual alcanzó el valor más alto de 127.4 HV_{0.3}, lo que representa un incremento del 56.6 % respecto a la muestra virgen.

En cuanto a la rugosidad, los valores disminuyeron hasta rangos entre 0.148 μ m y 0.175 μ m, siendo la muestra trabajada con 60 mm/min y 150 N la que presentó la superficie más lisa, con un valor de 0.148 μ m, alcanzando una rugosidad de 0.148 μ m equivalente a una reducción aproximada del 62.3 %. Estos resultados muestran que el bruñido superficial logró mejorar significativamente las propiedades superficiales de la aleación AZ31B, aumentando su resistencia y generando superficies más uniformes.

Una vez teniendo estos resultados, se procedió a realizar las pruebas de corrosión, en donde solo se trabajó con los resultados más representativos de este diseño de experimentos, dentro de las muestras más representativas se encuentra la que presentó la mayor dureza y la de menor rugosidad, esto con el fin de poder compararlas con la muestra virgen.

En la Figura 6 se muestra el diagrama de Nyquist obtenidas mediante la prueba EIS.

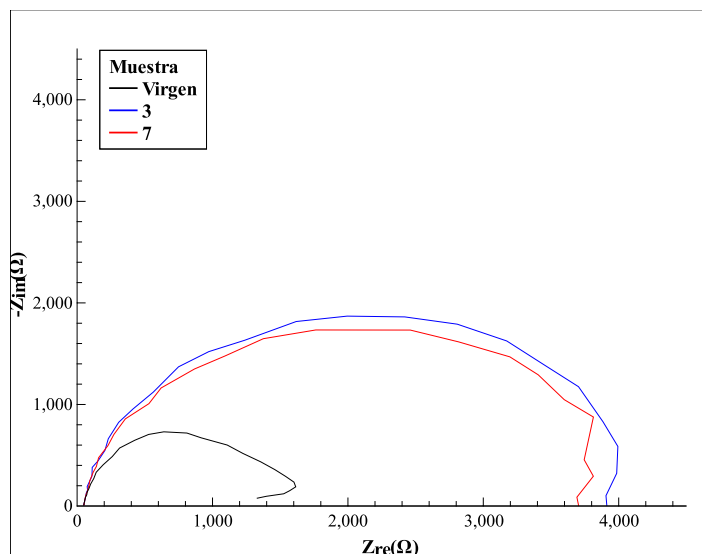


Figura 6. Diagramas de Nyquist de la muestra virgen y las de mejores resultados del diseño experimental.

En esta grafica la muestra virgen presenta el semicírculo más pequeño, lo que indica una menor resistencia a la corrosión. Por otro lado, las muestras 3 y 7 muestran semicírculos mucho más grandes, señal de que el bruñido superficial mejoró considerablemente la protección del material frente al medio corrosivo.

Esto ocurre porque el bruñido reduce irregularidades superficiales y genera una capa más compacta y endurecida, dificultando el avance de la corrosión sobre la superficie de la aleación de magnesio AZ31B.

Por otro lado, la Figura 7 muestra las curvas de polarización de Tafel, utilizadas para analizar la velocidad de corrosión de los materiales. En esta gráfica se comparan la muestra virgen y dos muestras tratadas mediante bruñido superficial (muestra 3 y 7). El eje horizontal representa el potencial eléctrico (V), mientras que el eje vertical muestra la densidad de corriente, relacionada directamente con la velocidad de corrosión del material.

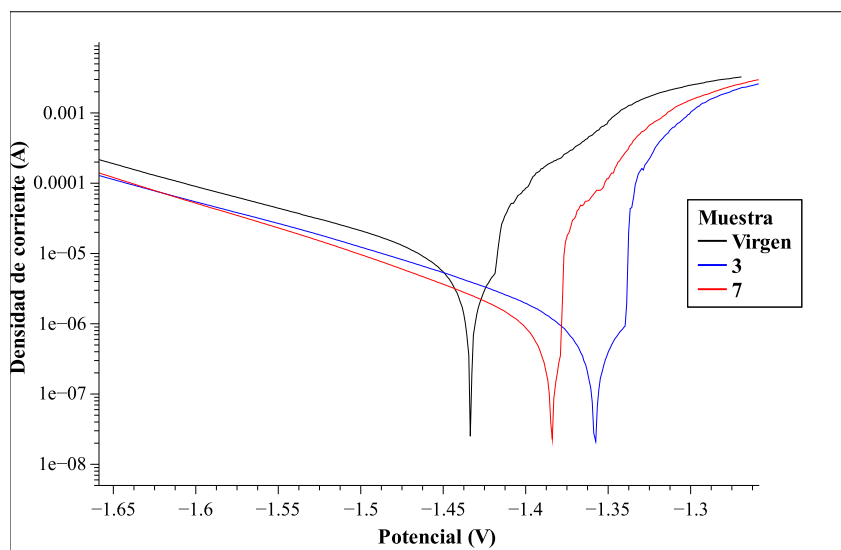


Figura 7. Curvas de polarización de Tafel de la muestra virgen y las de mejores resultados del diseño experimental.

En la gráfica puede observarse que las muestras 3 y 7 presentan desplazamientos respecto a la muestra virgen y muestran menores valores de corriente en gran parte de la curva. Esto indica que el bruñido superficial ayudó a disminuir la velocidad de corrosión de la aleación de magnesio AZ31B.

Además, las curvas de las muestras bruñidas son más estables, lo que sugiere que el tratamiento superficial generó una superficie más uniforme y resistente al ataque corrosivo. En contraste, la muestra virgen presenta una respuesta más rápida al proceso de corrosión, indicando menor protección superficial.

Conclusiones

El bruñido de bola demostró ser un tratamiento superficial capaz de mejorar significativamente las propiedades de la aleación de magnesio AZ31B. El proceso permitió aumentar la microdureza, disminuir la rugosidad superficial y mejorar la resistencia a la corrosión en comparación con la muestra sin tratamiento. Las pruebas electroquímicas confirmaron que las muestras bruñidas presentaron un comportamiento más estable frente al medio corrosivo, lo que podría favorecer su aplicación en implantes biodegradables. En conjunto, los resultados obtenidos muestran que la deformación plástica superficial mediante bruñido puede contribuir al desarrollo de materiales biomédicos más seguros y con mayor vida útil.

Referencias

- Callister, W. D., y Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction (10th ed.)*. Wiley.
- Gutiérrez Pulido, H., y De la Vara Salazar, R. (2012). *Análisis y diseño de experimentos (3rd ed.)*. McGraw-Hill.
- Liu, C., Ren, Z., Xu, Y., Pang, S., Zhao, X., y Zhao, Y. (2018). Biodegradable Magnesium Alloys Developed as Bone Repair Materials: A Review. *Scanning*, 2018(1), 9216314. <https://doi.org/10.1155/2018/9216314>
- Manam, N. S., Harun, W. S. W., Shri, D. N. A., Ghani, S. A. C., Kurniawan, T., Ismail, M. H., y Ibrahim, M. H. I. (2017). Study of corrosion in biocompatible metals for implants: A review. *Journal of Alloys and Compounds*, 701, 698–715. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.01.196>
- Otero Huerta, E. (2012). *Corrosión y degradación de materiales (2.a ed.)*. Síntesis Editorial.
- Saldaña Robles, A., Gutiérrez Vaca, C., Saldaña Robles, A., Flores Ortega, A., y Saldaña Robles, N. (2017). Bruñido con bola como proceso de acabado superficial y mejoramiento de propiedades físico-mecánicas de piezas manufacturadas. *Temas de Ciencia y Tecnología*, 21, 41–49. <http://repositorio.utm.mx/bitstream/123456789/351/1/2017-TCyT-ASR.pdf>
- Secretaría de Salud. (2025). INR alerta: osteoporosis afecta 10 millones de personas en México. Revisado en enero 24, 2025. <https://www.gob.mx/salud/prensa/411-inr-alerta-osteoporosis-afecta-10-millones-de-personas-en-mexico>

