

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA DE METALÚRGIA Y DE MATERIALES



**LAMINACIÓN DE COBRE ELECTROLÍTICO PRODUCIDO EN BOLIVIA PARA
LA FABRICACIÓN DE FOIL PARA EL ARMADO DE BATERÍAS DE ION LITIO**

Proyecto de grado para obtener el título de Ingeniero en Materiales

Presentado por

DANIELA ANAHI URUCHI COSME

TUTOR

Ing PhD. RODNY BALANZA ERQUICIA

COTUTOR

Ing. GIOVANA DIAZ AVILA

LA PAZ – BOLIVIA

2024



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERIA**



LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.

LICENCIA DE USO

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.

DEDICATORIA

A Dios por la bendición de la vida y permitirme culminar esta etapa de mi vida.

A mi familia, mi papá Nicolas Uruchi, mi hermana Karen Uruchi por su amor y por su apoyo incondicional.

A mi mamá Alicia Cosme que se encuentra en el cielo, por todo su amor, por guiarme, quien siempre me apoyó y confió en mí y a quien siempre llevaré en mi corazón.

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a mi asesor Ing. PhD Rodny Balanza Erquicia, docente investigador del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas de Materiales; quien me brindo su colaboración, tiempo, paciencia y dedicación para la realización de este proyecto, además de compartir conmigo sus conocimientos en el área de laminación y caracterización de materiales.

De igual manera agradecer a mi coasesora la Ing. Giovana Diaz Avila, docente investigador del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas y de Materiales; por el apoyo, colaboración y tiempo, también por asesorarme en el área de producción de baterías de Litio.

También agradecer al Ing. Tito Zegarra Verastegui, docente investigador del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas y de Materiales; por su colaboración en el área de fundición que fue fundamental para la realización del proyecto.

Un agradecimiento muy especial a mi abuelo Manuel Cosme y a la Tornería P.M. por su colaboración con trabajos de mantenimiento y trabajos mecánicos, los cuales me ayudaron de gran manera en el desarrollo del presente proyecto.

Al personal del Instituto de Investigaciones Metalúrgicas y de Materiales por su constante colaboración en el taller mecánico.

ÍNDICE GENERAL

Contenido

ÍNDICE DE FIGURAS	7
RESUMEN	14
CAPITULO 1 INTRODUCCION	15
1.1 La ocurrencia y explotación del recurso Litio	15
1.2 Aplicaciones industriales del Litio	17
1.2.1 Baterías de litio y Baterías de ión Litio	18
1.2.2 Insumos para la fabricación de baterías de ión litio	20
1.2.3 Laminas delgadas o foils de cobre como colector de corriente en baterias de ion litio 22	
1.3 Análisis e identificación del problema a investigar	23
1.4 Objetivo	26
1.4.1 Objetivos Específicos	26
1.5 Justificación	26
CAPITULO 2 MARCO TEORICO	27
2.1 Tecnologías de Fabricación de foils de cobre	27
2.1.1 Electrodeposición	27
2.1.2 Laminado de Cobre Electrolítico	28
2.1.3 Propiedades de los Foils de Cobre	30
2.2 Fundamentos de la laminación de metales	31
2.2.1 Teorías de la laminación en frío	35
2.2.2 Teorías de la laminación en caliente	37
2.2.3 Influencia de la laminación en la microestructura del metal	38

2.2.4	Temperatura de recristalización.....	40
2.2.5	Afinamiento del grano.....	43
2.2.6	Definiciones de acabado superficial.....	44
CAPITULO 3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL		45
3.1	Acondicionamiento de la maquina laminadora	45
3.2	Caracterización de las muestras de foils de cobre provistas por YLB	47
3.2.1	Caracterización de la pureza química	48
3.2.2	Caracterización de las propiedades mecánicas.....	48
3.2.3	Caracterización de la Morfología Superficial de foil de referencia YLB....	50
3.3	Conseguir y caracterizar muestras representativas de cátodos de cobre producidos por Empresa Minera Corocoro y Empresa Minera Bolívar.....	51
3.4	Pruebas Preliminares de laminacion con pletinas de cobre electrolítico.....	53
3.4.1	Laminación en caliente.....	55
3.4.2	Laminación en frio	58
3.5	Fundición de cátodos de cobre de la EM Bolivar.....	60
3.6.	Laminación de la barra fundida de cobre para la obtención de foils	64
3.6.1	Laminado en caliente de la barra fundida de cobre.....	64
3.6.2	Laminación en frio	65
CAPITULO 4 RESULTADOS y ANALISIS.....		68
4.1	Acondicionamiento de la máquina laminadora	68
4.2	Caracterización de las muestras de foils de cobre provistas por YLB	73
4.2.1	Caracterización de la composición química de foils YLB.....	73
4.2.2	Caracterización de las propiedades mecánicas de Foil provisto por YLB..	74
4.2.3	Medición del espesor del foil por Microscopía SEM.....	76

4.2.4	Caracterización de la morfología superficial de foil de referencia YLB.....	78
4.3	Resultados de las Pruebas Preliminares con Pletinas de cobre	80
4.3.1	Caracterización de la muestra de pletina adquirida de Gismart.....	80
4.3.2	Pruebas Preliminares de laminación con pletina adquirida de Gismart	81
4.4	Resultados de la Laminación de la Barra Fundida de Cobre.....	93
4.4.1	Caracterización de la Barra Fundida de Cobre	93
4.4.2	Laminación de la barra fundida a partir de cátodos de cobre de EMBolivar	96
CAPITULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		108
5.1 CONCLUSIONES		108
5.2 RECOMENDACIONES		108

INDICE DE FIGURAS

Figura 1.- 25 años de producción de litio (2021)	15
Figura 2.- Aplicaciones industriales del Litio. (Ref. 3).....	18
Figura 3.- (a) esquema de una batería de ion litio (b)Demanda de litio para autos eléctricos. (ref 6)	20
Figura 4.- Geometrías más habituales de las baterias de ión litio y sus componentes.	21
Figura 5.- Insumos principales para el armado de baterias de ión-litio ofertados por la Compañía Targray.	22
Figura 6.- Análisis del mercado global de foils de cobre.	23
Figura 7.- Esquema de la celda electrolítica para producir foils de cobre.	27
Figura 8.- Equipo de electrodeposición de cobre sobre un tambor que actúa de cátodo.	28
Figura 9.- Esquema representativo de la laminación de cobre.	28
Figura 10.- Secuencia productiva de foils de cobre a partir de lingotes de cobre electrolítico.	29
Figura 11.- Proceso de laminación.	32
Figura 12.- Fuerzas que actúan durante la laminación (Extraído de Dieter).....	33
Figura 13.- Distribución de la presión de laminación a lo largo del arco de contacto.	35
Figura 14.- Relaciones geométricas de un elemento que está sufriendo deformación plana por laminación.	36
Figura 15.- Deformación de la microestructura del metal durante la laminación (a) en caliente, (b) en frio fase 1, (c) en frio fase 2.....	39
Figura 16.- Grafica tiempo y recristalización (isotérmico). (ref 17)	40
Figura 17.- Curvas de transformación isotérmica (recristalización) para cobre puro laminado en frio al 98 % (de Decker B.F AIME 188 1950)	41

Figura 18.- Relación entre a temperatura de recristalización y la temperatura de fusión absoluta.....	42
Figura 19.- Modificación de las propiedades durante la deformación y el recocido.	42
Figura 20.- Apilamiento de dislocaciones en un borde de grano.	43
Figura 21.- Maquina laminadora dúo en estado de entrega por parte de Empresa Minera Bolívar.	46
Figura 22.- Pruebas de laminación.	47
Figura 23.- Muestra de una bobina de foil de cobre de 9 μm proporcionado por YLB para el presente proyecto.	48
Figura 24.- Ensayos de tracción en la Máquina Universal de Ensayos Mecánicos de IIMETMAT.	49
Figura 25.- Microscopio electrónico de barrido (SEM) marca Phillips modelo XL-30.	50
Figura 26.- Rugosímetro portátil del IIMETMAT.	50
Figura 27.- Detalles de la producción de cobre catódico en la EMC.	52
Figura 28.- Detalles de la producción de Cátodos de cobre electrolítico en E. M. Bolívar.	53
Figura 29.- Pletinas de cobre para instalaciones con pureza de 99.994% (foto gentileza de Gismart srl).	54
Figura 30.- Trozo de barra de conexiones eléctricas utilizada para las pruebas preliminares.	55
Figura 31.- Medición de la separación entre rodillos para 4.8 mm.	56
Figura 32.- Horno eléctrico utilizado en el calentamiento de barras de cobre en la laminación.	56
Figura 33.- Laminación en caliente en la laminadora dúo.	57
Figura 34.- Medición del espesor de la pieza laminada.	57
Figura 35.- Equipos de medición de propiedades mecánicas del IIMETMAT.	58
Figura 36.- Muestras provenientes de la laminación en caliente.	59

Figura 37.- Dureza Vickers vs tiempo de recristalización para cobre 99.9% con 95% de deformación por laminación (Ref 21).	60
Figura 38.- Cátodo de cobre provisto por la E.M. Bolivar.....	61
Figura 39.- Horno de crisol a llama de GLP.	61
Figura 40.- Equipo de vaciado.....	62
Figura 41.- Fundición y colada en el molde permanente.	63
Figura 42.- Barra calentada a 750 °C.....	65
Figura 43.- Muestras provenientes de la laminación en caliente.....	66
Figura 44.- Fleje decapado con solución de ácido sulfúrico.	67
Figura 45.- Máquina laminadora acondicionada.	68
Figura 46.- laminación	69
Figura 47.- Fuerzas que intervienen en la laminación.....	69
Figura 48.- Análisis químico de foils realizado en IIMETMAT.....	73
Figura 49.- Propiedades de los foils adquiridos por YLB de la empresa MTI Corporation) ..	74
Figura 50.- Curva tensión – deformación obtenida al aplicar el ensayo de tracción en tiras de foil YLB.....	75
Figura 51.- Curvas Tensión – deformación de 4 ensayos sobre tiras del YLB de referencia. 75	
Figura 52.- Imagen de foil encapsulado en resina obtenida en SEM donde imagen (a) corresponde a detector SE y (b) corresponde a detector BSE.	77
Figura 53.- Detalles de la textura superficial de foil de referencia vistos bajo SEM con detector de electrones secundarios SE. La imagen (a) es de la cara brillante a 1000x y la (b) de la cara opaca a 500x.....	78
Figura 54.- Imágenes SEM de la textura superficial de foils incluidas en el estudio de la Ref 24, donde R10=Laminado a 10 μm y ED6 Electrodepositado a 6 μm	79
Figura 55.- Variación de % de Reducción, % alargamiento y radio de alargamiento entre pasadas.....	83

Figura 56.- Variación de la dureza Brinell en función de las pasadas de laminación en caliente.....	83
Figura 57.- % Reducción, % Alargamiento y Relación de alargamiento entre pasadas.	89
Figura 58.- Mediciones de la Resistencia a la tracción al producto de la laminación en 3 pasadas bajo una abertura de rodillos.	89
Figura 59.- Instante en el que se obtiene el producto de la laminación en frío.	90
Figura 60.- Metalografía óptica del fleje de 0.95 mm laminado a 0.75 mm (a) Granos deformados en sentido de la laminación y (b) granos equiaxiales después del recocido de recristalización. Ataque químico con Dicromato de Potasio. Aumento 300x.....	91
Figura 61.- Fotomicrografía SEM de foil final obtenida de pletina estado no recocido. Microestructura ordenada de granos alargados. Espesor de 63.18 μm	91
Figura 62.- Fleje obtenido de pletina de cobre.	92
Figura 63.- Análisis químico de cátodo realizado en IIMETMAT, se muestra el contenido de Pb(0,006%), Zn (0,002%) y Sn (0.011%) dando como la diferencia 99,981% el contenido de Cu.	93
Figura 64.- Probeta pulida para pruebas de metalografía.....	94
Figura 65.- (a)Fotomicrografía óptica. Cátodo de cobre de EM Bolivar. Microestructura de granos aproximadamente equiaxiales de fase cobre. Ataque con solución de Dicromato de Potasio. Aumento 160x. (b)Fotomicrografía óptica. . Microestructura de barra de cobre fundida de EM Bolivar. Microestructura de granos equiaxiales de fase cobre. Ataque con solución de Dicromato de Potasio. Aumento 160x.	95
Figura 66.- Variación de % de Reducción, % alargamiento y radio de alargamiento entre pasadas.....	98
Figura 67.- Variación de la dureza Brinell en función de las pasadas de laminación en caliente.....	98
Figura 68.- % Reducción, % Alargamiento y Relación de alargamiento entre pasadas	103

Figura 69.- Resistencia a la tracción del producto de la laminación en frío en 3 pasadas bajo una abertura de rodillos.	104
Figura 70.- Fotomicrografía óptica de foil final obtenido de barra fundida en estado no recocido. Ataque químico con solución de dicromato de potasio. Aumento 320x	104
Figura 71.- Fotomicrografía SEM de foil final obtenido de la barra fundida de EM Bolivar en estado recocido.	105
Figura 72.- Fleje obtenido de la barra obtenida.....	105
Figura 73.- Flejes obtenidos en laboratorio.	106

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.- World Lithium Resources ref 4.....	16
Tabla 2.- Propiedades de foils de cobre.....	30
Tabla 3.- Propiedades de foils fabricados por CIVEN METALS.	30
Tabla 4.- Propiedades de Foils de cobre fabricados por JIMA COPPER	31
Tabla 5.- Abertura entre rodillos para laminación en caliente.....	55
Tabla 6.- Programa de aberturas entre rodillos para la laminación en frio.....	59
Tabla 7.- Abertura de rodillos para laminación en caliente.....	64
Tabla 8.- Abertura de rodillos para la laminación en frio de la barra fundida.	66
Tabla 9.- Comparación de la Resistencia a la Tracción ensayada en el presente proyecto y datos de referencia comercial.	76
Tabla 10.- Rugosidad medida sobre ambas caras de foil de referencia.....	80
Tabla 11.- Deformaciones medidas después de cada pasada de laminación en caliente. E_i = espesor antes de la pasada i , E_f = espesor al final de la pasada i . Similarmente para la L = largo y A = ancho. V_i = volumen al final de la pasada. Abertura entre rodillo medida con gauges.	81
Tabla 12.- % Reducción y % de Alargamiento logrado en la laminación en caliente de la pletina de cobre adquirida de Gismart.....	82
Tabla 13.- Deformaciones medidas después de cada pasada de laminación en frio. E_i = espesor antes de la pasada i , E_f = espesor al final de la pasada i . Similarmente para la L = largo y A = ancho. V_i = volumen al final de la pasada. Abertura entre rodillo medida con gauges.	84
Tabla 14.- Recalculo de las dimensiones finales después de 3 pasadas por cada anertura de rodillos.....	87
Tabla 15.- Calculo del % Reducción, % de Alargamiento y Relación de alargamiento por sucesivos pasadas en la laminación en frio de pletina.....	88

Tabla 16.- Deformaciones medidas después de cada pasada de laminación en caliente. E_i = espesor antes de la pasada i , E_f = espesor al final de la pasada i . Similarmente para la L = largo y A = ancho. V_i = volumen al final de la pasada. Abertura entre rodillo medida con gauges.	96
Tabla 17.- % Reducción y % de Alargamiento obtenido en la laminación en caliente de la barra fundida obtenida del cátodo de Cu de la EM Bolívar.	97
Tabla 18.- Deformaciones medidas después de cada pasada de laminación en frío. E_i = espesor antes de la pasada i , E_f = espesor al final de la pasada i . Similarmente para la L = largo y A = ancho. V_i = volumen al final de la pasada. Abertura entre rodillo medida con gauges.	99
Tabla 19.- Recalculo de las dimensiones finales después de 3 pasadas por cada abertura de rodillos	101
Tabla 20.- Calculo del % Reducción, % de Alargamiento y Relación de alargamiento por sucesivos pasadas en la laminación en frío de la barra fundida.	102

RESUMEN

Una posible industria de baterías ion litio en Bolivia generará mercado de materiales auxiliares, algunos de los cuales podrían fabricarse en nuestro país aprovechando materias primas locales. Los insumos que la planta de baterías de ion litio necesita son: precursores para los materiales catódicos (carbonato, hidróxido de litio, óxidos de manganeso, níquel, cobalto y fosfatos de hierro de alta pureza), electrolitos, membranas, carcasas y colectores de electricidad que son **láminas o foils de cobre y aluminio**. Considerando que en Bolivia se cuenta con plantas que producen cobre electrolítico, el presente Proyecto de Grado propone comenzar a demostrar la factibilidad técnica de elaborar foil de cobre RA. La muestra de partida fue cobre electrolítico de la Empresa Minera Bolívar que primeramente fue fundido y colado en barras para laminar. La laminación fue realizada en un laminador dúo de laboratorio con el que se aplicó una primera secuencia de laminación en caliente (750 °C) hasta lograr un espesor de 1 mm. Seguidamente se aplicó una secuencia de laminación en frío intercaladas con tratamiento térmicos de recocido de recristalización (200 °C). Luego de cada pasada se midieron las propiedades mecánicas del producto y las dimensiones finales y, al foil final se realizó una caracterización a través de Microscopia Electrónica de Barrido (SEM) y Microscopia óptica convencional.

Se logró un espesor máximo 54 μm en el foil final cuando la expectativa era de 10 μm aproximadamente. Se concluye entonces que el laminador dúo de laboratorio es insuficiente para producir foils para baterías de ion litio siendo recomendable utilizar un laminador de tipo cuarto.

Palabras Clave: Batería, Litio, Foil, Cobre, Laminado, Caliente, Frío, Espesor.

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 La ocurrencia y explotación del recurso Litio

En la naturaleza, el litio se halla en unos 150 minerales, pero únicamente en unos pocos se considera en cantidades comerciales, y también está presente en salmueras y en aguas de mar y termales. Se lo encuentra en varias formas, asociado a minerales, en sedimentos con arcilla, en salinas o salmueras, en yacimientos de boro o berilio, en suelos de ambientes desérticos y rocas sedimentarias¹.

El litio se obtiene esencialmente de dos fuentes naturales que se muestran en la Figura 1. La principal proviene del mineral espodumeno, que es un silicato doble de aluminio y litio asociado con el cuarzo, mica y feldespato. La otra es a partir de salmueras naturales de los salares, fundamentalmente en forma de sales de litio, sulfato doble de litio y potasio².

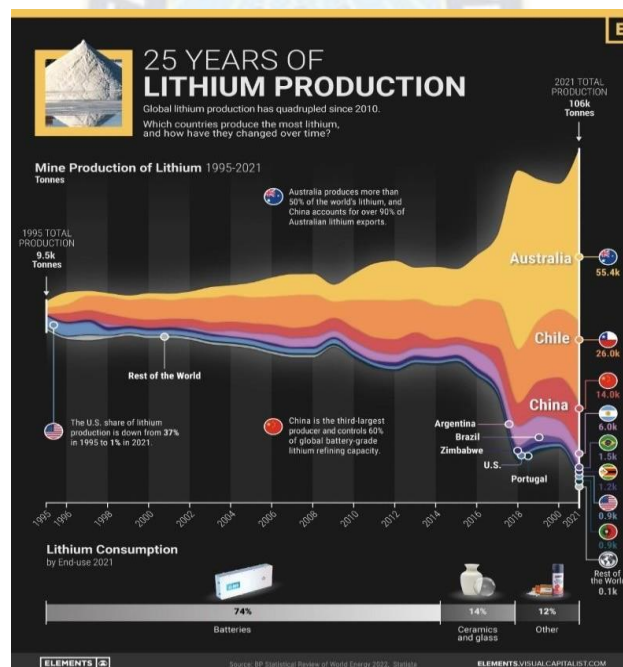


Figura 1.- 25 años de producción de litio (2021)

¹ (Manrique, 2014)

En la Figura 1 se observa que al 2021 Australia es el principal productor de mina a nivel mundial, contribuyendo con cerca de la mitad de producción mundial con 55.4 kton. Le sigue Chile con 26 Kton, China con 14 kton y Argentina con 6 kton.

La Producción mundial de Litio de los productores líderes el año 2021 alcanzó 106.000 Tn Li como se puede ver en la Figura 1.

Recursos mundiales de Litio

Debido a la exploración continua, los recursos de litio medidos e indicados han aumentado sustancialmente en todo el mundo y suman alrededor de 105 millones de toneladas. Recursos de litio medidos e indicados en Estados Unidos (de salmueras continentales, arcillas, salmueras geotérmicas, hectorita, salmueras de yacimientos petrolíferos y pegmatitas) son 14 millones de toneladas. Los recursos de litio medidos e indicados en otros países son 91 millones de toneladas, que se distribuyen de la siguiente manera: Bolivia, 23 millones de toneladas; Argentina, 22 millones de toneladas; Chile, 11 millones de toneladas; Australia, 8,7 millones de toneladas; China, 6,8 millones de toneladas; Alemania, 3,8 millones de toneladas; Canadá, 3 millones de toneladas; Congo (Kinshasa), 3 millones de toneladas; México, 1,7 millones de toneladas; Chequia, 1,3 millones de toneladas; Serbia, 1,2 millones de toneladas; Perú, 1 millón de toneladas; Rusia, 1 millón de toneladas; Malí, 890.000 toneladas; Brasil, 800.000 toneladas; Zimbabwe, 690.000 toneladas; España, 320.000 toneladas; Portugal, 270.000 toneladas; Namibia; 230.000 toneladas; Ghana, 200.000 toneladas; Finlandia, 68.000 toneladas; Austria, 60.000 toneladas; y Kazajstán, 50.000 toneladas.

Tabla 1.- Recursos Mundiales de Litio ²

País	Recursos Nacionales Millones de TM
Bolivia	23
Argentina	22
Chile	11

² (<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024-lithium.pdf>, 2024)

Australia	8.7
China	6.8
Alemania	3.8
Canadá	3
Congo	3
Mexico	1.7
Chequia	1.3
Serbia	1,2
Perú	1
Rusia	1
Malí	0.89
Brasil	0.8
Zimbabwe	0.69
España	0.32
Portugal	0.27
Namibia	0.23
Ghana	0.20
Finlandia	0.068
Austria	0.06
Kazajtán	0.05

1.2 Aplicaciones industriales del Litio

El litio es un recurso que tiene una importancia creciente en el mundo. Además de sus usos tradicionales –grasas lubricantes, medicina, vidrios y cerámicas, entre otros- hoy día es considerado un material energético fundamental.³ Una distribución de aplicaciones se muestra en la Figura 2.

³ (J. Gonzales, 2021)

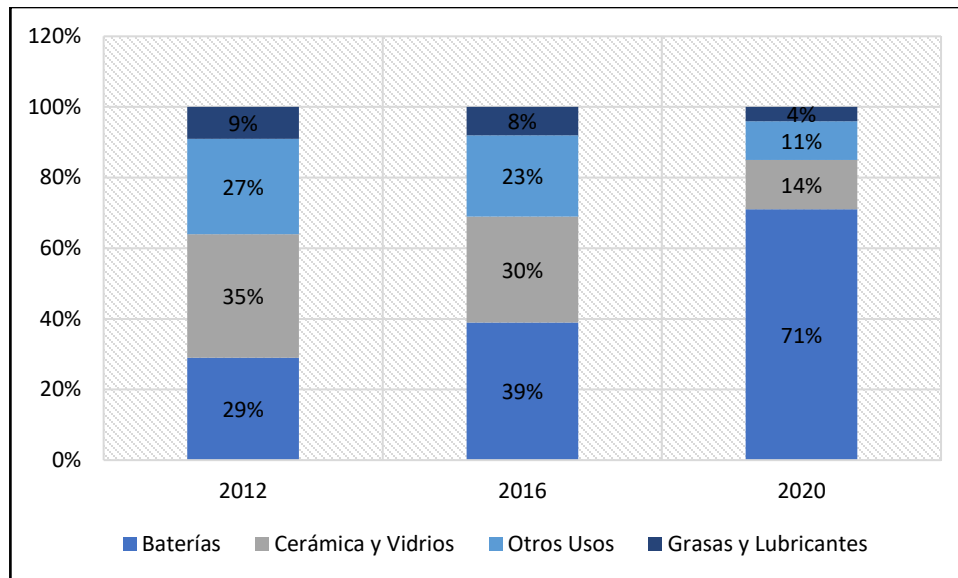


Figura 2.- Aplicaciones industriales del Litio. (Ref. 3)

En efecto, gracias a sus singulares propiedades físico-químicas, se han desarrollado baterías que pueden acumular grandes densidades de energía, siendo además un material muy liviano.

El litio se utiliza para almacenamiento de energía, a través de su uso en baterías eléctricas y acumuladores termosolares. Esto es importante no sólo para la industria electrónica y automotriz, sino también para el uso continuo de las energías renovables no convencionales – eólica, solar, geotérmica- donde se requiere acumular la energía producida durante parte del día (Ref. 3)

1.2.1 Baterías de litio y Baterías de ion Litio

Las baterías de litio contienen litio metálico y no son recargables. Ejemplos de ellas son las de tipo botón que se utilizan en calculadoras manuales, relojes y pequeños dispositivos médicos. Se las denomina baterías de litio primarias y brindan mayor energía útil por unidad de peso que las baterías de ion-litio, que se denominan secundarias. Las baterías de ion-litio usan compuestos de litio, que resultan más estables, no se oxidan espontáneamente y son recargables eléctricamente. (Goonan, 2012). La Real Academia de Ciencias de Suecia ha otorgado el Premio Nobel de Química 2019 a tres destacados investigadores que han dedicado su trabajo al desarrollo de las baterías de iones de litio. El estadounidense John B. Goodenough, el británico Stanley Whittingham y el japonés Akira Yoshino comparten este prestigioso premio como

reconocimiento a la importancia que hoy en día tiene las baterías de litio, presentes en la electrónica de consumo, en los vehículos eléctricos y en los sistemas de almacenamiento de energía, contribuyendo al uso de fuentes renovables.

La ventaja de las baterías de iones de litio es que no se basan en reacciones químicas que descomponen los electrodos, sino en iones de litio que fluyen de un lado a otro entre el ánodo y el cátodo. Una batería de ion litio básica funciona haciendo que los iones de litio se desplacen entre el cátodo o electrodo positivo y el ánodo o electrodo negativo a través del electrolito que se sitúa entre ellos. Cuando está en proceso de descarga los iones se liberan del ánodo y viajan hasta el cátodo y cuando la batería se conecta a un cargador, ocurre lo contrario y la batería se recarga, en la Figura 3 se expone un esquema de una batería de ion litio.

El impulso proporcionado por la electrificación de la industria del automóvil ha provocado que la capacidad mundial de fabricación de baterías de iones de litio se haya triplicado en los últimos cinco años. La capacidad es ahora de 302,2 GWh, que se verán incrementados con otros 603,8 GWh en los próximos cinco años, según datos de BloombergNEF.

La comercialización de vehículos eléctricos e híbridos enchufables impulsan la demanda de litio. De acuerdo con el estudio de Cochilco, la demanda internacional del mineral destinada a electromovilidad alcanzará las 1 416 000 toneladas de carbonato de litio equivalente hacia 2030. Cabe resaltar que en 2020 hubo una baja en la demanda debido a la crisis sanitaria provocada por el Covid 19. De las 102 000 toneladas demandadas el año 2019, el 2020 se llegó a 75 000 toneladas que incluso es mucho menor que en 2018 con 85 000 toneladas.⁴

⁴ Extraído de: (www.mch.cl/2020/08/26/electromovilidad, s.f.)

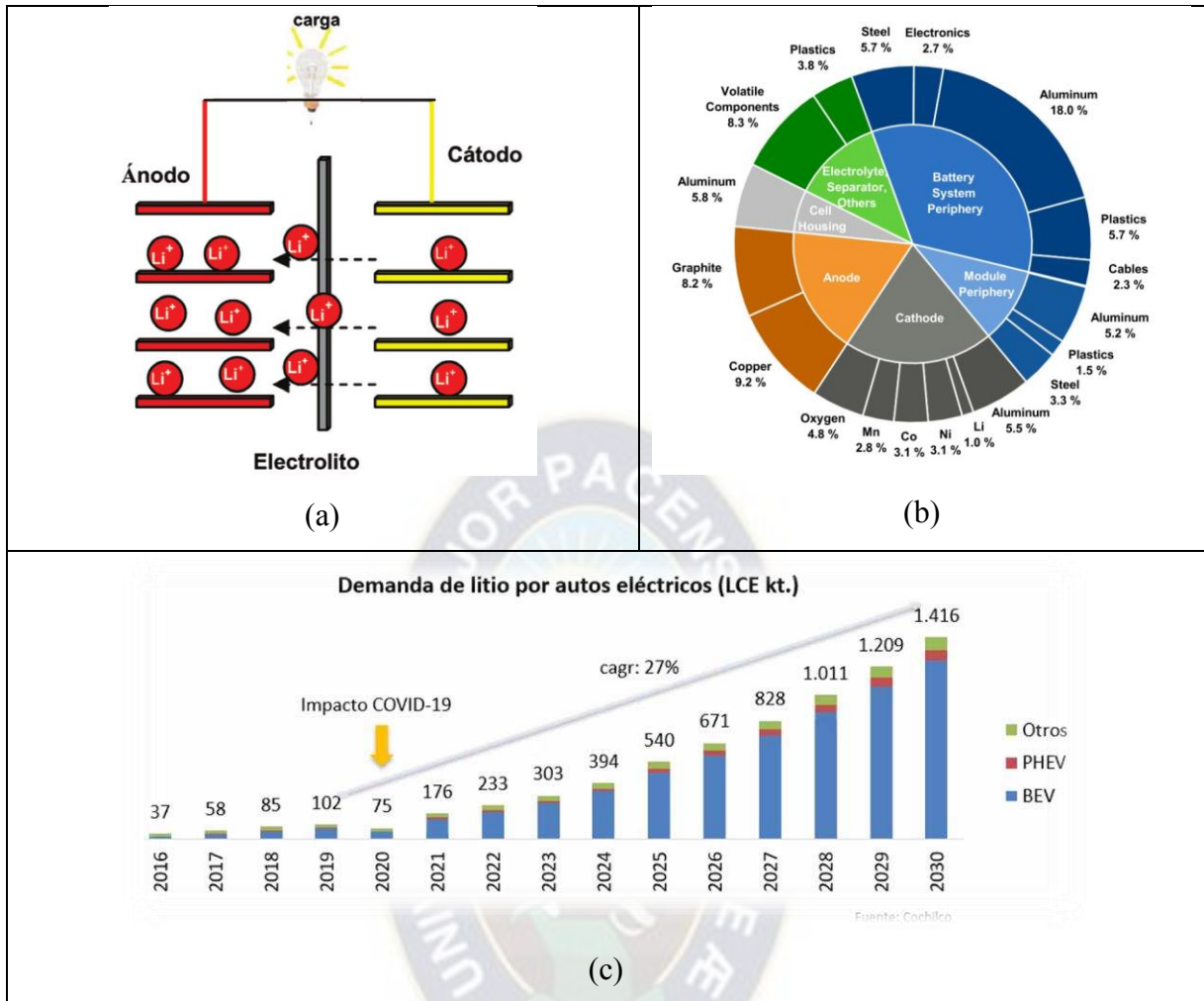


Figura 3.- (a) Esquema de una batería de ion litio, (b) Componentes de una batería, (c) Demanda de litio para autos eléctricos. (ref 6)

1.2.2 Insumos para la fabricación de baterías de ion litio

Existen varias configuraciones y tipos de baterías de ion-litio, que no tienen un diseño y tamaño común, sino que se fabrican específicamente para un determinado dispositivo electrónico. Se podría clasificar a las baterías de ion-litio de acuerdo con la composición química y el empaquetado de la batería. Las baterías de ion-litio recargables se pueden clasificar por el empaquetado en las siguientes categorías cuyo esquema se muestra en la Figura 4 donde se muestran los componentes principales:

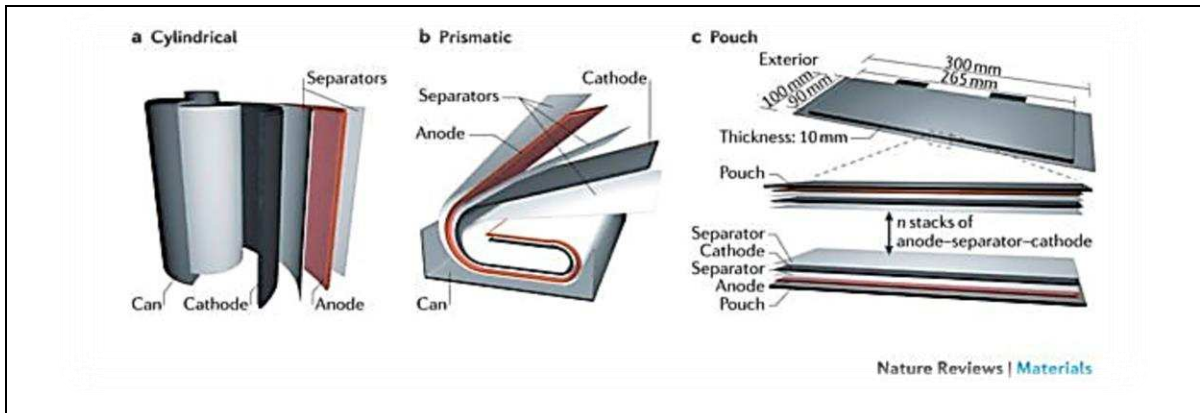





Figura 4.- Geometrías más habituales de las baterías de ion litio y sus componentes.

Targray⁵ es una Empresa Canadiense líder en el suministro de materiales para los fabricantes de baterías de ion-litio de cuya página web se puede extraer su oferta de productos en forma gráfica y que se muestra en la Figura 5.

 <p>CATHODE MATERIALS</p> <p>Cathode materials for battery manufacturing. Products include binders, foils, and cathode active materials (NMC, NCA, LMO, LCO).</p>	 <p>COPPER FOIL</p> <p>An anode foil portfolio of copper current collectors including Electrodeposited (ED), rolled annealed (RA) and roll-clad Cu foils.</p>	 <p>ELECTROLYTE SOLUTIONS</p> <p>Electrolyte solutions. Produced with LiPF₆ salt and a high phosphorous content flame retardant, DMMP.</p>
 <p>Nickel Foil</p> <p>Annealed, ED nickel foil materials. Engineered to meet the performance demands of lithium ion battery manufacturers.</p>	 <p>PVDF & SBR Binders</p> <p>High viscosity binder solutions. Developed specifically for lithium ion battery R&D and manufacturing.</p>	 <p>Pouch Cell Material</p> <p>Aluminum laminate composite pouch material large lithium-ion batteries used in electric vehicles and energy storage applications.</p>

⁵ (products & solution. TARGRAY , s.f.)

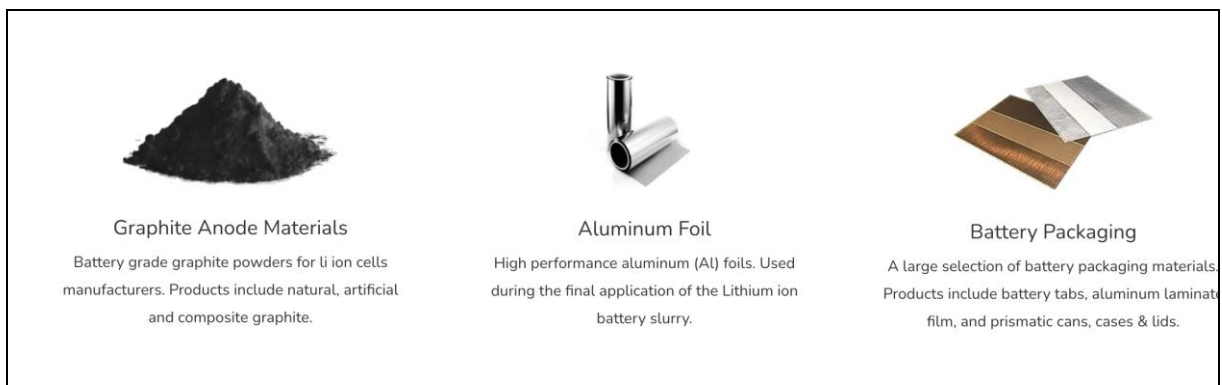


Figura 5.- Insumos principales para el armado de baterías de ion-litio ofertados por la Compañía Targray.

1.2.3 Láminas delgadas o foils de cobre como colector de corriente en baterías de ion litio

Para las baterías de iones de litio, el colector de corriente del cátodo suele ser una lámina o foil de aluminio y **el colector de corriente del ánodo es una lámina o foil de cobre**. Para garantizar la estabilidad interna del colector de corriente en la batería, se requiere que la pureza de ambos sea superior al 98%. Con el continuo desarrollo de la tecnología de baterías de litio, se espera que la densidad de energía gravimétrica (KWh/kg) de la batería sea lo más alta posible y el peso de la batería sea cada vez más ligero por lo que la tendencia es reducir el espesor y el peso del colector de corriente.

El tamaño del mercado internacional de foils de cobre para baterías de litio estaba valorada en 12.52 billones de dólares en 2022 y se espera que alcance 22 billones para el año 2029 con una velocidad de crecimiento de las inversiones (CAGR) de 8.67% durante ese periodo.⁶

La lámina o foil está disponible en espesores que van desde 5 μm (micrómetro) hasta 105 μm , también conocido como grado electrónico. La Figura 6 muestra el alcance del mercado internacional de los foils de cobre hacia el suministro a la industria de las baterías de ion litio:

⁶Extraído de: (Copper Foil Market: Global Industry Analysis and Forecast (2023-2029), 2023)

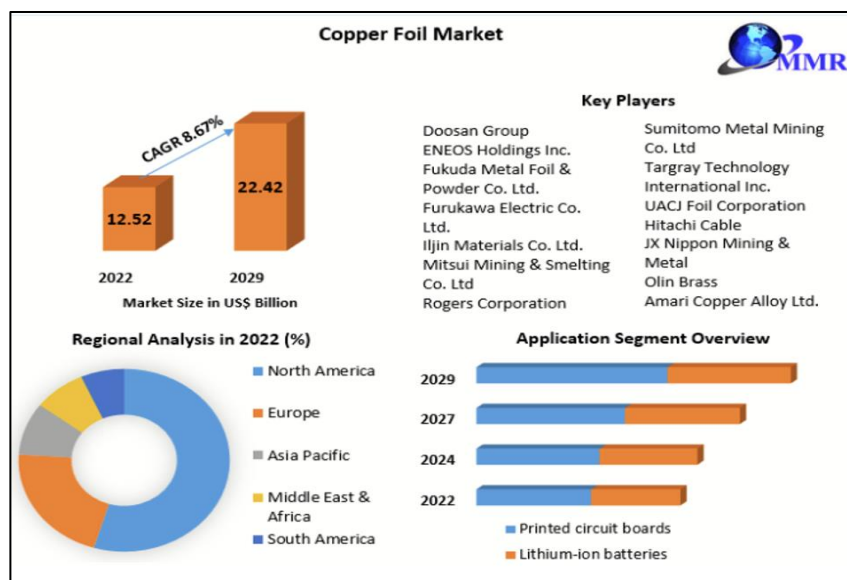


Figura 6.- Análisis del mercado global de foils de cobre.

A nivel nacional, la Empresa estatal Yacimientos de Litio Bolivianos (YLB) considera que la industrialización de los recursos evaporíticos implica, además, la implementación de industrias auxiliares que permitan la provisión de insumos y precursores para estas industrias, como ser cal, carbonato de sodio, ácido clorhídrico, ácido sulfúrico, precursores de materiales catódicos (óxidos de manganeso, níquel, cobalto y fosfatos de hierro de alta pureza), electrolitos, membranas, **láminas de cobre**, carcasas, conectores y todos los componentes para baterías recargables que puedan ser fabricados en Bolivia⁷.

Dado que existe producción de cobre electrolítico por parte de la Corporación Minera de Bolivia (COMIBOL) y algunas empresas privadas será de mucha utilidad estudiar la factibilidad de producir foils con destino a la futura industria de baterías de ion-litio y el presente trabajo tiene la intención de generar una respuesta de las muchas que serán necesarias responder.

1.3 Análisis e identificación del problema a investigar

El foil de cobre es el colector de corriente de ánodo más utilizado en las baterías de iones de litio; no solo deja fluir la corriente eléctrica, sino que también disipa el calor generado por la

⁷ (Montenegro, s.f.)

batería. Cuanto más delgada es la lámina, más material activo se puede cargar en el electrodo, lo que reduce el peso de la batería, aumenta la capacidad de la batería y minimiza los costos de fabricación y el impacto ambiental. Para ello, se requiere tecnología de control de procesos de vanguardia e instalaciones de producción altamente competitivas.

Se utilizan cuatro gramos de lámina de cobre para fabricar un teléfono inteligente; Se requieren de 35 a 40 kg, o diez mil veces más láminas de cobre, para las baterías de vehículos eléctricos de tamaño medio/grande, razón por la cual la demanda de láminas de cobre se ha disparado recientemente, según el productor líder de láminas de cobre SK Nexilis.⁸

El Grupo Consultivo Roskill en el Congreso Green-Car de 2021 presentó un análisis de las cinco tendencias principales en el mercado foils de cobre para baterías de litio para la presente década:

- Los productores de foils de cobre para baterías de litio están a plena capacidad de producción y ventas.
- La producción de foils de cobre de la batería de litio no puede satisfacer la demanda del mercado.
- Las empresas de foils de cobre aceleran el diseño hacia foils más delgados.
- Las compañías de baterías se unen e invierten en fábricas de foils de cobre para asegurar la cadena de suministro.
- El mercado de foils para baterías se ha hecho muy atractivo para inversiones privadas y públicas.

Frente a este panorama internacional tan interesante en tamaño y proyección de rentabilidad, se pueden situar dos industrias bolivianas que podrían aprovechar la oportunidad y apuntalar un proyecto para fabricar foils de cobre en Bolivia:

⁸ (Green Car Congress. Roskill: surge in electrodeposited copper foil projects to meet projected EV demand., 2021)

- Las Empresas Metalúrgicas que producen cobre electrolítico como la compañía estatal Empresa Minera Corocoro y otras privadas.
- La Empresa estatal Yacimientos de Litio Bolivianos (YLB).

YLB, en su Estrategia Nacional de Industrialización de los Recursos Evaporíticos de Bolivia se menciona lo siguiente:

*“La industrialización de los recursos evaporíticos implica, además, la implementación en Bolivia de industrias auxiliares que permitan la provisión de insumos y precursores para estas industrias, como ser cal, carbonato de sodio, ácido clorhídrico, ácido sulfúrico, precursores de materiales catódicos (óxidos de manganeso, níquel, cobalto y fosfatos de hierro de alta pureza), electrolitos, membranas, **láminas de cobre y aluminio**, carcacas, conectores”*

Claramente el efecto multiplicador del complejo industrial en los salares de Bolivia planteará desafíos para ideas de adaptación, ideas de innovación, proyectos de inversión y trabajos de investigación aplicada útiles para la generación de unidades productivas que suministren los insumos que se demande.

Por otra parte, se conoce que la Empresa Minera Corocoro tiene una Planta que tiene una capacidad de 300 toneladas/mes de cobre electrolítico de 99.9% de pureza y se conoce que hay otras empresas metalúrgicas privadas y más pequeñas que también producen cobre electrolítico. Este producto bien puede servir como materia prima para producir foils con un mucho mayor valor agregado.

Actualmente hay dos tecnologías para la producción de foils de cobre que se aplican a la industria electrónica; a saber, (1) Laminación (denominando el producto como foils RA = rolled and annealed) y (2) electrodeposición (denominando al producto foils ED = electro - deposited). Entonces uno de los primeros problemas que necesitan respuesta es ¿Cuál de las tecnologías se pueden aplicar mejor técnica y económicamente en Bolivia?.

Se abre por tanto un frente de investigación para responder a esta pregunta sobre la base de que en Bolivia se produce cobre electrolítico como posible materia prima de partida.

Para el propósito del presente Proyecto de Grado se ha identificado como problema de investigación específico el producir a nivel laboratorio foils RA a partir de cobre electrolítico producidos en Bolivia.

1.4 Objetivo

Determinar la factibilidad técnica de laminar cobre electrolítico producido en Bolivia para baterías de ion-litio, por el lapso de una gestión.

1.4.1 Objetivos Específicos

- Adecuar una maquina laminadora tipo duo de laboratorio.
- Caracterizar las propiedades estructurales, químicas, y mecánicas de foils (láminas).
- Establecer la mejor secuencia de laminación y de tratamiento térmico.
- Reducir el espesor inicial de las láminas de cobre electrolítico en un 90%..
- Obtener láminas de cobre con características mecánicas internacionalmente aceptadas en estos productos.

1.5 Justificación

- El desarrollo del presente trabajo de investigación despertará el interés para otros consecuentes que ayuden a la toma de decisiones en el diseño de plantas industriales que suministren insumos a una posible industria de baterías de litio.
- Dentro de la política de investigaciones de la UMSA tiene prioridad contribuir con conocimiento a la industria del litio boliviano
- El IIMETMAT suscribió un convenio con YLB para coparticipar en proyecto de investigación que apuntalen la industria del litio.
- Hasta el momento no hay estudios de investigación básicos o aplicados sobre la temática expuesta ni hay todavía ningún proyecto de factibilidad que propongan esta etapa adicional en la industria del cobre en Bolivia.

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO

2.1 Tecnologías de Fabricación de foils de cobre

2.1.1 Electrodeposición

En un proceso de fabricación de cobre electro depositado, la lámina de cobre se deposita en un tambor giratorio de titanio desde una solución de cobre donde se conecta a una fuente de voltaje de CC. La Figura 7 muestra que el cátodo está unido al tambor y el ánodo es sumergido en la solución de electrolito de cobre. Cuando se aplica un campo eléctrico, el cobre se deposita en el tambor a medida que gira a un ritmo muy lento. La superficie de cobre del lado del tambor es lisa mientras que el lado opuesto es rugoso. Mientras más lenta sea la velocidad del tambor, el cobre se vuelve más grueso y viceversa. El cobre es atraído y acumulado en la superficie cátodo del tambor de titanio. El lado mate de la lámina de cobre pasa por diferentes ciclos de tratamiento así el cobre podría ser adecuado para la fabricación de PCB (printed circuit board). Los tratamientos mejoran la adherencia entre el cobre y la capa intermedia de dieléctrico durante el proceso de laminación revestida de cobre. Otra ventaja de los tratamientos es que actúan como agentes anti-deslustre al ralentizar la oxidación del cobre.

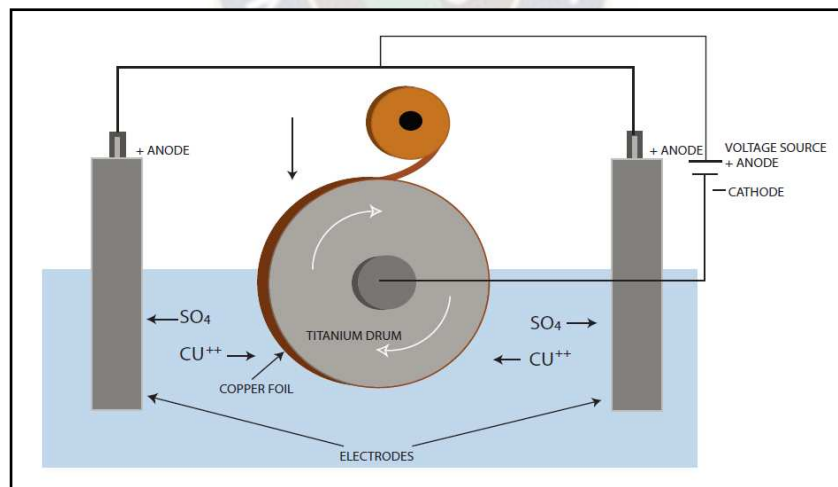


Figura 7.- Esquema de la celda electrolítica para producir foils de cobre.



Figura 8.- Equipo de electrodeposición de cobre sobre un tambor que actúa de cátodo.

2.1.2 Laminado de Cobre Electrolítico

El cobre laminado se fabrica mediante sucesivas operaciones de laminado en frío para reducir el espesor y extender la longitud comenzando con un tocho de puro cobre como el esquema mostrado en Figura 9. La suavidad de la superficie depende del estado del tren de laminación.⁹

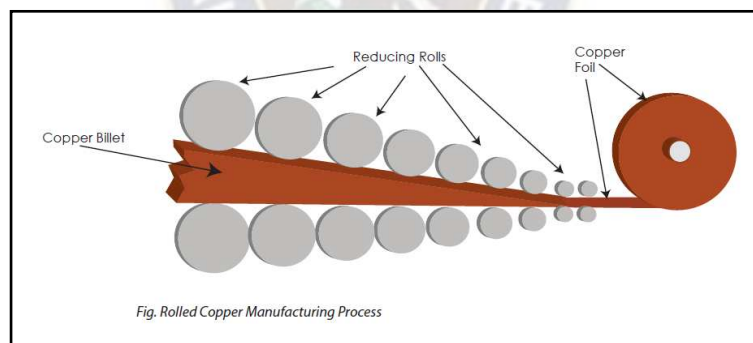


Figura 9.- Esquema representativo de la laminación de cobre.

Se forman bobinas de láminas delgadas y se someten a un tratamiento químico y mecánico posterior hasta que adquieren su forma final. En la Figura 10 se ofrece una descripción esquemática del proceso de laminación de láminas de cobre. Un bloque de cobre se calienta hasta 750 °C, luego se lamina en caliente de forma reversible en varios pasos hasta 1/10 de su

⁹ (Corporation, 2019).

espesor original. Antes de la primera laminación en frío, las escamas que se originan en el tratamiento térmico se eliminan mediante desbaste. En el proceso de laminación en frío, el espesor se reduce a aproximadamente 4 mm y las hojas se forman en bobinas. El proceso se controla de tal manera que el material solo se alarga y no cambia su ancho. Como las láminas no se pueden formar más en este estado (el material se ha endurecido por el trabajo extensamente), se someten a un tratamiento térmico y se calientan a aproximadamente 550 ° C y se continua con la laminación.¹⁰

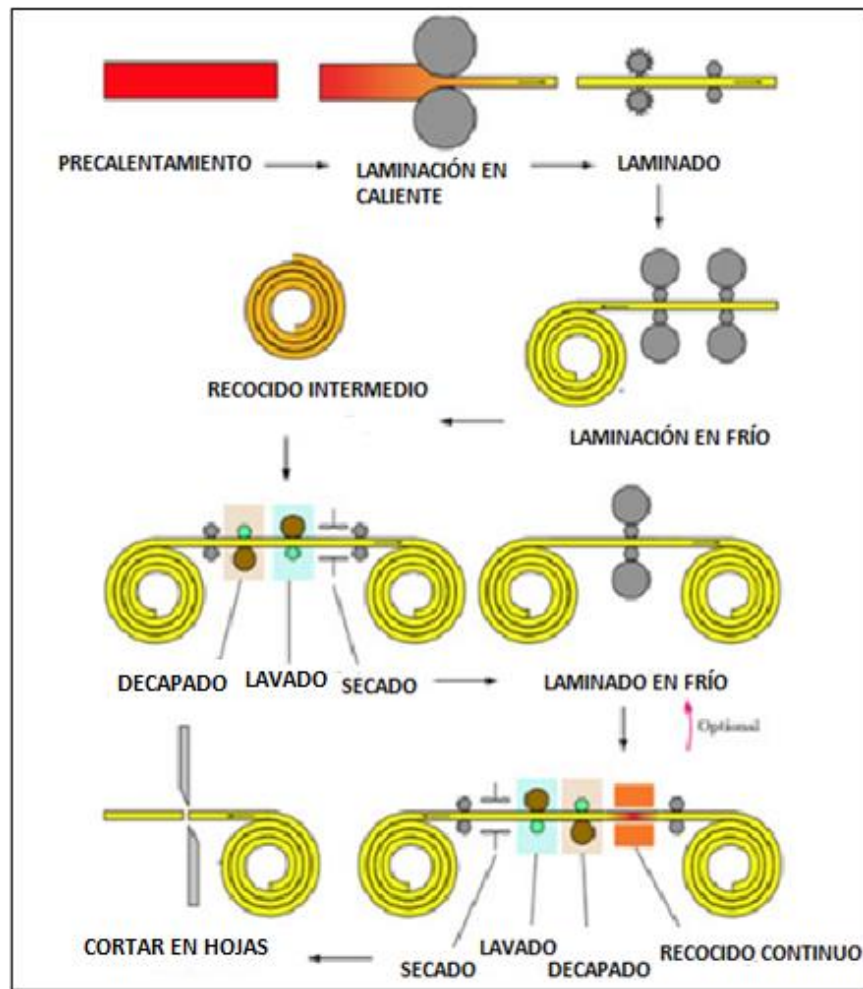


Figura 10.- Secuencia productiva de foils de cobre a partir de lingotes de cobre electrolítico.

¹⁰ (Copper Foil Manufacturing, 2019)

2.1.3 Propiedades de los Foils de Cobre

En la Tabla 2 se presenta datos de las propiedades mecánicas y eléctrica que los foils deben tener para aplicarse como colectores del ánodo de las baterías de ion litio

Tabla 2.- Propiedades de foils de cobre (ref 12) (oz = onzas)

Propiedad	Electro-depositado				Laminado		
	0.25 oz 8 μm	0.5 oz 18 μm	1 oz 35 μm	2 oz 70 μm	0.5 oz 18 μm	1 oz 35 μm	2 oz 70 μm
Resistencia a la tracción (Kpsi)	15	33	40	40	20	22	28
Elongación %	2	2	3	3	8	13	27
Vol. Resistividad Mohm-cm		1.66	1.62	1.62	1.78	1.74	1.74

La Tabla 3 también presenta como referencia propiedades de foils ED ofertados por la empresa CIVEN METALS de Shangai China¹¹

Tabla 3.-Propiedades de foils fabricados por CIVEN METALS.

Propiedad	Unidad	Especificación						
		6 μm	7 μm	8 μm	9/10 μm	12 μm	15 μm	20 μm
Pureza Cu	%	≥ 99.9						
Peso/ área	mg/10cm ³	54 \pm 1	63 \pm 1.25	72 \pm 1.5	89 \pm 1.8	107 \pm 2.2	133 \pm 2.8	178 \pm 3.6
Resistencia a la tracción (25 °C)	Kg/mm ²	28-35						
Elongación (25 °C)	%	5-10			5-15		10-20	
Rugosidad (M- lado)	μm	0.8-2.0					0.6-2.0	
Tolerancia de ancho	mm	0/+2						
Tolerancia longitud	m	0/+10						
Cambio de color	130 °C/10 min 150 °C/10min	Ninguno						
Pliegue	----	Ancho \leq 40mm					Ancho \leq 30mm	
Apariencia	----	Sin rayas, contaminación, oxidación, decoloración y así durante el uso						
Método de bobinado	----	Cuando en el bobinado es estable no hay fenómeno de rollo suelto.						

¹¹ (Metals, s.f.)

La Tabla 4 presenta referencia comercial de foils RA ofertados por JIMA Cooper¹²

Tabla 4.- Propiedades de Foils de cobre fabricados por JIMA COPPER

FICHA TECNICA DE FOIL DE COBRE LAMINADO PARA BATERIAS						
Espesor	9/10/12/15/20 μm		ancho		≤ 620 mm	
Propiedad	Unidad	Parámetro				
Espesor	Mm	0.009	0.01	0.012	0.015	0.02
Grade -	-	C1100	C1100	C1100	C1100	C1100
Contenido de cobre	%	≥99.95	≥99.95	≥99.95	≥99.95	≥99.95
Peso/área	g/m ²	80±3	95±3	107±4	134±4	178±6
Doble- lado (Ra)	μm	≤0.17	≤0.17	≤0.17	≤0.17	≤0.17
Resistencia a la tracción	Mpa	≥380	≥400	≥400	≥400	≥400
Estado Normal	%	≥1.2	≥1.4	≥1.5	≥1.5	≥1.6
Conductividad	20 °C IACS	≥95%	≥95%	≥95%	≥95%	≥95%
Resistencia a la oxidación a alta temperatura (180)		Calificado	Calificado	Calificado	Calificado	Calificado

IACS = Norma Internacional del Cobre Recocido (International Annealed Copper Standard)

2.2 Fundamentos de la laminación de metales

- Citando a George Dieter se entiende a la laminación como el proceso de conformar plásticamente los metales haciéndolos pasar entre cilindros. Es el procedimiento mas extendido para el trabajo de los metales, porque es el que mejor se presta a las producciones elevadas y permite obtener un buen control de los productos finales. Al deformar los metales pasándolos entre rodillos se somete el material a intensas tensiones de compresión, por el efecto de aplastamiento de los cilindros, y a tensiones superficiales de cizallamiento originadas por la fricción entre los cilindros y el metal. Las fuerzas de fricción son las encargadas de producir el estirado del metal como se representa en la Figura 11.

¹² (JIMA COPPER. Specialist of conductive copper, s.f.)

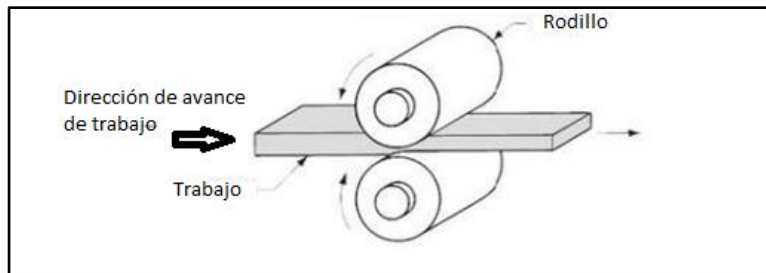


Figura 11.- Proceso de laminación.

- El lingote inicial se transforma en desbastes pesados o blooms generalmente por laminación en caliente. Los desbastes se continúan laminando en caliente hasta obtener planchas o chapas gruesas, chapa fina, barras, varillas, tubos carriles o perfiles estructurales. En frío se lamina la chapa fina y extra-fina, el fleje, etc obteniéndose productos de buen acabado superficial y mejor resistencia mecánica, a la vez que se consigue una gran precisión en las dimensiones del producto que se enrolla en bobinas para comercialización.

El proceso de laminado como ha quedado dicho anteriormente puede realizarse tanto en frío como en caliente. Los términos "frío" y "caliente" hacen referencia a si el material a procesar se encuentra a una temperatura por debajo o por encima respectivamente de su temperatura de cristalización.

La laminación en frío se aplica cuando son requeridas reducciones menos severas debido a que son necesarios esfuerzos mayores y se aparecen tensiones residuales en la superficie del material, sin embargo, se obtiene un material con mejores propiedades mecánicas y mejor acabado, idóneo para piezas con tolerancias más estrechas. Además, la laminación en frío no es sólo utilizado en procesos de reducción de espesor, sino que en ocasiones únicamente se utiliza para mejorar la resistencia del material mediante el endurecimiento por deformación.

En contraposición, la laminación en caliente es aplicada cuando se requieren grandes reducciones de espesor, ya que se requieren menores esfuerzos, por lo que generalmente el material final se encuentra libre de esfuerzos residuales y sus propiedades son isotrópicas. Proceso idóneo para reducciones severas en piezas en las que el acabado no es lo más importante y en cuyas tolerancias no sean muy estrechas, puesto que es muy difícil mantenerse dentro de

ellas. Además, se corre el riesgo de la formación de una capa de óxido característica en su superficie.

Fuerzas y relaciones geométricas en la laminación

La Figura 12 sirve para explicar las relaciones entre las dimensiones de los cilindros y las fuerzas que intervienen en la deformación de un material por laminación:

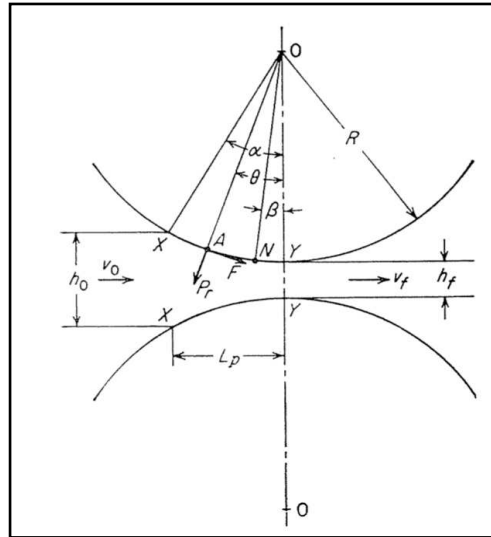


Figura 12.- Fuerzas que actúan durante la laminación (Extraído de Dieter).

- En el punto A actúan dos fuerzas en el metal, una en dirección del radio p_r y otra tangencial de fricción F
- Entre el punto de entrada y el punto neutro N, la fuerza de fricción actúa en la dirección indicada arrastrando el metal entre los cilindros
- Pasado el punto neutro N la chapa se mueve más aprisa que la superficie de los cilindros y se invierte la dirección de F .
- La componente vertical de p_r se denomina *carga de laminación* P . Es la fuerza con la que los cilindros comprimen entre sí al metal.
- La presión específica de los cilindros p = carga de laminación/superficie de contacto
- La superficie de contacto = ancho de chapa x proyección de la longitud del arco de contacto L_p .
- Según análisis geométrico $L_p \approx \sqrt{R(h_0 - h_f)}$
- La presión específica del cilindro está dada por

Ecuación 1
$$p = \frac{P}{bL_p}$$

- El ángulo α se llama ángulo de contacto o ángulo de mordido. El metal no puede entrar en el laminador cuando $\text{tg}\alpha$ es mayor que el coeficiente de fricción entre los cilindros y el metal.
- El ángulo β formado por la línea de los centros OO de los cilindros y la línea al punto neutro N suele llamarse *ángulo de no deslizamiento* puesto que las fuerzas de fricción cambian de sentido en el punto neutro.

Variables principales de la laminación

1. Diámetro de los cilindros.
2. Resistencia a la deformación del metal.
3. Fricción entre los cilindros.
4. Presencia de tensiones de tracción hacia adelante o hacia atrás.
 - Para una reducción dada y unas condiciones de fricción determinadas, el aumento del diámetro de los cilindros acarrea un aumento grande de la carga de laminación.
 - Si el diámetro del cilindro se mantiene constante pero varía su altura aumenta la tensión de compresión.
 - La laminación de la chapa es, esencialmente un proceso de deformación plana, por lo que depende del valor del límite elástico obtenido por ensayo de compresión plana.
 - La fricción entre el cilindro y el metal es muy importante en la laminación, no solo porque la fricción es la que fuerza al metal a entrar entre los cilindros sino porque afecta también a la magnitud y distribución de la presión del cilindro. Como se puede ver en la Figura 13, cuanto mayor son las fuerzas de fricción más grande debe ser la carga de laminación y el máximo de presión se alcanzará con el gradiente más grande.

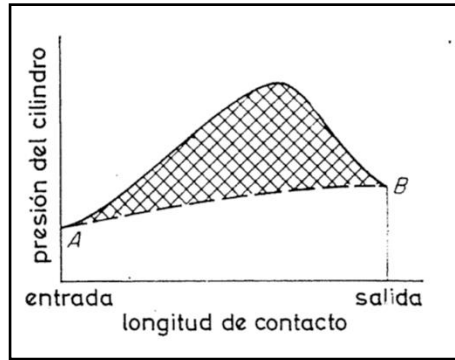


Figura 13.- Distribución de la presión de laminación a lo largo del arco de contacto.

La fricción varía de un punto a otro a lo largo del arco de contacto del cilindro, pero como es muy difícil medir esta distribución de la presión todas las teorías de laminación admiten un coeficiente de fricción constante. Se puede calcular el valor medio del coeficiente de fricción determinando el ángulo máximo de contacto para el que el metal es justamente mordido por los cilindros.

$$\text{Ecuación 2 } f = tg\alpha_{max}$$

2.2.1 Teorías de la laminación en frío

Una teoría de la laminación debe expresar las fuerzas externa tales como la carga y el par de laminación en función de las condiciones geométricas de la deformación y las características de resistencia mecánica del metal que ha de laminarse

Para encontrar las relaciones matemáticas se tienen que plantear las siguientes condiciones:¹³

1. El arco de contacto es circular; no hay deformación elástica de los cilindros
2. El coeficiente de frotamiento es constante en todos los puntos del arco de contacto
3. No hay ensanchamiento lateral
4. Las secciones verticales de mantiene planas
5. La velocidad periférica de los cilindros es constante
6. La deformación elástica de la chapa es despreciable frente a la deformación plástica
7. Se cumple el criterio de energía de distorsión para la deformación plana:

¹³ Citado en Ref 16

Ecuación 3
$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 = \sigma'_0$$

Donde

- $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_{31} = \text{tensiones principales}$
- $\sigma_0 = \text{límite elástico del material}$
- $\sigma'_0 = \text{límite elástico en deformación plana}$

En la Figura 14 se muestra las tensiones que actúan sobre un elemento de la chapa en la abertura entre cilindros:

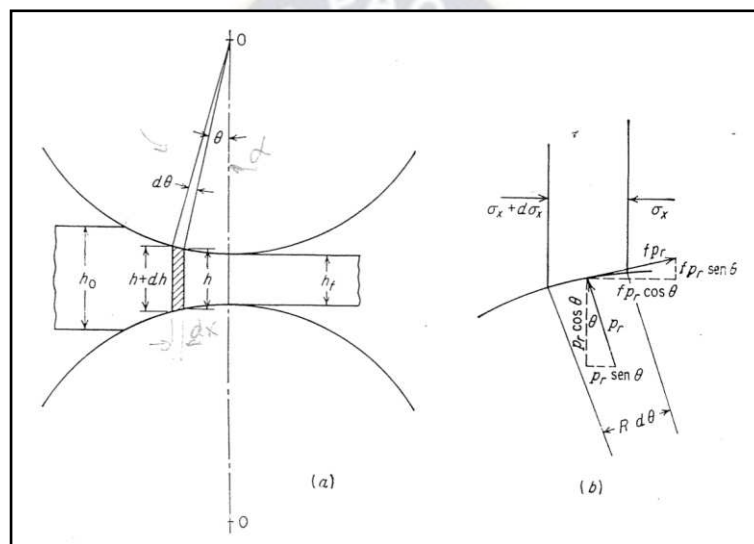


Figura 14.- Relaciones geométricas de un elemento que está sufriendo deformación plana por laminación.

- Las tensiones que actúan en un punto de contacto de ángulo θ son:
 - La tensión radial p_r
 - La tensión tangencial de cizallamiento $\tau = f p_r$
 - Estas tensiones se descomponen en componentes x y y como se muestra en (b)
 - La tensión σ_x está uniformemente distribuida sobre las caras verticales del elemento dx
 - La carga normal en un extremo del elemento $= p_r R d\theta$
 - La componente horizontal de la carga $= p_r R \text{sen} \theta d\theta$
 - La fuerza de fricción tangencial $= f p_r R d\theta$

- Componente horizontal de la fuerza de fricción = $f p_r R \cos \theta d\theta$

Considerando las fuerzas horizontales como $\sum F_x = 0$ sobre el elemento de volumen resulta que:

$$\text{Ecuación 4 } (\sigma_x + d\sigma_x)(h + dh) + 2f p_r R \cos \theta d\theta - \sigma_x h - 2p_r R \sin \theta d\theta = 0$$

Simplificando:

$$\text{Ecuación 5 } \frac{d(\sigma_x h)}{d\theta} = 2p_r R (\sin \theta \pm f \cos \theta)$$

Los signos positivo y negativo de la ecuación se debe a que el sentido de la fuerza de fricción cambia en el punto neutro.

Las fuerzas que actúan verticalmente son equilibradas por la presión específica de los cilindros p , siendo la relación entre la presión normal t la presión radial la siguiente:

$$\text{Ecuación 6 } p = p_r (1 \pm f t g \theta)$$

La relación entre la presión normal p y la tensión de compresión horizontal σ_x está dada por la condición del “criterio de la energía de distorsión” para la fluencia en tensión plana:

$$\text{Ecuación 7 } \sigma_1 - \sigma_3 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_0 = \sigma'_0$$

O bien

$$\text{Ecuación 8 } p - \sigma_x = \sigma'_0$$

La carga de laminación o fuerza total del cilindro, P , es la integral de la presión específica a lo largo del arco de contacto:

$$\text{Ecuación 9 } P = R b \int_0^{\theta=\alpha} p_r d\theta$$

- b = ancho de la chapa
- α = *angulo de contacto*

2.2.2 Teorías de la laminación en caliente

Se entiende laminación en caliente cuando esta se realiza a temperaturas por encima de la temperatura de recrystalización. El análisis tiene mayor complejidad que la laminación en frío porque el límite elástico y la tensión de fluencia es función de la temperatura y la velocidad de deformación.

Durante la laminación en caliente, la velocidad de deformación es una función de la posición a lo largo del arco de contacto indicada por θ aunque no se han hecho mediciones de precisión del coeficiente de fricción en el caso de la laminación en caliente, se sabe que sus valores son mas elevados que en la laminación en frio. La fuerza tangencial f_p puede alcanzar valores tan elevados como el límite elástico en deformación plana σ'_0 cuando esto ocurre, la chapa se mueve a la misma velocidad periférica de los cilindros con lo que se logra un caso de “fricción con adherencia perfecta”.

La velocidad de deformación para la laminación con adherencia perfecta esta dada por:

$$\dot{\epsilon} = \frac{v}{h} = \frac{2V \text{ sen } \theta}{h} = \frac{2V \text{ sen } \theta}{h_f + D(1 - \cos \theta)}$$

en la que:

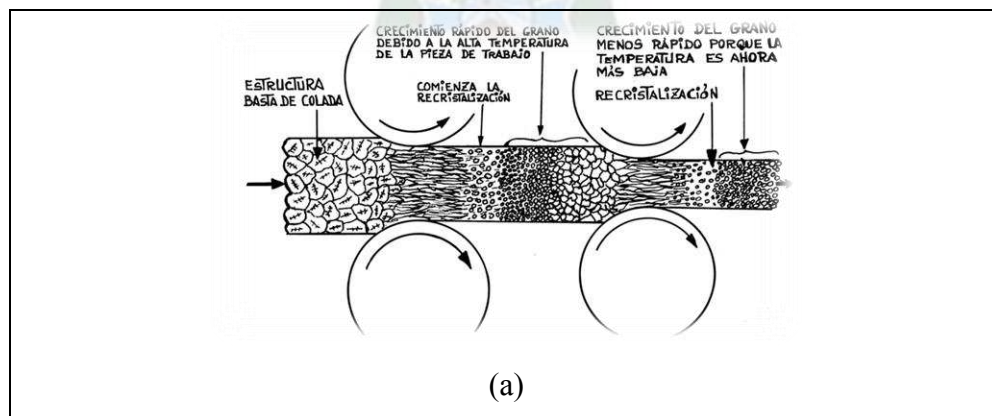
v = velocidad de un punto de la superficie del metal,
 V = velocidad periférica de los cilindros.

Ecuación 10

En la laminación en caliente el límite elástico o tensión de fluencia por endurecimiento se mantiene constante, pero, a pesar de ello, como la velocidad de deformación varía a lo largo del arco de contacto se modificará dicha tensión de fluencia.

2.2.3 Influencia de la laminación en la microestructura del metal

Los esfuerzos de compresión a que se somete el metal durante la laminación deforman también la microestructura de granos afectando por tanto a las propiedades mecánicas del producto laminado. En la Figura 15 se presenta gráficamente la deformación de la microestructura durante el laminado en caliente y en frio.



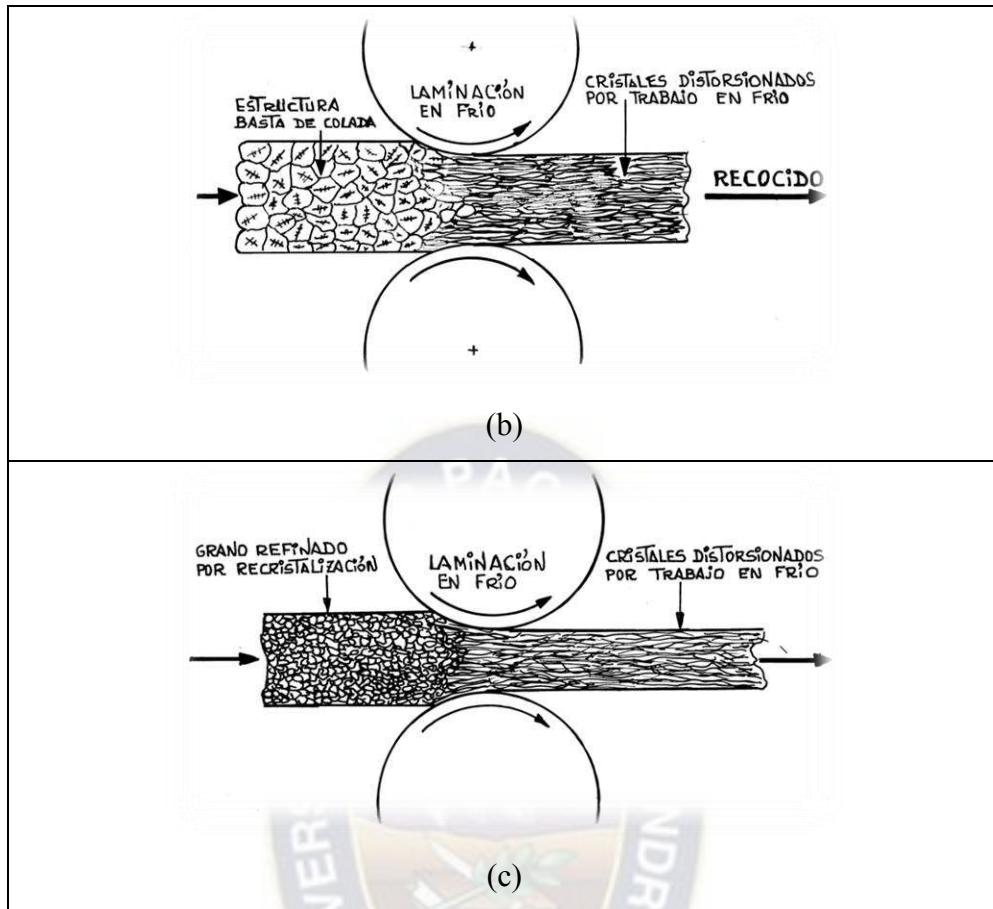


Figura 15.- Deformación de la microestructura del metal durante la laminación (a) en caliente, (b) en frío fase 1, (c) en frío fase 2.

En el caso del conformado en caliente, los granos deformado por las tensiones compresivas y de corte se recristalizan inmediatamente después de la salida logrando granos mas finos en las etapas consecuentes de laminación.

En el caso de la laminación en frío, o cold working, la mayoría de la energía invertida en el proceso aparece en forma de calor, pero una fracción de esta es almacenada en el metal como energía de deformación, asociada con defectos creados en la red cristalina.

La energía almacenada en el metal, principalmente está asociada con el incremento del número de dislocaciones durante el proceso cold working. Un metal bien tratado térmicamente contiene 10^{10} a 10^{12} dislocaciones/ m^2 , mientras que un metal sometido a cold working puede tener 10^{16} / m^2

El proceso cold working aumenta el número de dislocaciones en un factor de 10,000 a 1,000,000.

El proceso cold working cambia casi todas las propiedades físicas y mecánicas del metal, incrementa resistencia, dureza, resistencia eléctrica y, disminuye ductilidad. De modo que es necesario que el metal deformado sea sometido a un proceso de **Recuperación o Recocido de Recristalización** para recuperar sus propiedades.

En el **Recocido de Recristalización** los granos deformados se sustituyen por granos nuevos a través de un proceso de nucleación y crecimiento de grano hasta que los granos originales han sido completamente consumidos. En la recristalización, una región preexistente altamente desordenada en relación al material que la rodea, da origen aun nuevo grano. El alto grado de desorden proporciona la movilidad requerida para que el grano crezca.

Durante tratamiento térmico isotérmico la razón de recristalización es muy baja al inicio, después se incrementa grandemente y al final decrece.

El tratamiento termico de recristalización es un tratamiento isotérmico que depende del tiempo y la temperatura de tratamiento como se ve en la Figura 16.¹⁴

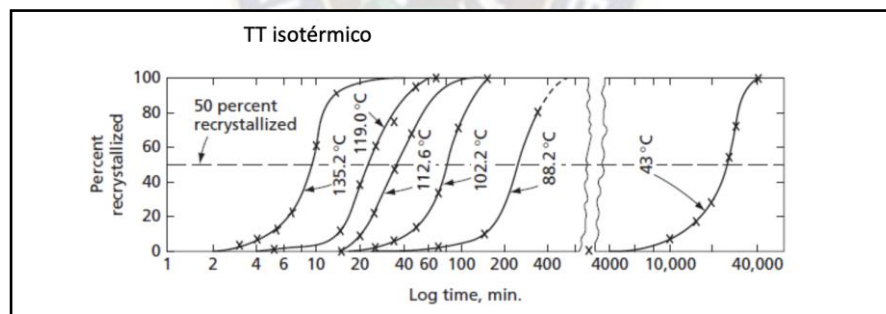


Figura 16.- Grafica tiempo y recristalización (isotérmico). (ref 17)

2.2.4 Temperatura de recristalización.

Como es de suponerse, la velocidad de transformación depende de la temperatura, como lo demuestra la Fig. 17 para el caso de la recristalización de cobre puro. En ella se puede observar que a mayor temperatura se requieren menores tiempos para realizar la transformación.

¹⁴ (Dieter, 1970)

Entonces ¿cuál es la temperatura de recristalización del material, si esta se lleva acabo a cualquier temperatura? Para fijarla y poder compararla con la de otros materiales debe definirse un tiempo y una fracción recristalizada. Las definiciones más comunes (y practicamente equivalentes) son:

a) $t = 1 \text{ h}$ y $f = 0.95$ y

b) $t = 30 \text{ min}$ y $f = 0.50$

En el ejemplo del cobre puro que se ha mencionado, la curva de transformación para la temperatura de recristalización (marcada en rojo en la Fig. 17 se localizaría entre las de 113°C y 135 °C.

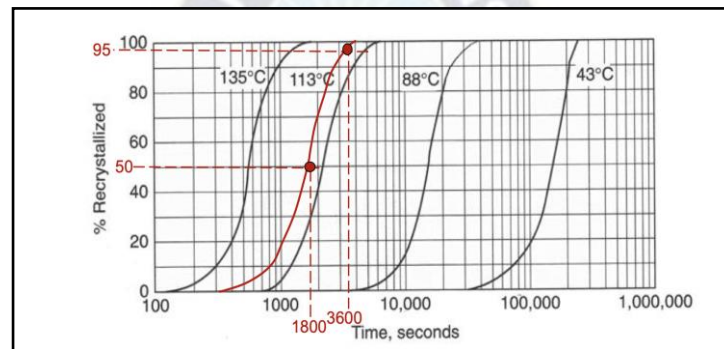


Figura 17.- Curvas de transformación isotérmica (recristalización) para cobre puro laminado en frío al 98 % (de Decker B.F AIME 188 1950) ¹⁵

Como un aproximado, se puede decir que la temperatura de recristalización de un metal o aleación de pureza comercial se encuentra entre 1/3 y 1/2 de su temperatura de fusión absoluta: En la Fig. 18 puede verse esta aproximación para algunos metales, con pureza comercial y de alta pureza.

¹⁵ de Decker B. F. Trans AIME 188, 1950

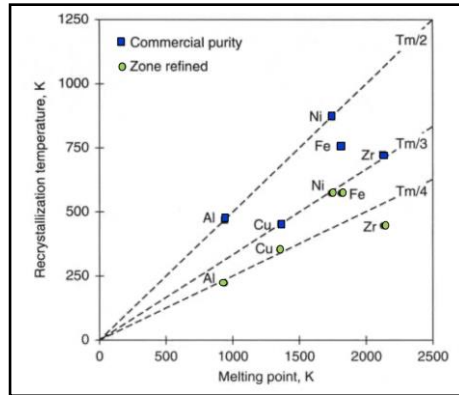


Figura 18.- Relación entre a temperatura de recristalización y la temperatura de fusión absoluta.

Por lo general, la dureza y el límite elástico aumentan con la deformación en frío. Los granos de un material deformado en frío tienden a alargarse y a adquirir una orientación cristalográfica preferente (“textura”). Si la deformación es elevada, la densidad disminuye ligeramente; al mismo tiempo disminuye la conductividad eléctrica y aumenta la expansión térmica (Figura 19). Además, produce un importante aumento en la reactividad química que conduce a una mayor velocidad de corrosión

Los efectos nocivos de la deformación en frío pueden eliminarse por medio de un tratamiento térmico: recocido de recristalización. En este tratamiento se distinguen tres etapas: recuperación, recristalización y crecimiento de grano.



Figura 19.- Modificación de las propiedades durante la deformación y el recocido.

2.2.5 Afinamiento del grano¹⁶

El endurecimiento por afino del grano (también denominado “de Hall-Petch”) es consecuencia de que los bordes de grano actúan como una barrera infranqueable para el movimiento de las dislocaciones, y que el número de dislocaciones dentro de un grano, afecta a cómo estas pueden transmitir su efecto a granos vecinos a través de los bordes. El tamaño de grano de un material depende del tratamiento térmico posterior a la deformación plástica, o bien de la velocidad de solidificación.



Figura 20.- Apilamiento de dislocaciones en un borde de grano.

El borde de grano actúa como punto de fijación, impidiendo la propagación de las dislocaciones. Por un lado, la estructura reticular de los granos adyacentes difiere en la orientación, por lo que se requeriría más energía para cambiar de dirección de deslizamiento. Además, el límite de grano es una región desordenada con campos de tensión muy elevados. Cuando varias dislocaciones que se mueven en el sentido indicado en la Fig. 20 por efecto de un esfuerzo aplicado, se encuentran con esos campos elásticos y se detienen cada vez a mayor distancia provocando un apilamiento de las mismas. Esto aumenta la tensión interna acumulada y obstaculiza el inicio de la plasticidad, aumentando la resistencia a la fluencia del material.

La relación entre el tamaño de grano y la tensión de fluencia, está dada por la ecuación de Hall-Petch.

¹⁶ Extraído de https://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/7-Mecanismos_de_endurecimiento_v2.pdf

$$\sigma_y = \sigma_0 + \frac{k_y}{\sqrt{d}}$$

Ecuación 11

donde σ_y es la tensión de fluencia, σ_0 es una constante del material relacionada con la tensión necesaria para iniciar el movimiento de las dislocaciones (o resistencia de la red cristalina al movimiento), k_y es el coeficiente de endurecimiento (constante para cada material), y d es el diámetro promedio de los granos.¹⁷

2.2.6 Definiciones de acabado superficial.

- 1) Ra: Ra es el promedio aritmético de los valores absolutos de las ordenadas del perfil de rugosidad. También conocido como Arithmetic Average (AA), Center Line Average (CLA). La rugosidad promedio es el área entre el perfil de rugosidad y su línea media, o la integral del valor absoluto de la altura del perfil de rugosidad sobre la longitud de evaluación.
- 2) Rz: Rz es el valor medio aritmético de la profundidad de rugosidad única de longitudes de muestreo consecutivas. Z es la suma de la altura de los picos más altos y la profundidad del valle más bajo dentro de una longitud de muestreo
- 3) Cutoff λ_c , de un filtro de perfil determina qué longitudes de onda pertenecen a la rugosidad y cuáles a la ondulación
- 4) Sampling length : es la referencia para la evaluación de rugosidad. Su longitud es igual a la longitud de onda de corte.
- 5) Traversing Lengthes la longitud total recorrida por el lápiz al adquirir el perfil trazado. Es el total de Pre-viaje, duración de la evaluación y post-viaje.
- 6) Evaluation Length: es la parte de la longitud de desplazamiento a partir de la cual se determinan los valores de los parámetros de la superficie

¹⁷ (Decker, 1950)

CAPÍTULO 3 PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

El programa de actividades y pruebas planteado en el perfil del proyecto para obtener los datos que permita alcanzar el objetivo del proyecto fue el siguiente:

1. Acondicionar la máquina laminadora provista por la Empresa Minera Bolívar.
2. Caracterizar una muestra de foil de cobre provista por YLB.
3. Conseguir y caracterizar muestras representativas de cobre electrolítico producidos por Empresa Minera Corocoro y Empresa Minera Bolivar.
4. Correr pruebas de laminación preliminares para ajustar la laminadora, lograr control de las variables de operación con barras rectangulares comerciales o pletina utilizadas en instalaciones eléctricas. Establecer la mejor secuencia de laminación y de tratamiento térmico para alcanzar el mínimo espesor de lámina posible.
5. Fundir barras rectangulares adecuadas a la máquina de laminación a partir de los cátodos de cobre electrolítico de EM Corocoro y EM Bolivar.
6. Aplicar el procedimiento determinado en el punto 4 a las barras fundidas.

3.1 Acondicionamiento de la maquina laminadora

La Empresa Minera Bolívar se dedica al procesamiento de varios tipos de minerales en Potosí, pero también incursionó en la producción de cobre electrolítico con una planta de lixiviación y electrowinning de pequeña escala. A partir del Convenio YLB – IIMETMAT en el que se acordó trabajar conjuntamente en un proyecto para estudiar la factibilidad de producir localmente foils de cobre a partir de cobre electrolítico producido en Bolivia, se conversó con el mencionado empresario industrial quien no solo se interesó en apoyar la iniciativa, sino que ofreció donar una maquina **laminadora dúo** para el estudio y proporcionar cobre electrolítico de su producción. Con estos elementos a disposición se propuso el presente Proyecto de Grado. Sin embargo, la maquina laminadora tipo dúo mostrada en la Figura 21 en el estado de entrega necesitaba un trabajo de acondicionamiento y puesta en funcionamiento muy significativo.



Figura 21.- Maquina laminadora dúo en estado de entrega por parte de Empresa Minera Bolívar.

El trabajo de reacondicionamiento de la máquina laminadora consistió en lo siguiente:

- Limpieza y desarmado.
- Compra de motor de 5,5 HP.
- Rectificado de cilindros de laminación.
- Armado de mecanismo de transmisión de fuerza.
- Armado de mecanismo de separación entre rodillos.
- Pruebas de funcionamiento.

Las pruebas de funcionamiento se llevaron a cabo laminando en frío barras de aluminio de 99% de pureza que es un material blando y dúctil. Aplicando reducciones de 25% cada vez se pudo alinear los cilindros y se pudo determinar el procedimiento de medición de la “apertura de los rodillos” con el uso de galgas como se muestra en la Figura 22. También se logró comprobar que la máxima apertura efectiva entre rodillos era de 6.5 (mm).



Pruebas de laminación con aluminio



Galgas para medición de la abertura entre rodillos

Figura 22.- Pruebas de laminación.

3.2 Caracterización de las muestras de foils de cobre provistas por YLB

Al tiempo de firmar el Convenio de trabajos de investigación YLB-IIMETMAT, la Empresa se comprometió en proporcionar una muestra de los foils de cobre que se adquieren para

suministrar a la Planta Piloto de Baterías de Litio en La Palca-Potosí. La Figura 23 presenta la muestra de referencia que es una lámina embobinada de 30 cm de ancho y 9 μm de espesor.



Figura 23.- Muestra de una bobina de foil de cobre de 9 μm proporcionado por YLB para el presente proyecto.

La caracterización de la muestra consistió en la aplicación de las siguientes técnicas:

- Caracterización de la pureza química.
- Caracterización de las propiedades mecánicas; Resistencia a la tracción y % de alargamiento.
- Morfología Superficial.
- Rugosidad de ambos lados.

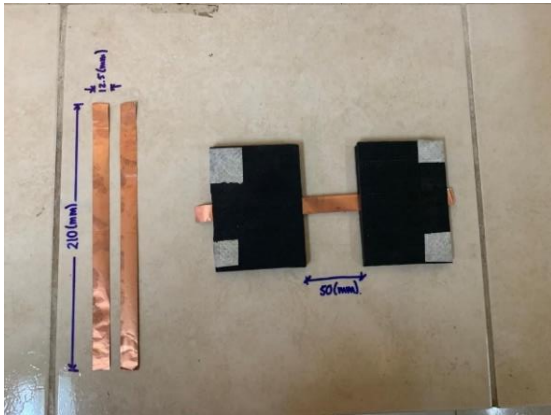
3.2.1 Caracterización de la pureza química

Una muestra de 10 g de foil fue entregado al Laboratorio Químico del IIMETMAT para que determine las impurezas que podría presentar el material siguiendo la Norma ISO 1811.

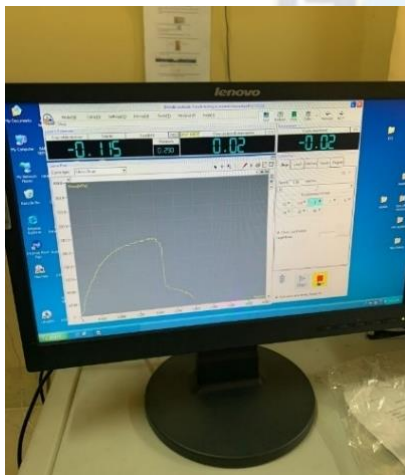
3.2.2 Caracterización de las propiedades mecánicas

Las propiedades mecánicas del foil de referencia se determinaron mediante ensayos mecánicos realizaron en la Máquina Universal de Ensayos Mecánicos del IIMETMAT sobre muestras rectangulares de 12.5 mm de ancho y 210 mm de largo. La Figura 24 muestra las probetas

preparadas y la adaptación de las mordazas, el equipo de ensayos y muestra el resultado del ensayo en una curva Tensión – Deformación.



Probetas de foil de cobre



Resultado de ensayo de en una curva de Tensión-Deformación



Montaje de las probetas en las mordazas de la Maquina Universal

Figura 24.- Ensayos de tracción en la Máquina Universal de Ensayos Mecánicos de IIMETMAT.

3.2.3 Caracterización de la Morfología Superficial.

La morfología superficial consiste en el tipo de textura que presenta el foil y en la rugosidad de la misma. La textura se puede caracterizar a partir de imágenes logradas por microscopía. En el caso del presente estudio se utilizó el SEM del IIMETMAT mostrado en la Figura 25.



Figura 25.- Microscopio electrónico de barrido (SEM) marca Phillips modelo XL-30.

3.2.3.1 Caracterización de la rugosidad

La Rugosidad de ambas caras del foil fue medida con un Rugosímetro Portátil del IIMETMAT marca “Phase II” SRG 4000 mostrado en la Figura 26.



Figura 26.- Rugosímetro portátil del IIMETMAT.

3.3 Obtener y caracterizar las muestras representativas de cobre electrolítico producidos por Empresa Minera Corocoro y Empresa Minera Bolívar.

El perfil de proyecto planteó utilizar como materia prima los cátodos de cobre producidos por la Empresa Minera Corocoro y la Empresa Minera Bolívar para laminar hasta conseguir foils. Para este propósito se hicieron gestiones y visitas ante las máximas autoridades de ambas empresas para visitar las Plantas.

Empresa Minera Corocoro EMC¹⁸

La empresa está radicada en el municipio de Corocoro ubicado en la provincia Pacajes del departamento de La Paz de Bolivia, a aproximadamente 82 kilómetros de distancia de la ciudad de La Paz. Tiene un área de 1.094 km², y está a una altitud de 4.020 m.s.n.m.

La Empresa EMC cuenta con un yacimiento mineralógico de cobre, de los sectores de Viscachani, Toledo y Capilla extrae diariamente óxidos de cobre en una cantidad de 700 toneladas por día que luego son procesadas en la Planta Hidrometalúrgica Lequelequeni. La solución (líquida) de cobre obtenida por el proceso de lixiviación por agitación y pilas dinámicas, es enviada a la Nave de Extracción por Solventes y luego pasa por el proceso de Electro Obtención, donde se obtienen cátodos de cobre del 99,9% de pureza. Actualmente la producción de cátodos de cobre está alrededor de 170 toneladas métricas finas por mes. A este ritmo la producción anual de cobre catódico puede llegar a 2000 TM. La Figura 27 muestra detalles de la planta y del producto.

¹⁸ (CoroCoro, 2023)



Pilas de Lixiviación



Celdas de Electrodeposición



Fardos de Cátodos de Cobre electrolítico para venta

Figura 27.- Detalles de la producción de cobre catódico en la EMC.

Lamentablemente, la fecha que se realizó la visita, la Empresa Metalúrgica Corocoro no contaba con Gerente General motivo por el cual no fue posible la provisión de una muestra de su producto para la presente investigación. Sin embargo, una vez que la EMC contó con un responsable a nivel gerencial, el IIMETMAT envió el Proyecto y solicitó su visita a las instalaciones del Instituto para establecer la suscripción de un Convenio Interinstitucional de Partes. Es así que, el nuevo Gerente General de la Empresa Minera Corocoro Ing. Juan Mamani Montoya manifestó verbalmente su pleno interés, pero hasta la fecha no se ha concretado su visita.

Empresa Minera Bolivar EMB

Como se mencionó líneas arriba la Empresa Minera Bolivar es una Empresa minera privada que opera en el Departamento de Potosí con Plantas de Concentración de Minerales pero también tiene una planta de lixiviación y electroobtención de cobre electrolítico a pequeña escala con una capacidad de 40 TM/mes. A pesar de que no se pudo concretar una visita a la Planta, la Empresa cumplió con la provisión de una muestra de cátodo de cobre de su producción para las pruebas del presente proyecto. La Figura 28 muestra detalles de la Planta de la EMB.



Figura 28.- Detalles de la producción de Cátodos de cobre electrolítico en E. M. Bolívar.

3.4 Pruebas Preliminares de laminación con pletinas de cobre electrolítico

Con el fin de ajustar la maquina laminadora y diseñar el procedimiento de laminación en caliente y luego en frio y lograr la mayor reducción de espesor posible, se adquirió una pletina de cobre

usada para instalaciones electricas del comercio local (Gismart SRL) del tipo mostrado en la Figura 29 cuyas dimensiones eran: ancho 38 mm y espesor 6.4 mm.



Figura 29.- Pletinas de cobre para instalaciones con pureza de 99.994% (foto gentileza de Gismart srl).

Las propiedades de la pletina de cobre de conexión adquirida de Gismart SRL obtenidas de su catálogo son las siguientes:

Características del producto:

Cobre C11000 Pureza	99.994 %min
Alta conductividad eléctrica min	100% IACS a 20°C
Alta conductividad térmica	(0.934 CAL/cm2/°C/sec (20°C) a 101% IACS)
Doblez a 120° sin fisuras ni desprendimientos.	
Resistencia a la tracción en recocido	200 a 250 MPa
Límite Elástico Convencional	120 MPa
Alargamiento s/200	30%
Dureza HB	70 – 80

El procedimiento por etapas consecutivas en las pruebas preliminares fue el siguiente:

- 1) **Laminación en caliente** a 750°C de barras con tres pasadas para lograr reducciones de espesor del 80% cada vez hasta alcanzar 1 mm.
- 2) **Medición de dimensiones**, longitud final y espesor al final de cada operación de laminado
- 3) Decapado y limpieza del producto
- 4) **Caracterización** de las propiedades mecánicas, dureza y resistencia.
- 5) **Laminación en frío** hasta 50% del espesor desde 1mm de espesor inicial.
- 6) Decapado, lavado y secado
- 7) **Caracterización del producto** en cuanto a su resistencia a la tracción
- 8) **Tratamiento térmico** de recristalización a 200°C y 30 min

9) Continuación de la laminación otros 50% de reducción

10) Repetición de pasos 6 a 9 hasta alcanzar el menor espesor posible.

3.4.1 Laminación en caliente

- **Muestra:** Las piezas a someter a laminación consistió en dos trozos de 70 mm de largo, 38 mm de ancho y 6,4 mm de espesor como se muestra en la Figura 30. El segundo trozo sirvió para obtener muestras para la caracterización.



Figura 30.- Trozo de barra de conexiones eléctricas utilizada para las pruebas preliminares.

- **Programa de Reducción de Espesor.-** La primera laminación fue programada para una separación de rodillos de 5 mm que representa el 80% del espesor inicial, el resto de las reducciones de espesor programadas para laminación en caliente fue aplicada según la posibilidad de medir la “abertura entre rodillos” con las galgas disponibles:

Tabla 5.- Abertura entre rodillos para laminación en caliente.

Abertura entre rodillos programada para laminación (mm)	Abertura entre rodillos real medida con las galgas
5.00	4.8
4.00	3.8
3.20	3.0
2.00	2.0
1.00	1.0



Figura 31.- Medición de la separación entre rodillos para 4.8 mm.

- **Calentamiento.** - El calentamiento de la pieza a 750 °C (Ref 11) (Figura 10) se realizó en un horno de resistencia eléctrica programable en cuanto a Velocidad de calentamiento y Temperatura de Mantenimiento mostrado en la Figura 35 en el que se aplicó la siguiente condición:
 - Velocidad de Calentamiento: 1000 °C/h
 - Temperatura de mantenimiento: 750 °C
 - Tiempo de mantenimiento: 15 min



Figura 32.- Horno eléctrico utilizado en el calentamiento de barras de cobre en la laminación.

- **Laminación en caliente.-** Inmediatamente la barra fue transferida a la laminadora para someterla a laminación. La Figura 33 muestra una de las operaciones y el producto de la misma.



Figura 33.- Laminación en caliente en la laminadora dúo.

- **Medición de las dimensiones resultantes.** - Se utilizó un flexómetro para determinar el largo final y el calibrador Venier para medir el espesor resultante de la manera en que se presenta en la Figura 34.



Figura 34.- Medición del espesor de la pieza laminada.

- **Decapado y limpieza del producto resultante.** - El decapado de la pieza oxidada fue realizada por la acción de una solución de ácido sulfúrico al 10% y enjuague en corriente de agua.
- **Medición de las propiedades mecánicas.**- A partir de la pieza paralela de fueron obteniendo las probetas para la medición de la resistencia a la tracción y la dureza. La probeta consistió en tiras de 210 mm de largo y 12.5 mm de ancho. (se pudo lograr probetas desde el momento en que la longitud final era de más de 210 mm). La dureza solo fue posible de ser registrada hasta que el espesor final fue de 1.4 mm por condición de del ensayo. La Figura 35 muestra los equipos de laboratorio donde se realizaron las medidas.



Figura 35.- Equipos de medición de propiedades mecánicas del IIMETMAT.

3.4.2 Laminación en frío

- **Muestra para laminar:** Fleje de 1.0 mm de espesor proveniente de la laminación en caliente como se muestra en la Figura 36.



Figura 36.- Muestras provenientes de la laminación en caliente.

- **Programa de reducción de espesor por laminación en frío.** Se empleó el siguiente programa de reducciones de espesor (Tabla 6), pero dado que en esta etapa se constató el endurecimiento por deformación (work hardening) después de cada pasada se aplicó un tratamiento térmico de recocido de recristalización.

Tabla 6.- Programa de aberturas entre rodillos para la laminación en frío.

Número de pasada	Abertura entre rodillos medida por galgas (mm)
1	0.75
Recocido 1	
2	0.50
Recocido 2	
3	0.40
Recocido 3	
4	0.30
Recocido	
5	0.20
Recocido	
6	0.15
Recocido	
	0.10
Recocido	

	0.07
Recocido	
	0.05
Recocido	
	0.02
Recocido	

- Recocido de recristalización.**- En base a la Figura 17 del capítulo de Marco Teórico y principalmente de la Figura 37 donde se muestra el seguimiento de la dureza respecto a la temperatura y tiempo de recristalización¹⁹ se determinó que el tratamiento térmico de recocido de recristalización para el cobre deformado por laminación del presente trabajo sea de $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ por un tiempo $t = 30\text{ min}$.

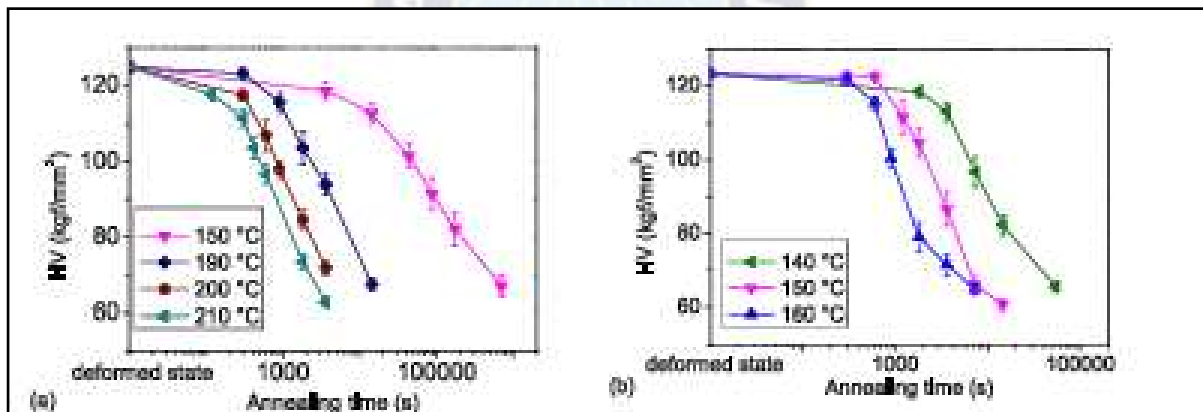


Figura 37.- Dureza Vickers vs tiempo de recristalización para cobre 99.9% con 95% de deformación por laminación (Ref 21).

3.5 Fundición del cobre electrolítico proveniente de la EM Bolivar

El cobre electrolítico provisto por la EM Bolivar en forma de cátodo mostrado en la Figura 38 tenía las siguientes dimensiones $120 \times 88 \times 0.3\text{ cm}$ y un peso de 14 kg. Presentaba una cara lisa levemente oxidada y la otra cara rugosa muy sucia y oxidada. Por esta razón y principalmente

¹⁹ (Recrystallization of deformed copper) (Lin, 2013)

por cumplir con la práctica industrial mostrada en la Figura 10 es que se planificó la fundición de este material para producir barras sólidas libres de defectos adecuadas a las características de la laminadora.



Figura 38.- Cátodo de cobre provisto por la E.M. Bolivar.

La fundición del cátodo de cobre se realizó en el Instituto de Investigaciones en Metalurgia y Materiales (IIMET-MAT) en el Laboratorio de Fundición utilizando un horno de crisol a llama de GLP mostrado en la Figura 39. El vaciado del cobre fundido se realizó en un molde permanente o coquilla diseñada especialmente y mandada a maquinar en un Taller Mecánico. La Figura 40 muestra la coquilla y su montaje en la máquina de volteo tipo Durville



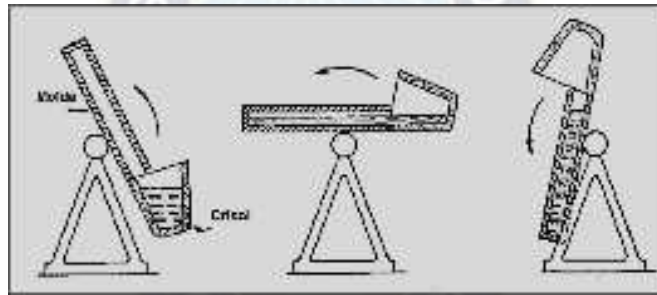
Figura 39.- Horno de crisol a llama de GLP.



Molde permanente o Coquilla.



Máquina de volteo tipo Durville.



Principio del método de colada Durville

Figura 40.- Equipo de vaciado.

La fundición y colada en el molde permanente siguió el siguiente procedimiento:

1. Troceado del cátodo de cobre en pedazos adecuados para el cargado del horno.
2. Cargado del horno y fusión.
3. Calentamiento del molde y de la cuchara de transferencia.
4. Desgasificación del baño fundido.
5. Colada del horno a cuchara de transferencia.
6. Vaciado del metal fundido en crisol de máquina de Durville.
7. Volteo de sistema para llevarlo al molde.
8. Solidificación y extracción de la barra.



Troceado del cátodo de cobre.



Calentamiento de la cuchara de transferencia.



Colada del horno a cuchara de transferencia



Vaciado del metal fundido en crisol de máquina de Durville.



Volteo del sistema para llevar el metal líquido al molde



Barra fundida

Figura 41.- Fundición y colada en el molde permanente.

3.6. Laminación de la barra fundida de cobre para la obtención de foils

La barra fundida de cobre obtenida en el anterior punto resultó teniendo las siguientes dimensiones 70 x 38 x 6 mm la que sirvió de materia prima para la obtención de foils mediante laminación. Esta parte del procedimiento experimental consistió en:

- Caracterización de la barra fundida de cobre: Dureza y Metalografía
- Laminación en caliente hasta 1mm de espesor.
- Laminación en frío y Recocido de Recristalización hasta lo más delgado posible.

Tal como se procedió en las pruebas preliminares con barra de conexión comprada.

3.6.1 Laminado en caliente de la barra fundida de cobre.

- **Muestra.-** La pieza se obtuvo de la fundición del cátodo de cobre. La barra tiene las siguientes medidas 70 x 38 x 6 mm con 78.5 HB de dureza.
- **Programa de Reducción de Espesor.-** El programa de laminado en caliente, considerando la experiencia en las pruebas preliminares, con la barra de conexión comprada, se programó iniciar con una separación de 5 mm hasta 1 mm.

Tabla 7.- Abertura de rodillos para laminación en caliente.

Abertura programada para laminación (mm)	Abertura real medida con las galgas
5	4.8
4.00	3.8
3.20	2.0
2.00	1.0
1.00	0.5

- **Calentamiento.-** La pieza fue calentada a 750 °C como se hizo con la barra de cobre en las pruebas previas. Se usó un horno de resistencia eléctrica programable con las siguientes condiciones.
- Velocidad de Calentamiento: 1000 °C/h
- Temperatura de mantenimiento: 750 °C
- Tiempo de mantenimiento: 15 min

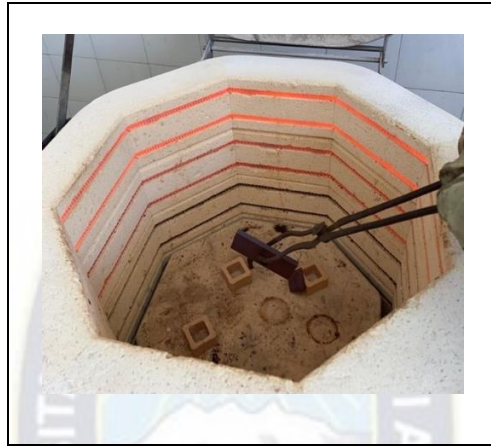


Figura 42.- Barra calentada a 750 °C.

- **Laminado en caliente.-** Una vez calentada la pieza se procedió inmediatamente a pasar por los rodillos de la laminadora.
- **Medición.-** Al finalizar la laminación se midió la longitud final de la barra con un flexómetro o regla y el espesor con un calibrador Venier.
- **Medición de propiedades mecánicas.-** A medida que se fue laminando se midió su dureza y luego su resistencia a la tracción. La dureza se midió con el durómetro del Instituto de investigaciones IIMETMAT, este ensayo solo fue posible hasta un espesor de 3 (mm) debido a la restricción de la Norma, mientras que la resistencia a la tracción se midió en la Máquina Universal. Las probetas para estas pruebas consistían en flejes de 210 mm de largo y 12,5 mm de ancho.

3.6.2 Laminación en frío

- **Muestra para laminar:** Fleje de 0.9 mm de espesor proveniente de la laminación en caliente como se muestra en la Figura 46.



Figura 43.- Muestras provenientes de la laminación en caliente.

- **Programa de reducción de espesor por laminación en frío.** Se empleó el siguiente programa de reducciones de espesor, pero dado que en esta etapa se constató el endurecimiento por deformación (work hardening) después de cada pasada se aplicó un tratamiento térmico de recocido de recristalización.

Tabla 8.- Abertura de rodillos para la laminación en frío de la barra fundida.

Número de pasada	Abertura entre rodillos medida por galgas (mm)
1	0.75
Recocido 1	
2	0.50
Recocido 2	
3	0.25
Recocido 3	
4	0.15
Recocido	
5	0.08
Recocido	
6	0.07
Recocido	
	0.06
Recocido	
	0.05

Recocido	
	0.03
Recocido	
	0.02

- **Recocido de recristalización.** - En base a la Figura 40 donde se muestra la variación de la dureza de cobre 99.9% respecto a la temperatura y tiempo de recristalización²⁰ se determinó trabajar a $T = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$ y Tiempo $t = 30\text{ min}$.
- **Decapado y limpieza.** - Para el decapado se usó un solución de ácido sulfurico al 10%. en una bodega de plastico y limpieza por corriente de agua.



Figura 44.- Fleje decapado con solución de ácido sulfúrico.

- **Medición de propiedades mecánicas.-** Luego de cada proceso de recalentamiento y laminado en frío se midió la longitud final con un flexometro, y el espesor con un micrometro al mismo tiempo de forma paralela se obtuvieron probetas para la realización de ensayos de tracción en diferentes espesores.

²⁰ (Lin, 2013)

CAPITULO 4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Acondicionamiento de la máquina laminadora

La Figura 45 muestra la maquina laminadora proporcionada por la Empresa Minera Bolivar en estado acondicionado para desarrollar el conformado de barras de cobre en foils.

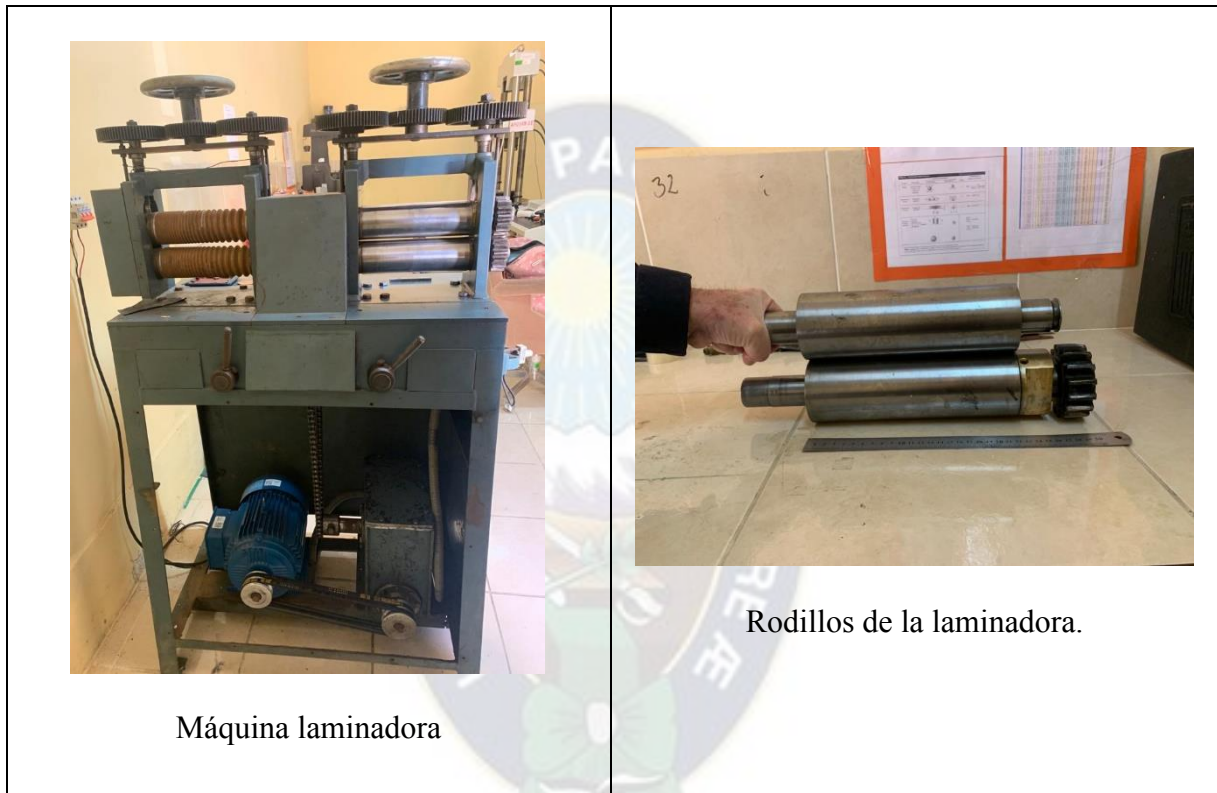


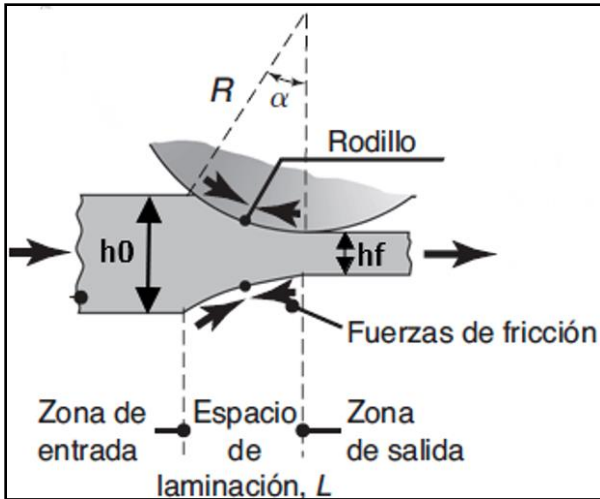
Figura 45.- Máquina laminadora acondicionada.

Las características mecánicas de la máquina de laminación resultaron ser las siguientes:

- Laminador de planos tipo dúo
- Los cilindros son de acero templado y revenido con dureza de 56 Rc de 74.6 mm de diámetro y 230 mm de largo cuyo terminado es pulido fino.
- El accionamiento mecánico utiliza motor eléctrico de 5.5 HP
- La transmisión de fuerza y movimiento es por cadena desde el reductor de velocidad directamente al rodillo inferior a partir del cual se transmite al cilindro superior mediante dos piñones.
- La velocidad angular de los rodillos es constante y es igual a 0.1 rpm.

- La velocidad angular del motor es de 1440 rpm.

En el laminado plano el cálculo teórico de carga, torque y potencia se puede realizar bajo el siguiente análisis:



$$\text{Draft: } d = h_0 - h_f$$

$$\text{Draft Max: } d_{max} = \mu 2 R$$

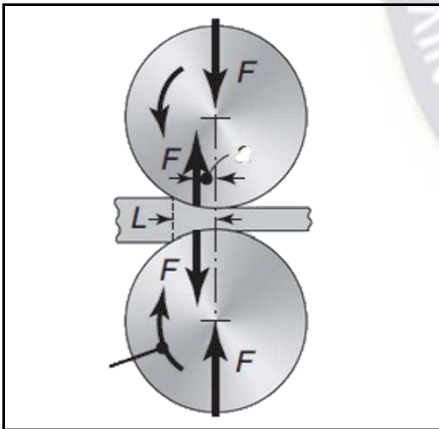
$$\text{Conservación de la materia: } h_0 w_0 L_0 = h_f w_f L_f$$

$$\text{Deformación real: } \epsilon = \ln \frac{h_0}{h_f}$$

$$\text{Esfuerzo de fluencia promedio: } \tilde{Y} = \frac{K \epsilon^n}{n+1}$$

$$\text{Fuerza: } F = \tilde{Y}^2 \sqrt{R \Delta h} w$$

Figura 46.- laminación



$$\text{Torque: } T = 0.5 F L$$

$$\text{Potencia: } P = 2\pi N F L (w)$$

Figura 47.- Fuerzas que intervienen en la laminación.

Aplicando los datos del sistema instalado en el Laboratorio para el presente proyecto, el cálculo resulta ser el siguiente:

Para laminación en caliente de pletina

La reducción del espesor que se intenta en esta operación de laminado es:

Cálculo de draft:

$$d = h_o - h_f$$

$$d = 4,82 - 4,00$$

$$d = 0,82$$

La reducción máxima posible para este coeficiente de fricción dado es:

cálculo de draft máximo (coeficiente de fricción entre acero y cobre =0,57)

$$d_{max} = \mu^2 R$$

$$d_{max} = (0.57)^2 (37.2)$$

$$d_{max} = 12.08 \text{ (mm)}$$

Como la reducción permisible máximo excede la reducción que se pretende, es posible el laminado.

$$d_{max} > d$$

$$12.08 \text{ (mm)} > 0,82 \text{ (mm)}$$

Aplicando los datos del sistema instalado en el Laboratorio para el presente proyecto, el cálculo resulta ser el siguiente:

Para laminación en frío de la barra fundida:

La reducción del espesor que se intenta en esta operación de laminado es:

Cálculo de draft:

$$d = h_o - h_f$$

$$d = 0,63 - 0,58$$

$$d = 0,05$$

La reducción máxima posible para este coeficiente de fricción dado es:

cálculo de draft máximo (coeficiente de fricción entre acero y cobre =0,57)

$$d_{max} = \mu^2 R$$

$$d_{max} = (0.57)^2 (37.2)$$

$$d_{max} = 12.08 \text{ (mm)}$$

Como la reducción permisible máximo excede la reducción que se pretende, es posible el laminado.

$$d_{max} > d$$

$$12.08 \text{ (mm)} > 0.05 \text{ (mm)}$$

Para laminación en caliente de la barra fundida

La reducción del espesor que se intenta en esta operación de laminado es:

Cálculo de draft:

$$d = h_o - h_f$$

$$d = 4,70 - 4,05$$

$$d = 0,65$$

La reducción máxima posible para este coeficiente de fricción dado es:

cálculo de draft máximo (coeficiente de fricción entre acero y cobre =0,57)

$$d_{max} = \mu^2 R$$

$$d_{max} = (0.57)^2 (37.2)$$

$$d_{max} = 12.08 \text{ (mm)}$$

Como la reducción permisible máximo excede la reducción que se pretende, es posible el laminado.

$$d_{max} > d$$

$$12.08 \text{ (mm)} > 0.65 \text{ (mm)}$$

Aplicando los datos del sistema instalado en el Laboratorio para el presente proyecto, el cálculo resulta ser el siguiente:

Para laminación en frío de la barra fundida:

La reducción del espesor que se intenta en esta operación de laminado es:

Cálculo de draft:

$$d = h_o - h_f$$

$$d = 0,67 - 0.61$$

$$d = 0,06$$

La reducción máxima posible para este coeficiente de fricción dado es:

cálculo de draft máximo (coeficiente de fricción entre acero y cobre =0,57)

$$d_{max} = \mu^2 R$$

$$d_{max} = (0.57)^2 (37.2)$$

$$d_{max} = 12.08 \text{ (mm)}$$

Como la reducción permisible máximo excede la reducción que se pretende, es posible el laminado.

$$d_{max} > d$$

$$12.08 \text{ (mm)} > 0.06 \text{ (mm)}$$

4.2 Caracterización de las muestras de foils de cobre provistas por YLB

4.2.1 Caracterización de la composición química de foils YLB

La Figura 48 presenta el resultado del análisis químico aplicado en el Laboratorio Químico del IIMETMAT

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN METALURGIA Y MATERIALES

metmat

No. Certif.: 150/2023
Fecha: 22/11/2023

CERTIFICADO DE ANÁLISIS QUÍMICO

CLIENTE: Daniela Anahí Uruchi Cosme EMPRESA: Proyecto de Grado

MUESTRA: 1 Muestra ANALISIS POR: Pb – Zn - Sn

RESULTADOS:

N°	Código	Elemento	Unidades	Contenido
1	S/C	Pb	%	0,005
2				
3		Zn	%	< 0,005
4				
5		Sn	%	< 0,005

Ljor. Oscar Calle Calderón.
LABORATORIO QUÍMICO
Cc.: Archivo IIMETMAT

VoBo. Ing. Juan Carlos Mancoske Bravo
DIRECTOR
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
METALÚRGICAS Y DE MATERIALES
U.M.S.A.

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN METALURGIA Y MATERIALES
I. I. MET. MAT.
La Paz - Bolivia

Dirección: Av. de las Américas esq. Santa Rosa N° 100 Telf. 2 210402 Fax: 591-2-2280106 e-mail: iimetmat@umsa.bo
Metalurgia: Concentración - Hidrometalurgia - Electrometalurgia - Pirometalurgia - Siderurgia
Materiales: Fundición - Materiales Metálicos - Sinterurgia - Corrosión - Desgaste - Soldadura - Materiales Cerámicos Materiales Polímeros - Análisis Químico - Asesoramiento y Asistencia Técnica

Figura 48.- Análisis químico de foils realizado en IIMETMAT

Yacimientos de Litio Bolivianos (YLB) proporcionó la información de los foils adquiridos para la Planta Piloto de Baterías de Litio que se muestra en la Figura 49.

Copper Foil with Various Width and Thickness as Battery Current Collector : from 4.5µm, to 25µm



Sale Price: USD\$685.00
If you are international, please click this.

In stock
Item Number: BCCF-9u

Product Options

Thickness and Width:

Quantity:

[Email this page to a friend](#)

Specifications

- Material: Electrolytic Tough Pitch Copper, Purity≥ 99.8% (C101)
- Tensile Strength: 30 kgf/mm
- Temper: H19
- Mass resistivity: 0.168 Ω.g/m²
- Tensile Strength: 38 Kg/m²
- Elongation Rate (RT): 4.2%
- Elongation Rate (HT): 5.5%
- Shiny Side Roughness (RA): 0.22-0.25 µm, all the following types of copper foils are double-side shiny and smooth.
- Shiny Side Roughness (RZ): 1.6 µm
- Core size: 75mm (~3 inches)
- Various thicknesses, widths, and lengths are available to select on the options bar.

Thickness	Width	Length (~)	Weight (~)
4.5µm	180mm	350m	2.5kg
	280mm	220m	2.5kg
6µm	180mm	525m	5kg
	280mm	333m	5kg
9µm	180mm	310m	5kg
	280mm	170m	4kg
12µm	180mm	240m	5kg
	280mm	155m	5kg
25µm	80mm	120m	2~2.5kg
	150mm	120m	4kg

Figura 49.- Propiedades de los foils adquiridos por YLB de la empresa MTI Corporation)²¹

Se puede observar que la determinación de la calidad química del *foil* de YLB analizado en el IIMETMAT concuerda con la presentada por la fábrica de procedencia, y se puede decir que el procedimiento empleado es confiable.

4.2.2 Caracterización de las propiedades mecánicas de Foil provisto por YLB

La Figura 50 muestra la Curva Tensión vs Deformación resultante del ensayo de tracción aplicado a probetas producidas del *foil* de referencia provisto por YLB.

²¹ <https://www.mtixtl.com/Li-IonBatteryAnode>

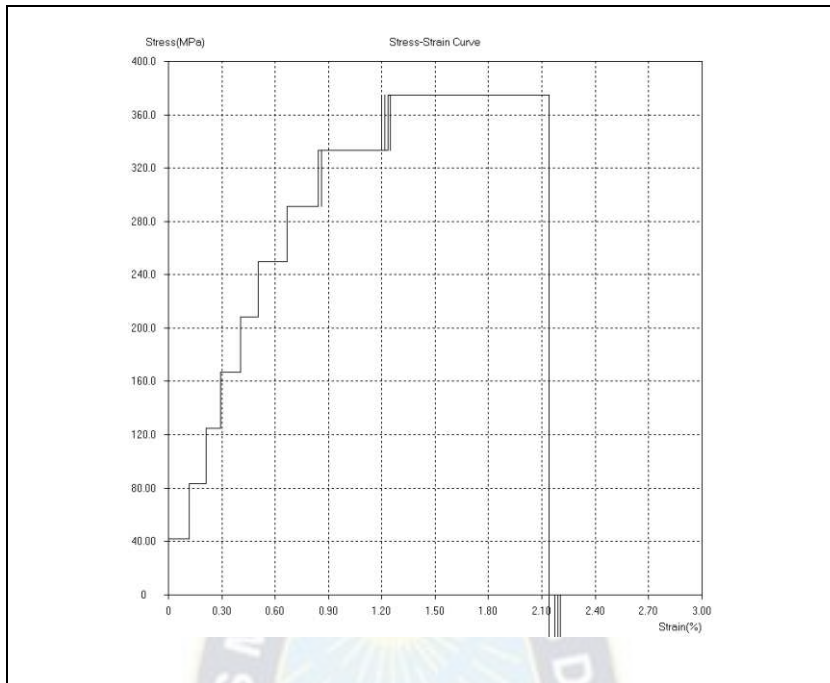


Figura 50.- Curva tensión – deformación obtenida al aplicar el ensayo de tracción en tiras de foil YLB.

Se hicieron 4 ensayos cuyas curvas σ vs ϵ se presentan en la Figura 51.

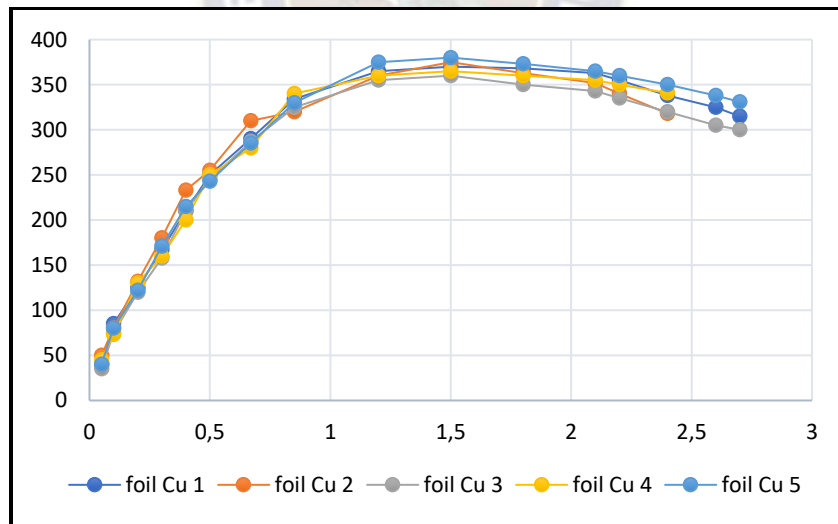


Figura 51.- Curvas Tensión – deformación de 4 ensayos sobre tiras del YLB de referencia.

A partir de las curvas se puede obtener los siguientes valores promedio:

- Resistencia a la Tracción promedio 370 MPa
- Alargamiento promedio 2.5%

En la Tabla 9 se presenta una comparación de la resistencia medida de los foils YLB con los datos de la oferta comercial.

Tabla 9.- Comparación de la Resistencia a la Tracción ensayada en el presente proyecto y datos de referencia comercial.

Tipo de datos	Resistencia a la Tracción		Alargamiento (%)
	Kg/mm ²	(MPa)	
Oferta MTI Corporation para Foil de 9 μm (Ref 25)	38	372	4.20
Oferta CIVEN Electronics Foils ED 9 μm (Ref 17)	28-35	274-343	5-15
Oferta JIMA Copper Foils RA 9 μm (Ref 18)		≥380	≥1.2
Valor Promedio ensayado en IIMETMAT a foils provisto YLB		370	2.50

El cuadro comparativo muestra que el procedimiento aplicado en el ensayo de tracción en el Laboratorio del IIMETMAT es confiable.

4.2.3 Medición del espesor del foil por Microscopía SEM

La imagen (Figura 52) del espesor del Foil provisto por YLB obtenida por SEM ratifica que este es de 9 – 10 μm.

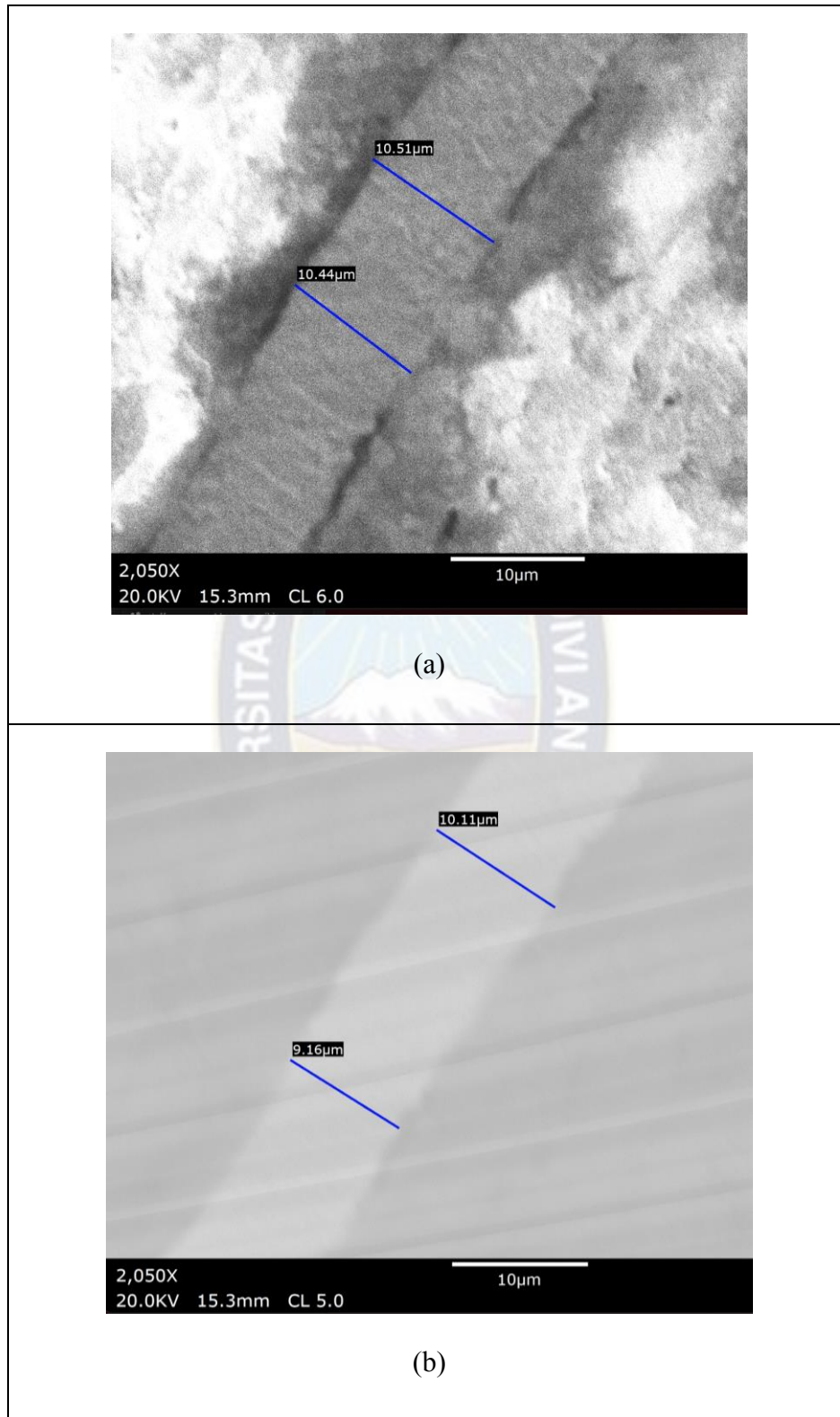


Figura 52.- Imagen de foil encapsulado en resina obtenida en SEM donde imagen (a) corresponde a detector SE y (b) corresponde a detector BSE.

4.2.4 Caracterización de la morfología superficial de foil de referencia YLB

En la figura 53 muestra la textura superficial del foil visto bajo SEM con detector de electrones secundarios, la imagen (a) muestra la cara brillante a 1000x y la imagen (b) la cara opaca a 500x.

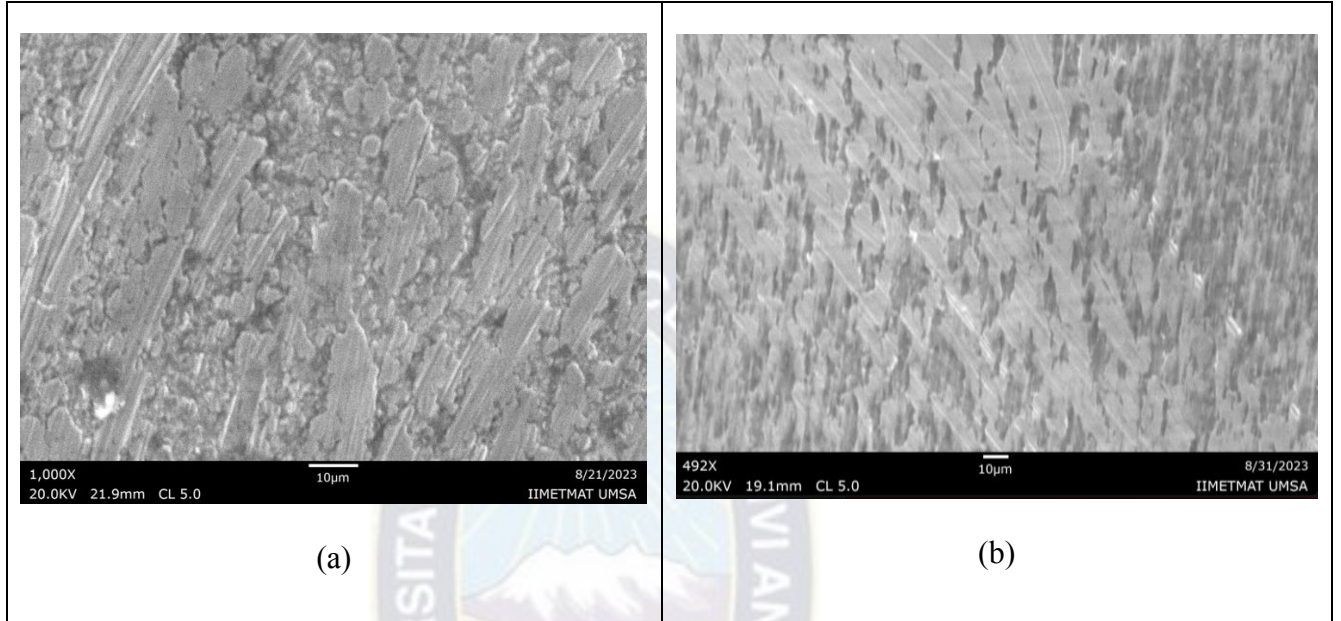


Figura 53.- Detalles de la textura superficial de foil de referencia vistos bajo SEM con detector de electrones secundarios SE. La imagen (a) es de la cara brillante a 1000x y la (b) de la cara opaca a 500x.

Con el fin de comparar las imágenes de la Figura 54 se incluye a continuación en la Figura 54 imágenes del estudio de Jingqi Chen, Xiaogong Wang et al²²

²² (Jingqi Chen, 2021)

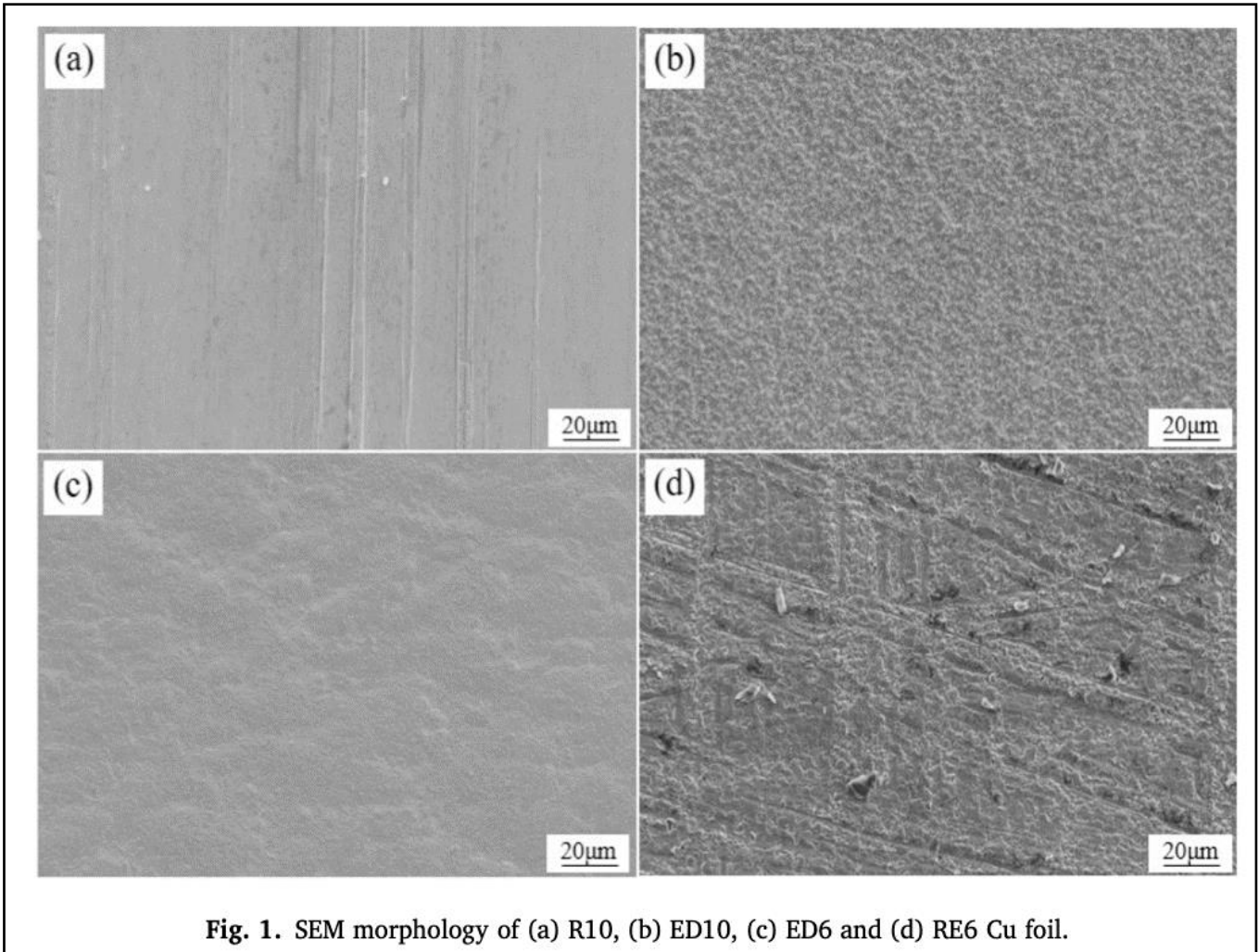


Figura 54.- Imágenes SEM de la textura superficial de foils incluidas en el estudio de la Ref 24, donde R10=Laminado a 10 µm y ED6 Electrodepositado a 6 µm.

De la comparación se puede concluir que la textura del foil de referencia proporcionado por YLB corresponde a aquella resultante de un proceso de electrodeposición.

Rugosidad Superficial

En la Tabla 10 se presenta el resultado de medir la rugosidad del Foil de referencia y las rugosidades que se reportan por empresas productoras.

Tabla 10.- Rugosidad medida sobre ambas caras de foil de referencia.

Muestra	Rugosidad Ra	
	Cara Brillante	Cara Opaca
Foil YLB	2,23	0,9
Civen	0,1-0,4	0,8-2,0
JIMA	>0,17	
MTI	0,22-0,25	1,6

Análisis

En resumen, las propiedades caracterizadas del foil provisto por YLB es él que se menciona a continuación y es la referencia para comparar las láminas producidas en el proceso de laminación utilizando cátodos de cobre de la EM Bolivar:

- *Aspecto*



- *Dimensiones:* Ancho 280 mm, espesor 9 μm
- *Pureza química:* 99.9%
- *Resistencia a la Tracción:* 370 MPa
- *Alargamiento:* 2.5%
- *Rugosidad cara brillante:* 2.23
- *Rugosidad cara opaca:* 0.9
- *Método de fabricación:* ED (electrodeposición)

4.3 Resultados de las Pruebas Preliminares con Pletinas de cobre

4.3.1 Caracterización de la muestra de pletina adquirida de Gismart

- Dimensiones de la muestra a laminar
 - $L_0 = 70 \text{ mm}$

- $A_o = 38 \text{ mm}$
- $E_o = 6.4 \text{ mm}$
- $V_o = 17024 \text{ mm}^3$
- Dureza: 75 HB
- Resistencia a tracción = 242 MPA

4.3.2 Pruebas Preliminares de laminación con pletina adquirida de Gismart

El programa de laminación de la pletina adquirida del comercio local tenía como objetivo establecer la confiabilidad de la maquina laminadora en el conformado del cobre desde lingote o barra a láminas a foils. Se hizo el seguimiento de la regularidad en la deformación de las dimensiones y se aprovechó para observar la modificación en las propiedades.

4.3.2.1 Primera etapa. Laminación en caliente

La aplicación del programa de laminación en caliente de la Tabla 5 dio los resultados que se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11.- Deformaciones medidas después de cada pasada de laminación en caliente. E_i = espesor antes de la pasada i , E_f = espesor al final de la pasada i . Similarmente para la L = largo y A = ancho. V_i = volumen al final de la pasada. Abertura entre rodillo medida con gauges.

Laminación en caliente de pletina Gismart									
Pasada de laminación	E_i(mm)	Abertura entre rodillos (mm)	L_i (mm)	L_f (mm)	A_i (mm)	A_f (mm)	E_f (mm)	V_i (mm³)	Dureza (HB)
1	6,4	4,8	70	88	38	42,5	4,82	18027	78
Calentamiento a 750 °C y decapado									
2	4,82	3,8	88	110	42,5	43,1	4,00	18964	79
Calentamiento a 750 °C y decapado									
3	4,00	3,0	110	130	43,1	43,8	3,21	18278	82
Calentamiento a 750 °C y decapado									
4	3,21	2,0	130	171	43,8	44	2,51	18885	81
Calentamiento a 750 °C y decapado									
5	2,51	1,0	171	227	44	44,3	1,90	19107	82
Calentamiento a 750 °C y decapado									

6	1,90	0,8	227	310	44,3	44,7	1,40	19400	80
Calentamiento a 750 °C y decapado									
7	1,40	0,6	310	448	44,7	45,5	0,95	19152	*

*Para este espesor de 0.95 mm ya no funciona el ensayo de dureza Rockwell.

A partir de las mediciones de las dimensiones del producto de una pasada de laminación se puede calcular las siguientes variables respuesta:

- Porcentaje de Reducción: $\frac{(E_i - E_f)}{E_i} 100$
- Porcentaje de Alargamiento: $\frac{(L_f - L_i)}{L_i} 100$
- Relación de Alargamiento entre pasadas: $\frac{L_f}{L_i}$

De modo que se puede obtener la siguiente Tabla 12:

Tabla 12.- % Reducción y % de Alargamiento logrado en la laminación en caliente de la pletina de cobre adquirida de Gismart.

Pasada	Abertura entre Rodillos (mm)	% Reducción	% Alargamiento	L_i/L_{i-1}	Dureza (HB)
1	4,8	24,69	25,71	1,26	78
2	3,8	17,01	25,00	1,25	79
3	3,0	19,75	18,18	1,18	82
4	2,0	21,81	31,54	1,32	81
5	1,0	24,30	32,75	1,33	82
6	0,8	26,32	36,56	1,37	80
7	0,6	32,14	44,52	1,45	*

Con los datos de la Tabla 12 se pueden obtener las gráficas de las Figuras 58 y 59.

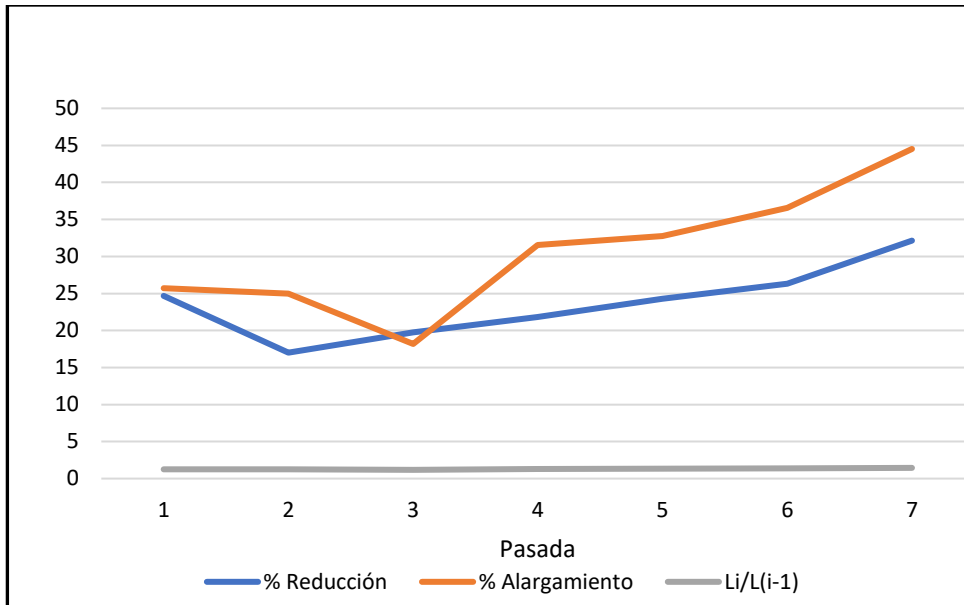


Figura 55.- Variación de % de Reducción, % alargamiento y radio de alargamiento entre pasadas.

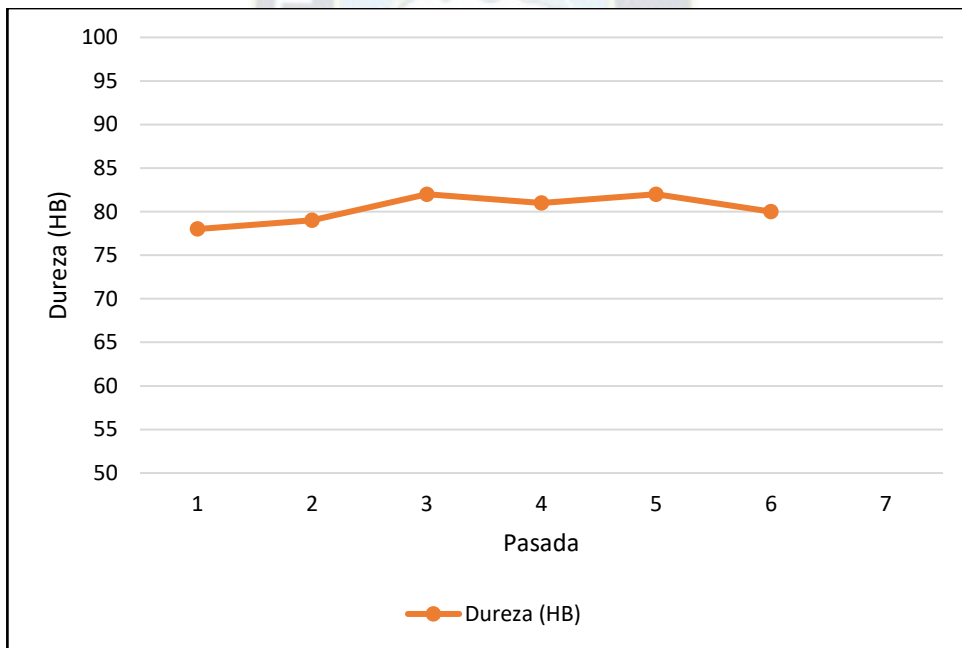


Figura 56.- Variación de la dureza Brinell en función de las pasadas de laminación en caliente.

Análisis

- En la Tabla 11 se advierte que la reducción de espesor lograda después de una pasada de laminación es mayor que la abertura fijada previamente.

- La Tabla 11 también muestra que se produce deformación perpendicular a la dirección de laminación, es decir que la variación del ancho del material es apreciable en un inicio, sin embargo, va siendo menor a medida que se va dando las pasadas.
- Lo más importante que muestra la Tabla 11 es que cuando los rodillos está bien alineados las deformaciones en largo y espesor son proporcionales dado que resultan en un volumen de material casi constante.
- La Tabla 12 y la consiguiente Figura 55 muestran que el **% Reducción** varía ligeramente de pasada a pasada lo mismo para **% Alargamiento**. En ambas variables respuesta, los mayores valores se dan a espesores menores a 1 mm del fleje debido a la mayor influencia de la temperatura y tiempo en la ductilidad del material.
- La medición de la dureza inicial de la pletina en el apartado 4.3.1 se reporta como de 75 HB, la Figura 56 muestra la evolución de la dureza del material en función de las sucesivas pasadas de laminación en caliente. Se encuentra que se produjo una ligera modificación de la dureza principalmente por la recristalización con afinamiento de grano a la salida de los rodillos.
- En base a este experimento preliminar se puede asegurar que las condiciones de la Máquina Laminadora Duo presenta buenas y confiables condiciones de laminación en caliente.

4.3.2.2 Segunda etapa. Laminación en frío

La laminación en frío del fleje de 1 mm logrado en la laminación en caliente se realizó aplicando tres pasadas en una misma abertura entre rodillos siguiendo la programación Tabla 6. Las mediciones de la deformación resultante se presenta en la Tabla 13.

Tabla 13.- Deformaciones medidas después de cada pasada de laminación en frío. E_i = espesor antes de la pasada i , E_f = espesor al final de la pasada i . Similarmente para la L = largo y A = ancho. V_i = volumen al final de la pasada. Abertura entre rodillo medida con gauges.

Laminacion en frio de pletina Gismart									
Pasada	Ei(mm)	Abertura Rodillos	Li (mm)	Lf (mm)	Ai (mm)	Af (mm)	Ef (mm)	Vi (mm ³)	Resist Traccion (MPa)
1	0,95	0,50	448	556	45,5	46,0	0,75	19182	
2	0,75	0,50	556	650	46	46,1	0,63	18878	
3	0,63	0,50	650	700	46,1	46	0,58	18676	259
Recocido a 200 °C y t = 30 min									
4	0,58	0,40	700	740	46	46	0,55	18722	
5	0,55	0,40	735	820	46	45,9	0,50	18819	
6	0,50	0,40	820	870	45,9	46	0,47	18809	238
Recocido a 200 °C y t = 30 min									
7	0,47	0,30	870	890	46	46,2	0,46	18914	
8	0,46	0,30	890	910	46,2	46	0,45	18837	
9	0,45	0,30	910	1000	46	46	0,40	18400	300
Recocido a 200 °C y t = 30 min									
10	0,40	0,20	1000	1040	46	46	0,39	18658	
11	0,39	0,20	1040	1070	46	46,1	0,38	18744	
12	0,38	0,20	1070	1115	46,1	46	0,36	18464	305
Recocido a 200 °C y t = 30 min (corte de láminas por aparición fisuras)									

13	0,36	0,15	520	535	46	46,2	0,35	8651	
14	0,35	0,15	535	560	46,2	46	0,33	8501	
15	0,33	0,15	560	625	46	46	0,30	8625	350
Recocido a 200 °C y t = 30 min									
16	0,30	0,10	625	670	46	45,8	0,28	8592	
17	0,28	0,10	670	690	45,8	46	0,27	8570	
18	0,27	0,10	690	800	46	46	0,22	8096	367
Recocido a 200 °C y t = 30 min									
19	0,22	0,07	800	810	46	46,1	0,22	8215	
20	0,22	0,07	810	900	46,1	46	0,20	8280	
21	0,20	0,07	900	1100	46	45,9	0,17	8583	300
Recocido a 200 °C y t = 30 min (corte de láminas por aparición fisuras)									
22	0,17	0,05	500	610	45,9	46	0,15	4209	
23	0,15	0,05	610	710	46	46,1	0,10	3273	
24	0,10	0,05	710	720	46,1	46	0,09	2981	316
Recocido a 200 °C y t = 30 min									
25	0,08	0,02	800	970	46	46	0,07	3123	
26	0,06	0,02	1000	1010	46	46	0,06	2788	
27	0,06	0,02	1010	1015	46	46	0,06	2335	300

A partir de los datos dimensionales registrados, y después de aplicar tres pasadas de laminación en frío por cada “abertura entre rodillos” se calcula una nueva Tabla 14 en la que se aplica las variaciones dimensionales totales por cada valor de apertura entre rodillos.

Tabla 14.- Recalculo de las dimensiones finales después de 3 pasadas por cada apertura de rodillos.

Pasada	E_i (mm)	Abertura Rodillos (mm)	L_i (mm)	L_f (mm)	A_i (mm)	A_f (mm)	E_f (mm)	V_i (mm ³)
1, 3 pasadas	0,95	0,50	448	700	41,0	42,0	0,58	17052
2, 3 pasadas	0,58	0,40	700	870	42	42,5	0,47	17378
3, 3 pasadas	0,47	0,30	870	1000	42,5	42,5	0,40	17000
4, 3 pasadas	0,40	0,20	1000	1070	42,5	42,5	0,36	16371
5, 3 pasadas	0,36	0,15	560	625	42,5	42,5	0,30	7969
6, 3 pasadas	0,30	0,10	625	800	42,5	42,6	0,22	7498
7, 3 pasadas	0,22	0,07	800	1010	42,6	42,7	0,17	7332
8, 3 pasadas	0,17	0,05	500	720	42,7	42,5	0,09	2754
9, 4 pasadas	0,09	0,02	800	1015	42,6	42,5	0,06	2588

A partir de las mediciones de las dimensiones del producto por cada 3 pasadas de laminación en frío se puede calcular las siguientes variables respuesta:

- Porcentaje de Reducción: $\frac{(E_i - E_f)}{E_i} 100$
- Porcentaje de Alargamiento: $\frac{(L_f - L_i)}{L_i} 100$
- Relación de Alargamiento entre pasadas: $\frac{L_f}{L_i}$

De modo que se puede obtener la siguiente Tabla 15:

Tabla 15.- Calculo del % Reducción, % de Alargamiento y Relación de alargamiento por sucesivos pasadas en la laminación en frio de pletina.

Pasada	% Reducción	% Alargamiento	Li/Li-1	Resistencia a la Tracción (MPa)
1 (3 pasadas)	38,95	56,25	1,56	259
2 (3 pasadas)	18,97	24,29	1,24	238
3 (3 pasadas)	14,89	14,94	1,15	300
4 (3 pasadas)	10,00	7	1,07	305
5 (3 pasadas)	21,05	11,61	1,12	350
6 (3 pasadas)	26,67	28	1,28	367
7 (3 pasadas)	39,29	26,25	1,26	300
8 (3 pasadas)	59,09	44	1,6	316
9 (4 pasadas)	25,00	26,88	1,27	300

A partir de los datos calculados en la Tabla 15 se procede a graficar para evaluar la regularidad en la laminación en frio dando la Figura 60.

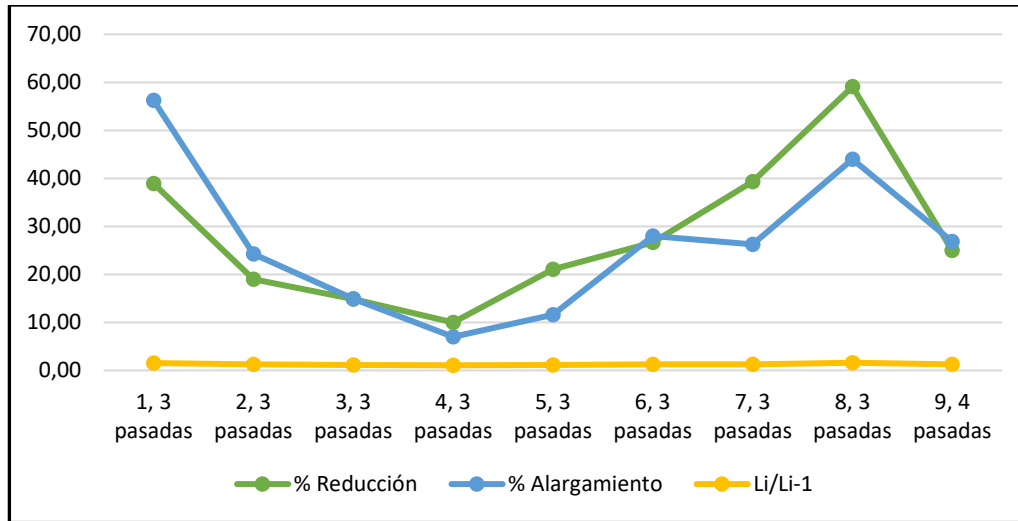


Figura 57.- % Reducción, % Alargamiento y Relación de alargamiento entre pasadas.

Utilizando la Tabla 15 evaluamos la Resistencia a la Tracción de las láminas producidas por laminación en frío aplicando 3 pasadas por cada “apertura entre rodillos” en la gráfica de la Figura 61.

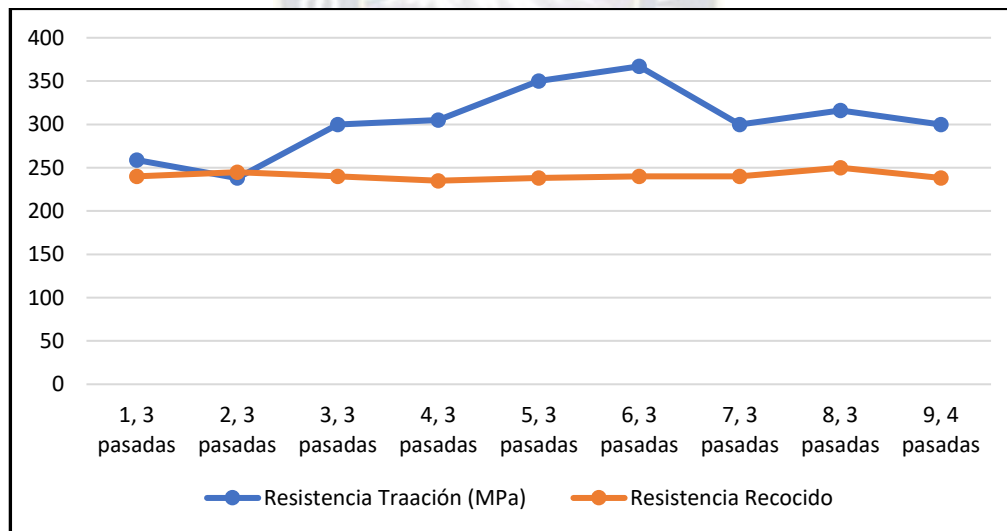
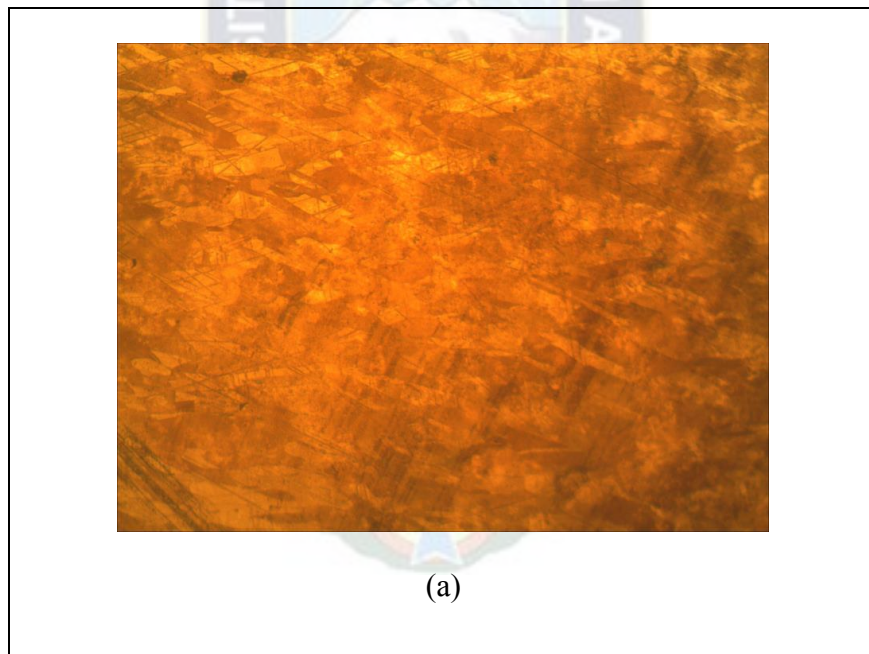


Figura 58.- Mediciones de la Resistencia a la tracción al producto de la laminación en 3 pasadas bajo una abertura de rodillos.



Figura 59.- Instante en el que se obtiene el producto de la laminación en frío.



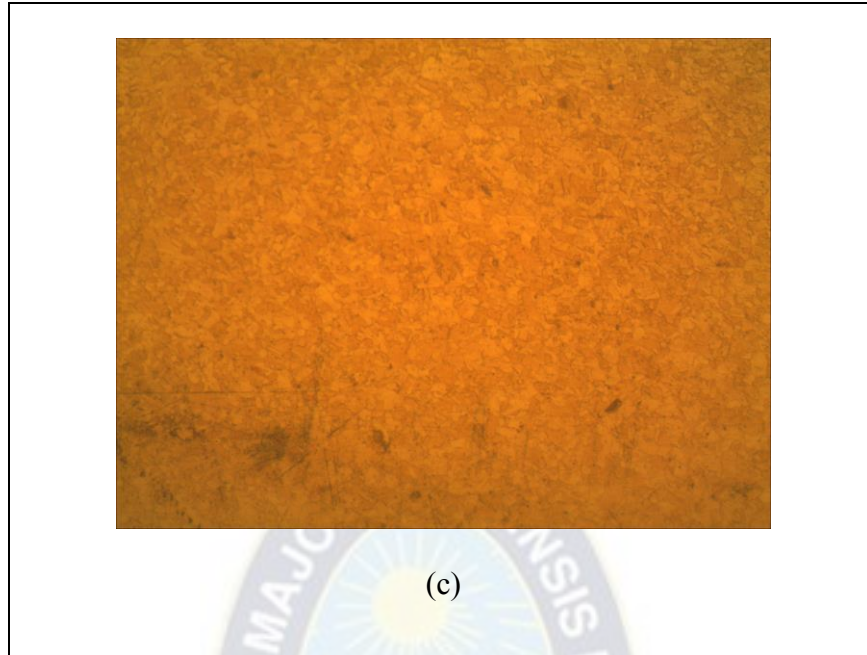


Figura 60.- Metalografía óptica del fleje de 0.95 mm laminado a 0.75 mm (a) Granos deformados en sentido de la laminación y (b) granos equiaxiales después del recocido de recristalización. Ataque químico con Dicromato de Potasio. Aumento 300x.

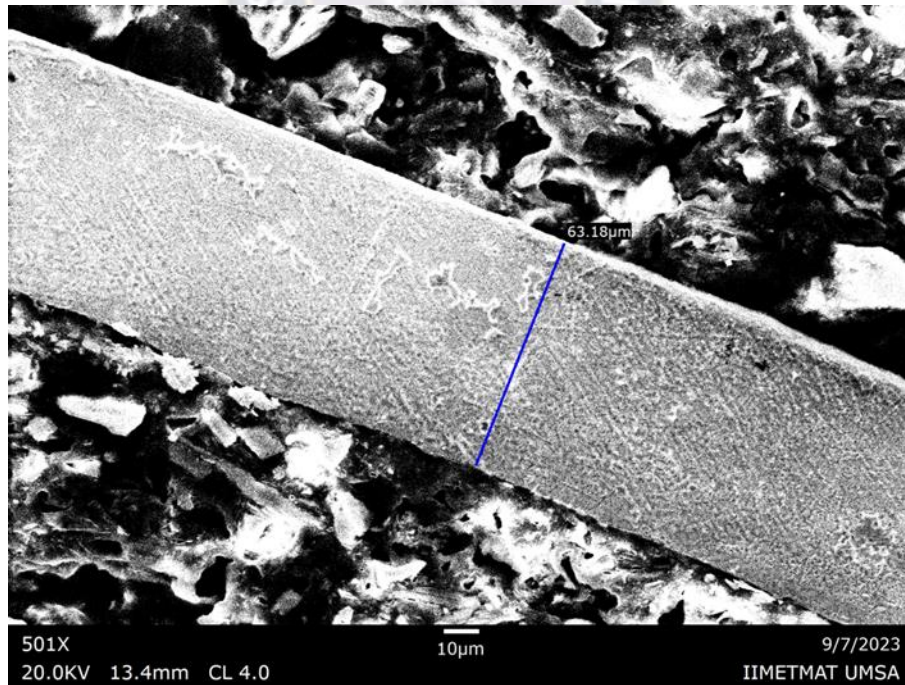


Figura 61.- Fotomicrografía SEM de foil final obtenida de pletina estado no recocido. Microestructura ordenada de granos alargados. Espesor de 63.18 μm



Figura 62.- Fleje obtenido de pletina de cobre.

Análisis


- La Tabla 13 de resultados del programa de laminación en frío a partir de un fleje de 0.95 mm de espesor en el realizó 3 pasadas con la misma abertura entre rodillos. Se puede ver que el espesor final E_f incluso después de las tres pasadas, es mayor que la “abertura entre rodillos”, esto quiere decir que los rodillos ceden a la fuerza de reacción del material. Sin embargo la columna V_i muestra una aceptable conservación del volumen de la pieza resultante.
- La Figura 57 demuestra que % Reducción y el %Alargamiento no son constantes de pasada a pasada pese a que el recocido de recristalización genera un material con casi con el mismo nivel de resistencia. Nuevamente, el hecho de que los rodillos no tengan soporte sobre ellos genera variaciones en la abertura entre rodillos y desigualdad en la fuerza de laminación a lo largo del eje.
- Sin embargo, con la mínima abertura entre rodillos se pudo lograr un espesor mínimo de 0.06 mm o 60 μm , es decir una reducción total del 99% desde el espesor inicial de la barra, todavía insuficiente porque debería alcanzarse el 99.8% de reducción.
- La fotomicrografía SEM del foil final obtenida de pletina estado no recocido muestra una microestructura de granos alargado de fase de cobre en diversas formas y tamaños, siendo el espesor evidenciado de 0.06318 mm o su equivalente 63.18 μm .

- La Figura 58 muestra el aumento en la Resistencia a la Tracción del laminado resultante para cada paso y la restitución de la Resistencia después del Recocido de recristalización, aspecto que se puede confirmar con la metalografía de lámina todavía gruesa vista en la Figura 63.


4.4 Resultados de la Laminación de la Barra Fundida de Cobre

4.4.1 Caracterización de la composición química del de cobre electrolítico de la Empresa Metalúrgica Bolívar

La Figura presenta el resultado del análisis químico aplicado en el Laboratorio Químico del IIMETMAT en el que se determinaron impurezas posibles siendo el resto del balance el % de cobre.



UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN METALURGIA Y MATERIALES



No. Certif.: 087/2023
Fecha: 10/08/2023


CERTIFICADO DE ANÁLISIS QUÍMICO


CLIENTE: Dr. Rodny Balanza E. EMPRESA: Proyecto de Investigación Laminación de Cobre para Foil


MUESTRA: 1 Muestra ANÁLISIS POR: Pb - Zn - Sn

RESULTADOS:

Nº	Código	Elemento	Unidades	Contenido
1	M/C	Pb	%	0,006
2				
3		Zn	%	0,002
4				
5		Sn	%	0,011
6				


 Lic. Oscar Calle Calderón.
LABORATORIO QUÍMICO
Ci: Archivo IIMETMAT


 VoBo. Lic. Oscar Calle Calderón
 DIRECTOR
 INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
 METALURGIA Y MATERIALES
 U.M.S.A.



Dirección: Av. de las Américas esq. Santa Rosa N° 100 Telef. 2 210402 Fax: 591-2-2260106 e-mail: iimetmat@umsa.bo
 Metalurgia: Concentración - Hidrometalurgia - Electrometalurgia - Pirometalurgia - Siderurgia
 Materiales: Fundición - Materiales Metálicos - Soldadura - Corrosión - Desgaste - Soldadura - Materiales Cerámicos Materiales Poliméricos - Análisis Químico - Asesoramiento y Asistencia Técnica

Figura 63.- Análisis químico de cátodo realizado en IIMETMAT, se muestra el contenido de Pb(0,006%), Zn (0,002%) y Sn (0.011%) dando como la diferencia 99,981% el contenido de Cu.

4.4.2 Caracterización de la Barra Fundida de Cobre

4.4.2.1 Propiedades Mecánicas

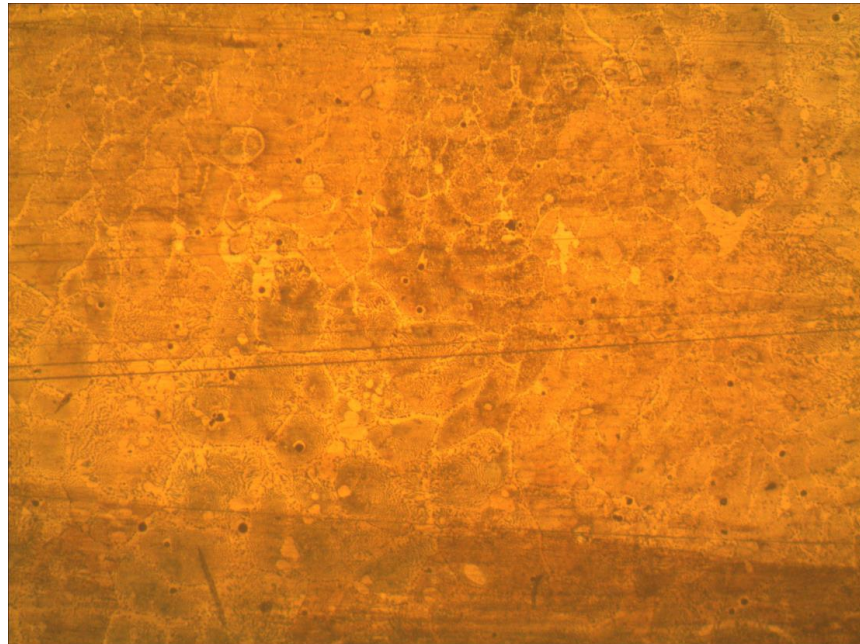
- Dimensiones de la muestra a laminar
 - $L_o = 70 \text{ mm}$
 - $A_o = 38 \text{ mm}$
 - $E_o = 6 \text{ mm}$
 - $V_o = 17343,00 \text{ mm}^3$
- Dureza: 78,5 HB

4.4.2.2 Metalografía

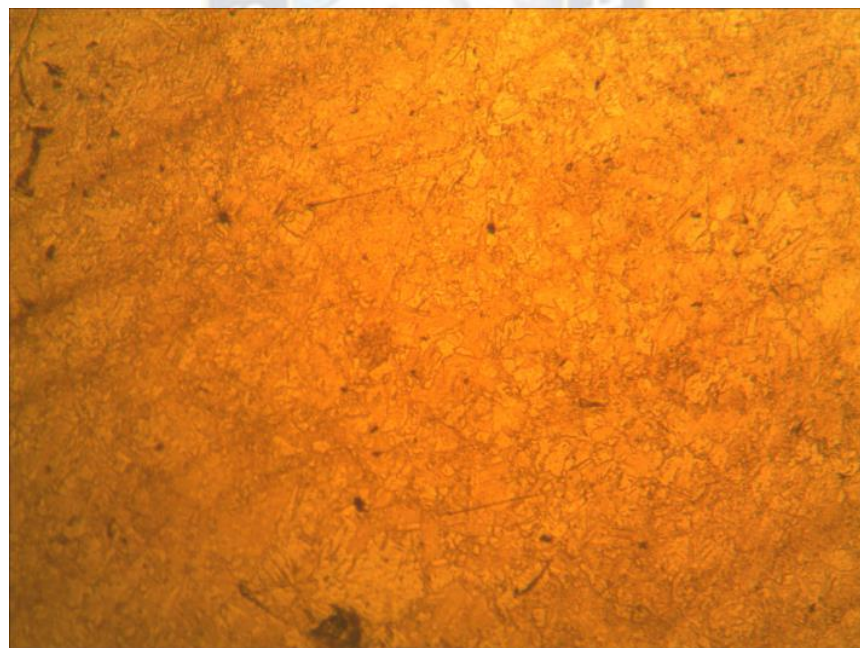
Para el estudio de la metalografía de la barra de cobre obtenida de la fundición del cátodo de cobre se preparó una muestra encapsulada en poxilina (Figura 64). Dicha muestra se lijó, pulió y atacó con dicromato de potasio para visibilizar la metalografía.



Figura 64.- Probeta pulida para pruebas de metalografía.



(a)



(b)

Figura 65.- (a)Fotomicrografía óptica. Cátodo de cobre de EM Bolivar. Microestructura de granos aproximadamente equiaxiales de fase cobre. Ataque con solución de Dicromato de Potasio. Aumento 160x. (b)Fotomicrografía óptica. Microestructura de barra de cobre fundida de EM Bolivar. Microestructura de granos equiaxiales de fase cobre. Ataque con solución de Dicromato de Potasio. Aumento 160x.

4.4.3 Laminación de la barra fundida (cobre de EM Bolívar)

Con las pruebas preliminares hechas con la pletina adquirida por Gismart se tuvo la confiabilidad en el proceso para la fabricación de *foil* de cobre alcanzó un espesor de 0.06 A 0.05 (mm). Al igual que las pruebas preliminares, se hizo el correspondiente seguimiento del cambio en las dimensiones de la barra y la modificación en las propiedades.

4.4.3.1 Laminación en Caliente de barra fundida

Tabla 16.- Deformaciones medidas después de cada pasada de laminación en caliente. E_i = espesor antes de la pasada i , E_f = espesor al final de la pasada i . Similarmente para la L = largo y A = ancho. V_i = volumen al final de la pasada. Abertura entre rodillo medida con gauges.

Laminación en caliente de barra fundida									
Pasada de laminación	E_i(mm)	Abertura entre rodillos gauge(mm)	L_i (mm)	L_f(mm)	A_i(mm)	A_f(mm)	E_f(f)	V_f(mm³)	Dureza (HB)
1	6	4,8	70	90	38	41	4,7	17343,00	78,5
Calentamiento a 750°C y decapado									
2	4,7	3,8	90	105	41	41,1	4,05	17477,7	79
Calentamiento a 750°C y decapado									
3	4,05	3	105	128	41,1	41,5	3,25	17264,00	80
Calentamiento a 750°C y decapado									
4	3,25	2	128	169	41,5	42	2,5	17745,00	80
Calentamiento a 750°C y decapado									

5	2,5	1	169	232	42	43	1,85	18455,60	80
Calentamiento a 750°C y decapado									
6	1,85	0,8	232	305	43	44,5	1,3	17644,25	81
Calentamiento a 750°C y decapado									
7	1,3	0,6	305	450	44,5	45	0,9	18225,00	*

*Para este espesor de 0.9 mm ya no funciona el ensayo de dureza Rockwell.

A partir de las mediciones en las dimensiones del producto de una pasada de laminación se puede calcular las siguientes variables respuesta:

- Porcentaje de Reducción: $\frac{(E_i - E_f)}{E_i} 100$
- Porcentaje de Alargamiento: $\frac{(L_f - L_i)}{L_i} 100$
- Relación de Alargamiento entre pasadas: $\frac{L_f}{L_i}$

De modo que se puede obtener la siguiente Tabla 17:

Tabla 17.- % Reducción y % de Alargamiento obtenido en la laminación en caliente de la barra fundida obtenida del cátodo de Cu de la EM Bolívar.

Pasada	Abertura de gauge	%Reduccion	%Alargamiento	Li/Li-1	Dureza(HB)
1	4,8	21,67	28,57	0,78	78,5
2	3,8	13,83	16,67	0,86	79
3	3	19,75	21,90	0,82	80
4	2	23,08	32,03	0,76	80
5	1	26,00	37,28	0,73	80
6	0,8	29,73	31,47	0,76	81
7	0,6	30,77	47,54	0,68	*

Con los datos obtenidos se tienen los siguientes gráficos:

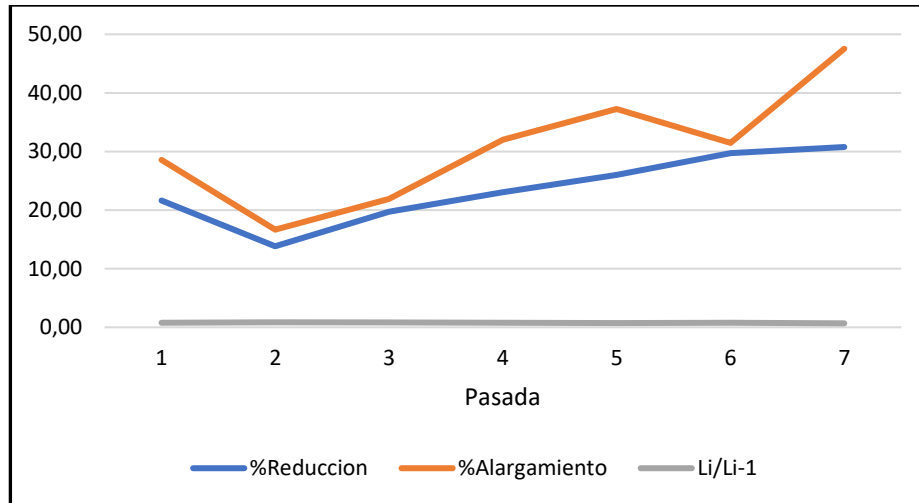


Figura 66.- Variación de % de Reducción, % alargamiento y radio de alargamiento entre pasadas

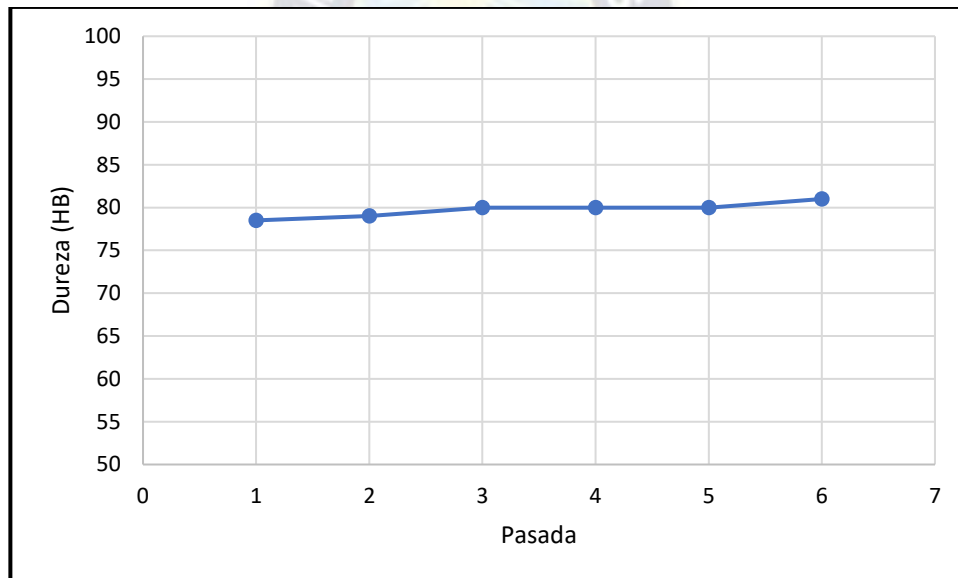


Figura 67.- Variación de la dureza Brinell en función de las pasadas de laminación en caliente.

Análisis

- Se puede apreciar en la tabla 16 que en el proceso de una pasada en caliente la barra sufre una considerable reducción de su espesor.
- En la tabla 16 se puede observar que la medida del ancho de la barra de cobre aumenta en un principio pero luego tiende a mantener su medida.
- La tabla 16 muestra que no varía mucho el volumen de la barra, confirmando así que el proceso es a volumen constante

- Se puede observar en la tabla 17 y en la figura 66 el porcentaje de reducción y alargamiento que obtuvo en cada pasada, los cuales existe una ligera variación. Cuando el fleje llega a tener un espesor cerca a 1mm se observa que estos porcentajes aumentan y es por la influencia de la temperatura y el tiempo que influyen en la ductilidad del material.
- En cuestión a la dureza la pieza tiene en un principio una dureza de 78,5 HB como se presenta en el apartado 4.4.2. características de la barra fundida de cobre. Sin embargo llega a tener un ligero aumento en la dureza a medida que se realizan las pasadas como se puede apreciar en la figura 67, esto debido a la recristalización con afino de grano que sucede al salir de la laminación.
- Considerando los resultados obtenidos en el laminado en caliente de la barra fundida se puede confirmar que la máquina laminadora es adecuada para la laminación en caliente.

4.4.3.2 Laminación en frío de la barra fundida

Tabla 18.- Deformaciones medidas después de cada pasada de laminación en frío. E_i = espesor antes de la pasada i , E_f = espesor al final de la pasada i . Similarmente para la L = largo y A = ancho. V_i = volumen al final de la pasada. Abertura entre rodillo medida con gauges.

Laminación en frío de barra fundida obtenida de cátodo de cobre de la EM Bolívar									
Pasada	E_i (mm)	Abertura Rodillos	L_i (mm)	L_f (mm)	A_i (mm)	A_f (mm)	E_f (mm)	V_i (mm ³)	Resist Traccion (MPa)
1	0,9	0,5	450	540	45	45,2	0,73	17817,84	
2	0,73	0,5	540	655	45,2	46	0,67	20187,1	
3	0,67	0,5	655	693	46	46,6	0,61	19699,21	240
Recocido a 200 °C y t = 30 min									
4	0,61	0,4	693	750	46,6	47	0,58	20445	

5	0,58	0,4	750	830	47	47	0,53	20675,3	
6	0,53	0,4	830	885	47	47	0,5	20797,5	264
Recocido a 200 °C y t = 30 min									
7	0,5	0,3	885	900	47	47	0,45	19035	
8	0,45	0,3	900	920	47	47,1	0,43	18632,76	
9	0,43	0,3	920	990	47,1	47	0,39	18146,7	300
Recocido a 200 °C y t = 30 min									
10	0,39	0,2	990	1010	47	47	0,38	18038,6	
11	0,38	0,2	1010	1050	47	47	0,37	18259,5	
12	0,37	0,2	500	540	47	47	0,35	8883	310
Recocido a 200 °C y t = 30 min									
13	0,35	0,15	540	560	47	47	0,33	8685,6	
14	0,33	0,15	560	610	47	47	0,32	9174,4	
15	0,32	0,15	620	635	47	47	0,31	9251,95	340
Recocido a 200 °C y t = 30 min									
16	0,31	0,1	635	680	47	47	0,28	8948,8	
17	0,28	0,1	680	700	47	47	0,26	8554	
18	0,26	0,1	700	750	47	47	0,24	8460	360
Recocido a 200 °C y t = 30 min									

19	0,24	0,07	750	790	47	47	0,22	8168,6	
20	0,22	0,07	790	850	47	47	0,21	8389,5	
21	0,21	0,07	850	970	47	47	0,18	8206,2	316
Recocido a 200 °C y t = 30 min									
22	0,18	0,05	500	630	47	47	0,16	4737,6	
23	0,16	0,05	630	685	47	47	0,1	3219,5	
24	0,1	0,05	685	710	47	47	0,07	2335,9	284
Recocido a 200 °C y t = 30 min									
25	0,07	0,02	710	750	47	47	0,07	2467,5	
26	0,06	0,02	765	775	47	47	0,06	2185,5	
27	0,06	0,02	775	780	47	47	0,05	1833	240

A partir de estos datos dimensionales registrados después de aplicar tres pasadas de laminación en frío por cada “abertura entre rodillos” se obtienen los siguientes datos registrados en Tabla 19 en la que se obtienen las variaciones dimensionales totales por cada valor de apertura entre rodillos.

Tabla 19.- Recalculo de las dimensiones finales después de 3 pasadas por cada apertura de rodillos

Pasada	Ei (mm)	Abertura Rodillos	Li (mm)	Lf (mm)	Ai (mm)	Af (mm)	Ef (mm)	Vi (mm ³)
1, 3 pasada	0,67	0,5	655	693	46	46,6	0,53	17115,71
2, 3 pasada	0,53	0,4	830	885	47	47	0,43	17885,85

3, 3 pasada	0,43	0,3	920	990	47,1	47	0,37	17216,10
4, 3 pasada	0,37	0,2	500	540	47	47	0,32	8121,60
5, 3 pasada	0,32	0,15	620	635	47	47	0,26	7759,70
6, 3 pasada	0,26	0,1	700	750	47	47	0,21	7402,50
7, 3 pasada	0,21	0,07	850	970	47	47	0,1	4559,00
8, 3 pasada	0,1	0,05	685	710	47	47	0,06	2002,20
9, 3 pasada	0,06	0,02	775	780	47	47	0,05	1833,00

A partir de las mediciones de las dimensiones del producto por cada 3 pasadas de laminación en frío se puede calcular las siguientes variables respuesta:

- Porcentaje de Reducción: $\frac{(E_i - E_f)}{E_i} 100$
- Porcentaje de Alargamiento: $\frac{(L_f - L_i)}{L_i} 100$
- Relación de Alargamiento entre pasadas: $\frac{L_f}{L_i}$

De modo que se puede obtener la siguiente Tabla 20:

Tabla 20.- Calculo del % Reducción, % de Alargamiento y Relación de alargamiento por sucesivos pasadas en la laminación en frío de la barra fundida.

Pasada	% Reducción	% Alargamiento	Li/Li-1	Resistencia a la tracción(MPa)
1, 3 pasada	20,90	5,80	0,95	240

2, 3 pasada	18,87	6,63	0,94	264
3, 3 pasada	13,95	7,61	0,93	300
4, 3 pasada	13,51	8,00	0,93	310
5, 3 pasada	18,75	2,42	0,98	340
6, 3 pasada	19,23	7,14	0,93	360
7, 3 pasada	52,38	14,12	0,88	316
8, 3 pasada	40,00	3,65	0,96	284
9, 3 pasada	16,67	0,65	0,99	300

A partir de los datos calculados en la Tabla 20 se procede a graficar para evaluar la regularidad en la laminación en frío dando la Figura 71

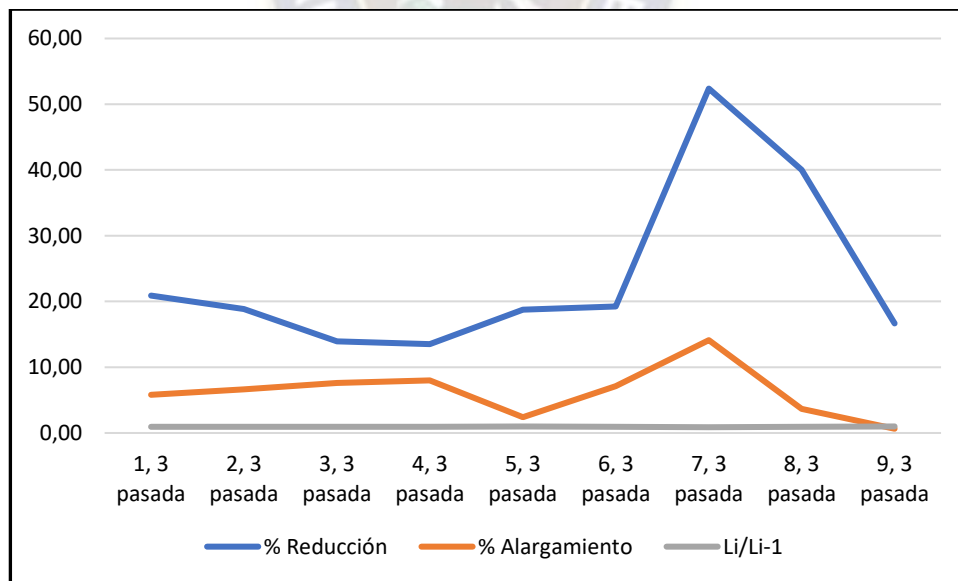


Figura 68.- % Reducción, % Alargamiento y Relación de alargamiento entre pasadas

De acuerdo con la Tabla 13 se evalúa la Resistencia a la Tracción de las láminas producidas por laminación en frío aplicando 3 pasadas por cada “apertura entre rodillos” obteniéndose la siguiente Figura 72

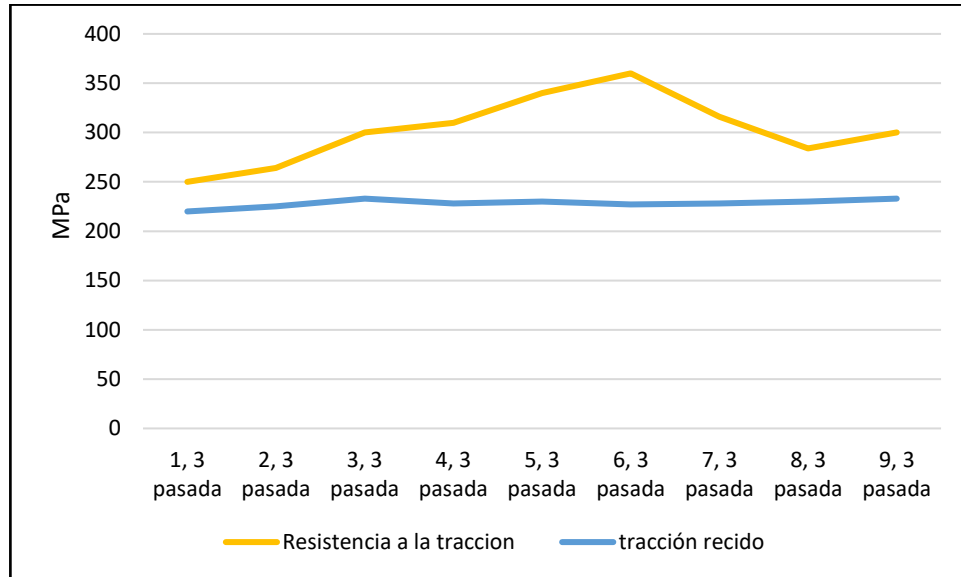


Figura 69.- Resistencia a la tracción del producto de la laminación en frío en 3 pasadas bajo una apertura de rodillos.

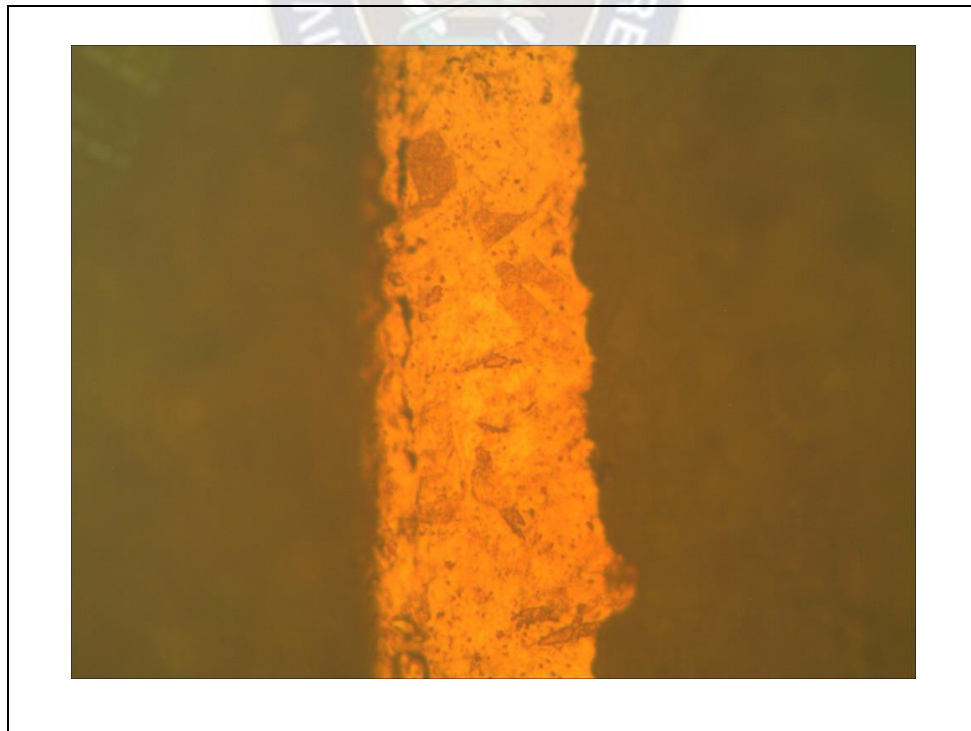


Figura 70.- Fotomicrografía óptica de foil final obtenido de barra fundida en estado no recocido. Ataque químico con solución de dicromato de potasio. Aumento 320x



Figura 71.- Fotomicrografía SEM de foil final obtenido de la barra fundida de EM Bolivar en estado recocido.



Figura 72.- Fleje obtenido de la barra obtenida.



Figura 73.- Flejes obtenidos en laboratorio.

Análisis

- En la tabla 18 se muestran los resultados del programa de laminado en frío para la barra fundida obtenida del cátodo de cobre de la EM Bolívar, empezando con 0,9 (mm) de espesor y haciendo 3 pasadas para cada medida de separación de rodillos. En esta tabla muestra E_i (espesor inicial) y E_f (espesor final) de cada pasada y se puede observar que el espesor final en cada pasada es mayor a la abertura entre rodillos, y esto es debido a que los rodillos llegan a ceder a la fuerza de reacción del material. Por otra parte se puede observar en la columna V_i que casi no existe una variación en el volumen.
- La Figura 68 al igual que en las pruebas preliminares muestra que el porcentaje de reducción y el porcentaje de alargamiento no son constantes de pasada a pasada aun cuando el recocido de recristalización produce un material con similar resistencia. Debido a que los rodillos no tienen un soporte que evite que estos cedan en la abertura durante la laminación produciéndose variaciones en la abertura y por lo tanto en el espesor final de las láminas.
- La fotomicrografía óptica del foil obtenido de barra fundida en estado no recocido muestra una microestructura de granos deformados de fase de cobre en diversas formas y tamaños, siendo el espesor evidenciado de 0,054 mm o su equivalente 54 μm .

- En la Figura 69 muestra el incremento de la resistencia a la tracción del producto resultante para cada laminado y por otro lado la resistencia del recocido que se restituye luego de cada recristalizado.



CAPITULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

- La caracterización de foil de referencia presentó los siguientes valores muy próximos a los reportados en su hoja técnica:
 - Dimensiones: ancho 280 mm, espesor 9-10 μm
 - Pureza Química: 99.9%
 - Resistencia a la tracción: 370 MPa
 - Alargamiento: 2,5%
 - Rugosidad cara brillante: 0.9
 - Rugosidad cara opaca: 2.23
 - Método de fabricación: ED (electrodeposición)
- La caracterización por microscopía SEM constata que el foil de referencia fue obtenido mediante ELECTRODEPOSICIÓN.
- Las pruebas de laminación para pletinas de cobre y la barra obtenida del cátodo de cobre alcanzaron la siguiente secuencia: laminación en caliente a temperatura de 750°C, laminación en frío a temperatura ambiente con previo precalentamiento a 200°C durante 30 minutos, decapado, lavado, secado y la secuencia del laminado en frío se repitió con 9 precalentamientos hasta llegar al espesor final.
- Del proceso de laminación para la pletina de cobre y barra obtenida del cátodo de cobre se logró obtener un porcentaje de reducción en espesor del 99.01% y 99.10% respectivamente, lograndose reducir por tanto a más del 90% del espesor inicial para ambos casos.
- La laminadora tipo DUO de laboratorio es inadecuada para obtener foils (láminas) del orden de 10 μm de espesor, espesor necesario para uso como colector de corriente del ánodo de una Batería de ion litio.

1.2 RECOMENDACIONES

- Es necesario que los rodillos de trabajo dispongan del soporte de rodillos de mayor diámetro como en laminadores tipo cuarto para tener mejor control de variables como ser

velocidad de laminado, presión que ejercen los rodillos con la barra, como también una manera más precisa de medir la separación de rodillos.

- Proseguir con el desarrollo de un proyecto de factibilidad técnica para plantear la producción industrial de foils a partir del cobre electrolítico producido en Corocoro.



BIBLIOGRAFÍA

A. Gonzalez, F. D. (2023). Desarrollo reciente y proyecciones al 2035. *Colchico*, 16.

Copper Foil For High Frequency Materials. (2019). *Rogers Corporation* .

- Copper Foil Manufacturing*. (Enero de 2019). Obtenido de www.totalmateria.com/page.aspx?ID=CheckArticle&site=ktn&NM=352
- Copper Foil Market: Global Industry Analysis and Forecast (2023-2029)*. (julio de 2023). Obtenido de www.maximizemarketresearch.com/market-report/copper-foil-market/122392/
- CoroCoro, E. (2023). *Empresa Minera CoroCoro*. Obtenido de <https://www.mineracorocoro.com/institucional/mision-y-vision.html>
- Corporation, R. (2019). *Copper Foils For High Frequency Materials*. Obtenido de www.rogercorp.com
- Decker, B. (1950). *trans AIME*.
- Dieter, G. (1970). *Metarurgia Mecánica Cap 19*. Editorial Agilar.
- Green Car Congress. Roskill: surge in electrodeposited copper foil projects to meet projected EV demand*. (13 de junio de 2021). Obtenido de <https://www.greencarcongress.com/2021/06/20210613-roskill.html>
- <https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2024/mcs2024-lithium.pdf>. (2024). Obtenido de pubs.er.usgs.gov
- J. Calzada, D. S. (agosto de 2019). *Bolsa de Comercio de Rosario* . Obtenido de cdi.mecon.gov.ar
- J. Gonzales, C. S. (agosto de 2021). *Informe Litio, secreteria de minería*. Obtenido de www.argentina.gob.ar/sites/default/files/informe
- JIMA COPPER. Specialist of conductive copper*. (s.f.). Obtenido de www.jimacopper.com
- Jinggi Chen, X. W. (2021). Rolled electrodeposited copper foil with modified surface morphology as anode current collector for high performance lithium-ion batteries. *Surface & Coating Technology* 410.
- Lin, F. (2013). *Recrystallization of deformed copper - kinetics and microstructural evolution*. DTU Wind Energy. DTU Wind Energy PhD No. 0011(EN).

Manrique, A. (2014). *explotación del litio, producción y comercialización de baterías de litio en Argentina*. Argentina : Universidad Nacional de Mar de Plata .

Manual de rugosímetro. (s.f.).

Metals, C. (s.f.). Obtenido de www.civen-inc.com

Montenegro, J. (s.f.). *Univesidad Nacional de Quilmes* . Obtenido de ridaa.unq.edu.ar

Nature Reviews/ Materialsblogs.cdecomunicacion.es. (s.f.).

products & solution. TARGRAY . (s.f.). Obtenido de www.targray.com/li-ion-battery

Recrystallization of deformed copper. (s.f.). *kinetics and microstructural evolution*.

www.mch.cl/2020/08/26/electromovilidad. (s.f.).

ANEXOS

ANEXO A: Análisis químico de cátodo de cobre de la Empresa Metalúrgica Bolívar.

Alex Stewart International Corporation
 28 Olympic Way, Sefton Business Park, Netherton, Liverpool L30 1RD, England, Tel: +44 (0)151 525 6258, Fax: +44 (0)151 523 3760

CERTIFICATE OF ASSAY Certificate No. **29683**

Client: EMPRESA MINERA BOLIVAR LTDA
 AV CIRCUMVALLATION SN
 POTOSI
 BOLIVIA

Lote: EMB-CU M-1

Our Ref: L48980-1

Client Ref: CLASE A

Date Reported: 22/08/14

Date Started: 08/08/14

Date Received: 08/08/14

Sample Of: Copper Metalliac

Sample Details: CLASE A

Herewith our analysis results:-

Copper by difference (Cu) %	99.990
Silver (Ag) %	0.0001
Aluminium (Al) %	0.0001
Arsenic (As) %	0.0002
Boron (B) %	0.0003
Barium (Ba) %	<0.0001
Bismuth (Bi) %	<0.0001
Calcium (Ca) %	<0.0001
Cadmium (Cd) %	<0.0001
Cobalt (Co) %	<0.0001
Chromium (Cr) %	<0.0001
Iron (Fe) %	0.0021
Magnesium (Mg) %	<0.0001
Manganese (Mn) %	<0.0001
Nickel (Ni) %	<0.0001
Oxygen (O) ppm	75
Phosphorus (P) %	<0.0001
Lead (Pb) %	0.0002
Sulphur (S) %	0.0033
Antimony (Sb) %	<0.0001
Selenium (Se) %	<0.0001
Silicon (Si) %	0.0001
Tin (Sn) %	<0.0001
Tellurium (Te) %	<0.0001
Thallium (Tl) %	<0.0001
Zinc (Zn) %	0.0041

Sample acid washed, metal basis

RECIBIDO
 27 OCT. 2014
 99.990
 0.0001
 0.0001
 0.0002
 0.0003

VIATOR
 30 OCT 2014

Page 1 of 1

ALEX STEWART INTERNATIONAL CORPORATION

Riddell

ANEXO B: Ficha técnica de foil de cobre provisto por YLB.

Copper Foil with Various Width and Thickness as Battery Current Collector : from 4.5µm, to 25µm



Sale Price: USD\$685.00

If you are international, please click this.

In stock

Item Number: BCCF-9u

Product Options

Thickness and Width:

Quantity: **BUY**

[Email this page to a friend](#)

Specifications

- Material: Electrolytic Tough Pitch Copper, Purity≥ 99.8% (C101)
- Tensile Strength: 30 kgf/mm
- Temper: H19
- Mass resistivity 0.168 Ω.g/m²
- Tensile Strength: 38 Kg/m²
- Elongation Rate (RT): 4.2%
- Elongation Rate (HT): 5.5%
- Shiny Side Roughness (RA): 0.22-0.25 µm, all the following types of copper foils are double-side shiny and smooth.
- Shiny Side Roughness (RZ): 1.6 µm
- Core size: 75mm (~3 inches)
- Various thicknesses, widths, and lengths are available to select on the options bar.

Thickness	Width	Length (~)	Weight (~)
4.5µm	180mm	350m	2.5kg
	280mm	220m	2.5kg
6µm	180mm	525m	5kg
	280mm	333m	5kg
9µm	180mm	310m	5kg
	280mm	170m	4kg
12µm	180mm	240m	5kg
	280mm	155m	5kg
25µm	80mm	120m	2~2.5kg
	150mm	120m	4kg

ANEXO C: Ficha técnica de la Laminadora Tipo Dúo.

FICHA TECNICA

LAMINADORA TIPO DÚO.



TIPO	LAMINADOR DE PLANOS TIPO DÚO
LARGO DE RODILLOS	230 (mm)
DIAMETRO DE RODILLOS	74.6 (mm)
VELOCIDAD ANGULAR DE RODILLOS	0.1 rpm
DUREZA DE RODILLOS	56 Rc
POTENCIA DE MOTOR	5.5 HP
VELOCIDAD ANGULAR DEL MOTOR	1440 rpm
MODO DE ENCENDIDO	Manual
SEPARACIÓN MAXIMA DE RODILLOS	6.5 (mm)

ANEXO D: Certificado de análisis químico del cátodo de cobre provisto por la Empresa Metalúrgica Bolívar.



UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN METALURGIA Y MATERIALES



No. Certif.: 087/2023
 Fecha: 10/08/2023

CERTIFICADO DE ANÁLISIS QUÍMICO

CLIENTE Dr. Rodny Balanza E.

EMPRESA: Proyecto de Investigación
 Laminación de Cobre para Foil

MUESTRA: 1 Muestra

ANÁLISIS POR: Pb - Zn - Sn

RESULTADOS:

N°	Código	Elemento	Unidades	Contenido
1	M/C	Pb	%	0,006
2				
3		Zn	%	0,002
4				
5		Sn	%	0,011
6				



[Signature]
 Lic. Oscar Calle Calderón.
LABORATORIO QUÍMICO

VoBo.

[Signature]
 Lic. Juan Carlos Montenegro Bravo
DIRECTOR
 INSTITUTO DE INVESTIGACIONES
 METALURGICAS Y DE MATERIALES
 U.M.S.A.

Cc.: Archivo IIMETMAT

Daniela Anahi Uruchi Cosme

danielauruchi@gmail.com

Cel: 77235559



DIRECCIÓN DE DERECHO DE AUTOR
Y DERECHOS CONEXOS
RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA NRO. 1-1317/2024
La Paz, 30 de abril de 2024

VISTOS:

La solicitud de Inscripción de Derecho de Autor presentada en fecha **23 de abril de 2024**, por **DANIELA ANAHI URUCHI COSME** con **C.I. N° 4908088 LP**, con número de trámite **DA 714/2024**, señala la pretensión de inscripción del Proyecto de Grado titulado: **"LAMINACIÓN DE COBRE ELECTROLÍTICO PRODUCIDO EN BOLIVIA PARA LA FABRICACIÓN DE FOIL PARA EL ARMADO DE BATERÍAS DE ION LITIO"**, cuyos datos y antecedentes se encuentran adjuntos y expresados en el Formulario de Declaración Jurada.

CONSIDERANDO:

Que, en observación al Artículo 4º del Decreto Supremo N° 27938 modificado parcialmente por el Decreto Supremo N° 28152 el *"Servicio Nacional de Propiedad Intelectual SENAPI, administra en forma desconcentrada e integral el régimen de la Propiedad Intelectual en todos sus componentes, mediante una estricta observancia de los regímenes legales de la Propiedad Intelectual, de la vigilancia de su cumplimiento y de una efectiva protección de los derechos de exclusiva referidos a la propiedad industrial, al derecho de autor y derechos conexos; constituyéndose en la oficina nacional competente respecto de los tratados internacionales y acuerdos regionales suscritos y adheridos por el país, así como de las normas y regímenes comunes que en materia de Propiedad Intelectual se han adoptado en el marco del proceso andino de integración"*.

Que, el Artículo 16º del Decreto Supremo N° 27938 establece *"Como núcleo técnico y operativo del SENAPI funcionan las Direcciones Técnicas que son las encargadas de la evaluación y procesamiento de las solicitudes de derechos de propiedad intelectual, de conformidad a los distintos regímenes legales aplicables a cada área de gestión"*. En ese marco, la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos otorga registros con carácter declarativo sobre las obras del ingenio cualquiera que sea el género o forma de expresión, sin importar el mérito literario o artístico a través de la inscripción y la difusión, en cumplimiento a la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, Ley de Derecho de Autor N° 1322, Decreto Reglamentario N° 23907 y demás normativa vigente sobre la materia.

Que, la solicitud presentada cumple con: el Artículo 6º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, el Artículo 26º inciso a) del Decreto Supremo N° 23907 Reglamento de la Ley de Derecho de Autor, y con el Artículo 4º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina.

Que, de conformidad al Artículo 18º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor en concordancia con el Artículo 18º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, referentes a la duración de los Derechos Patrimoniales, los mismos establecen que: *"la duración de la protección concedida por la presente ley será para toda la vida del autor y por 50 años después de su muerte, a favor de sus herederos, legatarios y cesionarios"*

Que, se deja establecido en conformidad al Artículo 4º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, y

Artículo 7º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina que: *"...No son objeto de protección las ideas contenidas en las obras literarias, artísticas, o el contenido ideológico o técnico de las obras científicas ni su aprovechamiento industrial o comercial"*

Que, el artículo 4, inciso e) de la ley N° 2341 de Procedimiento Administrativo, instituye que: *"... en la relación de los particulares con la Administración Pública, se presume el principio de buena fe. La confianza, la cooperación y la lealtad en la actuación de los servidores públicos y de los*



ciudadanos ...", por lo que se presume la buena fe de los administrados respecto a las solicitudes de registro y la declaración jurada respecto a la originalidad de la obra.

POR TANTO:

El Director de Derecho de Autor y Derechos Conexos sin ingresar en mayores consideraciones de orden legal, en ejercicio de las atribuciones conferidas.

RESUELVE:

INSCRIBIR en el Registro de Tesis, Proyectos de Grado, Monografías y Otras Similares de la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos, el Proyecto de Grado titulado: **"LAMINACIÓN DE COBRE ELECTROLÍTICO PRODUCIDO EN BOLIVIA PARA LA FABRICACIÓN DE FOIL PARA EL ARMADO DE BATERÍAS DE ION LITIO"** a favor de la autora y titular: **DANIELA ANAHI URUCHI COSME** con **C.I. N° 4908088 LP**, quedando amparado su derecho conforme a Ley, salvando el mejor derecho que terceras personas pudieren demostrar.

Regístrese, Comuníquese y Archívese.

CASA/Im

Firmado Digitalmente por:

Servicio Nacional de Propiedad Intelectual - SENAPI
CARLOS ALBERTO SORUCO ARROYO
DIRECTOR DE DERECHO DE AUTOR Y DERECHOS CONEXOS
LA PAZ - BOLIVIA



Firma:



xWP0o4Ou3Np52F

PARA LA VALIDACIÓN DEL PRESENTE DOCUMENTO INGRESAR A LA PÁGINA WEB www.senapi.gob.bo/verificacion Y COLOCAR CÓDIGO DE VERIFICACIÓN O ESCANEAR CÓDIGO QR.



Oficina Central - La Paz
Av. Montes, N° 515,
entre Esq. Uruguay y
C. Batallón Illimani.
Telfs.: 2115700
2119276 - 2119251

Oficina - Santa Cruz
Av. Uruguay, Calle
prolongación Quijarro,
N° 29, Edif. Bicentenario.
Telfs.: 3121752 - 72042936

Oficina - Cochabamba
Calle Bolívar, N° 737,
entre 16 de Julio y Antezana.
Telfs.: 4141403 - 72042957

Oficina - El Alto
Av. Juan Pablo II, N° 2560
Edif. Multicentro El Ceibo
Ltda. Piso 2, Of. 5B,
Zona 16 de Julio.
Telfs.: 2141001 - 72043029

Oficina - Chuquisaca
Calle Kilómetro 7, N° 366
casí esq. Urriolagoitia,
Zona Parque Bolívar.
Telf: 72005873

Oficina - Tarija
Av. La Paz, entre
Calles Ciro Trigo y Avaroa
Edif. Santa Clara, N° 243.
Telf: 72015286

Oficina - Oruro
Calle 6 de Octubre, N° 5837,
entre Ayacucho
y Junín, Galería Central,
Of. 14.
Telf: 67201288

Oficina - Potosí
Av. Villazón entre calles
Wenceslao Alba y San Alberto,
Edif. AM. Salinas N° 242,
Primer Piso, Of. 17.
Telf: 72018160

