



Universidad Mayor de San Andrés
Facultad de Ingeniería
Carrera de Ingeniería Industrial



REVISTA INDUSTRIAL 4.0

ISSN-L 2958-0188

Edición Digital Nro. 10
Noviembre 2024

**Universidad Mayor de San Andrés
Facultad de Ingeniería
Carrera de Ingeniería Industrial**

**Dra. Maria Eugenia Garcia Moreno
Dr. Tito Estevez Martini
Ing. Freddy Gutierrez Barea
Ing. Juan Jose Torrez Obleas
Ing. Franz José Zenteno Benítez**

**Rectora
Vicerrector
Decano Facultad de Ingeniería
ViceDecano Facultad de Ingeniería a.i.
Director de Carrera Ingeniería Industrial**

**Revista Industrial 4.0
Edición Digital N°. 10 - Noviembre 2024
Impresa: ISSN 2958-017X
En Línea: ISSN-L 2958-0188**

**Comite Editor:
Ing. Monica Lino Humerez
Ing. Grover Sanchez Eid**

**Diseño Versión Impresa & web:
Ing. Enrique Orosco Crespo**

**Imagen Tapa:
Carrera de Ingeniería Industrial**

**Imprenta:
Walking Graf**

**Deposito Legal:
4-3-68-20**

**Web:
<https://industrial.umsa.bo/revistaindustrial-40>
Email:
revistaindustrial4.0@umsa.bo**

**Av. Mcal. Santa Cruz N° 1175, Plaza del Obelisco
Mezzanine, Edificio Facultad de Ingeniería
TEI. 2205000-2205067, Int. 1402
Campus Universitario, Cota Cota - calle 30**

CARACTERIZACIÓN DE FOILS DE COBRE PARA BATERÍAS DE ION-LITIO: EVALUACIÓN MORFOLÓGICA POR MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

Ing. Giovana Diaz Avila
grdiaz@gmail.com
ORCID: 0009-0006-3858-8913

Ing. Adalid Jose Contreras Gallegos
adalidcontreras503@gmail.com
ORCID: 0009-0004-8076-2562

Recibido: 15 de septiembre; aprobado: 14 de octubre

RESUMEN:

Este estudio se enfoca en la caracterización morfológica de foils de cobre obtenidos mediante laminación y su comparación con un foil de referencia para su aplicación en baterías de ion-litio. La evaluación se realizó utilizando Microscopía Electrónica de Barrido (SEM), con el objetivo de identificar defectos superficiales, grietas e irregularidades morfológicas. Además, se llevó a cabo la medición de espesor mediante el SEM para evaluar la homogeneidad de los foils. Los resultados revelan que los foils laminados presentan una alta densidad de defectos morfológicos, como grietas, lo que afecta negativamente su viabilidad para aplicaciones en las baterías de ion-litio. En comparación, los foils de referencia mostraron una superficie más homogénea y sin defectos críticos. Se concluye que el proceso de laminación no es el óptimo para producir foils de cobre de calidad adecuada para uso en baterías de ion litio.

PALABRAS CLAVE: Foils de cobre, morfología, baterías de ion-litio, microscopía electrónica de barrido, laminación, espesor, defectos morfológicos.

ABSTRACT: This study focuses on the morphological characterization of copper foils obtained by lamination and their comparison with reference foils for their application in lithium-ion batteries. The evaluation was carried out using Scanning Electron Microscopy (SEM), with the objective of identifying surface defects, cracks

and morphological irregularities. In addition, thickness measurement by SEM was carried out to evaluate the homogeneity of the foils. The results reveal that the laminated foils present a high density of morphological defects, such as cracks, which negatively affects their viability for lithium-ion battery applications. In comparison, the reference foils showed a more homogeneous surface without critical defects. It is concluded that the lamination process is not optimal for producing copper foils of suitable quality for batteries.

KEY WORDS: Copper foils, morphology, lithium-ion batteries, scanning electron microscopy, lamination, thickness, morphological defects.

1. INTRODUCCIÓN

Las baterías de ion-litio dependen de materiales conductores de alta calidad para garantizar un rendimiento óptimo. Los foils de cobre se utilizan como colectores de corriente debido a su excelente conductividad eléctrica y estabilidad mecánica. Sin embargo, el rendimiento de estos foils puede verse afectado por defectos morfológicos en su superficie, como ser las grietas, que pueden generarse durante el proceso de fabricación, específicamente en el laminado. Estos defectos pueden comprometer la eficiencia y la vida útil de las baterías de ion-litio, ya que afectan la distribución de corriente y la integridad del colector.

El objetivo de este estudio es caracterizar la morfología superficial de foils de cobre obtenidos mediante laminación y compararlos con un foil de referencia, mediante el uso de Microscopía Electrónica de Barrido (SEM). También se realizará la medición de espesor para evaluar la homogeneidad del material. La caracterización morfológica es crucial para entender cómo los procesos de fabricación influyen en la calidad del material, como ser los foils de cobre, y su aplicabilidad en baterías de ion-litio.

2. DESARROLLO

2.1. Metodología

El estudio se realizó con dos tipos de foils de cobre: laminado y de referencia. Ambos se analizaron mediante SEM para identificar defectos morfológicos en la superficie, tales como grietas. Adicionalmente, se midió el espesor de los foils en cortes transversales, con el fin de evaluar su homogeneidad.

El procedimiento experimental incluyó los siguientes pasos:

Figura 2.1 Pasos del procedimiento experimental



Fuente: Elaboración propia

2.2. Definición de las variables

Las variables, tanto independientes como dependientes, se describen a continuación:

- **Variable independiente:** Tipo de foil (laminado y de referencia).
- **Variables dependientes:**
 - Defectos morfológicos observados (grietas).
 - Espesor del foil (medido en micrómetros).

2.3. Materiales utilizados

Los materiales utilizados en el estudio versan a continuación:

- **Foil de cobre laminado:** muestra obtenida a partir de cobre electrolítico producido en Bolivia mediante un proceso de laminación desarrollado por Uruchi (2024), en el proyecto de grado titulado “*Laminación de Cobre Electrolítico Producido en Bolivia para la Fabricación de Foil para el Armado de Baterías de Ión Litio*”, presentado en la Universidad Mayor de San Andrés, La Paz. Este proceso involucró la laminación en frío para reducir el espesor del cobre electrolítico y obtener foils adecuados para aplicaciones en baterías de ion-litio¹.
- **Foil de cobre de referencia:** muestra de foil de cobre comercial para aplicación como colector de corriente en una batería ion-litio.
- **Equipos:** Microscopio electrónico de barrido (SEM) marca Phillips, modelo XL 30.
- **Software de análisis de imágenes:** Para medir el espesor de los foils se utilizó el programa SEMTech Solutions - SEMView800.

¹ Uruchi Cosme, D.A. (2024), Laminación de Cobre Electrolítico Producido en Bolivia para la Fabricación de Foil para el Armado de Baterías de Ión Litio.

3. ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS

El análisis de los foils de cobre laminados y de referencia reveló resultados críticos respecto a la morfología y la calidad del material, especialmente en su potencial uso como colectores de corriente en baterías de ion-litio.

3.1. Análisis mediante Microscopía Electrónica de Barrido (SEM)

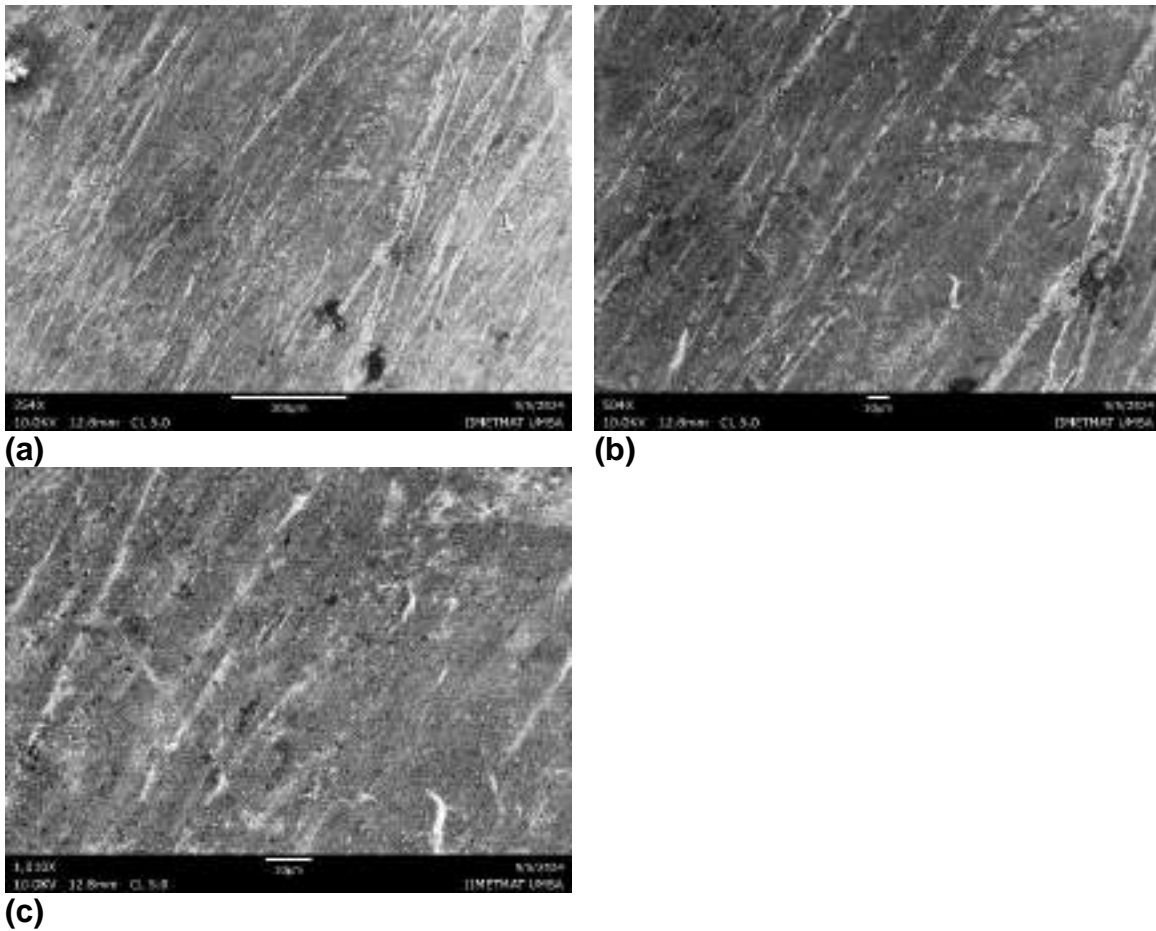
La Microscopía Electrónica de Barrido se utilizó para evaluar la morfología de los foils de cobre, revelando información crítica sobre las irregularidades superficiales, la rugosidad, la presencia de grietas y otros defectos.

3.1.1. Foil de cobre laminado

Las imágenes SEM (Figura3.1) mostraron grietas significativas a lo largo de la superficie de los foils de cobre laminados, algunas de las cuales se extendían de manera continua a lo largo de varios micrómetros. Estas grietas, originadas probablemente por el estrés mecánico del proceso de laminación, comprometen la integridad del foils.

La distribución heterogénea de los defectos en los foils de cobre laminados también fue evidente, con áreas de mayor concentración de grietas en ciertas regiones, lo que sugiere inconsistencias en el proceso de laminación.

**Figura 3.1 Micrografía electrónica del foil de cobre obtenido por laminación.
(a) Aumento 254x. (b) Aumento 504x. (c) Aumento 1.01Kx.**



Fuente: Elaboración Propia

La imagen SEM de corte transversal del foil de cobre obtenido por laminación (Figura 3.2) muestra un valor promedio del espesor de 55.10 μm .

Figura 3.2 Medidas del espesor del foil de cobre laminado. Aumento 497x.

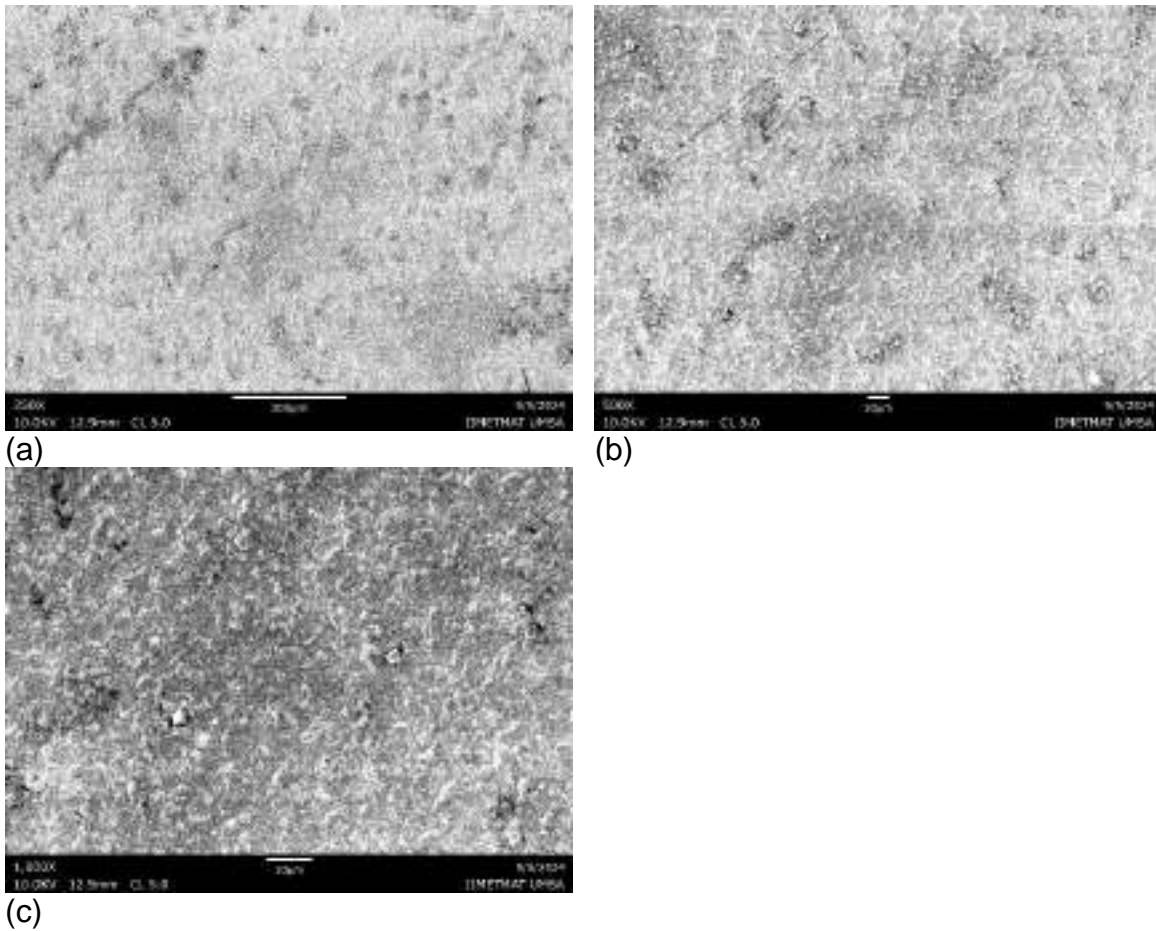


Fuente: Elaboración Propia

3.1.2. Foil de referencia

Las imágenes SEM (Figura 3.3) del foil de referencia muestra una superficie mucho más uniforme. No se observaron grietas superficiales significativas. La homogeneidad en estos foils indica que no fueron sometidos a las mismas tensiones mecánicas que los foils laminados, lo que resalta la mayor calidad del proceso de fabricación de los foils de referencia.

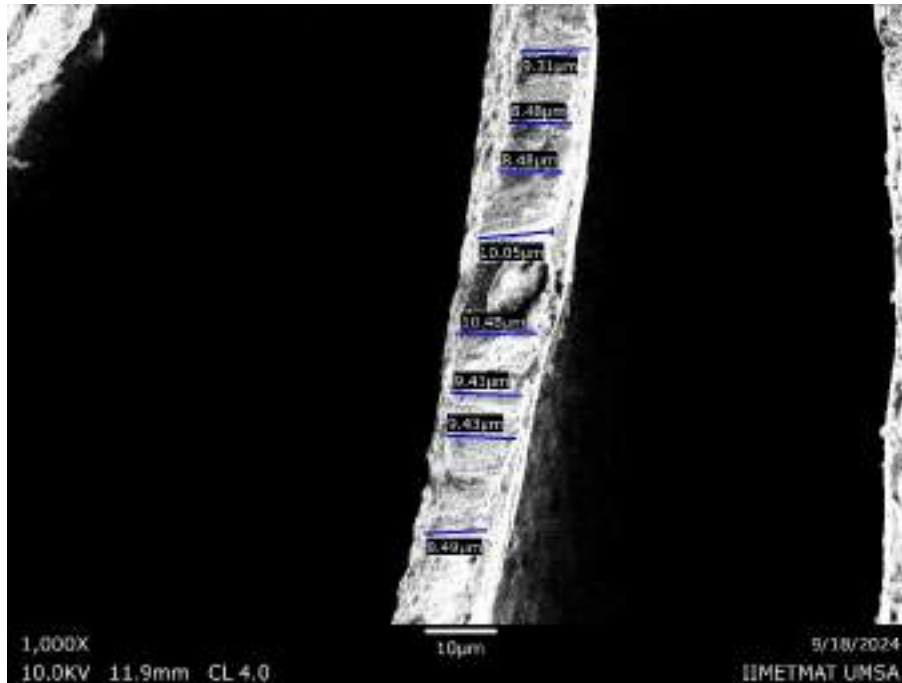
Figura 3.3 Micrografía electrónica del foil de referencia. (a) Aumento 250x. (b) Aumento 500x. (c) Aumento 1Kx.



Fuente: Elaboracion propia

La imagen SEM de corte transversal del foil de referencia (Figura 3.4) muestra un valor promedio del espesor de 9.27 μm .

Figura 3.4 Medidas del espesor del foil de referencia. Aumento 1 kx.



Fuente: Elaboracion propia

3.2. Evaluación morfológica

Los análisis de SEM revelaron una notable presencia de grietas superficiales en los foils de cobre laminados. Las grietas son indicativas de tensiones generadas durante el proceso de laminación, que el material no pudo absorber adecuadamente, dando como resultado fracturas superficiales.

Los foils de referencia, en comparación con los foils de cobre laminados, no mostraron grietas significativas. Las superficies son más homogéneas, lo que sugiere que tuvo un mayor control en el proceso de fabricación.

3.3. Evaluación de los espesores de los foils de cobre

Una de las diferencias más significativas encontradas entre los foils laminados y los de referencia fue el espesor. Los foils laminados presentaron un espesor promedio

de 55.10 μm , mientras que los foils de referencia tenían un espesor mucho más delgado y homogéneo de 9.27 μm .

El espesor es un parámetro crítico en la fabricación de colectores de corriente para baterías de ion-litio. El espesor excesivo en los foils laminados puede aumentar la resistencia interna de la batería de ion litio, lo que disminuye la eficiencia general del sistema. Además, un espesor de 55.10 μm representa un incremento significativo en el peso del colector, lo que afecta negativamente en la densidad energética de la batería (relación entre energía almacenada y peso del sistema).

Por otro lado, los foils de referencia, con su espesor uniforme de 9.27 μm , ofrecen una mejor relación entre conductividad eléctrica y peso, lo que es ideal para maximizar el rendimiento energético en aplicaciones de baterías.

El espesor considerablemente mayor en los foils laminados sugiere que el proceso de laminación no está optimizado para producir foils delgados, lo cual es una limitación crítica. Este espesor no solo afecta el rendimiento energético, sino que también incrementa los costos de producción, ya que se requiere un aumento de material de cobre por unidad de área.

4. DISCUSIÓN, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIÓN

4.1. Discusión

Los análisis realizados sobre la morfología de los foils de cobre laminado y de referencia muestran diferencias significativas que impactan directamente en su capacidad para aplicaciones en baterías de ion-litio. Los foils laminados presentan una gran cantidad de defectos morfológicos que incluyen grietas y variaciones significativas en el espesor, los cuales limitan su rendimiento y durabilidad. Estos defectos son el resultado de un proceso de laminación que no está optimizado para producir foils delgados y homogéneos, lo que genera limitaciones significativas en su aplicación.

Por el contrario, los foils de referencia, con un espesor uniforme de 9.27 μm , con presencia escasa de grietas, son significativamente más adecuados para su uso en baterías de ion litio. Su morfología homogénea y su espesor optimizado proporcionan un mejor rendimiento energético en aplicaciones de baterías de ion litio.

4.2. Conclusiones

- Los foils laminados presentan serias limitaciones para su uso en baterías de ion-litio debido a la presencia de grietas y variaciones considerables en el espesor (55.10 μm), lo que aumenta la resistencia interna y reduce la eficiencia energética en aplicaciones de baterías ion-litio.
- El proceso de laminación no es adecuado para producir foils de cobre delgados y homogéneos. La mayor cantidad de material y las inconsistencias en el espesor generan un producto de menor calidad y menos eficiente en términos electroquímicos.
- Los foils de referencia caracterizados morfológicamente por SEM son más apropiados para aplicaciones de baterías de ion-litio debido a su morfología homogénea, rugosidad mínima y espesor uniforme de 9.27 μm , lo que mejora la conductividad eléctrica y la eficiencia energética.

4.3. Recomendaciones

- Se recomienda realizar mejoras en el proceso de laminación de los foils estudiados, como ajustar los parámetros de presión y velocidad de laminación, para lograr un mejor control del espesor y reducir la aparición de grietas y espesor.
- Se deben considerar procesos de fabricación alternativos, como la electrodeposición, que permiten un mayor control sobre la morfología y el espesor del foil. Estos métodos podrían producir foils más delgados y libres de defectos.

- Es importante realizar pruebas en condiciones operativas de baterías para evaluar el impacto directo de los defectos morfológicos y las variaciones en el espesor sobre el rendimiento electroquímico, la vida útil y la eficiencia energética de las baterías.

5. REFERENCIAS

Uruchi Cosme, D.A. (2024). Laminación de Cobre Electrolítico Producido en Bolivia para la Fabricación de Foil para el Armado de Baterías de Ión Litio. Proyecto de Grado, Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Ingeniería, La Paz, Bolivia.

Shi, F., Zhang, X., Meng, J., & Zhang, L. (2016). Effects of surface roughness and contact resistance on the performance of lithium-ion battery copper current collectors. *Journal of Power Sources*, 306, 852-861. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2015.12.090>

Kim, D. H., & Kang, S. H. (2019). Investigation of copper foil morphology for high performance lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta*, 311, 102-110. <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.04.042>

Xu, K. (2004). Nonaqueous Liquid Electrolytes for Lithium-Based Rechargeable Batteries. *Chemical Reviews*, 104(10), 4303–4418. <https://doi.org/10.1021/cr030203g>

Linden, D., & Reddy, T. B. (2001). *Handbook of Batteries* (3rd ed.). McGraw-Hill.

Chen, Y., & Yang, C. (2017). Study on the crack propagation in rolled copper foils for lithium-ion batteries. *Materials Research Bulletin*, 95, 419-426. <https://doi.org/10.1016/j.materresbull.2017.08.017>

- Uchida, K., Watanabe, M., & Matsui, K. (2021). Influence of surface treatments of copper foil on lithium plating behavior in lithium-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 482, 228914. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2020.228914>
- Cabrera, N., & Mott, N. F. (1948). Theory of the Oxidation of Metals. *Reports on Progress in Physics*, 12(1), 163–184. <https://doi.org/10.1088/0034-4885/12/1/308>
- Tasaki, K., Yang, M. Y., & Ouchi, S. (2018). Investigation of electrolyte decomposition on copper current collector in lithium-ion batteries. *Journal of The Electrochemical Society*, 165(9), A2052-A2059. <https://doi.org/10.1149/2.1051809jes>
- Cheng, F., Yang, J., & Zhang, X. (2020). Effects of cold-rolling parameters on the microstructure and mechanical properties of copper foils for lithium-ion batteries. *Materials Science and Engineering A*, 774, 138901. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.138901>
- Fan, X., Zhang, Z., & Guo, Y. (2020). Mechanical and electrochemical properties of copper foils for lithium-ion batteries: Influence of rolling process and heat treatment. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(5), 10840-10850. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.07.055>
- Deng, Z., & Wang, J. (2019). Understanding the correlation between copper foil surface morphology and dendrite formation in lithium-ion batteries. *Energy Storage Materials*, 21, 218-227. <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2019.06.008>
- Bates, J. B., Dudney, N. J., & Neudecker, B. J. (2000). Thin-film lithium and lithium-ion batteries. *Annual Review of Physical Chemistry*, 51(1), 475-507. <https://doi.org/10.1146/annurev.physchem.51.1.475>
- Zhang, S. S. (2011). A review on the separators of liquid electrolyte Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 164(1), 351-364. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2010.09.065>

Schröder, J. H., & Schmidt, V. (2020). Review on manufacturing technologies of copper foils for lithium-ion batteries. *Journal of Energy Storage*, 32, 101862. <https://doi.org/10.1016/j.est.2020.101862>



Bodas de Marmol

85

*Años Formando
Profesionales Exitosos*

**Todos los Derechos Reservados
Carrera de Ingeniería Industrial
Facultad de Ingeniería
Universidad Mayor de San Andrés**

La Paz - Bolivia 2024