



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE INGENIERÍA

**DETERMINACIÓN DE LA FACTIBILIDAD DE LA UNIÓN
ACERO-COBRE MEDIANTE LA TÉCNICA DE
COLAMINACIÓN**

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL GRADO DE:
INGENIERO MECÁNICO
P R E S E N T A:
FERNANDO CHAVARRÍA JALPILLA

ASESOR: DR. JOSÉ JAVIER CERVANTES CABELLO



CIUDAD UNIVERSITARIA, 2010

AGRADECIMIENTOS

- A mis padres

Por ser quienes me dieron todo para poder ser lo que soy ahora, por saberme guiar por el camino del bien y brindarme una educación plena. Por darme todo su amor, cariño y comprensión.

- A mi hermano

Por apoyarme siempre sin importar la hora ni el lugar, por compartir momentos de mucha alegría y por estar cuando más lo necesitaba.

- A mi abuelito

Por ser mi primer maestro, por enseñarme muchas cosas desde pequeño, siempre estar al pendiente de mí y por tantas

- Al Dr. José Javier Cervantes Cabello

Por el gran apoyo para la realización de este trabajo, por brindarme toda la confianza y por guiarme para llegar con éxito a la meta.

- A Magdalena

Por estar a mi lado cuando más lo necesitaba, por tantas alegrías y momentos felices, por darme su apoyo a cada instante y por acompañarme en los momentos más importantes de mi vida.

- A mis amigos de la Facultad de Ingeniería

Por todo lo que vivimos en nuestra gloriosa Facultad de Ingeniería, por tantos momentos compartidos y por apoyarme siempre.

INDICE

Objetivos.....	4
Introducción.....	5
Capítulo I	
1. Generalidades sobre el acero y el cobre.....	6
1.1. El acero.....	6
1.1.1. Antecedentes históricos.....	6
1.1.2. Obtención.....	6
1.1.3. Propiedades.....	8
1.1.4. Clasificación.....	10
1.1.5. Métodos de conformado.....	10
1.1.6. Usos y aplicaciones.....	11
1.2. El cobre.....	12
1.2.1. Antecedentes históricos.....	12
1.2.2. Obtención.....	12
1.2.3. Propiedades.....	16
1.2.4. Clasificación.....	19
1.2.5. Métodos de conformado.....	19
1.2.6. Usos y aplicaciones.....	21
Capítulo II	
2. Proceso de Laminado Conjunto.....	22
2.1. Antecedentes.....	22
2.2. Definición.....	22
2.3. Descripción del proceso.....	23
2.4. Aplicaciones y ventajas.....	26
Capítulo III	
3. Producción experimental del material colaminado Acero-Cobre.....	28
3.1. Material utilizado en las pruebas.....	28
3.2. Equipo y sustancias empleadas.....	28
3.3. Producción del material.....	29
3.4. Obtención de resultados.....	32
3.4.1. Evaluación de la unión.....	32
3.4.2. Microscopía óptica.....	32
3.4.3. Microscopía electrónica de barrido.....	40
3.4.4. Prueba de desgarre.....	42
3.4.5. Microdureza Vickers.....	46
Capítulo IV	
4. Análisis de resultados.....	52
4.1. Obtención del material colaminado.....	52
4.2. Análisis de la unión.....	52
4.2.1. Análisis de microscopía óptica y microscopía electrónica de barrido.....	53
4.2.2. Prueba de desgarre.....	54
4.2.3. Análisis de microdureza Vickers.....	55
5. Conclusiones.....	56
6. Glosario.....	58
7. Bibliografía.....	60

Objetivos:

- Determinar la factibilidad de la unión, por medio de la técnica llamada colaminación, de láminas de acero y cobre con el fin de aprovechar las características de ambos materiales.
- Determinar los parámetros y procedimientos que permitan obtener el material compuesto acero-cobre por medio de la colaminación.

INTRODUCCIÓN.

Entre las técnicas de unión de metales se encuentran los procesos en estado sólido, los cuales requieren la aplicación de presión y temperatura. El principal método para lograr uniones de metales en forma continua se denomina colaminación. Este proceso comprende la creación de una unión entre dos o más metales mediante presión, con el objetivo de aprovechar las propiedades particulares que posee cada material por separado. Entre las razones para crear metales colaminados se pueden mencionar aumentar la resistencia a la corrosión, reemplazar aleaciones costosas, obtener mayor resistencia mecánica, resistencia al desgaste o mejorar el aspecto superficial. Las aplicaciones de los materiales colaminados tienen gran demanda en varias ramas de la industria tales como la automotriz, eléctrica, petrolera, petroquímica, etc.

La presente investigación tiene por objeto mostrar los resultados logrados en la unión de acero y cobre mediante técnicas de laminado conjunto. Se pretende aprovechar la resistencia del acero y la conductividad del cobre en un mismo material por ser dos materiales que se encuentran con cierta facilidad.

Este trabajo se compone de cinco capítulos, en el primero se habla de los materiales a unir por medio de colaminación, sus antecedentes históricos, la forma de obtenerlos en la naturaleza, sus propiedades, clasificación así como los usos y aplicaciones que tienen en la vida cotidiana. El segundo capítulo trata del proceso de unión por laminado, sus antecedentes, la descripción de cómo se lleva a cabo y las ventajas que presenta con respecto a otros métodos de unión. En el tercer capítulo se describe el proceso experimental que se llevó a cabo para obtener el material colaminado acero-cobre, se describen los materiales y equipos utilizados en las pruebas, así como los pasos detallados que se siguieron para obtener la unión satisfactoria. En este mismo capítulo se describen las pruebas realizadas para evaluar la unión obtenida entre los materiales. En el cuarto capítulo se analizan los resultados obtenidos en el capítulo anterior, se determinan los parámetros óptimos para lograr la unión deseada y se muestran las tablas y gráficas que permiten ver con mayor claridad cuales son dichos parámetros. En el quinto y último capítulo se exponen las conclusiones a las que se llegaron después de realizar todos los procesos, evaluaciones y análisis.

1. GENERALIDADES SOBRE EL ACERO Y EL COBRE

1.1. EL ACERO

1.1.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

Existen varias versiones sobre el inicio de la utilización del hierro, material base del acero, una de ellas menciona que a la llegada de los españoles, en específico Hernán Cortés, éste preguntó a uno de los jefes aztecas de donde obtenían el hierro con el cual elaboraban los utensilios, la respuesta fue que llegaba del cielo. Muchas de las tribus que habitaban el nuevo continente confirmaron dichas afirmaciones. Estas rocas que venían del espacio exterior se llamaron “rocas meteoríticas” y contenían el llamado “hierro meteorítico”. Los antiguos herreros forjaban con ayuda del fuego dichas rocas hasta convertirlas en utensilios o armas. No existen piezas o utensilios ferrosos muy antiguas debido a que el hierro se corroe muy fácilmente, por lo que no es posible encontrar pistas que lleven a saber quienes fueron los primeros fundidores que trabajaron con los minerales ferrosos.

Se sabe que por el año 1200 a. c. se conocía un método para convertir la superficie de un hacha de hierro en acero. Cuando ya se tenía forjada el hacha, esta se envolvía en carbón de leña molido y se mantenía al rojo vivo para que el carbón se difundiera en el hierro, formando así una capa de acero que cubría todo el hierro.

El acero es una aleación que está compuesta por hierro y una cantidad relativamente baja de carbono (menos del 2% de porcentaje en masa). El carbono juega un papel fundamental en los aceros, ya que entre mayor cantidad de carbono contenga el acero su resistencia aumenta aunque al mismo tiempo su ductilidad disminuye.

1.1.2. OBTENCIÓN

Fabricación de acero con oxígeno. Convertidor LD.

Este proceso se desarrollo a mediados del siglo XX y ha desplazado a los procedimientos Bessemer y Siemens. Se caracteriza porque se utilizan convertidores de revestimiento básico cerrado por abajo, con una lanza vertical que se introduce por la boca del convertidor y por la que se inyecta oxígeno a una velocidad mayor a la del sonido sobre la superficie de la fundición que se ha de refinar.

La calidad de acero fabricado con oxígeno es mejor comparada con el acero fabricado por Bessemer y aproximadamente igual al fabricado por Siemens – Martin y los de horno eléctrico. En comparación con los hornos eléctricos y los hornos Siemens – Martin el costo de la planta acerera con convertidores LD es inferior y sus reparaciones son más sencillas. El proceso por oxígeno dura alrededor de 40 minutos y la chatarra ocupa entre el 10% a 35% de la materia prima empleada y al final de la fase oxidante y antes de colarse contiene menos oxígeno que en los procesos Bessemer y Siemens – Martin en esa misma fase de fabricación. Los procedimientos Bessemer y Siemens – Martin ya no se usan en la actualidad

Las principales partes que componen una acería LD son:

1. Nave de materias auxiliares y refractarias.
2. Parque de chatarra.
3. Convertidores y mezcladores.
4. Naves de colada.

Este tipo de convertidores son de forma de crisol con fondo cerrado, son de chapas de acero de 30 a 50 milímetros de espesor y puede girar 360° para colocarse de forma adecuada en cada fase del proceso como en las cargas, para el soplado y la colada del acero. La capacidad de los convertidores va de 30 a 300 toneladas y la carga fundida ocupa el 20% del volumen del convertidor.

El proceso inicia cargando la chatarra y posteriormente el hierro fundido con el convertidor inclinado, posteriormente se endereza y se sopla el oxígeno con ayuda de la lanza, se añade alrededor del 5 % del peso de la fundición de cal para la formación de la escoria y en ocasiones también se agrega caliza.

Casi de forma inmediata se produce la oxidación de los elementos que contiene la fundición. A lo pocos instantes de comenzado el soplado se agrega la mitad de la cal y aproximadamente unos cuatro minutos después de iniciar la operación se agrega el resto de la cal, estas adiciones se hacen por medio de canales que los llevan hasta la parte superior del convertidor. En los primeros minutos del soplado se elimina el silicio y el manganeso, el carbono y el fósforo se eliminan poco después, pero casi simultáneamente, durante la operación. Después de 20 minutos de iniciada la operación se interrumpe el soplado y se toman muestras de acero y escoria para analizarlos y medir la temperatura del baño, si el resultado del análisis es el adecuado, se procede a colar el acero.

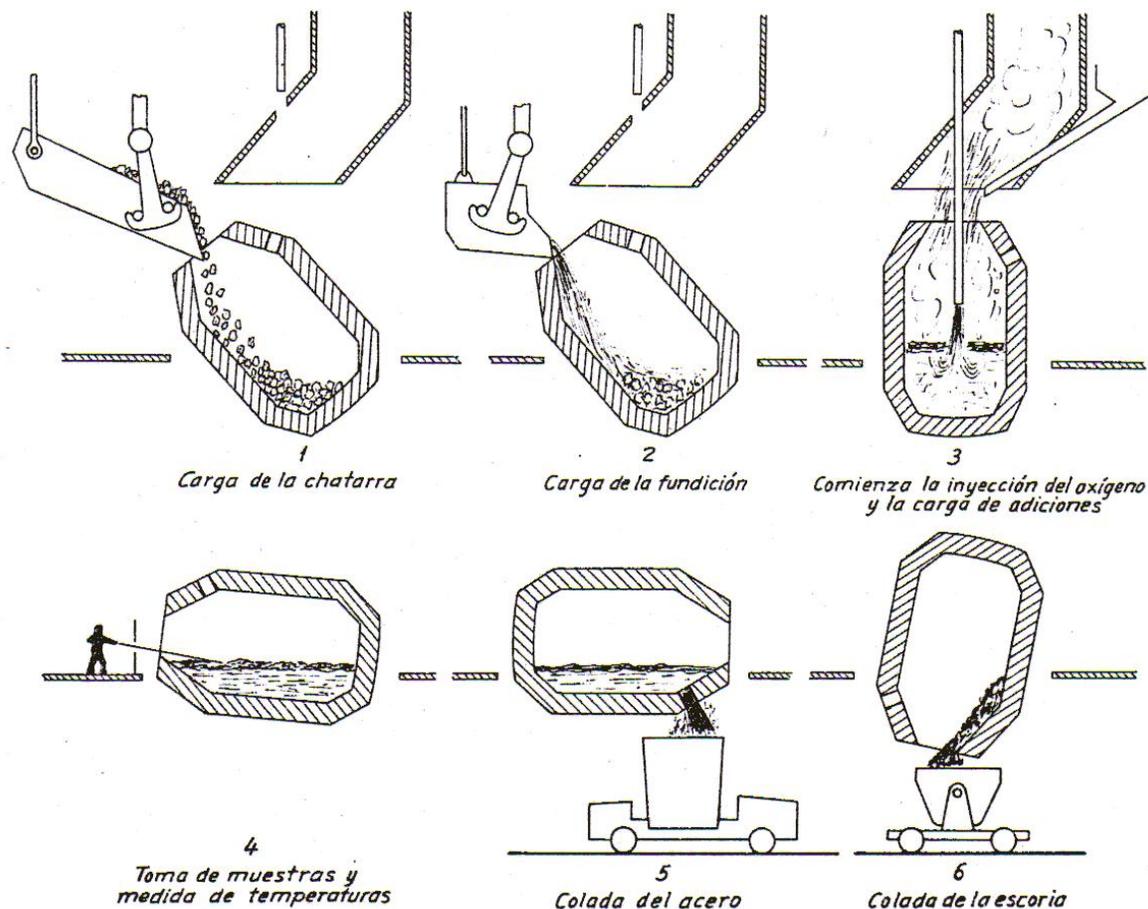


Figura 1.1. Etapas de fabricación del acero con oxígeno en convertidor LD.¹

1.1.3. PROPIEDADES

El acero está básicamente constituido por hierro y carbono, aunque existen otros elementos que modifican sus propiedades. Los principales elementos que modifican las propiedades del acero son:

- a) Carbono (C): Es un elemento que se encuentra presente en todos los aceros hasta un máximo de 2%, aunque generalmente se encuentra de 0.04% a 0.5%. Al aumentar el contenido de carbono mejoran las propiedades mecánicas como la resistencia y dureza, pero sus propiedades de elasticidad, forjabilidad, soldabilidad y corte disminuyen. En cantidades mayores a 0.2% se reduce la ductilidad a temperatura ambiente. Su presencia no influye en la resistencia a la corrosión en agua. El carbono también puede existir en el acero en forma combinada como carburo de hierro.
- b) Aluminio (Al): Es un desoxidante que al combinarse con el nitrógeno reduce la susceptibilidad a la deformación por envejecimiento. Mejora la resistencia a la oxidación a altas temperaturas y en cantidades pequeñas reduce el tamaño de grano.

¹ Apraiz Barreiro, José. Fabricación de hierro, aceros y fundiciones. Urmo, España, 1978.

- c) Cobalto (Co): El cobalto impide el crecimiento de grano a altas temperaturas y mejora notablemente la resistencia al temple. Se utiliza como aleante en aceros de alta velocidad y para trabajo en caliente. Ayuda a la formación de grafito y se utiliza para aceros y aleaciones con un alto grado de magnetismo permanente.
- d) Cromo (Cr): Aumenta la dureza, resistencia a la tensión, resistencia a la corrosión, resistencia al calor y a la oxidación a altas temperaturas aunque disminuye ligeramente la elasticidad. Puede formar carburos que permiten al acero ser más resistente al desgaste. Al aumentar la cantidad de cromo disminuyen las propiedades de soldabilidad del acero.
- e) Cobre (Cu): Eleva la resistencia y el punto de cedencia de los aceros, pero disminuye su elasticidad. Al estar presente en un porcentaje bajo mejora su resistencia a la corrosión cuando se expone a la intemperie.
- f) Manganeso (Mn): Está presente en todos los aceros en cantidades de 2% aproximadamente. Con este elemento se controla la cantidad de escoria producto de la fundición del acero. Eleva la cedencia y resistencia a la tensión en cantidades de 1% a 8%, y en cantidades mayores disminuye. También aumenta las propiedades de soldabilidad y forja, aunque su elasticidad disminuye. Cuando se presenta el manganeso con el carbono se incrementa la resistencia al desgaste.
- g) Molibdeno (Mo): Aumenta la dureza y tenacidad de los aceros además de mejorar la resistencia al calor y su soldabilidad. Cuando se presenta en altas cantidades el trabajo de forja se vuelve más difícil. Al utilizarse combinado con cromo se obtiene un punto de cedencia muy alto y aumenta la resistencia a la tensión.
- h) Nitrógeno (N): Incrementa la dureza y las propiedades mecánicas a altas temperaturas y reduce la ductilidad a temperatura ambiente. Cuando se somete al acero a un proceso de nitruración, el nitruro endurece la superficie.
- i) Niobio – Columbio, Tantalio (Nb – Cb, Ta): Por lo general estos elementos se presentan juntos ya que es muy difícil separarlos. Mejoran la resistencia y dureza a altas temperaturas y en cantidades mayores al 1% genera problemas para la soldadura de aceros inoxidable.
- j) Níquel (Ni): Se utiliza en los aceros resistentes a la corrosión y a la oxidación y en los aceros tratados térmicamente mejora su tenacidad. Aumenta la resistencia a la fatiga, ductilidad, resistencia eléctrica y disminuye la conductividad térmica. Mejora las propiedades de soldabilidad y aumenta la resistencia al impacto en aceros estructurales.
- k) Fósforo (P): Este elemento es perjudicial para el acero y su nivel máximo debe ser de 0.03% a 0.05%.
- l) Azufre (S): En cantidades mayores al 0.04% produce una gran fragilidad que hace quebradizo al acero.
- m) Selenio (Se): Mejora las condiciones del maquinado y en aceros inoxidable reduce la resistencia a la corrosión.
- n) Silicio (Si): Se encuentra en todos los aceros ya que la materia prima utilizada en la elaboración del acero lo contiene en cantidades variables. Si se agrega aproximadamente 2% de Silicio se mejora la resistencia a la oxidación a altas temperaturas. Aumenta la temperatura crítica en los tratamientos térmicos, la resistencia a la tensión, el punto de cedencia y afecta la elasticidad. Si se presenta un alto contenido de Silicio puede resistir el ataque químico pero no puede ser forjado.

- o) Titanio (Ti): Este elemento aleante se utiliza en aceros inoxidable para estabilizar la corrosión intragranular y refinación de grano.
- p) Vanadio (V): Refina el grano, mejora las propiedades mecánicas. En pequeñas cantidades mejora la dureza y reduce el crecimiento de grano. Aumenta las propiedades de corte en aceros de alta velocidad. Mejora la resistencia a la tensión y al punto de cedencia.
- q) Tungsteno (W): Mejora la resistencia y es un aleante para aceros de alta velocidad tratados térmicamente.

1.1.4. CLASIFICACIÓN

De acuerdo a los elementos aleantes presentes en el acero, este se clasifica de la siguiente manera:

- Aceros al carbono: La mayoría de los aceros son aceros al carbono. Contienen hasta un 2% de carbono, 0.6% de Cobre, 0.6% de Silicio y 1.65% de Manganeso.
- Aceros aleados: Contienen una cierta cantidad de Vanadio, Molibdeno y otros elementos. También contienen Cobre, Silicio y Magnesio aunque en mayores cantidades que los aceros al carbono. Los aceros aleados se pueden clasificar a su vez en:
 - Estructurales: Este tipo de aceros se ocupan para estructuras de edificios, construcción de chasis de automóviles y puentes. También se utilizan en la fabricación de piezas de máquinas como engranes, ejes y palancas.
 - Para herramientas: Son utilizados para fabricar herramientas para cortar metales y no metales. Son aceros de alta calidad.
 - Especiales: Son los aceros con una cantidad de cromo superior al 12%, de alta dureza y resistencia a la temperatura y a la corrosión.
- Aceros inoxidables: Estos aceros contienen elementos como níquel, cromo y otros elementos aleantes. Este tipo de acero se caracteriza por ser brillante y resistente a la corrosión a pesar de encontrarse en ambientes agresivos.
- Aceros de baja aleación ultrarresistentes: Contiene menor cantidad de elementos de aleación por lo cual son más baratos. Reciben tratamientos térmicos para mejorar su resistencia. Es la familia de aceros que más recientemente se fabrica.

1.1.5. MÉTODOS DE CONFORMADO

Laminado.

Consiste en calentar previamente los lingotes de acero fundido a una temperatura que permita la deformación del lingote por un proceso de estiramiento y desbaste que se produce en una cadena de cilindros a presión llamado tren de laminación. Estos cilindros van conformando el perfil deseado hasta conseguir las medidas adecuadas. Las dimensiones del acero que se consigue no tienen tolerancias muy ajustadas y por eso muchas veces a los productos laminados hay que someterlos a fases de mecanizado para ajustar su tolerancia.

Forja.

La forja es el proceso que modifica la forma de los metales por deformación plástica cuando se somete al acero a una presión o a una serie continuada de impactos. La forja generalmente se realiza a altas temperaturas porque así se mejora la calidad metalúrgica y las propiedades mecánicas del acero. El sentido de la forja de piezas de acero es reducir al máximo posible la cantidad de material que debe eliminarse de las piezas en sus procesos de mecanizado.

Estampado.

Consiste en un proceso de mecanizado sin arranque de viruta donde a la plancha de acero se la somete por medio de prensas adecuadas a procesos de embutido y estampado para la consecución de determinadas piezas metálicas. Para ello en las prensas se colocan los moldes adecuados.

Troquelado.

El troquelado es un proceso de mecanizado sin arranque de viruta donde se perforan agujeros en la plancha de acero por medio de prensas de impactos donde tienen colocados sus respectivos troqueles y matrices.

1.1.6. USOS Y APLICACIONES

El acero en sus distintas clases está presente en gran cantidad en nuestra vida cotidiana en forma de herramientas, utensilios, equipos mecánicos y formando parte de electrodomésticos y maquinaria en general así como en las estructuras de las viviendas que habitamos y en la gran mayoría de los edificios modernos.

Los fabricantes de camiones y los de maquinaria agrícola son grandes consumidores de acero, al igual que las constructoras de índole ferroviario desde la construcción de infraestructuras viarias así como la fabricación de todo tipo de material rodante. También consumen mucho acero los grandes constructores de barcos especialmente petroleros, y de gas u otros buques cisternas.

Como consumidores destacados de acero cabe citar a los fabricantes de automóviles porque muchos de sus componentes significativos son de acero.

Entre los componentes del automóvil que son de acero están los siguientes:

- Cigüeñal, bielas, piñones, ejes de transmisión de caja de velocidades y brazos de articulación de la dirección.
- Puertas y demás componentes de la carrocería.
- Muelles de válvulas, de asientos, de amortiguadores, etc.
- Rodamientos.
- Ruedas, excepto las de alta gama que son de aleaciones de aluminio.
- Tornillos y tuercas.

Cabe destacar que cuando el automóvil pasa a desmantelamiento por su antigüedad y deterioro se separan todas las piezas de acero, son convertidas en chatarra y son reciclados de nuevo en acero mediante hornos eléctricos y trenes de laminación o piezas de fundición de hierro

1.2. EL COBRE

1.2.1. ANTECEDENTES HISTÓRICOS

El cobre es utilizado por el hombre desde la antigüedad por los romanos que lo usaban a gran escala aleado con otros metales. Algunas de las razones para su utilización es que el cobre se encontraba en un estado casi puro y era muy fácil su extracción. El cobre se asemeja a los metales preciosos por su excelente resistencia a la corrosión.

En África se ha utilizado el cobre en forma de barras como medio monetario y de capitalización. Su nombre proviene de la isla de Chipre donde era un metal muy abundante.

Las aleaciones de cobre se han desarrollado al mismo tiempo que el mismo metal y en la antigüedad las más utilizadas fueron:

- Bronces al estaño.
- Cuproantimonios chinos.
- Latones más o menos complejos.

Estos tenían composiciones muy variables pero se utilizaban para aplicaciones bastante precisas.

1.2.2. OBTENCIÓN

En la naturaleza el cobre suele encontrarse en forma de minerales sulfurados, a esta materia prima se le conoce como mena sulfurada (también es posible encontrar el cobre en forma de minerales con oxígeno pero en menor concentración). Durante la fusión de estas se derriten sulfuros fusibles de metales que forman una aleación llamada mata, que es un producto intermedio de la fusión del cobre. La mata está constituida básicamente por sulfuro de cobre y sulfuro de hierro.

Otro producto que se obtiene de la fusión de las menas sulfuradas es la escoria la cual está constituida por la ganga que es sílice, alúmina, óxidos de calcio, magnesio, hierro y rocas que no contienen metales ferrosos, además de óxidos de metales que también se obtienen del proceso de fusión.

La extracción del cobre se realiza mediante técnicas pirometalúrgicas y consiste en cuatro etapas:

- Concentración por flotación de espuma.
- Tostación.

- Fundición de matas.
- Conversión de cobre *blister* (cobre ampollado).

En la actualidad las últimas tres etapas se han combinado en un proceso continuo.

El producto final que se obtiene de estas etapas es el cobre blister impuro y debe someterse a altas temperaturas y electrorrefinación antes de ser utilizado.

Concentración por flotación en espuma.

Como la cantidad del cobre extraída a partir de las menas es aproximadamente 1% no vale la pena la fundición directa ya que requeriría enormes cantidades de energía. Por ello deben extraerse por medios físicos y formar concentrados con alto contenido de cobre que pueden fundirse con un buen rendimiento económico.

En el método de flotación en espuma las menas son pulverizadas para obtener partículas finas. Posteriormente se introducen en reactivos los cuales extraen los minerales mediante la adhesión selectiva a las burbujas de aire que se elevan a través de la pulpa espumosa de la mena pulverizada. En esta etapa se extraen los minerales de cobre hidrofóbico (ávido de aire) y los minerales de la ganga que son hidrofílicos (ávidos de agua).

Los minerales que flotan se mantienen en la espuma de donde son retirados para formar el concentrado que es de alrededor de 20% a 30% de cobre.

Tostación

Consiste en oxidar parcialmente los sulfuros de los concentrados por flotación. Se lleva a cabo cuando los concentrados reaccionan con el aire a temperaturas entre los 500°C y 700°C. El producto que se obtiene se llama calcinado, es una mezcla de óxidos, sulfatos y sulfuros y su composición depende de la temperatura y de la relación del aire concentrado.

Fundición de matas.

En esta etapa se forma una fase líquida de sulfuro (mata) que contiene todo el cobre y una fase líquida de escoria con poco cobre. La mata es oxidada para formar cobre blister impuro (cobre ampollado) y la escoria fundida es desechada. Este proceso se lleva a cabo a una temperatura aproximada de 1200 °C y se utiliza sílice, alúmina, óxido de hierro, cal y otros óxidos que forman la escoria fundida. La mata la forman el cobre, azufre, hierro sin oxidar y algunos metales preciosos.

Conversión.

Consiste en la oxidación con aire de la mata líquida que proviene de la fundición, elimina el hierro y el azufre de la mata quedando solamente cobre blister (ampollado) sin refinar (alrededor de 99% de cobre).

Este proceso se lleva a cabo en un convertidor horizontal cilíndrico revestido con refractario básico. La mata se deposita en su interior a través de una entrada central y el aire se introduce por toberas. Se lleva a cabo en dos etapas:

- Formación de escoria.
- Formación de cobre blister.

Este último paso sucede hasta que la cantidad de hierro es menor al 1% de modo que el hierro es eliminado como escoria antes de comenzar la producción del cobre.

El cobre blister contiene entre 0.02% y 0.1 % de azufre por lo que no existe formación considerable de óxido de cobre ya que para que esto suceda se necesita una cantidad menor de azufre (<0.02%). También contiene níquel y metales preciosos.

La escoria contiene de 2% a 10 % de cobre, el cual se recupera al introducirla en el horno de fundición o por medio de la flotación en espuma.

Refinación térmica y electrorrefinación del cobre blister.

Este proceso consiste en la disolución electroquímica del cobre blister a partir de ánodos impuros y el depósito de cobre puro en los cátodos de cobre. El electrolito que se utiliza es una solución acuosa de H_2SO_4 y $CuSO_4$ con una pequeña cantidad de cloruro.

La diferencia de potencial entre el ánodo y el cátodo es de 0.25V a 0.3V con una densidad de corriente de $250 \frac{A}{m^2}$. El producto de la electrorrefinación es un cobre de alta pureza (>99.99% de cobre) el cual es apropiado para diversos usos.

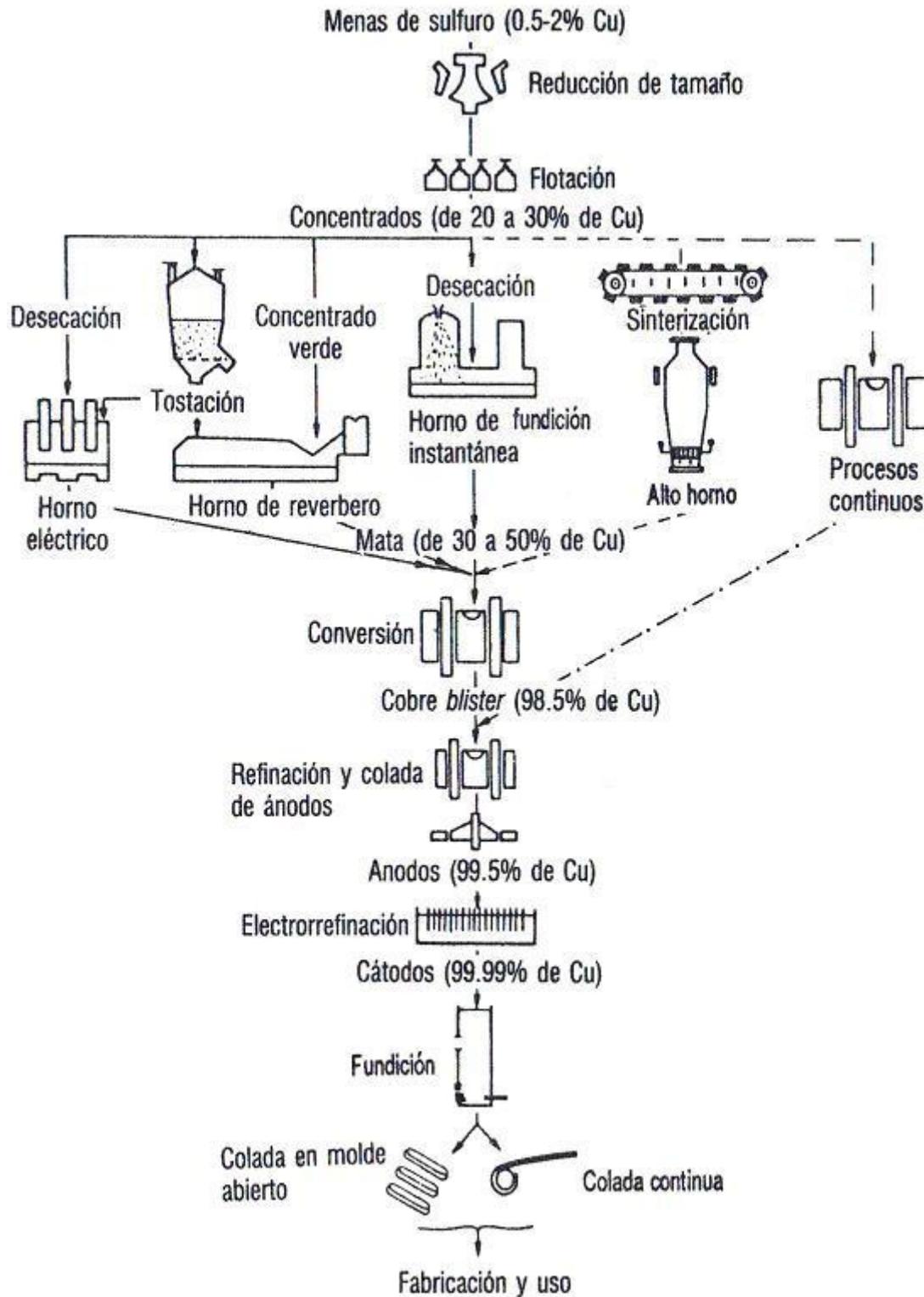


Figura 1.2. Principales procesos para la extracción de cobre a partir de menas de sulfuro.²

² Biswas, Anil Kumar. El cobre: metalurgia extractiva. Limusa, México, 1993.

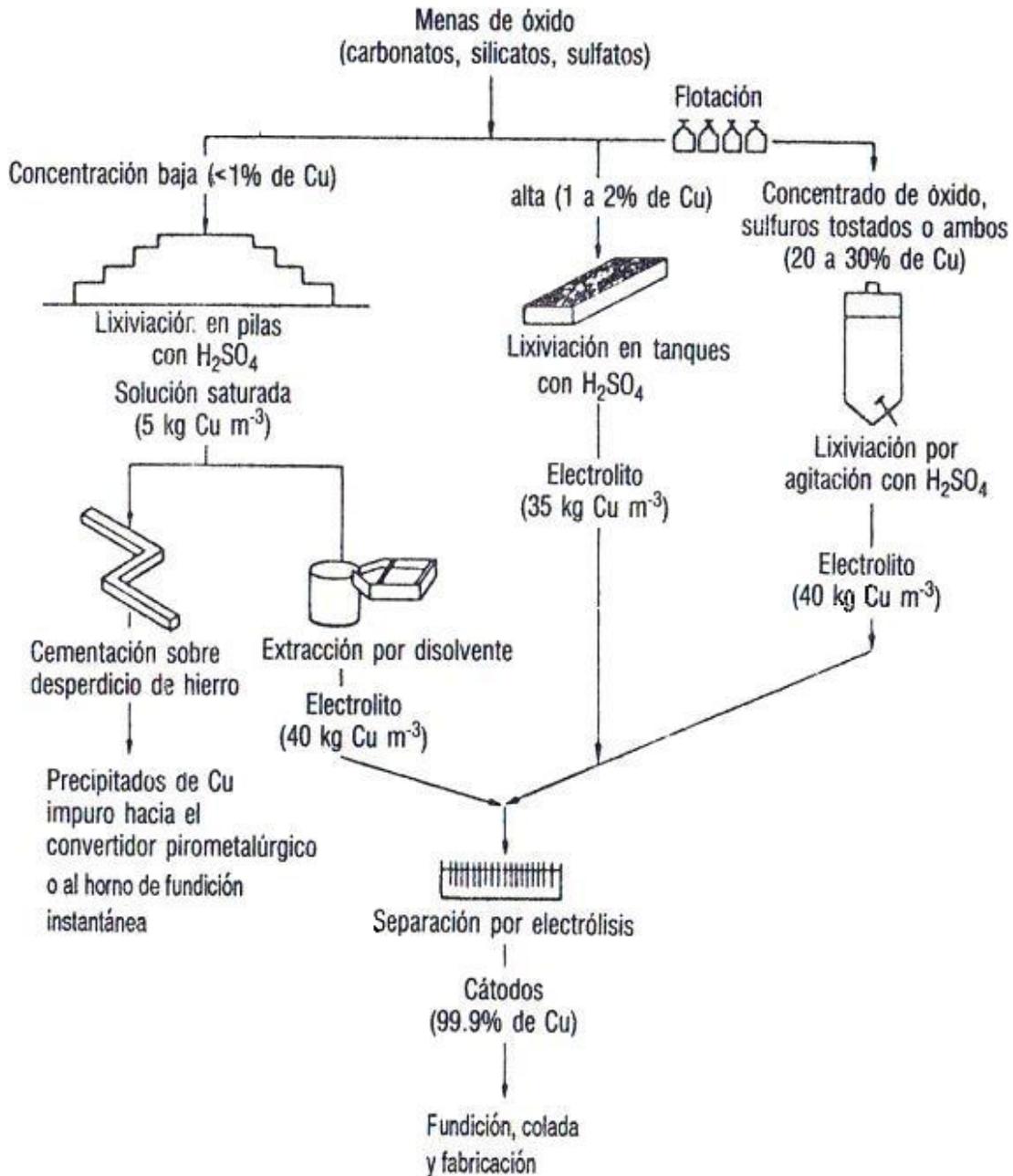


Figura 1.3. Principales procesos para la extracción de cobre a partir de menas de óxido.³

1.2.3. PROPIEDADES

Propiedades físicas.

El color característico del cobre es un tono rosa salmón que al contacto con el aire se oscurece y al exponerlo prolongadamente a la intemperie se forma una capa verdosa.

³ Biswas, Anil Kumar. El cobre: metalurgia extractiva. Limusa, México, 1993.

La siguiente tabla muestra las propiedades físicas más importantes del cobre a temperatura de 20 °C:

Material			Cu electrolítico tenaz	Cu térmico de alta conductividad	Cu térmico tenaz	Cu exento de oxígeno	Cu desoxidado con fósforo, con bajo contenido de fósforo residual	Cu desoxidado con fósforo, con alto contenido de fósforo residual
Designación			Cu-ETP	Cu-FRHC	Cu-FRTP	Cu-OF	Cu-DLP	Cu-DHP
Magnitud	Unidad	Estado						
Densidad	g/cm ³		8.9	8.9	8.9	8.9	8.9	8.9
Punto de fusión	°C		1083	1083	1083	1083	1083	1083
Coefficiente de dilatación lineal	°C ⁻¹		0.0000168	0.0000168	0.0000168	0.0000168	0.0000168	0.0000168
Calor específico	Cal/g°C		0.0921	0.0921	0.0921	0.0921	0.0921	0.0921
Conductividad térmica	cal cm/cm ² s°C		0.94	0.94	0.80-0.90	0.94	0.80-0.93	0.70-0.87
Conductividad eléctrica	m/Ωm m ²	Recocido	58.0-58.9	58.0-58.9	49-55	58.0-58.9	49-57	41-52
Resistividad eléctrica	μΩ cm	Recocido	1.70-1.7241	1.70-1.7241	1.8-2.0	1.70-1.7241	1.76-2.0	1.9-2.5
Coefficiente térmico de la resistencia eléctrica	°C ⁻¹	Recocido	0.00393	0.00393	0.00334	0.00393	0.00334	0.00275
Módulo de elasticidad	kg/mm ²	Recocido	12000	12000	12000	12000	12000	12000
		Forjado	12000-13500	12000-13500	12000-13500	12000-13500	12000-13500	12000-13500
Módulo de rigidez	kg/mm ²	Recocido	4500	4500	4500	4500	4500	4500
		Forjado	4500-5000	4500-5000	4500-5000	4500-5000	4500-5000	4500-5000

Propiedades mecánicas.

Las propiedades mecánicas se ven afectadas por la temperatura, siendo mejores cuando esta es baja. El límite para la utilización del cobre es de 200 °C ya que va perdiendo sus propiedades y para trabajar a altas temperaturas es mejor utilizar otras aleaciones.

Las siguientes tablas muestran las propiedades mecánicas del cobre a temperatura ambiente, baja y alta.

Propiedades mecánicas a temperatura ambiente.

Material			Cu electrolítico tenaz	Cu térmico de alta conductividad	Cu térmico tenaz	Cu exento de oxígeno	Cu desoxidado con fósforo, con bajo contenido de fósforo residual	Cu desoxidado con fósforo, con alto contenido de fósforo residual
Designación			Cu-ETP	Cu-FRHC	Cu-FRTP	Cu-OF	Cu-DLP	Cu-DHP
Magnitud	Unidad	Estado						
Resistencia a la tracción	kg/mm ²	Recocido (chapa)	22	22	22	22	22	22
		Recocido (alambre)	23-26	23-26	-	23-26	-	-
		Forja (chapa)	27-38	27-38	27-38	27-38	27-38	27-38
		Forja (alambre)	38-45	38-45	-	38-45	-	-
Límite elástico	kg/mm ²	Recocido (chapa)	5	5	5	5	5	5
		Forja (chapa)	18-34	18-34	18-34	18-34	18-34	18-34
Alargamiento	%	Recocido (chapa)	48	48	48	48	48	48
		Recocido (alambre)	26-37	26-37	-	26-37	-	-
		Forja (chapa)	6-25	6-25	6-25	6-25	6-25	6-25
Dureza Brinell		Recocido (chapa)	45	45	45	45	45	45
		Forja (chapa)	75-105	75-105	75-105	75-105	75-105	75-105
Resistencia a la cizalladura	kg/mm ²	Forja (chapa)	16	16	16	16	16	16
		Recocido	18-20	18-20	18-20	18-20	18-20	18-20

Propiedades mecánicas a baja temperatura.

Material			Cu electrolítico tenaz	Cu térmico de alta conductividad	Cu térmico tenaz	Cu exento de oxígeno	Cu desoxidado con fósforo, con bajo contenido de fósforo residual	Cu desoxidado con fósforo, con alto contenido de fósforo residual
Designación			Cu-ETP	Cu-FRHC	Cu-FRTP	Cu-OF	Cu-DLP	Cu-DHP
Magnitud	Unidad	Estado	a -196°C	a -196°C	a -196°C	a -196°C	a -196°C	a -196°C
Resistencia a la tracción	kg/mm ²	Recocido	36	36	36	36	35	35
		Forja	39	39	39	37-48	37	37
Límite elástico	kg/mm ²	Recocido	7	7	7	6-7.5	6-7.5	6-7.5
		Forja	26	26	26	19-22	18-20	18-20
Alargamiento	%	Recocido	57	57	57	58-68	56-59	56-59
		Forja	45	45	45	43-62	49-62	49-62

Propiedades mecánicas a alta temperatura.

Material			Cu electrolítico tenaz	Cu térmico de alta conductividad	Cu térmico tenaz	Cu exento de oxígeno	Cu desoxidado con fósforo, con bajo contenido de fósforo residual	Cu desoxidado con fósforo, con alto contenido de fósforo residual
Designación			Cu-ETP	Cu-FRHC	Cu-FRTP	Cu-OF	Cu-DLP	Cu-DHP
Magnitud	Unidad	Estado	a 200°C	a 200°C	a 200°C	a 200°C	a 200°C	a 200°C
Resistencia a la tracción	kg/mm ²	Recocido	16	16	16	16	17	16
		Forja	17.5	17.5	17.5	16	-	17.5
Límite elástico	kg/mm ²	Recocido	6	6	6	6.5	-	5.5
		Forja	14.5	14.5	14.5	13	-	15.5
Alargamiento	%	Recocido	57	57	57	57	60	52
		Forja	34	34	34	45	-	46

1.2.4. CLASIFICACIÓN

Según la Internacional Standard Organization el cobre y sus aleaciones se pueden clasificar en 11 grupos y son los siguientes:

GRUPO	TIPO DE COBRE.
A	Cobres.
B	Cobres débilmente aleados.
C	Cobres de alta aleación.
D	Latones (Aleaciones cobre – cinc).
E	Latones con plomo (Aleaciones cobre – cinc – plomo).
F	Latones especiales (Aleaciones cobre – cinc – especiales).
G	Bronces (Aleaciones cobre – estaño).
H	Cuproaluminios (Aleaciones cobre – aluminio).
K	Cuproníqueles (Aleaciones cobre – níquel).
L	Alpacas (Aleaciones cobre – níquel – cinc).
M	Alpacas con plomo (Aleaciones cobre – níquel – cinc – plomo).

Existen otras aleaciones que contienen al menos 50 % de cobre, como son el monel y aleaciones para resistencias eléctricas.

1.2.5. MÉTODOS DE CONFORMADO.

Fundición.

Para materiales que van a ser utilizados principalmente en la conducción eléctrica se utilizan materia prima nueva con una pureza controlada y chatarras que se obtienen del

mismo ciclo de fabricación. Para otro tipo de uso se utilizan como materia prima cobres de la pureza del producto final y chatarras del exterior. Estos lotes de chatarra exterior son seleccionados y analizados dependiendo del producto que se desea elaborar.

Las temperaturas que se alcanzan en la fusión son de aproximadamente 1100°C a 1200°C y para cuproníqueles se alcanzan 1300°C. Los hornos que se utilizan para fundir el cobre son: hornos de inducción, hornos rotativos con calentamiento por resistor de grafito y hornos de vacío.

Posteriormente viene la etapa de solidificación en la cual existen varias técnicas como son:

- Moldeo en arena.
- Fundición inyectada.
- Colada de lingotes para transformación.

Extrusión.

El proceso de extrusión consiste en aplicar una presión al cilindro de cobre (tocho) haciéndolo pasar por un molde (matriz), para conseguir la forma deseada. Del proceso de extrusión y temple, dependen gran parte de las características mecánicas de los perfiles, así como la calidad en los acabados.

Cada tipo de perfil, posee un “molde”, llamado matriz, que es el que determinará su forma. El tocho es calentado para facilitar su paso por la matriz, y es introducido en la prensa. Esta se cierra, y un émbolo comienza a empujar el tocho con una fuerza determinada, obligándolo a salir por la boca de la matriz. La gran presión a la que se ve sometido el cobre hace que este eleve su temperatura ganando en maleabilidad. A la salida de la matriz el material alcanza altas temperaturas, el tocho de cobre ha adquirido la forma deseada, pero no así sus propiedades mecánicas, de la forma y la velocidad de enfriamiento dependerán gran parte de estas propiedades.

Las temperaturas y presiones alcanzadas para algunos tipos de cobre en el proceso de extrusión y aleaciones son

ALEACIÓN	TEMPERATURA [°C]	PRESIÓN ESPECÍFICA [Kg/mm ²]
Cuproníquel 70/30	950	90
Cobre no aleado	850	70
U-S3M	850	-
Bronce al Aluminio (10% de Al)	850	60
Latón 70/30	830	-
Latón 65/35	750	80
Latón 60/40	700	35

1.2.6. USOS Y APLICACIONES

Con el descubrimiento de la electricidad y el desarrollo de la industria, el cobre encuentra su principal aplicación: la de conductor eléctrico. Con excepción de los metales preciosos, el cobre es el mejor conductor de electricidad y calor por lo que cerca del 60% del uso del cobre sea con este fin. También ha sido utilizado por varios años como material para comunicaciones de corta y larga distancia. Al ser un muy buen conductor de calor el cobre también es utilizado en la fabricación de intercambiadores de calor.

Una aplicación de composiciones especiales de aleaciones de cobre es la de los tubos de condensadores, en ella se relaciona la conductibilidad térmica y la resistencia a la corrosión acuosa.

En la arquitectura las aleaciones de cobre se han utilizado durante miles de años. Las láminas de cobre son ligeras, fáciles de manejar y unir, visualmente atractivas y extremadamente duraderas. Resisten los ataques del aire y de la humedad. Las aleaciones de cobre, como bronce y latones (el cobre aleado con estaño y zinc, respectivamente), también se utilizan en el diseño arquitectónico y ofrecen una gran variedad de colores y acabados, combinados con las características excepcionales del cobre.

En la plomería y calefacción el tubo de cobre es el material de referencia para los sistemas de agua potable de la mayoría de los países y el material preferido por los profesionales de la plomería y de la ingeniería térmica.

El cobre se utiliza extensamente en los automóviles, los trenes y camiones, principalmente en sus componentes eléctricos, seguidos de los dispositivos de transferencia térmica, como radiadores y refrigeradores del aceite, y de los rodamientos con funda de bronce. Además, innumerables accesorios, mecanismos de cierre y tornillos están hechos de latón.

Para la fabricación de bobinados de transformadores de artículos pequeños se utiliza el cobre en forma de alambre. En los equipos más grandes, el cobre se usa en forma de cintas. En los productos pequeños, el alambre debe ser lo suficientemente duro para que no se rompa al ser enrollado, pero lo suficientemente flexible para conseguir bobinados lo más juntos posibles. La superficie de las cintas debe ser de buena calidad para evitar que los esmaltes aislantes se rompan al ser sometidos a tensión. Para poder formar y enrollar las cintas, es necesario que sean dúctiles; y para que resistan las altas tensiones electromecánicas ocasionadas por los cortocircuitos, deben ser fuertes. Las propiedades que precisan los bobinados de motores son similares a las de los transformadores, aunque con el requisito añadido de resistir las vibraciones mecánicas y las fuerzas centrífugas a temperatura de trabajo.

2. PROCESO DE LAMINADO CONJUNTO

2.1. ANTECEDENTES

Desde 1928 se han unido aleaciones de aluminio mediante la técnica de laminados compuestos. Estos se han fabricado desde entonces a gran escala y su producción es principalmente en láminas, aunque también ha sido posible fabricarlas en forma de alambres o productos tubulares. Dichos productos están constituidos por un núcleo y un revestimiento que puede estar en uno o ambos lados en forma de “sandwich”.

La elección del núcleo se hace conforme a las especificaciones y a las propiedades mecánicas que se requieren para determinado producto. En muchas ocasiones el núcleo debe ser de un material que presente alta resistencia a la tracción, facilidad de fabricación, ductilidad, entre otras. Para el revestimiento se preferían materiales que tuvieran un potencial eléctrico capaz de proteger al núcleo en medios anódicos naturales y su espesor regularmente era del 1.5% al 15% del espesor total del producto. Debido a que los primeros productos obtenidos por laminado conjunto fueron aleaciones de aluminio, estos se denominaron “Al Clad” y este término ha sido adoptado por la Asociación del Aluminio para designar una aleación de aluminio que protege a un núcleo electroquímicamente.

La primera producción a gran escala de un material colaminado fue el Al-clad-2017-T3 que en un principio fue llamado Al-clad 17S-T y se usó principalmente en los aviones trimotor Ford monoplano, Sikorsky S-38 y el Hamilton metaplano así como en el dirigible ZMC-2 en su interior.

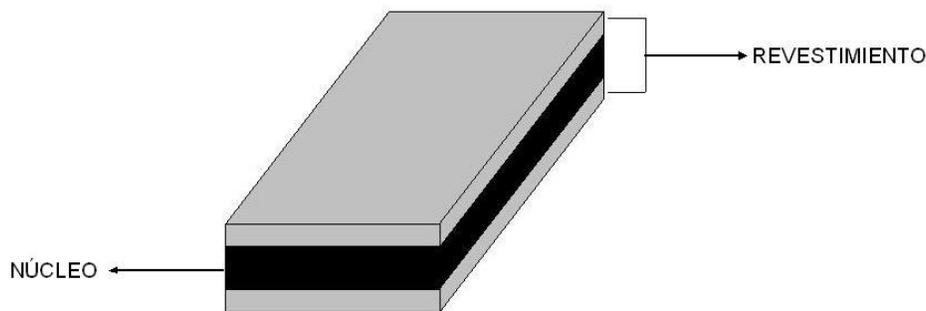


Figura. 2.1. Esquema de un material obtenido por laminado conjunto

2.2. DEFINICIÓN

Un material colaminado es aquel obtenido a partir de un proceso de laminación de productos planos de 2 materiales, conocido también como laminado conjunto. El producto final obtenido del laminado de los dos materiales, uno sobre otro, posee unas propiedades mayores que las de los materiales iniciales y de gran interés en aplicaciones industriales específicas. Además de la buena conformabilidad, estos materiales presentan una gran resistencia a la corrosión. Estas propiedades confieren a estos productos transformados una gran variedad en diferentes aplicaciones mecánicas y estructurales.

El interés por el desarrollo de esta tecnología reside en que el material resultante presenta propiedades mecánicas y químicas que, junto con su bajo costo, lo hacen atractivo respecto a otras aleaciones en diferentes aplicaciones mecánicas y estructurales.

2.3. DESCRIPCIÓN DEL PROCESO.

Para empezar se requiere un tratamiento superficial previo al proceso de laminación con el fin de obtener un grado de limpieza superficial óptimo que pueda permitir obtener una calidad de unión óptima entre los materiales de diversa naturaleza. Para ello una opción es desbastar la lámina con un material abrasivo por las caras de la placa.

Al término del tratamiento superficial se sugiere una limpieza de los materiales con aire a presión. De esta manera se evita la generación de partículas contaminantes que perjudiquen la unión mecánica entre las aleaciones. La calidad superficial final de las láminas será un parámetro crítico, puesto que la existencia de partículas en la superficie de las láminas previo al proceso de laminación, impedirán la obtención de una intercara de calidad.

Después de la limpieza, se procede a empalmar las láminas del revestimiento y la matriz, por lo que se exigirá una holgura de material de la lámina que permita tener un borde de 0.5 mm favoreciendo la alineación de las dos láminas por ambos extremos y permitiendo la realización de una soldadura por puntos que cierre el emparedado de las láminas. Cuando las láminas se encuentren unidas por soldadura, se realiza un tratamiento térmico si así lo requieren los materiales para llevar a cabo la colaminación. Posteriormente el emparedado se pasa a través de una laminadora especialmente diseñada para este trabajo un determinado número de veces hasta lograr el espesor deseado. El tiempo de laminación en caliente está directamente asociado con el tiempo del tratamiento térmico del material, siendo los pasos de laminación necesarios función de las condiciones a las que este sometido el material

Posteriormente se someterá a un tratamiento térmico de recocido en un horno a una temperatura apropiada, durante un tiempo mínimo de homogeneización determinado. Dado los requerimientos técnicos necesarios, los hornos más convenientes a utilizar para este tratamiento de recocido son los del tipo eléctrico, ya que permiten tener una atmósfera de gas inerte con el fin de evitar la oxidación de los metales.

En función de las aplicaciones industriales y los requerimientos de dureza superficial necesaria se pueden utilizar diferentes aleaciones de materiales que proporcionen los valores solicitados por el diseño de la pieza final. Es una decisión del diseñador definir los tipos de aleaciones a emplear en función de los requerimientos tecnológicos de las piezas en operación.

Al final del proceso se obtiene una unión de elevada calidad dado que la intercara de unión entre ambos materiales ha desaparecido, como consecuencia de la difusión de los elementos que constituyen ambas aleaciones.

El material obtenido al final del proceso de colaminación puede considerarse la mayoría de las veces como un material monolítico y efectuarse los trabajos de maquinado, corte y tratamientos térmicos comúnmente empleados en dichos materiales. Algunos problemas

pueden existir después del proceso de colaminación y se presentan cuando las temperaturas de fusión de los materiales en forma individual son muy distintas y por lo tanto sus temperaturas de recocido también lo son.

El nuevo material tiene nuevas propiedades y algunas como la resistencia, conductividad térmica, conductividad eléctrica y ductilidad pueden ser obtenidas mediante la regla de las mezclas y esta consiste en una serie de cálculos en la cual se ven involucradas las propiedades de los materiales antes de ser colaminados.

La ecuación general de la regla de las mezclas es:

$$D = \frac{(A_1D_1 + A_2D_2 + \dots + A_nD_n)}{100}$$

donde:

A_1, A_2, \dots, A_n son los espesores en porcentaje del metal revestido.

D_1, D_2, \dots, D_n : son las propiedades de los componentes.

El proceso de colaminación se puede realizar con muchas combinaciones de materiales y entre materiales idénticos. La siguiente tabla muestra las diferentes combinaciones que se pueden llevar a cabo mediante el proceso de colaminación cuando las condiciones de presión y temperatura del proceso son las apropiadas. Las combinaciones de materiales que están marcadas con X son las que pueden unirse mediante dicha técnica.

	Acero al carbono	Acero inoxidable	Aleaciones Níquel / Hierro	Aluminio	Cobre	Latón / Bronce	Metales preciosos	Níquel	Plomo / Estaño soldados	Titanio
Acero al carbono		X	X	X	X	X	X	X	X	X
Acero inoxidable	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
Aleaciones Níquel / Hierro	X	X		X	X	X	X	X	X	
Aleaciones soldadas	X	X	X		X	X	X	X	X	
Aluminio	X	X	X	X	X	X				X
Cobre	X	X	X	X			X	X	X	X
Latón / Bronce	X	X	X				X	X	X	
Metales preciosos	X	X	X		X	X	X	X	X	
Níquel	X	X	X		X	X	X		X	X
Titanio	X			X	X			X		

Existen metales que no pueden ser colaminados debido a sus características como baja ductilidad, ya que no pueden ser deformados hasta el límite necesario para lograr una unión. También pueden presentarse dificultades con materiales que forman capas de óxido en su superficie haciendo difícil la unión. A continuación se muestran las diversas combinaciones de materiales y la factibilidad con la que pueden ser unidos.

De fácil unión:

- Oro / Níquel.
- Estaño / Níquel.
- Estaño / Cobre.
- Aluminio / Aleaciones de Aluminio.
- Cobre / Oro.
- Cobre / Plata.
- Cobre / Níquel.
- Cobre / Acero.

Imprácticos:

- Zirconio / Aluminio.
- Oro / Aluminio.
- Cobalto / Aluminio.

De difícil unión pero posibles:

- Cobre / Aluminio.
- Aluminio/ Acero al carbono.
- Acero inoxidable / Aluminio.
- Cobre / Tantalio.
- Cobre / Niobio.
- Cobre / Titanio.
- Titanio / Acero al carbono.
- Titanio / Acero inoxidable.
- Acero inoxidable / Acero al carbono.
- Aluminio / Níquel.
- Níquel / Acero al carbono.
- Cobre / Acero inoxidable.
- Cobre / Manganeso.
- Plata / Acero.
- Uranio / Zirconio.
- Zirconio / Cobre.
- Zirconio / Acero.
- Zirconio / Acero inoxidable.
- Platino / Níquel.
- Platino / Cobre.
- Platino / Acero.
- Tantalio / Niobio.

Imposibles:

- Berilio / Cualquier material.

2.4. APLICACIONES Y VENTAJAS

Los materiales colaminados se están utilizando en diversas aplicaciones debido a las características especiales que presentan y que no pueden ser obtenidas a partir de materiales sin colaminar. Las uniones que se llevan a cabo pueden ser entre metales, o bien, entre un metal y un polímero dependiendo de las características que requieres el diseño. Entre las aplicaciones de materiales colaminados se encuentran las siguientes:

Chapa de metal con revestimiento de PVC para uso en construcciones y terminaciones de obras de ingeniería civil. Es un perfil de acero galvanizado laminado con una membrana de PVC. Este material es resistente a los rayos ultravioleta y a objetos pesados que se puedan poner sobre ella, se puede cortar y doblar fácilmente y es resistente a la humedad. El espesor total de la lámina con revestimiento es de 1.40 milímetros. Se pueden unir varios perfiles mediante el uso de tornillos o remaches.

Otra aplicación en la que son utilizados los metales revestidos es la fabricación de monedas compuestas por 3 capas de metal, donde una capa interna es rodeada a modo de sandwich por dos capas externas de similar aleación. Este método es usado para ahorrar costos de producción o para hacer más resistentes las monedas al paso del tiempo. El núcleo o parte central de las monedas bimetálicas de 1 y 2 Euros está formado por 3 capas a modo de sandwich, en el que la capa interna es de Níquel en ambas monedas, y las dos capas exteriores son de Cuproníquel para la moneda de 1 Euro y de cobre con aluminio en la moneda de 2 Euros.

En la actualidad la mayoría de los alambres empleados en diversas aplicaciones están fabricados totalmente por cobre. Debido a los altos costo que este material presenta, se deben buscar alternativas para disminuir los costos de fabricación. Una de las alternativas empleadas es el alambre bimetálico, el cual es un alambre compuesto por acero revestido de cobre. Se produce mediante la unión metalúrgica de cobre con un núcleo de alambre de acero. Este alambre engloba los beneficios del cobre y del acero, en un producto con fortaleza mecánica y resistencia a la corrosión. La temperatura y presión del proceso aseguran un recubrimiento de cobre unido de manera uniforme y firmemente adherente. El espesor nominal del cobre es 12% del radio del alambre. El alambre bimetálico se trefila fácilmente para obtener calibres de diámetro pequeño. Tiene diversas aplicaciones en donde se necesita una resistencia superior a la que presenta el cobre y una mejor resistencia a la corrosión. Entre las industrias que se ven beneficiadas con el uso del alambre bimetálico se encuentran la automotriz, telecomunicaciones, servicios públicos, militar, entre otras. Sus aplicaciones mas frecuentes son como conductores de tierra y alfombrillas antiestáticas, alambre para acometidas de telefónico o coaxial, componentes electrónicos, blindaje de radiofrecuencia, alambre para edificios, alambre para bobinados, arneses de cableado automotriz y turbinas eólicas. El acero revestido de cobre puede utilizarse en muchas otras aplicaciones como una solución alternativa al uso de cobre macizo. Entre sus ventajas se encuentran costo menor al uso de cobre macizo, mejor conductividad, alta resistencia mecánica, fácil instalación, resistencia a la corrosión, entre otras.

Los productos colaminados también son muy utilizados en la fabricación de utensilios para cocina. En ellos se combina la conducción de calor y apariencia que ofrece el cobre y la durabilidad que proporciona el acero inoxidable, además de ofrecer una mayor resistencia a la corrosión debida a la acidez de los alimentos.

3. PRODUCCIÓN EXPERIMENTAL DEL MATERIAL COLAMINADO ACERO -COBRE

3.1. MATERIAL UTILIZADO EN LAS PRUEBAS

En el desarrollo de la técnica de colaminado se utilizó: lámina de cobre calibre 24 (0.58mm) y lámina de acero 1018 calibre 11 (3.05mm) proporcionada por el Laboratorio de Materiales de la Facultad de Ingeniería.

3.2. EQUIPO Y SUSTANCIAS EMPLEADAS

Para la fase experimental se utilizaron los siguientes equipos:

Horno eléctrico: Para calentar las probetas a la temperatura de trabajo se utilizó un horno eléctrico de la marca Lindberg del tipo 41SE8156 con una potencia de 14 kW y con una temperatura máxima de 1371 °C.

Laminadora: La laminadora que se utilizó en el proceso es de la marca Hille modelo LCG-50K con una capacidad de carga de 30 toneladas, en la cual puede controlarse la velocidad de laminación, así como también el porcentaje de deformación.

Microscopio óptico: En el se analizó visualmente, a diferentes aumentos (desde 50X hasta 500X) si existió unión en los materiales.

Microscopio electrónico de barrido: En este equipo se obtuvieron microscopías con mayor detalle y a mayores aumentos. En este equipo además pudimos observar ciertas características que en el microscopio óptico no fueron posibles observar.

Máquina para ensayos de tracción: Para evaluar la calidad de la unión del acero y el cobre se utilizó esta máquina de marca Instron modelo 4206 con una capacidad de 15 toneladas. Esta máquina es controlada por una computadora donde es posible programar las condiciones necesarias para la realización de los experimentos, además de obtener un reporte y las gráficas correspondientes de cada prueba.

Microdurómetro Vickers: Se utilizó un microdurómetro de la marca Leitz tipo 301-252.001 con el cual se pudo obtener la dureza Vickers de los materiales unidos.

Además de los equipos antes mencionados también se utilizaron:

- Cizalla de pedal marca Chicago modelo FS-416.
- Soldadora de puntos marca Mac's modelo PM12 con una potencia de 8.4 kW.
- Lijas (números 180, 240, 360, 400, 500 y 600) y pulidoras del laboratorio de metalografía.
- Montadora para encapsular las probetas en baquelita y de esta forma facilitar el pulido.
- Mezcla de gas Nitrógeno (95%) e Hidrógeno (5%).

3.3. PRODUCCIÓN DEL MATERIAL

La preparación del material comienza con el corte de los materiales a las dimensiones apropiadas para llevar a cabo la laminación. En el caso de una producción industrial los materiales pueden ser bobinas para que esta sea continua. En el caso de este trabajo los materiales se cortaron en piezas de 50 x 38.1 mm.

Posteriormente, los materiales con las dimensiones adecuadas para la laminación, son sometidos a un proceso de limpieza superficial. Este proceso es de suma importancia ya que de ello depende la calidad de la unión mecánica que se obtendrá. El proceso de limpieza comienza con un lijado de la superficie del cobre con una lija de carburo de silicio del número 180. El lijado se realiza en forma longitudinal y transversal produciendo un mallado y se realiza hasta eliminar impurezas y así permitir una mejor unión mecánica en la etapa de laminación. Para el caso de las láminas de acero no se utilizaron lijas de carburo de silicio, en su lugar se utilizó un esmeril para lograr la limpieza y el mallado con mayor facilidad.

Una vez terminada la limpieza mecánica las láminas se colocan en forma de paquete, o sea colocando la lámina de cobre sobre la lámina de acero de forma que las superficies limpias se encuentren en contacto tal como lo muestra la figura 3.1. El siguiente paso es unir las láminas mediante soldadura por puntos en el extremo que pasara primero a través de la laminadora, esto con la finalidad de evitar que exista un corrimiento de los materiales una vez iniciado el proceso de laminación.

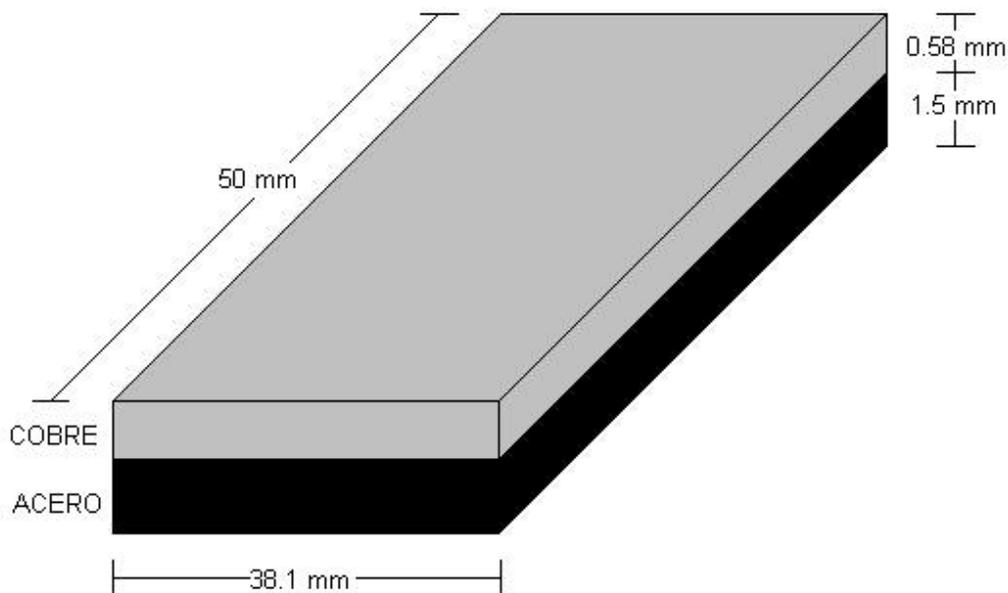


Figura 3.1

Cuando ya se tiene el paquete dispuesto el siguiente paso es precalentar las probetas. El tiempo de precalentado fue variable en intervalos de 20 segundos hasta los 2 minutos para posteriormente ser laminadas con un porcentaje de deformación del 20% y una velocidad

de laminación de 10 ft/min. Las temperaturas de precalentamiento también fueron variables comenzando a partir de los 500 °C para continuar como lo describe la siguiente tabla.

No. De Probeta	Temperatura [°C]	Tiempo en el horno [seg]
1	500	20
2	500	40
3	500	60
4	500	80
5	500	100
6	500	120
7	600	20
8	600	40
9	600	60
10	600	80
11	600	100
12	600	120
13	700	20
14	700	40
15	700	60
16	700	80
17	700	100
18	700	120
19	800	20
20	800	40
21	800	60
22	800	80
23	800	100
24	800	120
25	850	20
26	850	40
27	850	60
28	850	80
29	850	100
30	850	120
31	900	20
32	900	40
33	900	60
34	900	80

Cabe señalar que no se pudo continuar con la laminación de las probetas después de los 900°C y más de 100 segundos de precalentamiento ya que los materiales se suavizaban tanto que estos se pegaban a los rodillos. Al terminar el laminado de las probetas se pudo observar que no existía ningún tipo de unión mecánica por lo que se procedió a realizar una segunda deformación de 20% a temperaturas y tiempos de precalentamiento que mostraron una posibilidad de unión. Los resultados fueron los siguientes:

No. De Probeta	Temperatura [°C]	Tiempo en el horno [seg]	¿Existe unión?
35	800	20	No hubo
36	800	40	Si
37	800	60	Si
38	800	80	Se suavizó
39	800	100	Se suavizó
40	850	20	Si
41	850	40	Si
42	850	60	Se suavizó
43	900	20	Se suavizó
44	900	40	Se suavizó

Al terminar el proceso se obtuvieron los parámetros a los cuales existe una unión mecánica los cuales fueron:

TEMPERATURAS DE PRECALENTAMIENTO [°C]	TIEMPOS DE PRECALENTAMIENTO [seg]
800	40 y 60
850	20 y 40

Al obtenerse estos resultados se procedió a fabricar probetas con estas características utilizando para ambas temperaturas un tiempo promedio dentro del horno (a 800°C las piezas permanecieron dentro del horno 50 segundos y a 850°C permanecieron 30 segundos, se tomaron estos tiempos y temperaturas de laminación debido a que se encontró que existía una unión satisfactoria después de realizar el proceso.) a fin de someterlas a un recocido posterior a 850°C que mejorara la unión obtenida mediante el laminado. Por cada parámetro se fabricaron 5 probetas, 2 de ellas para realizar metalografías, microscopia electrónica de barrido y pruebas de microdureza y 3 más para evaluarlas mediante la prueba de desgarre. Cabe mencionar que después de la fabricación de estas probetas, con el fin de mejorar la unión, algunas de ellas fueron sometidas a un recocido a 850°C durante un tiempo de 1 hora, 2 horas y 24 horas, con una atmósfera de una mezcla de Nitrógeno (95%) e Hidrógeno (5%). Esta atmósfera se utilizó para evitar la corrosión de las piezas debido a la alta temperatura dentro del horno. El proceso se muestra en la siguiente tabla.

No. de probeta	Porcentaje de deformación	Temperatura de laminado	Tratamiento térmico
1	20% dos pasos	800	Sin Recocido
2	20% dos pasos	800	Sin Recocido
3	20% dos pasos	800	Sin Recocido
4	20% dos pasos	800	Sin Recocido
5	20% dos pasos	800	Sin Recocido
6	20% dos pasos	850	Sin Recocido
7	20% dos pasos	850	Sin Recocido
8	20% dos pasos	850	Sin Recocido
9	20% dos pasos	850	Sin Recocido

10	20% dos pasos	850	Sin Recocido
11	20% dos pasos	800	Recocido 1 hora
12	20% dos pasos	800	Recocido 1 hora
13	20% dos pasos	800	Recocido 1 hora
14	20% dos pasos	800	Recocido 1 hora
15	20% dos pasos	800	Recocido 1 hora
16	20% dos pasos	850	Recocido 1 hora
17	20% dos pasos	850	Recocido 1 hora
18	20% dos pasos	850	Recocido 1 hora
19	20% dos pasos	850	Recocido 1 hora
20	20% dos pasos	850	Recocido 1 hora
21	20% dos pasos	800	Recocido 2 horas
22	20% dos pasos	800	Recocido 2 horas
23	20% dos pasos	800	Recocido 2 horas
24	20% dos pasos	800	Recocido 2 horas
25	20% dos pasos	800	Recocido 2 horas
26	20% dos pasos	850	Recocido 2 horas
27	20% dos pasos	850	Recocido 2 horas
28	20% dos pasos	850	Recocido 2 horas
29	20% dos pasos	850	Recocido 2 horas
30	20% dos pasos	850	Recocido 2 horas
31	20% dos pasos	850	Recocido 24 horas
32	20% dos pasos	850	Recocido 24 horas
33	20% dos pasos	850	Recocido 24 horas
34	20% dos pasos	850	Recocido 24 horas

3.4. OBTENCION DE RESULTADOS

3.4.1. EVALUACIÓN DE LA UNIÓN

El siguiente paso fue evaluar la unión del acero y del cobre después de los procesos antes mencionados con el fin de determinar cuales son los mejores parámetros para lograr una unión satisfactoria.

La primera prueba a la que fueron sometidas las probetas fue la realización de metalografías con el fin de observarlas en el microscopio óptico y posteriormente ser analizadas mediante la microscopía electrónica de barrido (MEB). La siguiente prueba fue un ensayo de desgarre con el fin de verificar la calidad de la unión y obtener resultados numéricos y finalmente una prueba de microdureza Vickers.

3.4.2. MICROSCOPIA ÓPTICA

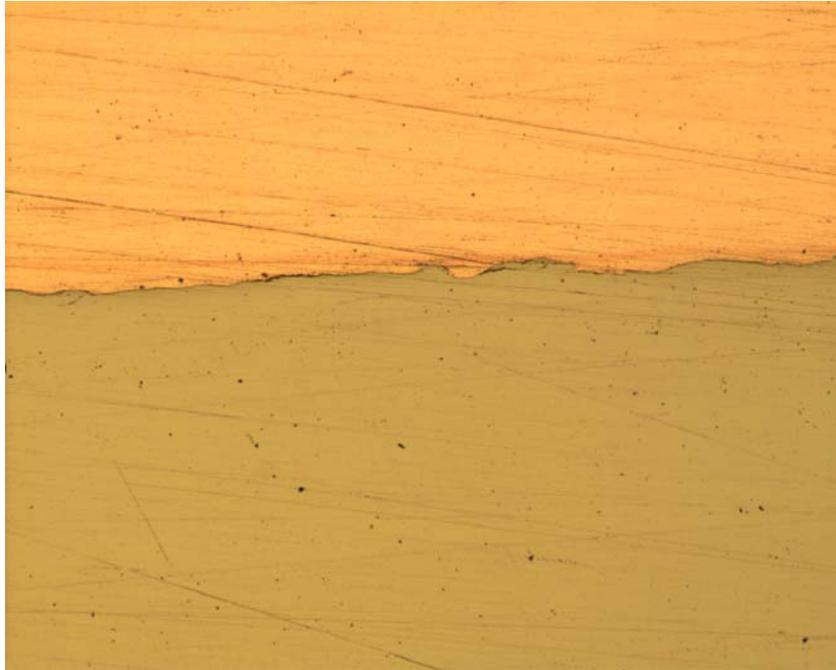
Al realizar la metalografía y observar las piezas en el microscopio óptico se obtuvieron las siguientes fotografías. En la parte superior se puede observar el cobre y en la inferior se encuentra el acero.



Fotografía 1. Material colaminado acero cobre con precalentamiento a 800°C y dos reducciones de espesor por laminado del 20% a 100 X.



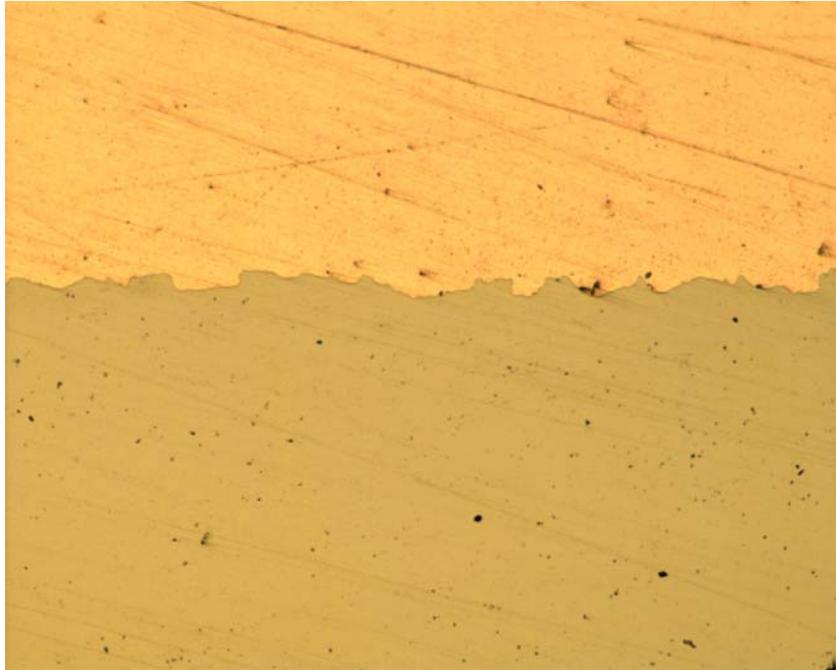
Fotografía 2. Material colaminado acero cobre con precalentamiento a 800°C y dos reducciones de espesor por laminado del 20% a 200 X.



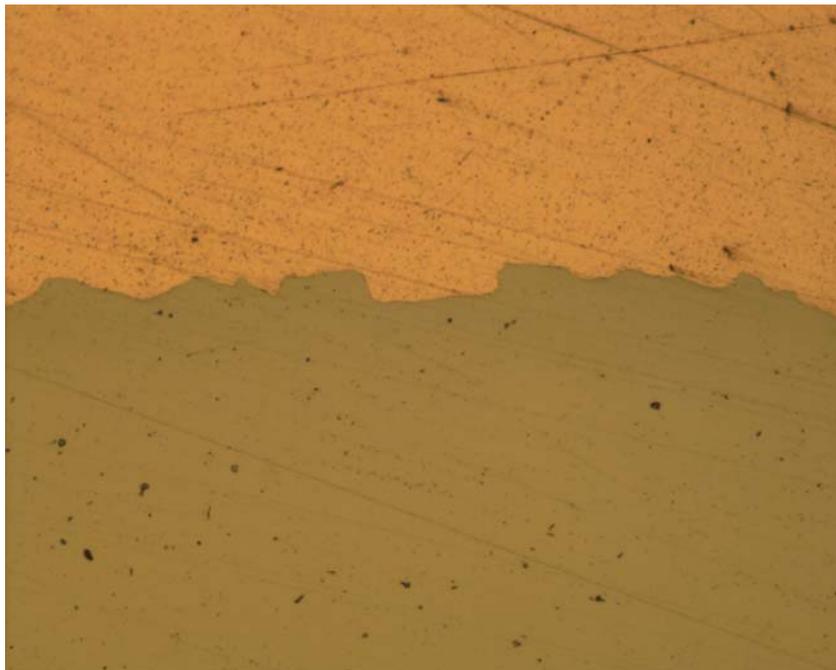
Fotografía 3. Material colaminado acero cobre con precalentamiento a 800°C, dos reducciones de espesor por laminado del 20% y recocido a 850°C durante 1 hora a 100 X.



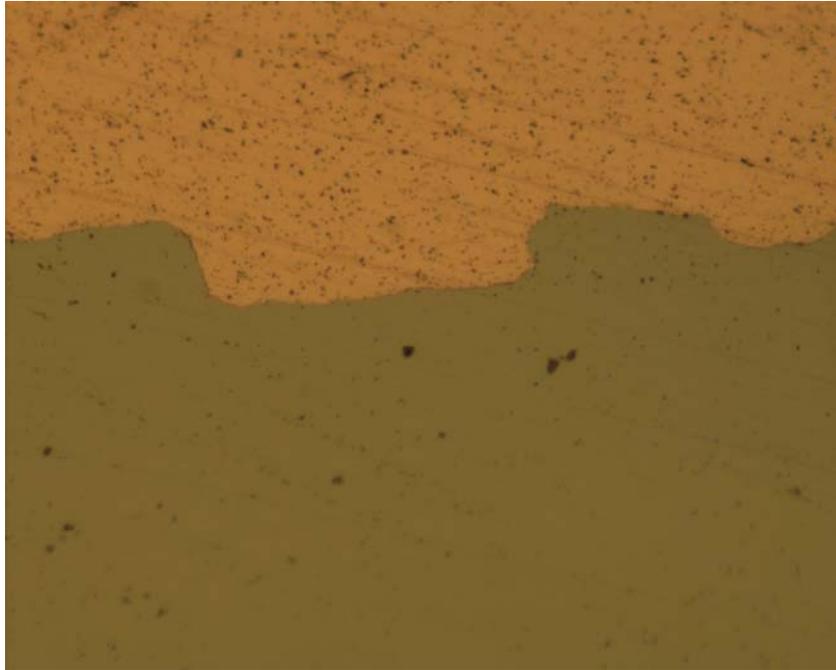
Fotografía 4. Material colaminado acero cobre con precalentamiento a 800°C, dos reducciones de espesor por laminado del 20% y recocido a 850°C durante 1 hora a 200 X.



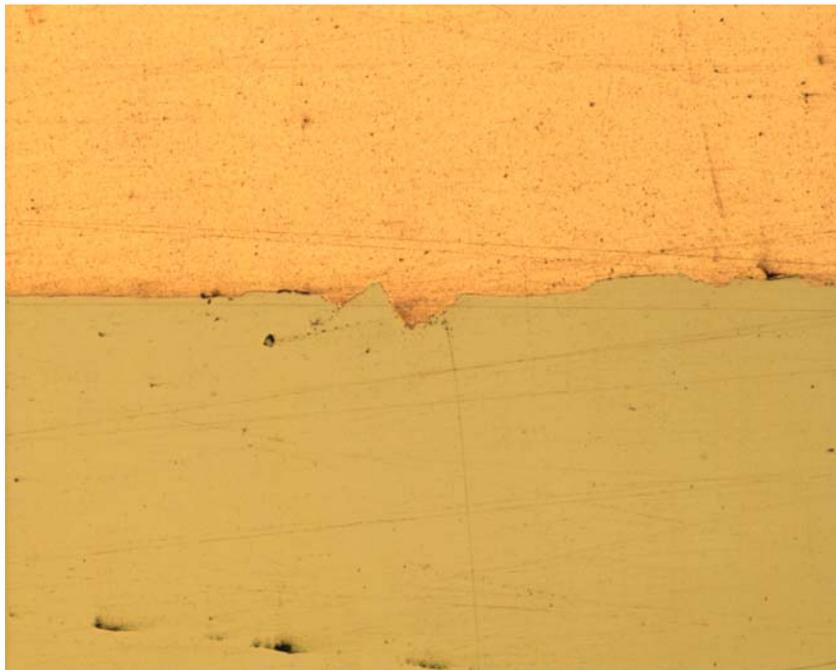
Fotografía 5. Material colaminado acero cobre con precalentamiento a 850°C, dos reducciones de espesor por laminado del 20% y recocido a 850°C durante 1 hora a 100 X.



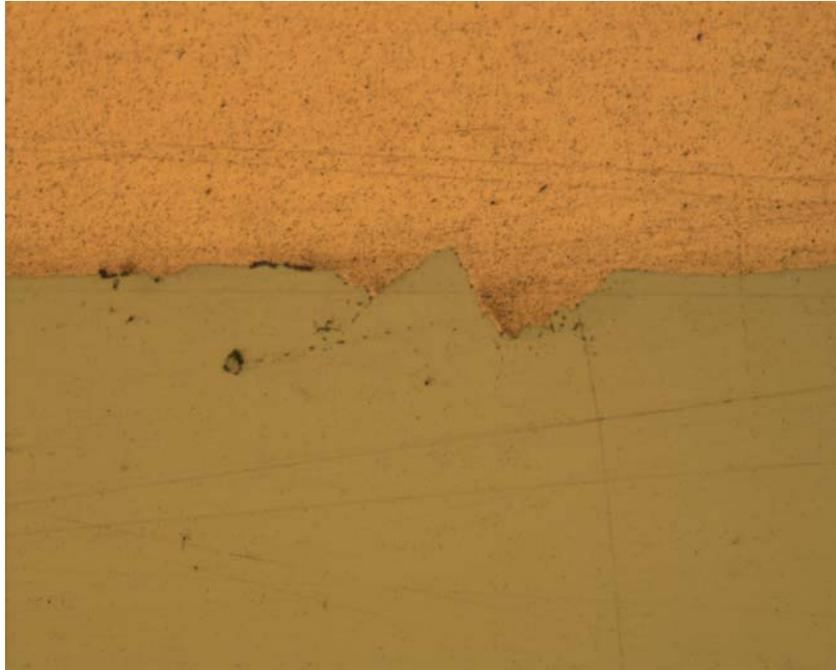
Fotografía 6. Material colaminado acero cobre con precalentamiento a 850°C, dos reducciones de espesor por laminado del 20% y recocido a 850°C durante 1 hora a 200 X.



Fotografía 7. Material colaminado acero cobre con precalentamiento a 850°C, dos reducciones de espesor por laminado del 20% y recocido a 850°C durante 1 hora a 500 X.



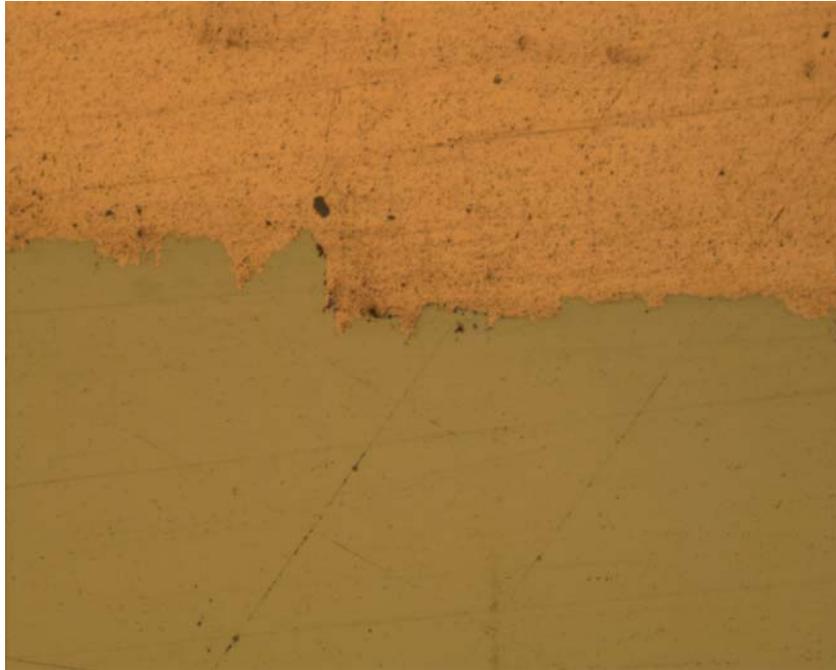
Fotografía 8. Material colaminado acero cobre con precalentamiento a 800°C, dos reducciones de espesor por laminado del 20% y recocido a 850°C durante 2 horas a 100 X.



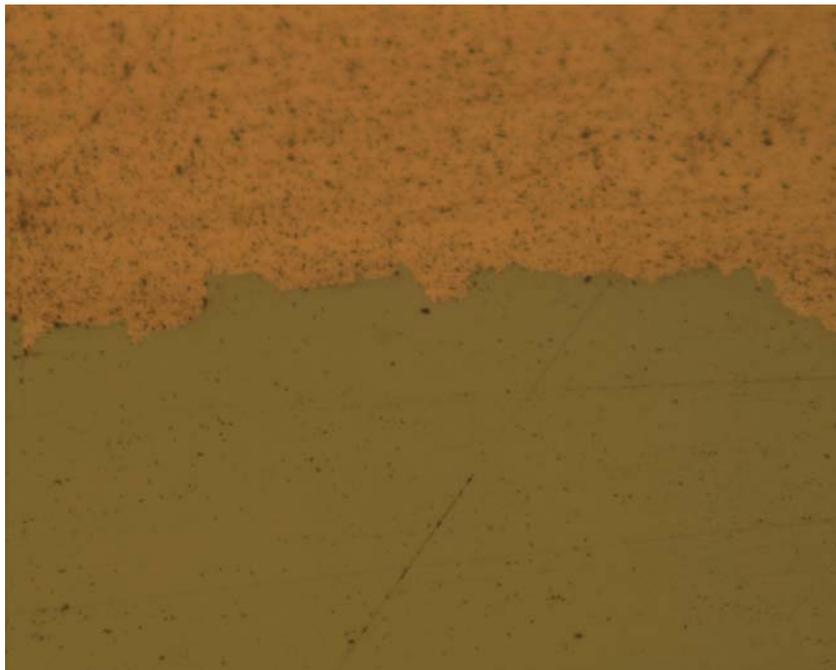
Fotografía 9. Material colaminado acero cobre con precalentamiento a 800°C, dos reducciones de espesor por laminado del 20% y recocido a 850°C durante 2 horas a 200 X.



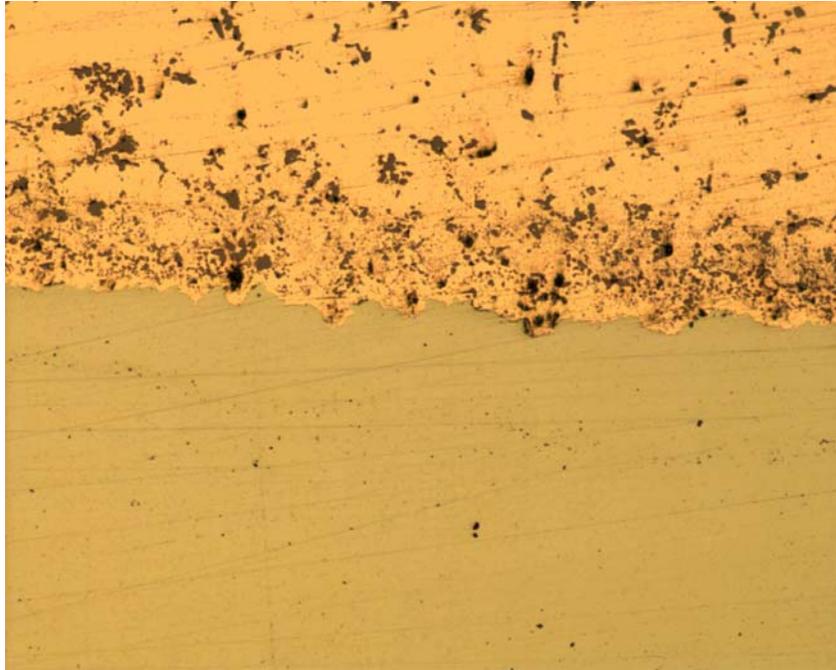
Fotografía 10. Material colaminado acero cobre con precalentamiento a 850°C, dos reducciones de espesor por laminado del 20% y recocido a 850°C durante 2 horas a 100 X.



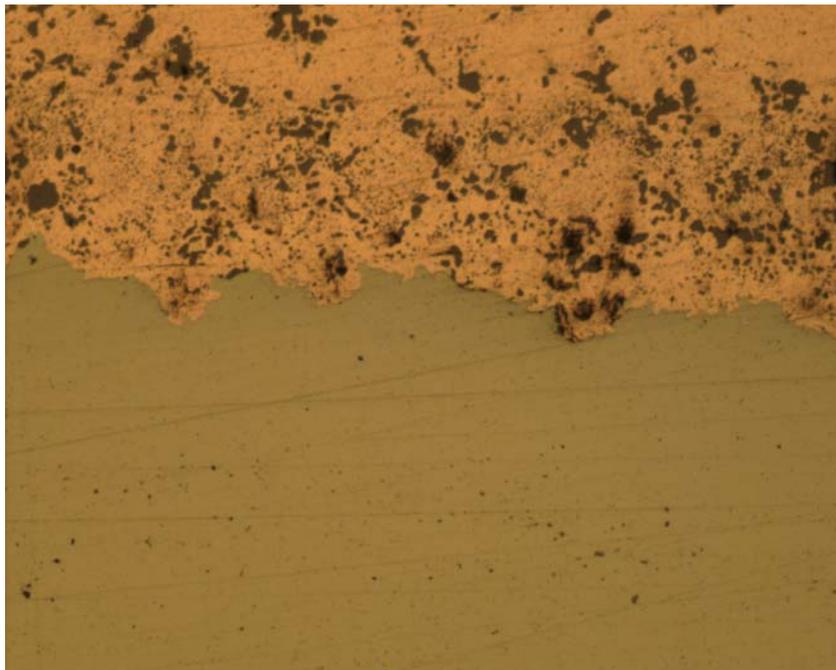
Fotografía 11. Material colaminado acero cobre con precalentamiento a 850°C, dos reducciones de espesor por laminado del 20% y recocido a 850°C durante 2 horas a 200 X.



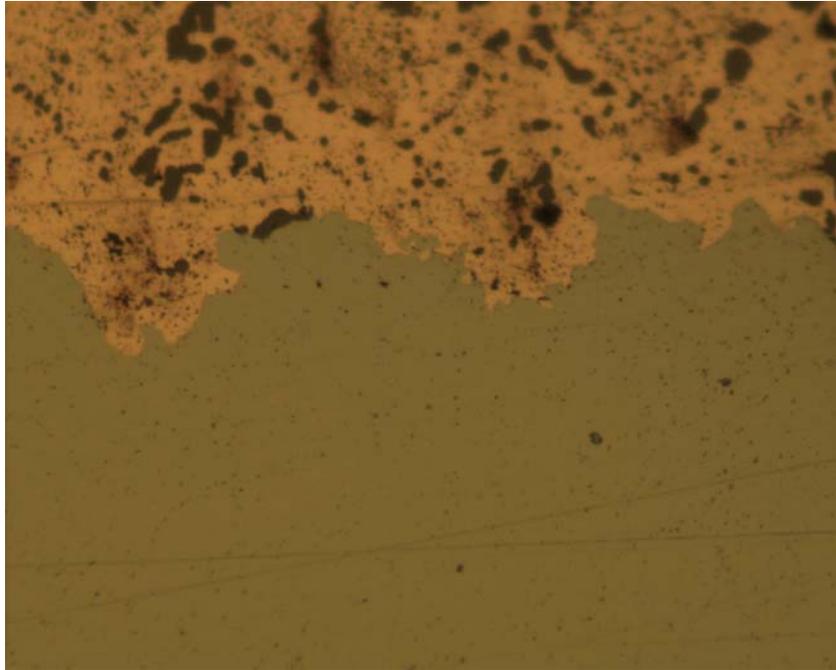
Fotografía 12. Material colaminado acero cobre con precalentamiento a 850°C, dos reducciones de espesor por laminado del 20% y recocido a 850°C durante 2 horas a 500 X.



Fotografía 13. Material colaminado acero cobre con precalentamiento a 850°C, dos reducciones de espesor por laminado del 20% y recocido a 850°C durante 24 horas a 100 X.



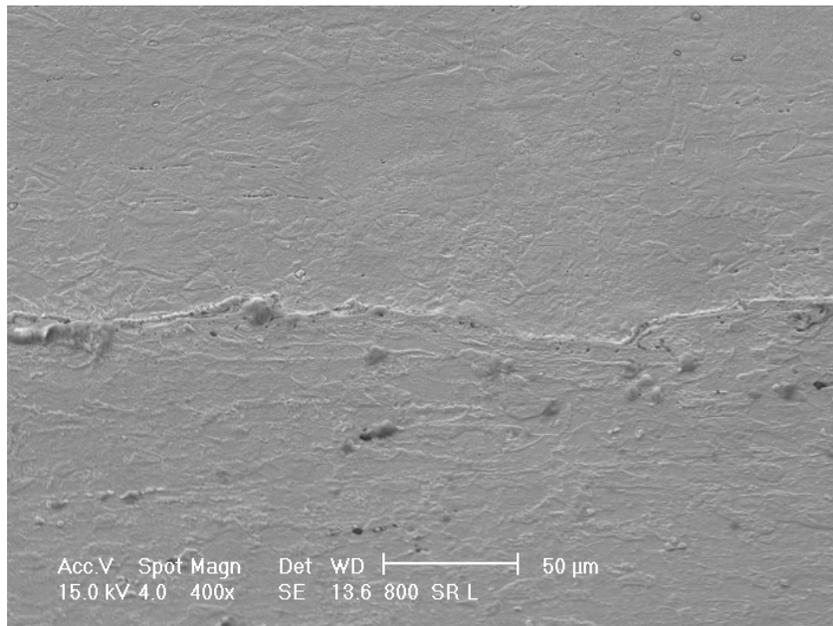
Fotografía 14. Material colaminado acero cobre con precalentamiento a 850°C, dos reducciones de espesor por laminado del 20% y recocido a 850°C durante 24 horas a 200 X.



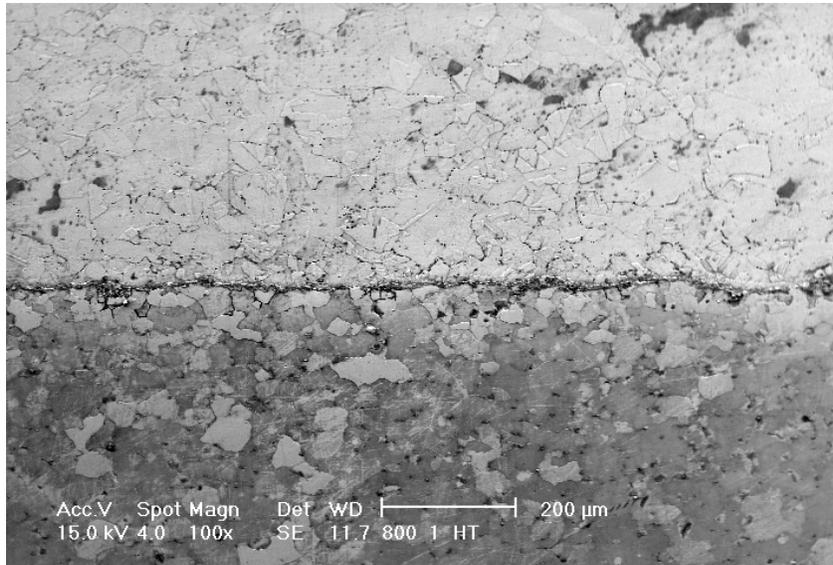
Fotografía 15. Material colaminado acero cobre con precalentamiento a 850°C, dos reducciones de espesor por laminado del 20% y recocido a 850°C durante 24 horas a 500 X.

3.4.3. MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

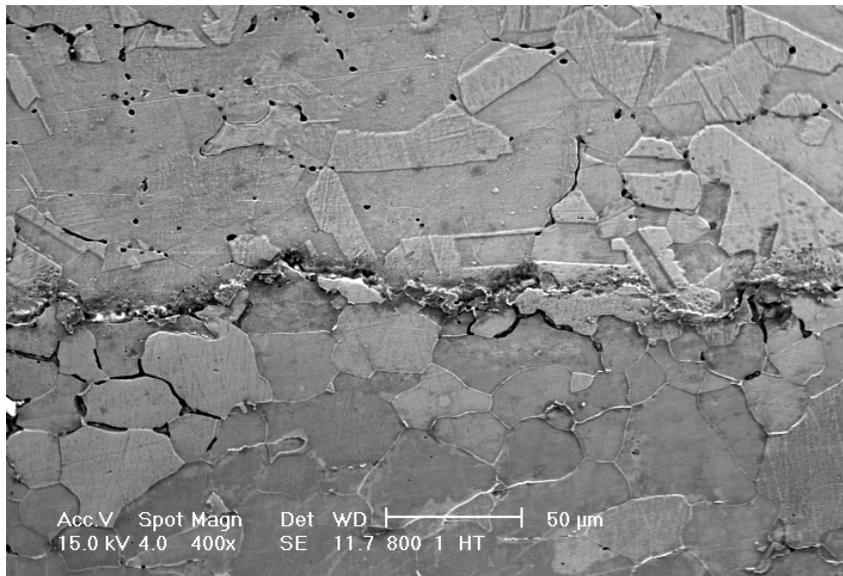
Después de obtener las imágenes con el microscopio óptico se observaron las piezas en el microscopio electrónico de barrido.



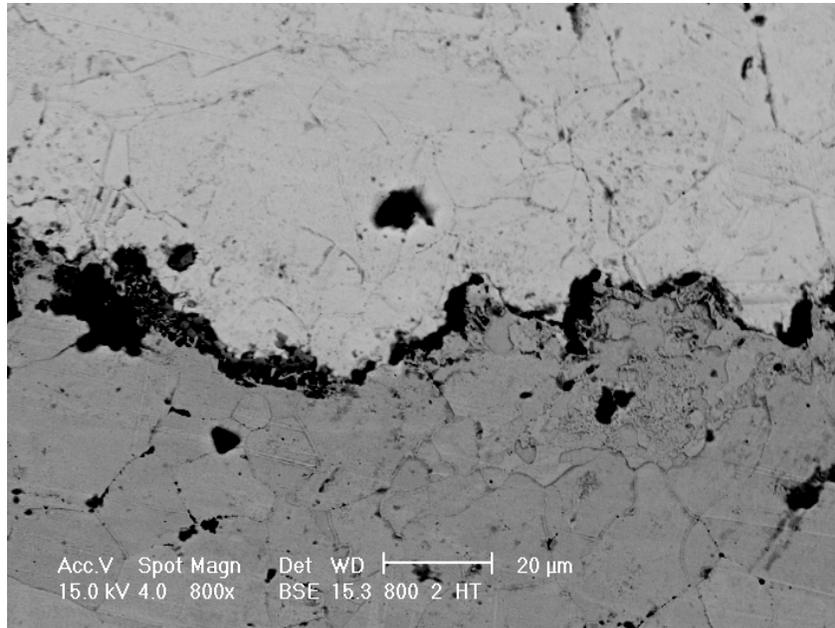
Fotografía 16. Material colaminado acero cobre con precalentamiento a 800°C y dos reducciones de espesor por laminado del 20% a 400 X.



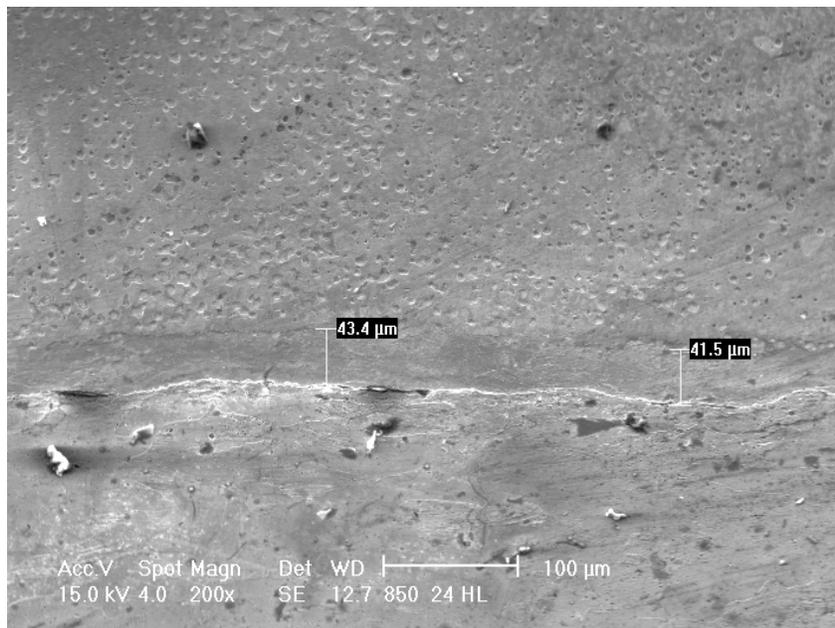
Fotografía 17. Material colaminado acero cobre con precalentamiento a 800°C, dos reducciones de espesor por laminado del 20% y recocido a 850°C durante 1 hora a 100 X.



Fotografía 18. Material colaminado acero cobre con precalentamiento a 800°C, dos reducciones de espesor por laminado del 20% y recocido a 850°C durante 1 hora a 400 X.



Fotografía 19. Material colaminado acero cobre con precalentamiento a 800°C, dos reducciones de espesor por laminado del 20% y recocido a 850°C durante 2 horas a 800 X.



Fotografía 20. Material colaminado acero cobre con precalentamiento a 850°C, dos reducciones de espesor por laminado del 20% y recocido a 850°C durante 24 horas a 200X.

3.4.4. PRUEBA DE DESGARRE

Esta prueba se realizó en las piezas unidas por colaminación con diferentes condiciones de unión. Las piezas fueron preparadas de modo que en un extremo no existiera unión y de esta forma facilitar la sujeción de las piezas tal como lo muestra la siguiente figura.

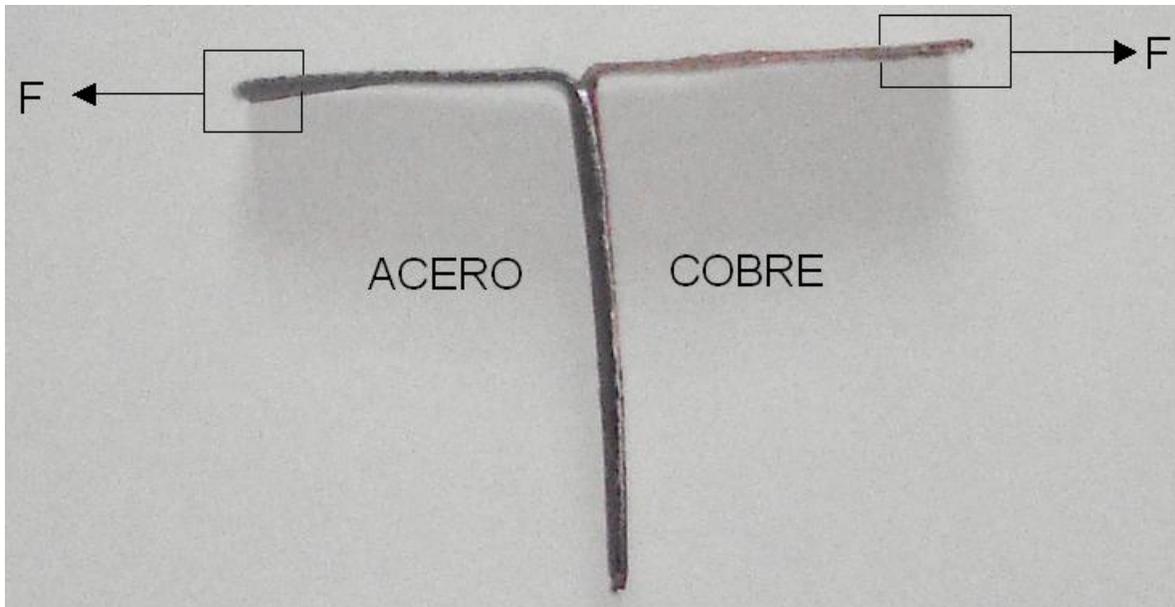


Figura 3.2

Cabe señalar que en las piezas que no fueron sometidas a recocido se presentó una unión que no permitió que las piezas se pudieran montar en la máquina de ensayos por lo que no fue posible someterlas a esta prueba. Los resultados de dicha prueba se muestran en las siguientes tablas y gráficas.

Precalentamiento a 800°C con recocido a 850°C durante 1 hora		
Número de pieza	Carga máxima [N]	Carga en la ruptura [N]
1	63.5	57.9
2	81.5	57.2
3	70.3	63.2
Promedio	71.7666667	59.4333333

Precalentamiento a 850°C con recocido a 850°C durante 1 hora		
Número de pieza	Carga máxima [N]	Carga en la ruptura [N]
1	65.5	39.3
2	57.3	20.3
3	54.6	51
Promedio	59.1333333	36.8666667

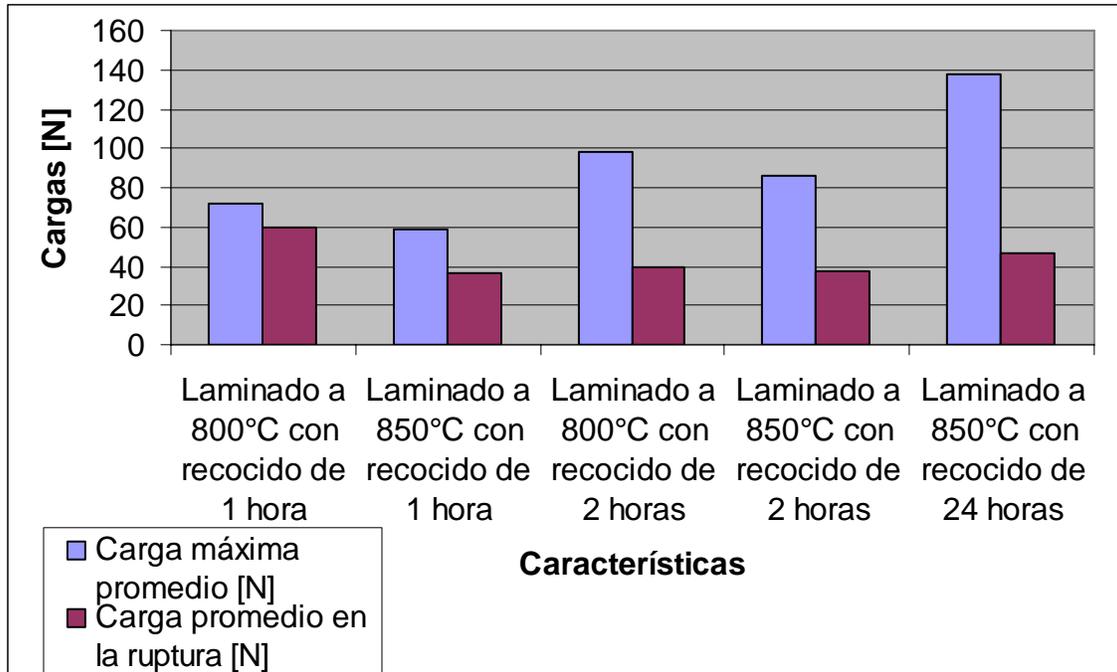
Precalentamiento a 800°C con recocido a 850°C durante 2 horas		
Número de pieza	Carga máxima [N]	Carga en la ruptura [N]
1	103.4	45.1
2	92.9	39.3
3	97	34.1
Promedio	97.7666667	39.5

Precalentamiento a 850°C con recocido a 850°C durante 2 horas		
Número de pieza	Carga máxima [N]	Carga en la ruptura [N]
1	79.2	58.1
2	74.9	26.7
3	103.9	27.7
Promedio	86	37.5

Precalentamiento a 850°C con recocido a 850°C durante 24 horas		
Número de pieza	Carga máxima [N]	Carga en la ruptura [N]
1	120.3	19.7
2	155.2	73.7
Promedio	137.75	46.7

De las tablas anteriores se sacaron los promedios y se muestran en la siguiente tabla.

Características	Carga máxima promedio [N]	Carga promedio en la ruptura [N]
Laminado a 800°C con recocido de 1 hora	71.77	59.43
Laminado a 850°C con recocido de 1 hora	59.13	36.87
Laminado a 800°C con recocido de 2 horas	97.77	39.5
Laminado a 850°C con recocido de 2 horas	86	37.5
Laminado a 850°C con recocido de 24 horas	137.75	46.7

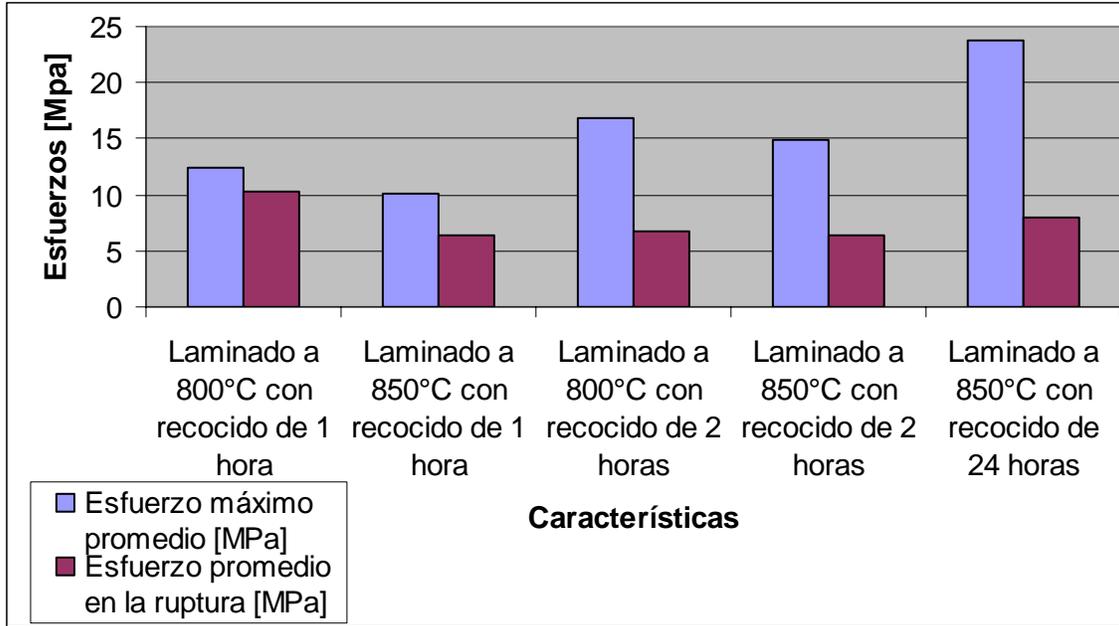


Para obtener los esfuerzos máximos promedio y los esfuerzos promedios en la ruptura se dividieron las cargas entre el área transversal del cobre que fue el material que falló al momento de realizar el ensayo de desgarre.

$$\sigma = \frac{F[N]}{A[m^2]}$$

El área transversal del cobre es 5.8×10^{-6} por lo que los resultados son los siguientes:

Características	Esfuerzo máximo promedio [MPa]	Esfuerzo promedio en la ruptura [MPa]
Laminado a 800°C con recocido de 1 hora	12.3741379	10.2465517
Laminado a 850°C con recocido de 1 hora	10.1948276	6.35689655
Laminado a 800°C con recocido de 2 horas	16.8568966	6.81034483
Laminado a 850°C con recocido de 2 horas	14.8275862	6.46551724
Laminado a 850°C con recocido de 24 horas	23.75	8.05172414



3.4.5. MICRODUREZA VICKERS

Esta prueba se llevo a cabo para verificar la microdureza Vickers que se obtuvo al final del proceso. Las microdurezas se obtuvieron al medir el tamaño de huella que dejó el indentador y se sustituyó el valor en la siguiente fórmula:

$$HV = \frac{1854.4 \times P}{d^2}$$

donde:

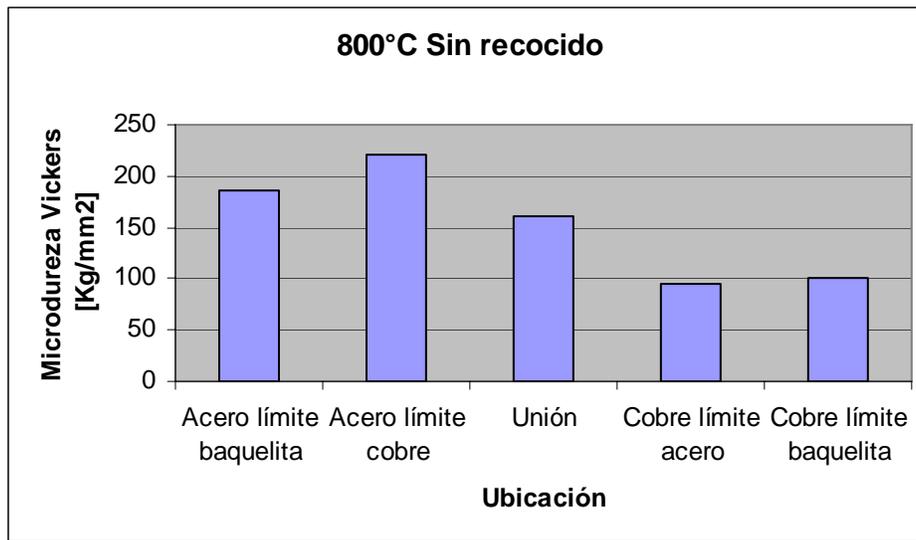
- P es la carga del Microdurómetro [g]
- d es el diámetro de la huella [mm]

A continuación se muestra el diagrama en el que se observan los puntos donde fue medida la dureza además de las tablas y graficas con los resultados obtenidos:

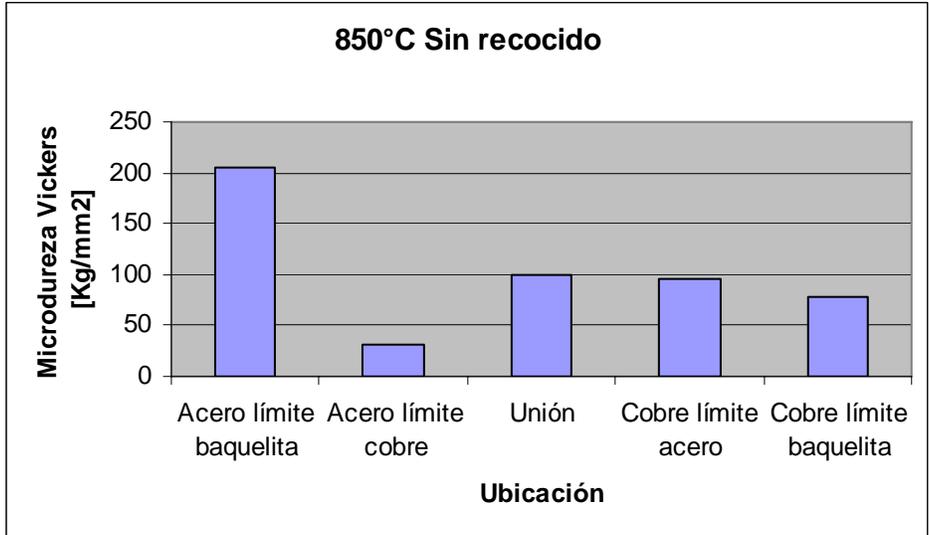


Figura 3.3. Diagrama de ubicación de los puntos donde se midió la microdureza

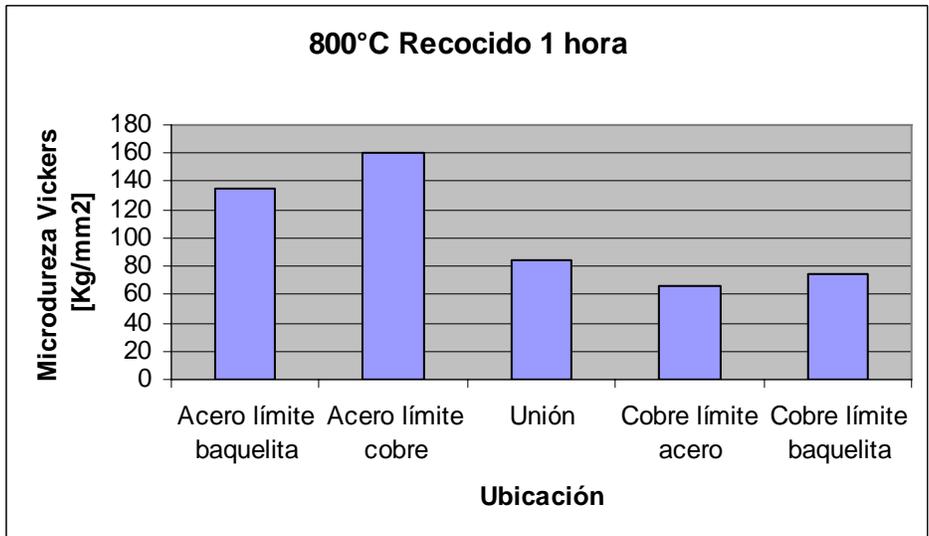
800°C Sin recocido			
Ubicación	Tamaño de la huella [micras]	Microdureza Vickers [Kg/mm ²]	Observaciones
Acero límite baquelita	31.5	187	Ninguna
Acero límite cobre	29	221	A 44 micras de la frontera
Unión	34	160	Ninguna
Cobre límite acero	44	95.8	A 42 micras de la frontera
Cobre límite baquelita	43	100	Ninguna



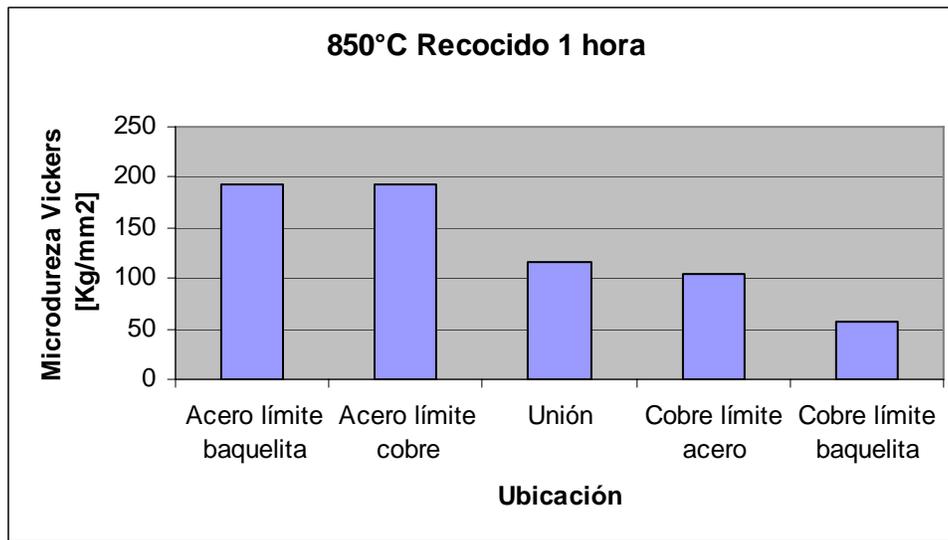
850°C Sin recocido			
Ubicación	Tamaño de la huella [micras]	Microdureza Vickers [Kg/mm ²]	Observaciones
Acero límite baquelita	30	206	Ninguna
Acero límite cobre	76	32.1	A 44 micras de la frontera
Unión	43	100	Ninguna
Cobre límite acero	44	95.8	A 42 micras de la frontera
Cobre límite baquelita	49	77.2	Ninguna



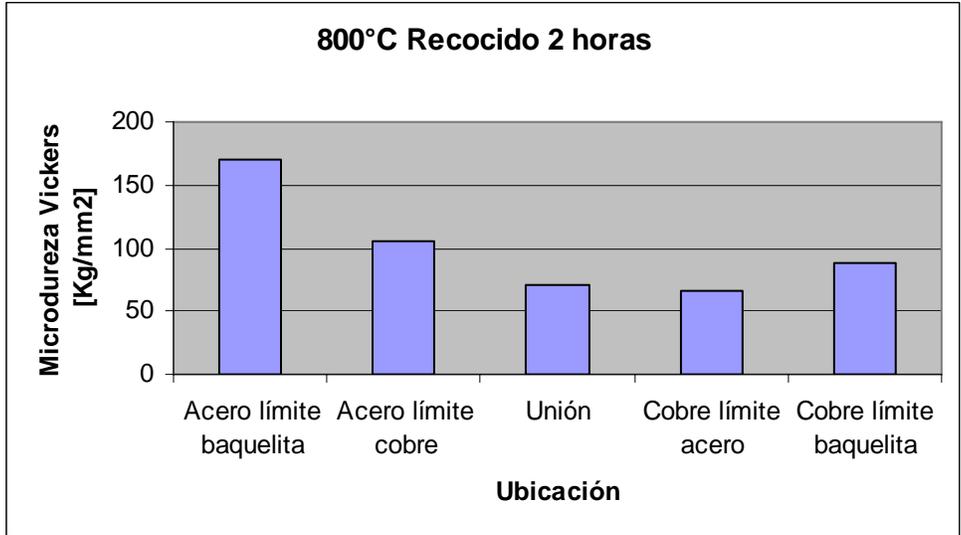
800°C Recocido 1 hora			
Ubicación	Tamaño de la huella [micras]	Microdureza Vickers [Kg/mm ²]	Observaciones
Acero límite baquelita	37	135	Ninguna
Acero límite cobre	34	160	A 45 micras de la frontera
Unión	47	83.9	Ninguna
Cobre límite acero	53	66	A 44 micras de la frontera
Cobre límite baquelita	50	74.2	Ninguna



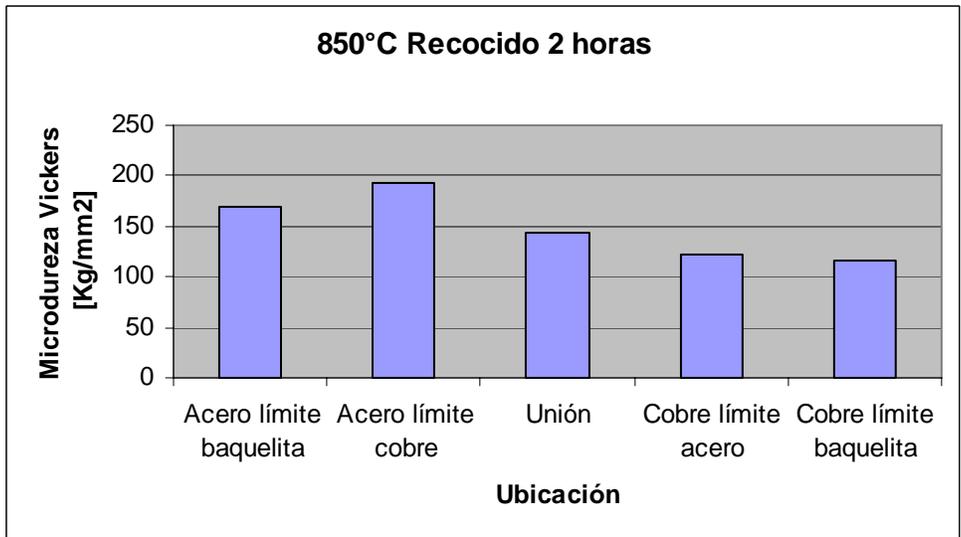
850°C Recocido 1 hora			
Ubicación	Tamaño de la huella [micras]	Microdureza Vickers [Kg/mm ²]	Observaciones
Acero límite baquelita	31	193	Ninguna
Acero límite cobre	31	193	A 33 micras de la frontera
Unión	40	116	Ninguna
Cobre límite acero	42	105	A 48 micras de la frontera
Cobre límite baquelita	57	57.1	Ninguna



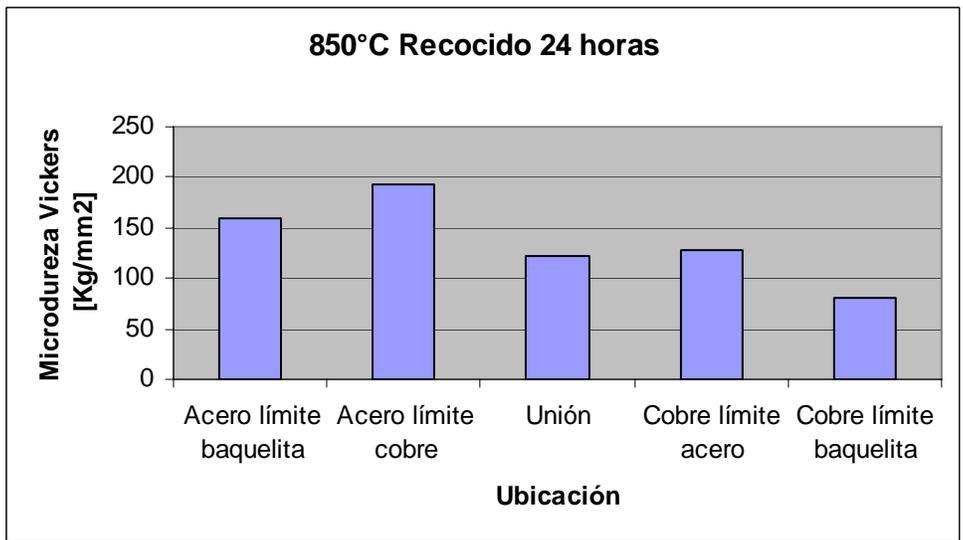
800°C Recocido 2 horas			
Ubicación	Tamaño de la huella [micras]	Microdureza Vickers [Kg/mm ²]	Observaciones
Acero límite baquelita	33	170	Ninguna
Acero límite cobre	42	105	A 27 micras de la frontera
Unión	51	71.3	Ninguna
Cobre límite acero	53	66	A 20 micras de la frontera
Cobre límite baquelita	46	87.6	Ninguna



850°C Recocido 2 horas			
Ubicación	Tamaño de la huella [micras]	Microdureza Vickers [Kg/mm ²]	Observaciones
Acero límite baquelita	33	170	Ninguna
Acero límite cobre	31	193	A 38 micras de la frontera
Unión	36	143	Ninguna
Cobre límite acero	39	122	A 48 micras de la frontera
Cobre límite baquelita	40	116	Ninguna



850°C Recocido 24 horas			
Ubicación	Tamaño de la huella [micras]	Microdureza Vickers [Kg/mm ²]	Observaciones
Acero límite baquelita	34	160	
Acero límite cobre	31	193	A 30 micras de la frontera
Unión	39	122	
Cobre límite acero	38	128	A 35 micras de la frontera
Cobre límite baquelita	48	80.5	



4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Después de llevar a cabo el proceso de unión del acero y cobre a distintos parámetros de unión, en este capítulo se analizarán los resultados obtenidos.

4.1. OBTENCIÓN DEL MATERIAL COLAMINADO

Para lograr la unión mecánica de los materiales se probó con distintos tiempos y temperaturas de precalentamiento, así mismo se varió el número de reducciones a las que fue sometido el paquete acero-cobre con el fin de determinar los parámetros óptimos para lograr dicha unión. Se hicieron pruebas variando la temperatura de precalentamiento iniciando a 500°C y llegando hasta los 900°C, con permanencia de las piezas dentro del horno desde los 20 segundos hasta los 2 minutos en intervalos de 20 segundos, posteriormente las piezas fueron sometidas a un laminado con el 20% de reducción de espesor. La temperatura máxima de precalentamiento se determinó a 850°C, por que a mayor temperatura las láminas de cobre se adherían a los rodillos del laminador, imposibilitando la unión. Al observar las piezas obtenidas con un solo paso de laminación se determinó que no se logró unión alguna, por lo que se procedió a realizar una segunda reducción del 20%. Al realizar esta reducción se observó que en algunas piezas ya presentaban una unión mecánica. Los parámetros a los que se logró dicha unión son los siguientes:

TEMPERATURAS DE PRECALENTAMIENTO [°C]	TIEMPOS DE PRECALENTAMIENTO [seg]
800	40 y 60
850	20 y 40

Como no existía gran diferencia entre los dos intervalos de tiempo, se determinó que para una temperatura de precalentamiento de 800°C el tiempo dentro del horno fuera 50 segundos y para una temperatura de 850°C el tiempo fue de 30 segundos. Con estos parámetros se obtuvo la unión mecánica de las láminas acero-cobre.

Lograda la unión mecánica deseada, se propuso efectuar un tratamiento térmico posterior que permitiera mejorar la unión, el tratamiento térmico utilizado fue un recocido a una temperatura de 850°C, el tiempo al que las piezas se sometieron a este proceso también fue variable. Las piezas se sometieron al recocido a 850°C en tiempos de 1 hora, 2 horas y 24 horas. Una vez finalizado este proceso se hicieron distintos análisis que permitieron determinar cuales fueron las piezas que mostraron una mejor unión.

4.2. ANÁLISIS DE LA UNIÓN

Para el análisis de la unión obtenida se realizaron dos tipos de pruebas, una de observación y otra de carácter mecánico. La prueba de observación se divide en dos: observación en microscopio óptico y observación en microscopio electrónico de barrido, mientras que la de carácter mecánico fue una prueba de desgarre.

4.2.1. ANÁLISIS DE MICROSCOPIA ÓPTICA Y MICROSCOPIA ELECTRÓNICA DE BARRIDO

El primer análisis de la unión fue mediante observaciones que se hicieron en el microscopio óptico y en el microscopio electrónico de barrido, de estas observaciones se obtuvieron fotografías que permitieron ver a nivel microestructural los resultados logrados en la unión.

Los resultados obtenidos se muestran en las fotografías 1 a 20 del capítulo anterior y demuestran lo siguiente:

Fotografías 1 y 2: En la fotografía 1 que muestra las piezas a 100 aumentos, da la impresión de no existir unión mecánica debido a la presencia de una pequeña línea negra en el límite de ambos materiales, aunque al efectuar un acercamiento a 200 aumentos (fotografía 2) se puede apreciar una aparente unión mecánica con delimitado perfecto entre el acero y el cobre.

Fotografías 3 y 4: Se observa una mejor unión mecánica, en comparación de las imágenes anteriores y esto se debe al efecto del recocido al que fue sometido durante una hora. En las imágenes se puede observar a las piezas perfectamente delimitadas sin la presencia de intermetálicos.

Fotografías 5 a 7: En estas imágenes se muestra una unión mecánica en la que ya no se ve una zona de unión en línea recta, como las imágenes anteriores. En dichas imágenes se puede observar una aparente penetración de un material en otro, aunque sin presencia de una zona intermedia que indique que existe difusión entre los materiales, pero gracias al recocido de 1 hora se ha logrado una unión aceptable de los materiales.

Fotografías 8 y 9: Al igual que las imágenes de la 5 a la 7 existe una zona en donde un material penetra en el otro y la zona de unión se encuentra perfectamente definida. En estas piezas el recocido fue de 2 horas y se demuestra que también se obtiene una unión aceptable después de este proceso.

Fotografías 10 a 12: En las fotografías 10 a 12 se puede observar que existe la misma unión que en imágenes anteriores a pesar de que la temperatura y el tiempo de precalentamiento fueron distintos. Las fotografías 8 y 9 obtenidas por laminado con un precalentamiento a 800°C durante 50 segundos y en las fotografías 10 a 12 el laminado se hizo con un precalentamiento a 850°C durante 30 segundos, por lo cual se puede deducir que las temperaturas de 800°C y 850°C son adecuadas para realizar el proceso de laminación.

Fotografías 13 a 15: En las imágenes 13 a 15 se observa que la calidad de la unión entre los materiales sigue siendo buena, aunque en el cobre se presentan manchas de color negro, debido a lo limitado del microscopio no se puede saber con certeza que son dichas manchas. Para tener respuesta acerca de que se ha presentado en las piezas se procedió a observarlas por microscopía electrónica de barrido.

Fotografía 16: Esta fotografía fue obtenida mediante el microscopio electrónico de barrido, muestra la unión del acero y cobre con un precalentamiento a 800°C durante 50 segundos y

en ella se puede observar que sí existe unión mecánica entre dichos materiales, aun cuando no existe un proceso posterior de recocido. Se observa que la unión tiene un límite perfectamente definido.

Fotografías 17 y 18: Estas fotografías corresponden a una unión mecánica con un precalentamiento a 800°C durante 50 segundos con un proceso de recocido de 1 hora a 850°C. Estas piezas fueron atacadas con nital para el acero y con una solución de Hidróxido de Amonio (5 partes), Peróxido de Hidrógeno (3 partes) y Agua destilada (5 partes) para el cobre, y con esto se logró observar su microestructura. En ella se observa que la microestructura de dichos materiales es la microestructura característica de cada uno de los materiales, mientras que en la zona de unión existe un cambio en el tamaño de grano que indica que aparentemente existe difusión de un material en otro.

Fotografía 19: En esta imagen, al igual que en la anterior, se puede observar una zona intermedia en la que el límite de los materiales ya no está tan definido por lo que se puede decir que la unión de ambos materiales es satisfactoria.

Fotografía 20: En esta imagen muestra una franja intermedia de aproximadamente 43µm de grosor, con esto se confirma la perfecta unión entre los materiales. También se observa una serie de huecos en la zona del cobre debido al tiempo de recocido al que fue sometida la pieza.

4.2.2. PRUEBA DE DESGARRE

Después del análisis óptico de la unión se procedió a evaluar la calidad de la unión con un ensayo mecánico denominado desgarre. De estas pruebas se obtuvieron los siguientes resultados.

A pesar de que en el análisis óptico se muestra que existe unión mecánica entre el acero y el cobre después del colaminado sin aplicar el tratamiento de recocido, estas piezas mostraron una unión mecánica deficiente, al grado de no poder prepararse para llevar a cabo la prueba de desgarre, ya que al momento de querer preparar dichas piezas se separaban.

Para las piezas que fueron tratadas térmicamente mediante recocido, se encontró que la unión de los metales fue de una excelente calidad, ya que durante la prueba de desgarre en vez de separarse, el cobre era el que resultaba con daño al romperse completamente, por lo que la unión obtenida fue satisfactoria.

Al realizar las pruebas de desgarre se obtuvieron una serie de resultados en los cuales se indican las fuerzas necesarias para que la unión fallara, pero debido a que la unión fue tan buena lo que falló finalmente fue el cobre.

Al revisar las gráficas obtenidas por el ensayo de desgarre se obtuvo que el mayor esfuerzo máximo en la ruptura corresponde a las piezas que fueron unidas mediante un laminado con un precalentamiento a 800°C durante 50 segundos y con un recocido posterior de 850°C durante 1 hora, lo que hace que este sea el mejor parámetro para lograr una unión satisfactoria. El que presentó menor esfuerzo máximo en la ruptura corresponde a las piezas

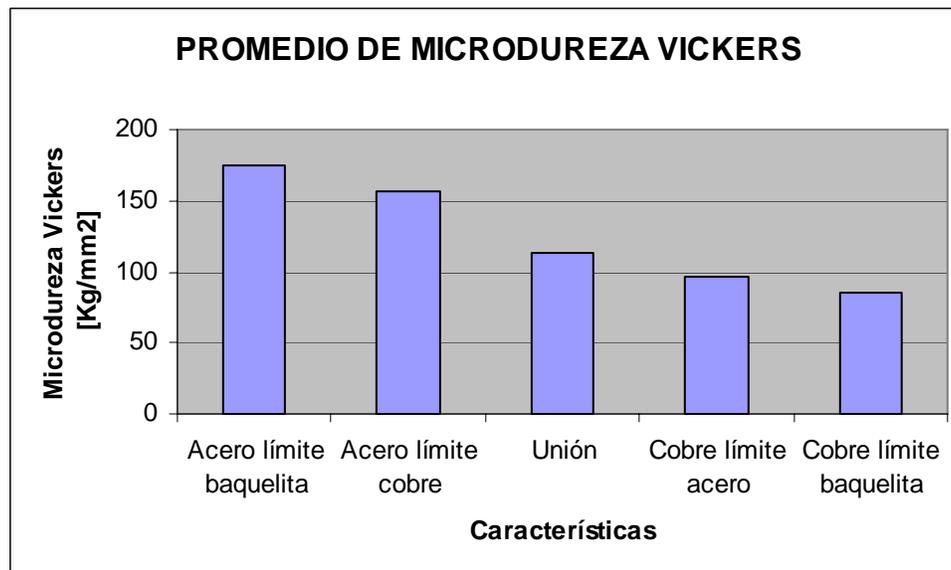
que fueron laminadas con un precalentamiento previo de 850°C durante 30 segundos con un recocido posterior de 850°C durante 1 hora, pero finalmente lo que falló fue el cobre, dejando la unión intacta por lo que también se puede considerar un parámetro apropiado para lograr la unión.

4.2.3. ANÁLISIS DE MICRODUREZA VICKERS

La última prueba que se realizó no fue para evaluar la calidad de la unión sino para evaluar una de las características finales del material. La prueba de microdureza Vickers revela la dureza al final del proceso, comparándola con la dureza de los materiales antes de ser tratados. Los resultados son los siguientes:

Al obtener el promedio de las microdurezas, dada su ubicación donde fue medida, la microdureza fue mayor en el acero en el extremo más lejano del cobre. El segundo punto con mayor dureza se encontró en el acero cerca del límite con el cobre. Al llegar a la unión de los metales se logró una microdureza menor que la del acero, pero mayor que la del cobre y conforme se fue avanzando sobre el cobre la microdureza disminuyó. Lo antes mencionado se muestra en la siguiente tabla y la siguiente gráfica:

Características	Promedio Microdureza Vickers [Kg/mm ²]
Acero límite baquelita	174.43
Acero límite cobre	156.73
Unión	113.74
Cobre límite acero	96.94
Cobre límite baquelita	84.66



5. CONCLUSIONES

Una vez terminados todos los experimentos, pruebas y análisis de resultados se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- Se cumplió con el objetivo de lograr la unión entre el acero y cobre por medio de la técnica llamada colaminación. La unión obtenida fue 100% satisfactoria debido a que después de realizar ensayos de desgarre los materiales no se separaron.
- Se determinaron las condiciones necesarias para llevar a cabo la unión satisfactoria de los materiales, los cuales se detallan a continuación:

Limpieza del material.

Para la preparación del material es necesario llevar a cabo una limpieza mecánica que consiste en un lijado superficial con el objetivo de eliminar óxidos, suciedad, polvo y agentes externos a los materiales. Al lijar los materiales se produce una superficie rugosa en ellos que permite lograr la unión con mayor facilidad.

Parámetros de la colaminación del material.

Velocidad de laminación: Para la realización de los experimentos solo se probó con una sola velocidad de laminación que fue de 10 [ft/min], esta velocidad no varió debido a que con ella se logró una unión satisfactoria por lo cual la podemos tomar como un parámetro válido.

Porcentaje de deformación: El porcentaje de deformación debe ser del 20 % en dos pasos, ya que uno solo no es suficiente para lograr la unión mecánica.

Temperatura y tiempo de precalentamiento: Para lograr la unión mecánica buscada los materiales se deben meter al horno a una temperatura de 800°C durante 50 segundos, o bien a 850°C durante 30 segundos. Con estos parámetros se logra la unión mecánica buscada.

Recocido: Con el fin de mejorar la unión mecánica obtenida mediante la colaminación se propuso un recocido posterior a 850 °C. A pesar de haber probado con tiempos de recocido de 1 hora, 2 horas y 24 horas, la unión resultó satisfactoria con un tiempo de recocido de 1 hora, ya que al realizar la prueba de desgarre las piezas no se separaron, **POR LO CUAL SE ESTABLECE QUE EL RECOCIDO DE 1 HORA ES RECOMENDADO PARA NO INCURRIR EN GASTOS INNECESARIOS.**

- En cuanto a la dureza obtenida en los materiales, después de llevar a cabo todo el proceso, se obtuvo que, en la mayoría de las piezas la microdureza Vickers de la unión fue menor que la dureza del acero y mayor que la del cobre. En cuanto a la microdureza del acero y del cobre se encontró, que en la mayoría de las piezas fue mayor cerca de la unión y disminuía conforme se alejaba de ella.

- El presente trabajo puede ser complementado realizando los mismos experimentos pero variando los parámetros como el porcentaje de deformación, el número de pasos en la laminadora, etc. También es recomendable utilizar láminas de diferentes espesores con el fin de encontrar nuevos parámetros de unión. Como parte de las pruebas finales se recomienda llevar a cabo un análisis químico en las piezas para conocer las concentraciones de los materiales a lo largo del perfil, así como realizar un ensayo de tracción con el objetivo de verificar la resistencia final del material compuesto.

6. GLOSARIO

Ánodo: Conductor o electrodo positivo. Polo positivo de un generador de electricidad.

Caliza: Roca sedimentaria cuyo componente principal es la calcita (carbonato cálcico, CaCO_3).

Carga: Fuerza general aplicada a un objeto por parte de objetos externos.

Cátodo: Conductor o electrodo negativo. Polo negativo de un generador de electricidad

Conductividad: Propiedad natural característica de cada cuerpo que representa la facilidad con la que los electrones pueden pasar por él.

Conformabilidad: Facilidad con que el material se presta para que el fabricante le dé una forma determinada.

Corrosión: Deterioro de un material a consecuencia de un ataque electroquímico por su entorno. De manera más general, puede entenderse como la tendencia general que tienen los materiales a buscar su forma más estable o de menor energía interna.

Desecación: Extracción o eliminación de la humedad de un cuerpo.

Difusión: Interpenetración de las moléculas de dos o más gases o líquidos. Este fenómeno se debe al movimiento de las moléculas que constituyen las sustancias y que tienden a mantenerse en estado de equilibrio.

Ductilidad: Capacidad de un material para ser deformado plásticamente sin presentar fractura.

Dureza: Capacidad de un material para resistir rayado, abrasión, indentación o corte. La dureza generalmente se mide por la profundidad o área de penetración bajo una carga fija utilizando un indentador de diamante.

Elasticidad: Propiedad mecánica de ciertos materiales de sufrir deformaciones reversibles cuando se encuentran sujetos a la acción de fuerzas exteriores y de recuperar la forma original si estas fuerzas exteriores se eliminan.

Escoria: Subproducto que contiene los elementos estériles, obtenido en el proceso de fusión en el horno alto o en las operaciones de fabricación del acero.

Fatiga: Fenómeno por el que se rompen los materiales bajo cargas dinámicas cíclicas (fuerzas repetidas aplicadas sobre el material).

Forjabilidad: Capacidad del material para sufrir deformación plástica sin romperse ni desarrollar defectos.

Fundición: Proceso de fabricación de piezas, comúnmente metálicas pero también de plástico, consistente en fundir un material e introducirlo en una cavidad, llamada molde, donde se solidifica.

Indentador: Dispositivo utilizado en una prueba de dureza que es oprimido contra el material de prueba.

Intercara: Superficie de separación entre componentes diferentes en un material compuesto.

Intermetálicos: Sistema aleado que se presenta como una fase homogénea en la que la proporción de los componentes es la deseada.

Lixiviación: Proceso en el que un disolvente líquido se pone en contacto con un sólido pulverizado para que se produzca la disolución de uno de los componentes del sólido.

Monolítico: Que está hecho de una sola pieza.

Punto de cedencia: Punto en el cual la deformación del material se produce sin incremento sensible del esfuerzo.

Recocido: Tratamiento térmico que tiene como finalidad una temperatura que permita obtener plenamente la fase estable a falta de un enfriamiento lo suficientemente lento como para que se desarrollen todas las reacciones completas.

Sinterización: Tratamiento térmico de un polvo o compactado metálico o cerámico a una temperatura inferior a la de fusión de la mezcla, para incrementar la fuerza y la resistencia de la pieza creando enlaces fuertes entre las partículas.

Soldabilidad: Aptitud de un metal para conservar sus características iniciales en las partes afectadas, metalúrgica o técnicamente, por la operación de soldadura.

Tenacidad: Energía total que absorbe un material antes de alcanzar la ruptura, por acumulación de dislocaciones.

Tostación: Operación consistente en calentar los minerales en una corriente de aire para eliminar las partes volátiles y oxidar la parte sólida.

Tracción: Esfuerzo al que está sometido un cuerpo por la aplicación de dos fuerzas que actúan en sentido opuesto, y tienden a estirarlo.

Tratamiento térmico: Proceso al que se someten los metales u otros sólidos con el fin de mejorar sus propiedades mecánicas, especialmente la dureza, la resistencia y la tenacidad.

Trefilar: Operación de conformación en frío consistente en la reducción de sección de un alambre o varilla haciéndolo pasar a través de un orificio cónico practicado en una herramienta llamada hilera o dado.

Viruta: Fragmento de material residual con forma de lámina curvada o espiral que es extraído mediante un cepillo u otras herramientas, tales como brocas, al realizar trabajos de cepillado, desbastado o perforación, sobre madera o metales.

7. BIBLIOGRAFÍA

Cervantes Cabello, José Javier. Desarrollo de la tecnología para la obtención de materiales compuestos laminados Zinalco-Aluminio. Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM, 1996.

Ramírez Rodríguez, Marco Antonio. Modelado y simulación del proceso de laminado conjunto no simétrico. Tesis de Maestría, Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM, 2007.

Mendoza Soriano, Felipe. Aplicaciones de laminado conjunto para la elaboración de uniones acero inoxidable-acero al carbono. Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM, 1992.

Quiroz González, Héctor Adrián. Modelado y simulación de procesos de laminado conjunto. Tesis de Maestría, Instituto de Investigaciones en Materiales, UNAM, 2003.

Avner, Sidney H. Introducción a la metalurgia física. McGraw-Hill, México, 1979.

De Garmo, E. Paúl. Materiales y procesos de fabricación. Reverte, España, 1988.

Biswas, Anil Kumar. El cobre: metalurgia extractiva. Limusa, México, 1993.

Herenguel, Jean. El cobre y sus aleaciones: metalurgia de la elaboración, transformación y propiedades. Urmo, España.

Apraiz Barreiro, José. Fabricación de hierro, aceros y fundiciones. Urmo, España, 1978.

Ernitz, Anatolio. Manual de hierros y aceros. Espasa-Calpe, Argentina, 1944.

Figueroa Ruano, Constancio. Aceros y aleaciones propiedades, aplicaciones y soldabilidad. Gráficas Turriles, México, 1984.

Correa, Luis Guillermo. Trabajo mecánico de los metales. Bogotá: Banco de la República, c1985.

Copper and copper alloys. Philadelphia, Pennsylvania: American Society for testing and materials, c1997.

Centro Español de Información del Cobre. El cobre y sus aleaciones en la tecnología. Publicación CIDEDEC, 1974.

Hojas de datos del cobre. Consejo internacional para el desarrollo del cobre. 1969

<http://www.eurocopper.org/cobre/aplicaciones-cobre.html>.

<http://www.fisica.uh.cu/biblioteca/revcubfi/1986/Vol.%206,%20No.%201/06001047.pdf>.

http://www.espatentes.com/pdf/8205352_A1.pdf.

<http://202.114.89.60/resource/pdf/1185.pdf>.

<http://web.unicen.edu.ar/crecic/analesafa/vol16/f2-208-214.pdf>.

http://fain.uncoma.edu.ar/prof_tec/mecanic/materiales/DifusionAtomica.pdf.

<http://materias.fi.uba.ar/6713/difusion-repaso.pdf>.

http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/tesis/Ingenie/calderon_c_j/cap05.pdf.

<http://redalyc.uaemex.mx/redalyc/pdf/475/47545203.pdf>.

<http://www.imiq.org/documentos/4102007103117.pdf>.

http://sx.commscope.com/company/eng/support_document/spec_sheets/bimetals/__icsFiles/afieldfile/2008/03/28/40CCS_S.pdf.

<http://www.bencoins.com/metales-monedas.pdf>.

<http://www.ute.com.uy/Empresa/lineas/distribucion/normalizacion/docs/NO-DIS-MA-5500.pdf>.

<http://www.centelsa.com.co/userfiles/catalogos/TELECOMUNICA25.pdf>.

http://www.centelsa.com.co/userfiles/catalogos/Catalogo_Cables_Submarinos.pdf.

<http://www.sika.es/sika-doc/R65315.3.2.ChapacolaminadaTrocaTipoR.pdf>.

<http://www.cladmetal.com>.

<http://www.springerlink.com/content/p740885283644877/fulltext.pdf?page=1>.