



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

**ANÁLISIS DE LA MICROESTRUCTURA DE
LATÓN PROCESADO POR DEFORMACIÓN
PLÁSTICA SEVERA**

TESIS

Para obtener el título de
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

P R E S E N T A

GERARDO GÓMEZ JIMÉNEZ

DIRECTOR DE TESIS

DR. FRANCISCO ALFREDO GARCÍA PASTOR



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 04 de Marzo del 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: BALBINA OJEDA RAMÍREZ

VOCAL: GABRIEL ÁNGEL LARA RODRÍGUEZ

SECRETARIO: FRANCISCO ALFREDO GARCÍA PASTOR

1° SUPLENTE: IGNACIO ALEJANDRO FIGUEROA VARGAS

2° SUPLENTE: OCTAVIO LOZADA FLORES

SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: CINVESTAV UNIDAD SALTILLO

ASESOR DEL TEMA:

DR. FRANCISCO ALFREDO GARCÍA PASTOR

SUSTENTANTE:

GERARDO GÓMEZ JIMÉNEZ

ÍNDICE

Dedicatoria	5
Agradecimientos	6
1. Resumen	8
2. Introducción	9
3. Hipótesis	12
4. Objetivos	13
4.1. Objetivo General	13
4.2. Objetivos Particulares	13
5. Antecedentes	14
5.1. Proceso de Laminación	14
5.1.1. Laminadores	14
5.1.2. Laminación en Caliente	18
5.1.3. Laminación en Frío	19
5.1.4. Fuerzas durante el Proceso de Laminación	19
5.2. Mecanismos de Endurecimiento	22
5.2.1. Endurecimiento por refinamiento de grano	23
5.2.2. Endurecimiento por deformación	23
5.3. Latón	24
5.3.1. Latones α o para trabajo en frío	25
5.3.1.1. Latones amarillos	26
5.3.1.2. Latones rojos	26
5.3.2. Latones $\alpha + \beta$ o para trabajo en caliente	26
5.4. Latón C26000 (70/30)	27
5.5. Proceso de Deformación Plástica Severa	30
5.6. Aplicaciones	31
5.6.1. Aplicaciones derivadas a sus propiedades	31
5.6.2. Aplicaciones derivadas de su fácil manufactura	32
5.7. Unión por Laminación Acumulativa (ARB)	33
6. Metodología	36
6.1. Previos al proceso de Laminación	36

6.2. Proceso de Laminación	39
6.3. Unión por Laminación Acumulada	40
7. Resultados	42
7.1. Previos al proceso de laminación	42
7.1.1. Curvas de Esfuerzo vs Deformación de latón	44
7.1.2. Datos reales basados en las curvas de Esfuerzo vs Deformación	45
7.2. Microscopía Óptica	47
7.2.1. Unión por Laminación Acumulada	47
7.3. Medición de Durezas	49
8. Análisis de Resultados	51
8.1. Previos al proceso de Laminación	51
8.2. Proceso de Laminación	53
8.3. Unión por Laminación Acumulada	54
8.4. Durezas antes y después del proceso	57
9. Conclusiones	58
10. Índice de figuras	59
11. Índice de ecuaciones	62
12. Índice de tablas	63
13. Referencias bibliográficas	64

Dedicatoria

Este trabajo va dedicado a las siguientes a las siguientes personas:

- A mis amigos de la universidad: Alberto Martínez, Fabiola Nájera, Abril Pineda, Jonathan Sánchez, Andrés Maza, Luis Jiménez, Alejandro Conejeros, Luis Allende, Francisco Novas, Moisés Segundo, Alex Benítez, Juan Manuel Avilés, Dante Tórices; gracias a ellos y a los que no mencioné por hacer amenas las horas en la universidad y también por aprender y estudiar con ellos las materias que llevamos juntos.
- A mis amigos de Cuautla, Morelos: Jorge Iván Acosta, David Márquez, Hassibe Márquez, Luis Arcos, Diana Guzmán, Abril Mendoza, Karla Cedillo, Michael Castillo, Andrea Ramírez, Juan Carlos Santamaría, Edgar Fernández, Luis Omar Cortázar, Carlos Alberto Martínez, Trinidad Cuenca, y otros más que por ahora no recuerdo, por ellos me han enseñado en parte de mi camino de estudios secundaria-preparatoria, por ellos les agradezco la amistad que me dieron y que con gusto aún conservo.
- A mi maestro de Kung-Fu, José Remis, que siempre lo recuerdo dando lecciones de vida con cada entrenamiento y por su apoyo sigo mejorando mi persona.
- A los académicos de la UNAM que siempre me enseñaron, no sólo más que sus materias a cursar, sino un claro ejemplo de lo que una persona puede llegar a ser, tales profesores como: Dra. Concepción Abella, Dr. Miguel Morúa, Dr. Ignacio Figueroa, M. Walter Medrano (q.e.p.d), M. Balbina Ojeda, M. Wendy López, entre otros.
- A todo el equipo de laboratorio de microestructura y deformación en CINVESTAV, igualmente a todos los que trabajan en CINVESTAV y a los investigadores que me ayudaron en mi jornada en Ramos Arizpe.
- A toda mi familia, tanto los Gómez, los Vargas y los Jiménez Thomas que siempre me han ayudado en mi educación, apoyo moral y que siempre sea un hombre de bien, tanto con conocimientos, educación y voluntad de llegar a más.

Agradecimientos

Agradezco en primer lugar a mis padres, Javier Gómez Vargas y Silvia Concepción Jiménez Thomas, aquellos que con sus esfuerzos, sus desvelos y su constante apoyo me ayudaron a terminar otro episodio de mi vida la cual, de ser honesto, ellos fueron quienes me dieron el gran gusto por esta carrera, mi madre por la química y mi padre por la ingeniería, y un gran aprecio y respeto por la UNAM, la cual ellos fueron también estudiantes en su tiempo.

Agradezco a mi hermana Gabriela Gómez Jiménez, que no de ser por ella creo que no sabría dar mis pasos de forma independiente, ya que ella, fue el motor de mi fuerza y mi gran inspiración, yo seguí casi todos sus pasos y toda la experiencia que eh obtenido es en gran parte por ella, siendo mi compañera de vida la cual mis recuerdos tengo por ti.

Agradezco también a mis abuelos, Teódulo Jiménez Sánchez, Judith Thomas Palacios, Eva Vargas Coria y José Gómez Flores, los cuales siempre me hicieron reflexionar mis acciones y también por ser los mejores consejeros, consentidores, bromistas y sobre todo, que siempre buscaron que siguiera el buen camino y eligiera las cosas buenas, muchas gracias abuelos, descansen en paz.

Agradezco a mi asesor de este proyecto, el Dr. Francisco Alfredo García Pastor, el cual me ayudó a formar todo este proyecto, tomándose el tiempo en enseñarme más allá de su labor como investigador, motivándome al área de la mecánica de materiales y sobre todo, en invitarme a realizar este proyecto, mostrándome una confianza en el manejo de todo el equipo que tiene y la experiencia de su área, muchas gracias doctor.

Agradezco de corazón a mi pareja Krystel Trinidad Hernández, quien ha sido para mí, más que una novia, una compañera de la escuela, una amiga la cual eh aprendido, y seguiré aprendiendo, todas esas cosas de la carrera, cursado materias juntos, venciendo retos que se nos interponen, literalmente puedo decir que es casi como mi esposa, que me regaña, me consuela, me motiva y me hace

relajar en los momentos que son para eso, sin ella, no me hubiera animado a hacer todo este proyecto, te amo muchísimo mi vida, gracias.

Y agradezco a Dios, que de todos a él le eh confiado en mí todos estos momentos, y los que están por venir; que salí adelante y seguiré por el camino que él me mande, Amen.

1. Resumen

La producción de materiales con grano ultrafino (materiales policristalinos con tamaño de grano inferior a 1 μm) por medio de la deformación plástica severa o SPD (severe plastic deformation) tiene gran potencial para aplicaciones a escala industrial, pues emplea equipos y herramientas con gran similitud a aquellos empleados en procesos de manufactura convencional. Por lo tanto, al implementarlos no es necesario incurrir en altas inversiones iniciales de capital. Otra ventaja importante es la capacidad de producir material con las dimensiones necesarias para aplicaciones estructurales. Una de las técnicas más prometedoras para realizar SPD es la unión por laminación acumulativa (ARB, accumulative roll bonding)¹.

El material que se utilizó en esta tesis es el latón. Primeramente se realizó una caracterización del material que incluyó: metalografías, pruebas de dureza en escala Rockwell y ensayos de tensión. Posteriormente se realizó un tratamiento térmico para tener las piezas de pruebas listas para deformar. Tras el proceso de ARB, se realizó una nueva caracterización, incluyendo metalografías y ensayos de dureza en la misma escala Rockwell.

El proyecto se realizó en las instalaciones del Centro de Investigación y Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional (CINVESTAV), el cual se trabajó en el edificio de posgrado de Ingeniería Metalúrgica, en los laboratorios de pruebas físicas y mecánicas, en el laboratorio de metalografía y en el laboratorio de fundición.

¹ (Saito, Utsunomiya, Tsuji, & Sakai, 1999)

2. Introducción

El artículo de Gleiter “Nanocrystalline Materials” publicado en 1989 direccionó una significativa proporción de la investigación existente en Ciencia e Ingeniería de Materiales, este, él y otros vanguardistas en el área, han denominado a los materiales policristalinos con tamaño de grano inferior a $1\ \mu\text{m}$, como materiales con Grano Ultrafino o UFG (Ultra-fine grain), y a su vez, ésta denominación se subdivide en materiales submicrométricos (100 a $1000\ \mu\text{m}$) y materiales nanométricos (inferiores a $100\ \text{nm}$). Estos materiales UFG se caracterizan por tener una gran fracción de volumen de límites de grano, lo que puede alterar significativamente las propiedades físicas, mecánicas y químicas, en comparación con los materiales policristalinos convencionales, los cuales tienen tamaños de grano usualmente en el rango de $10 - 300\ \mu\text{m}$. El significativo incremento de propiedades como resistencia mecánica, dureza, tenacidad, ductilidad a temperaturas altas (superplasticidad), coeficiente de expansión térmica, calor específico, resistividad eléctrica, difusividad, límites de solubilidad, reactividad química, permeabilidad magnética, etc; en comparación con los materiales policristalinos convencionales, han sido la motivación e incentivo para que muchos grupos de investigación alrededor del mundo centren sus esfuerzos en el desarrollo y caracterización de estos materiales. Últimamente, el desarrollo de mejores herramientas para el procesamiento y la caracterización de materiales no convencionales han impulsado aún más el avance de materiales UFG².

² (Meyers, Mishra, & Benson, 2006)

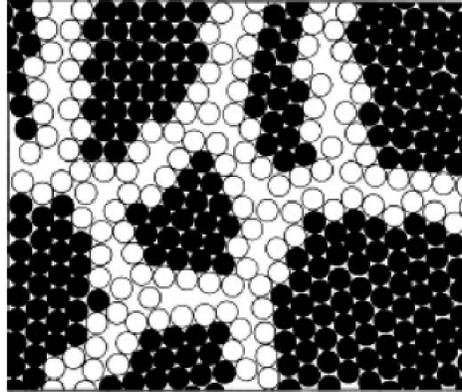


Figura 1. Representación esquemática de un material UFG²

Estos materiales además de proporcionar una excelente oportunidad para el estudio de la interacción cristalina y la relación entre estructura y propiedades en materiales sólidos, también muestran un atractivo potencial para aplicaciones tecnológicas, debido a sus notables propiedades. Manteniendo este incentivo presente, el objetivo es proporcionar una visión general de los procesos de deformación plástica severa para obtener materiales con tamaños de grano ultrafinos y su producción es por medio de SPD. A continuación se mencionan las principales técnicas SPD:

- Presión en Canal Angular Constante o ECAP (Equal-Channel Angular Pressing).
- Torsión en Alta Presión o HPT (High Pressure Torsion).
- Molienda / Aleado Mecánico o MM (Mechanical Milling).
- Forja Multidireccional o MDF (Multi-directional Forging).
- Unión por Laminación Acumulada o ARB (Accumulative Roll Bonding).

El proceso de ARB consiste en la reducción sistemática del espesor de una chapa por laminación. El material al pasar por un tren de laminación convencional es a continuación dividido en dos, ubicándose una parte sobre la otra para someterla nuevamente a laminación. Las caras enfrentadas son previamente desengrasadas y cepilladas para conseguir una buena unión. De esta manera, un conjunto de procesos de laminación, corte, cepillado, desengrasado y apilado se repiten varias veces hasta obtener una gran deformación acumulada en la lámina² más atrás.

Dentro de las variaciones del proceso está el calentamiento de la lámina siempre por debajo de su temperatura de recristalización. Una limitación importante en este proceso es la obtención de granos no equiaxiales, dependiendo de la dirección de laminación³.

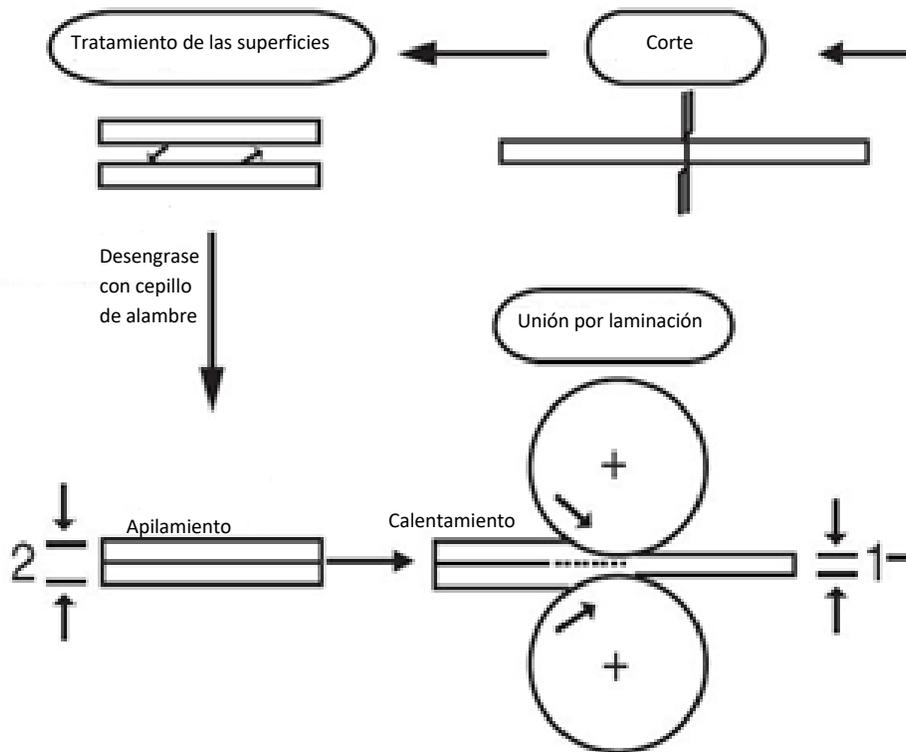


Figura 2. Esquema del proceso de ARB convencional¹

¹ (Saito, Utsunomiya, Tsuji, & Sakai, 1999)

³ (Zhu & Langdon, 2004)

3. Hipótesis

El nivel de deformación plástica severa, dada por el porcentaje de deformación de trabajo y el número de pasos a realizar el proceso, en las aleaciones de latón, realizadas por la unión por laminación acumulada (ARB) no son las óptimas para la unión de los materiales.

4. Objetivos

4.1. Objetivo general

Establecer una relación entre el nivel de deformación plástica severa (número de pasos y porcentaje de deformación), en las aleaciones de latón procesadas por unión por laminación acumulativa, considerando los parámetros de la temperatura de trabajo y el espesor del material.

4.2. Objetivos particulares

- Caracterizar mecánicamente la materia prima (lámina de latón 260).
- Calcular las condiciones de laminación necesarias para conseguir la unión por laminación acumulativa en función de las propiedades y dimensiones de las láminas de latón.
- Caracterizar metalográfica y mecánicamente los productos obtenidos antes y después del ARB.

5. Antecedentes

5.1. Proceso de Laminación

El proceso de deformar plásticamente un metal por el paso entre rodillos es conocido como laminación. Este trabajo mecánico es el más usado porque se presta a una alta producción y un control preciso del producto final. Una parte importante (del orden de 90% aproximadamente) de acero, aluminio, y cobre pueden pasar por la laminación al menos una vez durante una producción de materiales. Los objetivos principales de la laminación son el reducir la sección transversal del material entrante, para mejorar sus propiedades y el obtener la sección deseada a la salida. Se utilizan dos cilindros de trabajo que giran en direcciones opuestas los cuales se encargan de reducir la sección transversal. Este proceso puede llevarse a cabo a altas temperaturas y en condiciones al ambiente ($T=25^{\circ}\text{C}$) por lo que los procesos de laminación suelen clasificarse en caliente o frío.⁴

5.1.1. Laminadores

En su forma más elemental, un laminador está constituido por dos o más cilindros que giran en sentidos contrarios entre sí. La distancia entre las superficies cilíndricas enfrentadas es siempre menor que el espesor inicial del lingote, por lo que éste, al pasar entre los dos cilindros se aplasta y se alarga proporcionalmente a la reducción de sección. Durante el trabajo, el lingote queda sometido a la acción de una fuerza R , normal a la superficie de contacto, es decir, según un radio del cilindro como se muestra en la figura 3.

⁴ (Enriquez Berciano, Tremps Guerra, Fernandez Segovia, & Elío de Bengy, 2009)

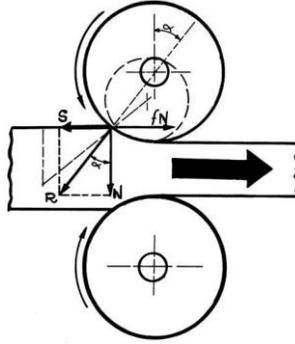


Figura 3. Esquema de un laminador⁴

Esta fuerza, que es la resultante de todas las fuerzas elementales que actúan sobre la superficie de contacto, puede descomponerse en dos⁴. Una es la componente horizontal o de estiramiento

$$S = R \cdot (\text{sen} \alpha) \dots \dots \dots \text{Ec.1}$$

La otra es la componente normal o de aplastamiento

$$N = R \cdot (\text{cos} \alpha) \dots \dots \dots \text{Ec.2}$$

Donde

N = Componente normal o de aplastamiento

S = Componente horizontal o de estiramiento

R = Fuerza que actúa el laminador con respecto al material

α = Ángulo de mordida del laminador

El avance del lingote es debido al rozamiento en la superficie de contacto, por lo que es necesario, para que este avance se produzca, cumplir la desigualdad:

$$(f \cdot N) > S \dots \dots \dots \text{Ec.3}$$

Siendo f el coeficiente de rozamiento entre cilindro y lingote. Si se cumple esta condición, se tiene una fuerza horizontal T:

⁴ (Enriquez Berciano, Tremps Guerra, Fernandez Segovia, & Elío de Bengy, 2009)

$$T = (f \cdot N) - S \dots \dots \dots \text{Ec.4}$$

Esta hace avanzar el lingote, mientras la componente N lo aplasta. Por efecto del aplastamiento y estirado, el metal adquiere una estructura estratificada en el sentido de la laminación. Si se disminuye el diámetro de los cilindros, la componente S crece. Por consiguiente, para satisfacer la desigualdad enunciada anteriormente, conviene cilindros pequeños que dan estiramientos más enérgicos y absorben menos potencia; en general, el diámetro de los cilindros varía entre 40 y 60 cm. La experiencia ha demostrado que los mejores resultados se obtienen con ángulo $\alpha=24^{\circ}$.

En la figura 4 se muestran en una vista espacial las fuerzas que actúan:

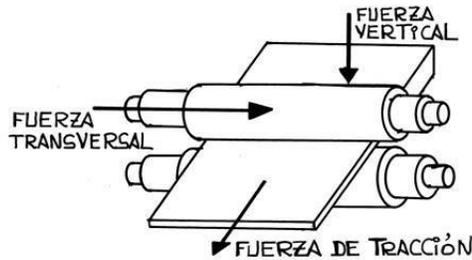


Figura 4. Fuerzas que actúan en la laminación⁴

El lingote, bajo la acción del laminado, además de aplastarse y alargarse, se ensancha, pasando de las dimensiones primitivas (a_1, h_1) a las nuevas (a_2, h_2). La experiencia enseña que el efecto de ensanchamiento es notablemente menor que el de aplastamiento. Parece que el ensanchamiento no es mayor que un 0.3 o 0.4 % del aplastamiento. Es de notar también que durante la laminación en caliente el lingote no se enfría, porque el trabajo de deformación de la estructura cristalina se transforma en calor⁴.

El objetivo de la laminación es producir una deformación permanente en el material de partida, aprovechando la ductilidad del material, que es mucho mayor en caliente. Para ello se hace pasar al material a laminar entre dos cilindros que giran a la misma velocidad y en sentido contrario y cuya separación es inferior al

⁴ (Enriquez Berciano, Tremps Guerra, Fernandez Segovia, & Elío de Bengy, 2009)

espesor del material de entrada. La presión que ejercen los cilindros sobre el material hace que se reduzca el espesor del mismo aumentando proporcionalmente, en consecuencia, la longitud del producto que emerge de los cilindros, de tal forma que se cumpla la ecuación:

$$V_f = \text{Sección de salida} \times L_f = V_i = \text{Sección de entrada} \times L_i = \text{Constante}$$

$$\text{Sección de salida} = \text{Base} \times h_f$$

$$\text{Sección de entrada} = \text{Base} \times h_i$$

$$V = \text{Base} \times h_f \times L_f = \text{Base} \times h_i \times L_i \dots \dots \dots \text{Ec.5}$$

Donde

V_f = Volumen final

V_i = Volumen inicial

L_f = Longitud final

L_i = Longitud inicial

h_f = altura final

h_i = altura inicial

Los laminadores se pueden clasificar en dos grandes grupos: los que laminan formas planas, constituidos por rodillos lisos y paralelos; y los que se utilizan para producir perfiles tales como: redondos, cuadrados, rieles, viguetas, canales y varilla; para lo que se utilizan rodillos con diferentes tipos de acanaladuras.



Figura 5. Molino de laminación IRM 4060 CINVESTAV Unidad Saltillo

5.1.2. Laminación en Caliente

La deformación plástica en caliente es el método más común para proveer al acero y otras aleaciones metálicas formas útiles. La principal ventaja de la deformación en caliente es que se pueden conseguir grandes deformaciones con poco o nulo endurecimiento por deformación. Como regla general, se dice que un material está sometido a trabajo en caliente cuando la temperatura es superior al 40% de la temperatura de fusión del mismo⁴.

$$T_{\text{Trabajo}} = 0.4 * T_{\text{Fusión}} \dots \dots \dots \text{Ec.6}$$

En términos metalúrgicos, el material está sometido a condiciones de alta temperatura cuando es capaz de restaurar y recristalizar. Los productos laminados en caliente se producen mediante un proceso termomecánico para reducción del espesor del planchón a altas temperaturas. Son utilizados para fabricación de ruedas, piezas automotrices y tubos, así como soleras, vigas para la construcción de edificios, puentes, ferrocarriles; chasis de automóviles y camiones. Entre sus características y desventajas encontramos las siguientes⁴:

- Posibilidad de altos porcentajes de reducción
- Deficiente acabado superficial
- Limitado control dimensional
- Menores cargas de deformación

⁴ (Enriquez Berciano, Tremps Guerra, Fernandez Segovia, & Elío de Bengy, 2009)

5.1.3. Laminación en Frío

El proceso de laminación en frío es usado para la producción de hojas y tiras con un acabado y tolerancias superiores en comparación con el laminado en caliente. Además, el endurecimiento por deformación resultante de la reducción en frío puede ser usado para dar mayor resistencia. Un mayor porcentaje de metales no ferrosos son trabajados en laminación en frío en comparación con los productos de acero laminado. La reducción total conseguida por laminación en frío generalmente variará de aproximadamente 50 a 90 por ciento. En el establecimiento de la reducción en cada pasada, es deseable distribuir el trabajo tan uniformemente como sea posible sobre los diversos pases sin caer muy por debajo de la reducción máxima para cada pase. En general, el porcentaje de reducción más baja se toma en el último pase para permitir un mejor control del calibre y el acabado superficial, las características y desventajas que podemos tener durante este proceso son las siguientes⁴.

- Buen acabado superficial
- Buen control dimensional
- Bajo porcentaje de reducción posible.
- Se hace necesario realizar un tratamiento térmico de recocido para aliviar tensiones por deformación plástica en frío (acritud o endurecimiento en frío).

5.1.4. Fuerzas durante el Proceso de Laminación

Durante el proceso de laminación la fuerza que se necesita para la deformación está dada por los rodillos. Esta fuerza es distribuida en forma de presión sobre el área de contacto, esta presión no se distribuye de manera uniforme, por el contrario lo hace de forma variable a lo largo de toda el área de contacto, la

⁴ (Enriquez Berciano, Tremps Guerra, Fernandez Segovia, & Elío de Bengy, 2009)

presión y la fricción crecen hasta un máximo en el plano neutro y luego disminuyen formando la colina de fricción¹.

El ángulo formado entre el centro del rodillo y el plano entrante es llamado ángulo de mordida o de contacto (α) y se calcula por medio de la Ec. 7.

$$\alpha = \text{ArcCos} \left(1 - \frac{h_1 - h_2}{D} \right) \dots \dots \dots \text{Ec.7}$$

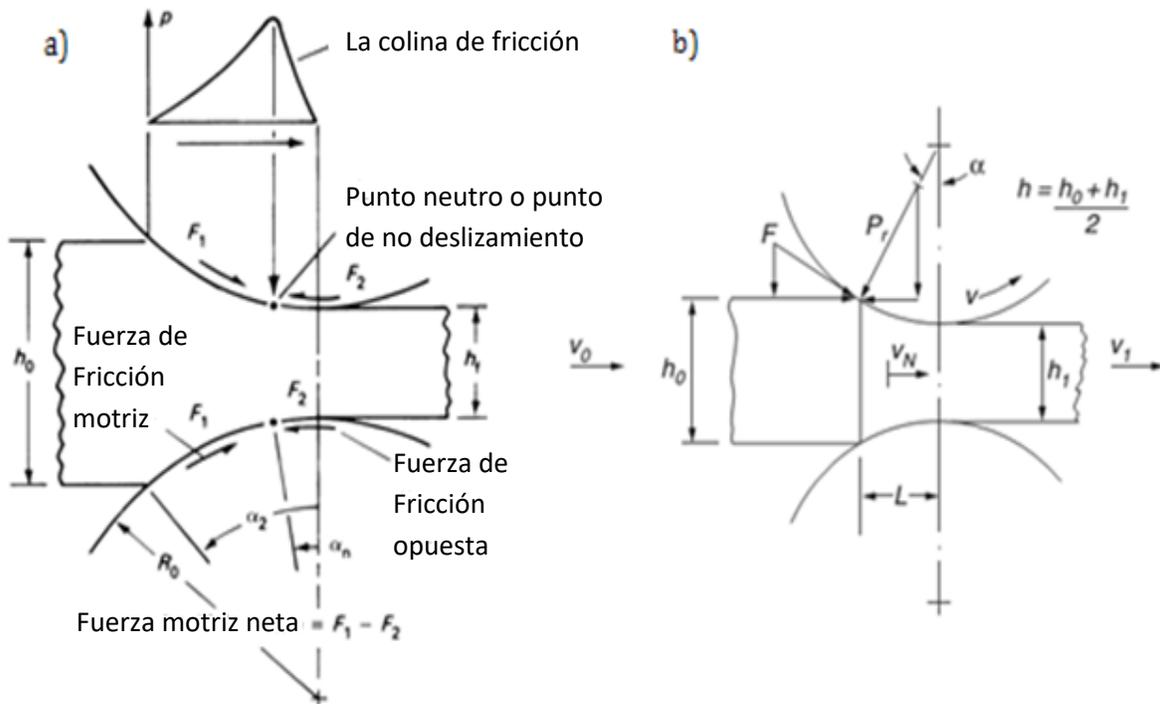


Figura 6. Fricciones y condiciones durante la laminación⁵

Dónde:

α = Ángulo de Mordida

h_1 = Espesor inicial

h_2 = Espesor final

D = Diámetro de los rodillos

¹ (Saito, Utsunomiya, Tsuji, & Sakai, 1999)

⁵ (Li, Nagai, & Yin, 2008)

Para que una pieza pueda entrar al rodillo, la componente horizontal de la fuerza de fricción debe ser mayor o igual a la componente horizontal de la fuerza del rodillo como se puede ver en las Ec. 8-12.

Condición de entrada

$$F \cos \alpha \geq F_f \sin \alpha \dots\dots\dots\text{Ec.8}$$

Reescribiendo la ecuación

$$\frac{F}{F_f} \geq \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \tan \alpha \dots\dots\dots\text{Ec.9}$$

Relación física entre F y F_f

$$F = \mu F_f \dots\dots\dots\text{Ec.10}$$

Despejando μ

$$\mu = \frac{F}{F_f} \dots\dots\dots\text{Ec.11}$$

Condición de laminación

$$\mu \geq \tan \alpha \dots\dots\dots\text{Ec.12}$$

Dónde:

μ = Es el coeficiente de fricción

α = Ángulo de mordida

Si se requiere conocer el esfuerzo necesario para deformar el material se realiza el cálculo a partir de la siguiente ecuación:

$$\sigma_c = 1.155 \sigma_y \dots\dots\dots\text{Ec.13}$$

Dónde:

σ_c = esfuerzo para deformar el material

σ_y = esfuerzo de cedencia

Con lo que se podría realizar el cálculo de la fuerza requerida para esta deformación que se hace a partir de la Ec.14 en la que interviene el área de contacto que se obtiene por medio de la Ec.15

$$F = A_d \times \sigma_c \dots\dots\dots\text{Ec.14}$$

$$A_d = l_d \times b_m \dots\dots\dots\text{Ec.15}$$

Dónde:

F = Fuerza requerida

A_d = Área de contacto

σ_c = Esfuerzo para deformar el material

l_d = Longitud de contacto

$b_m = \frac{1}{2} (b_i + b_f)$

b_i = Ancho inicial

b_f = Ancho final

5.2. Mecanismos de Endurecimiento

Existen cuatro mecanismos principales para endurecer un material:

- Endurecimiento por refinamiento de grano
- Endurecimiento por solución sólida
- Endurecimiento por deformación
- Endurecimiento por segundas fases (Agregados o dispersas)

Pero al hablar de un proceso de laminación o de deformación plástica volumétrica sólo se aplican dos métodos de endurecimiento⁶.

⁶ (Askeland, 1998)

5.2.1. Endurecimiento por refinamiento de grano

El hacer más fino el tamaño de grano, significa que se tendrán más fronteras de grano, y cada límite de grano es un obstáculo para la movilidad de dislocaciones, por lo cual el material se hace más resistente y más duro. Todo esto regido por medio de la relación Hall-Petch.

$$\sigma_y = \sigma_i + kd^{-1/2} \dots\dots\dots Ec.16$$

Dónde:

σ_y = Resistencia a la tracción

σ_i = Esfuerzo de fricción de la red

k = Constante que indica cedencia

d = Tamaño de grano

5.2.2. Endurecimiento por deformación

Este fenómeno ocurre durante la deformación en frío, a temperaturas alejadas de la temperatura de recristalización. A medida que un material se deforma plásticamente, la densidad de dislocaciones se incrementa, por lo tanto la distancia media entre deslizamientos se reduce, en general las interacciones entre dislocaciones son repulsivas, por lo que cada vez hay menos espacio libre para generar nuevas dislocaciones. De igual manera, ante tal concentración de dislocaciones, la movilidad de las mismas se reducirá, incrementando la resistencia y endureciendo el material pero haciéndolo menos dúctil.

Es importante recordar que durante los procesos de laminación en frío existen tres procesos internos de suma importancia que son: la recuperación; la cual causa una disminución de dislocaciones en la microestructura, la recristalización consta en la formación de nuevos granos libres de deformación, que van sustituyendo a los que están deformados, y por último, el crecimiento de grano es cuando los

nuevos granos formados van creciendo hasta alcanzar un cierto tamaño uniforme en todo el material⁶.

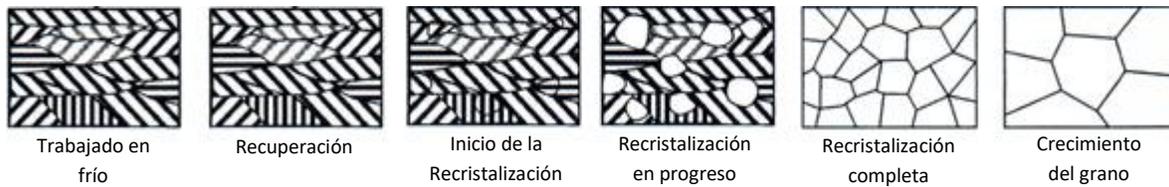


Figura 7. Etapas de la laminación en frío⁶

5.3. Latón

El latón en esencia, es una aleación de cobre y zinc, algunas de las cuales tienen cantidades pequeñas de plomo, estaño o aluminio. Al variar las composiciones de la aleación darán como resultado las características de color, resistencia, ductilidad, maquinabilidad, resistencia a la corrosión deseada o una combinación de estas propiedades⁷. La siguiente figura es el Diagrama de Fases del Latón, el cual dependiendo de cuanto Zn haya en la matriz de Cu, es la microestructura que tendría el latón, variando sus propiedades.

⁶ (Askeland, 1998)

⁷ (Pero & Elorz, 2006)

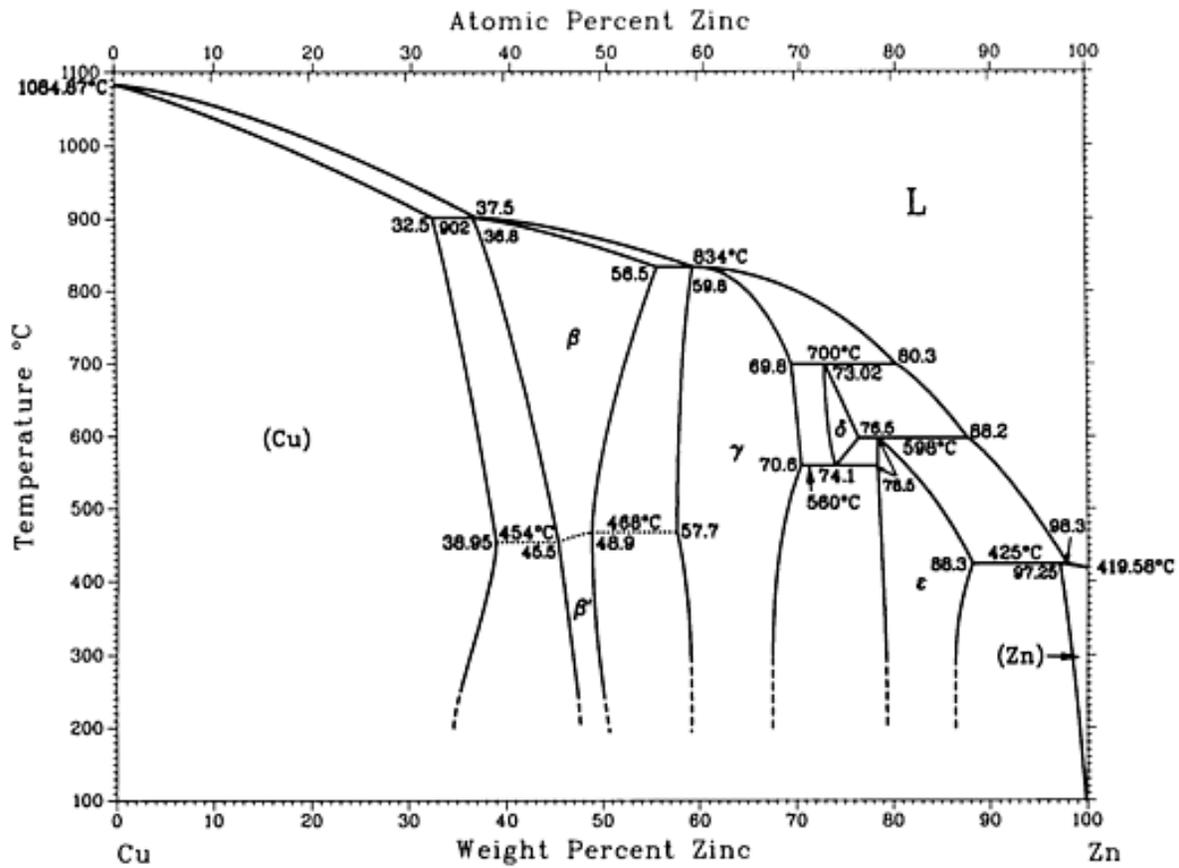


Figura 8. Diagrama de Fases de Cu-Zn⁸

En la mayoría de los casos, la adición de elementos en solución sólida tiende a disminuir la ductilidad junto con la resistencia. La mejor combinación de resistencia y ductilidad se obtienen en un latón 70Cu-30Zn⁹. Los latones comerciales se dividen en dos grupos: latones para trabajo en frío (latones α) y latones para trabajo en caliente (latones α + β)

5.3.1. Latones α o para trabajo en frío

Estos latones pueden tener hasta un 36% de zinc en la matriz de cobre, por lo que poseen relativamente buena resistencia a la corrosión y buenas propiedades de trabajo. El color de los latones varía de acuerdo con el contenido del cobre, desde rojo en las aleaciones con alto cobre, hasta amarillos en los contenidos de 62% de cobre. Los latones α se pueden dividir en dos grupos

⁸ (International, 2004)

⁹ (Avner, 1988)

5.3.1.1. Latones amarillos

Los latones amarillos contienen entre un 20% y 36% de zinc, combinan la buena resistencia con la alta ductilidad y, por lo tanto, son adecuados para efectuar drásticas operaciones de trabajo en frío. Lo común que se les realiza es un revenido para liberar esfuerzos residuales que contengan estos latones ya que pueden presentar después de un severo trabajado en frío fisuras intercristalinas, las cuales aparecen algunas veces después de muchos años.

5.3.1.2. Latones rojos

Los latones rojos contienen entre un 5% y 20% de zinc, generalmente tienen mejor resistencia a la corrosión que los latones amarillos y no son susceptibles a la presencia de fisuras por esfuerzos de corrosión o dezincificación. Los latones al bajo zinc más comunes son el oropel, el latón bajo y el latón rojo.

5.3.2. Latones $\alpha + \beta$ o para trabajo en caliente

Estos latones tienen entre un 54 a 62% de cobre. Estas aleaciones son difíciles de trabajarlas en frío debido a que la fase β a temperatura ambiente es frágil y dura; por lo que su trabajo debe ser exclusivo en caliente. Los latones que son más empleados con estas fases son el metal muntz, latón de alta maquinabilidad, latón naval, entre otros; su uso más común es en la marina por su alta resistencia a la corrosión. La siguiente figura muestra la microestructura del latón Muntz.

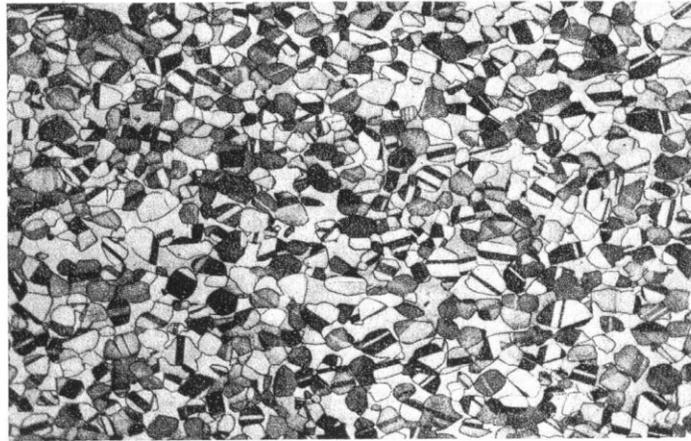


Figura 9. Estructura de dos fases del metal muntz recocido⁹

5.4. Latón C26000 (70/30)¹⁰

Tabla 1. Propiedades mecánicas del latón C26000

Temple	UTS		Esfuerzo de Cedencia		Elongación en 50 mm (2 in.) %	Dureza		Esfuerzo de Corte		Esfuerzo de Fatiga		Condición del Material
	MPa	ksi	MPa	ksi		HRF	HR30T	MPa	ksi	MPa	ksi	
OS100	300	44	75	11	68	54	11	215	31	90	13	Tamaño de grano promedio 0.100 mm
H04	525	76	435	63	8	82 HRB	73	305	44	145	21	duro

El latón C26000 o latón de cartucho presenta una combinación óptima de resistencia mecánica y de aptitud al martilleo en frío. En la tabla anterior se observan los esfuerzos de cedencia, de corte, fatiga, el esfuerzo máximo (UTS) y la elongación máxima que puede llegar a tener este material y que condiciones presenta estas propiedades. El recocido clásico para el latón se efectúa entre los 425 y 700°C. Estudios efectuados en este material ha demostrado, que era posible

⁹ (Avner, 1988)

¹⁰ (International, 2001)

obtener una recristalización muy fina a una ductilidad relativamente alta realizándola por medio de un recocido cuidadoso; esta operación consiste en mantener el latón, necesariamente muy martilleado en frío a una temperatura constante entre 250 y 700°C, durante un tiempo determinado que depende de la deformación inicial. Así es posible realizar combinaciones de dureza y de resistencia a la tracción equivalente a la que se obtienen por simple martilleo en frío, pero presentando alargamientos relativamente dobles. La siguiente figura muestra como es el comportamiento de la dureza contra la Temperatura y cómo es que afecta el crecimiento del grano¹¹.

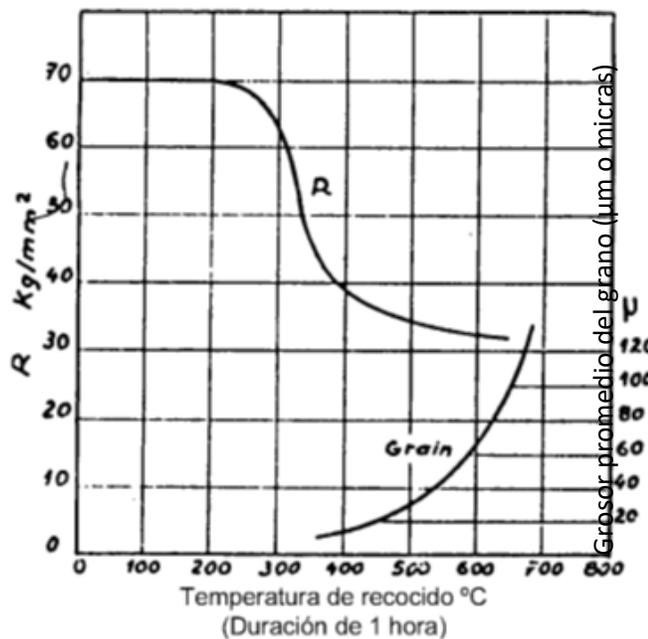


Figura 10. Influencia de la temperatura de recocido sobre la carga de ruptura y el grosor del grano¹¹

La temperatura de trabajo en caliente está comprendida entre 725 y 850°C; a pesar de esto, la capacidad de forjado es bastante débil, pero también lo es para todos los latones monofásicos ricos en zinc.

Sus propiedades mecánicas aumentadas, junto con una gran maleabilidad, ofrecen al latón un campo de aplicación extremadamente vasto: radiadores de

¹¹ (Whitwham & Herenguel, 1962)

automóviles, reflectores, soquetes de lámparas, instrumentos musicales, adornos de ropa, tornillos enroscados y golpeados, entre otros.

En la siguiente figura muestra el comportamiento de la dureza en diferentes escalas contra el diámetro de los granos (promedio) y la deformación que puede tener¹¹.

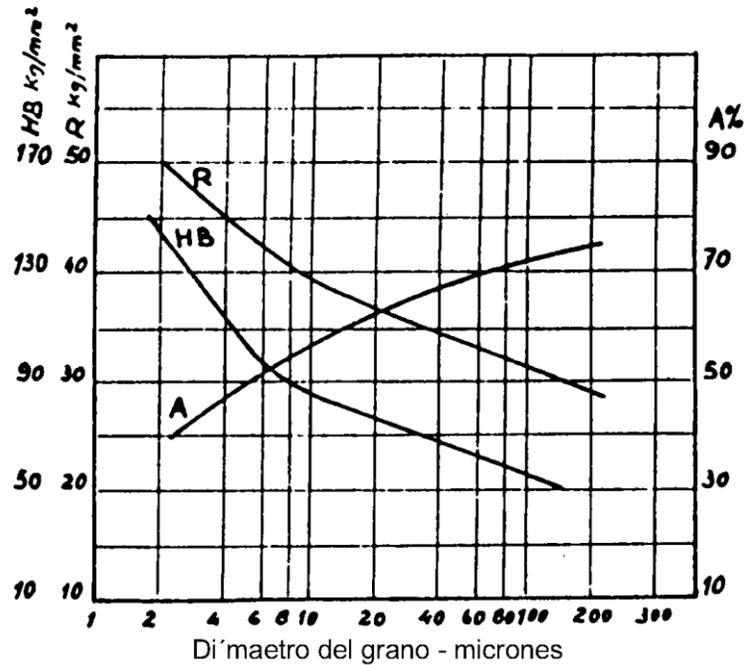


Figura 11. Influencia del grosor del grano sobre las características mecánicas¹⁰

¹⁰ (Whitwham & Herenguel, 1962)

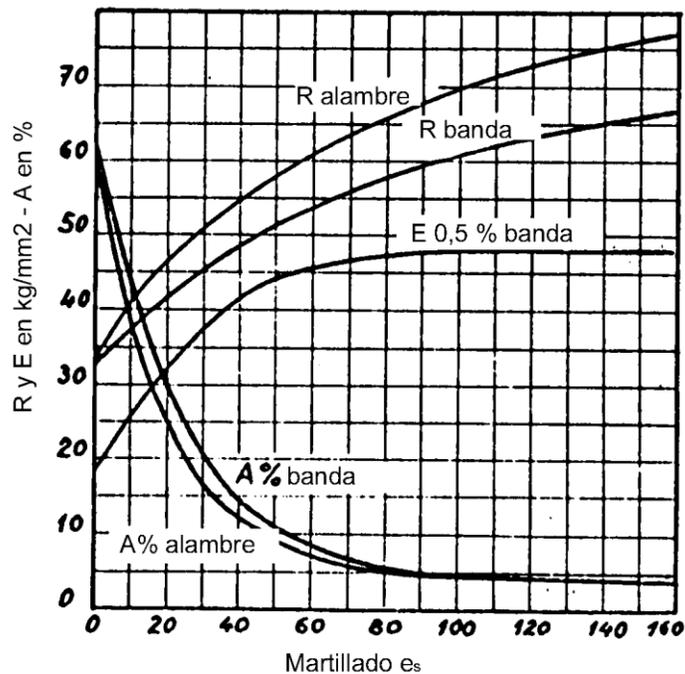


Figura 12. Diagrama de martilleo en frío¹¹

En la figura anterior se muestra el comportamiento del latón cuando se le aplica martilleos, dependiendo de la cantidad que se le proporcione de esta acción al material va a variar su dureza, su esfuerzo y la deformación que tendría; dependiendo de la forma del material¹¹.

5.5. Proceso de Deformación Plástica Severa

La deformación plástica severa (SPD) de materiales metálicos ha sido uno de los temas más investigados en el campo de la ciencia y la ingeniería de materiales en la última década. Se han hecho muchos esfuerzos recientemente para producir materiales metálicos estructurales que tengan tamaños de grano submicro o nanométricos, ya que se espera que los materiales UFG posean propiedades mecánicas superiores a los convencionales. Esta es una de las maneras prometedoras para producir materiales UFG con forma voluminosa. Se han

¹¹ (Whitwham & Herenguel, 1962)

propuesto diversos tipos de procesos SPD especiales, y algunos de ellos han tenido éxito en la producción de materiales UFG¹.

Los materiales obtenidos con tamaños de grano submicro o nanométrico generalmente presentaron una resistencia muy alta en comparación con los materiales que tienen tamaños de grano convencionales mayores que varían en decenas de micrómetros. Sin embargo, todavía hay pocos datos sistemáticos sobre las propiedades mecánicas de los materiales UFG en función del tamaño del grano. Una de las razones de esta falta es la dificultad para obtener suficiente cantidad de muestras de ensayo mecánico que tienen microestructuras de UFG. Su producción por medio de SPD tiene un gran potencial para aplicaciones a escala industrial, ya que emplea equipos y herramientas con una gran similitud a los procesos de manufactura convencional. Por lo tanto, al implementarlos no es necesario incurrir en altas inversiones.

5.6. Aplicaciones

Las aplicaciones de materiales UFG están siendo gobernadas por dos factores principalmente: Sus propiedades y la facilidad de manufactura que ofrecen respecto a materiales de tamaño de grano convencional.

5.6.1. Aplicaciones derivadas a sus propiedades

La producción y aplicación actual de metales no ferrosos estructurales como el Al y el Cu es muy alta. Este tipo de materiales han sido procesados por SPD con éxito, obteniendo propiedades mecánicas antes inimaginables. Considerando aplicaciones muy sensibles al factor peso como aviones, automóviles, barcos y bicicletas; es totalmente razonable pensar en lo atractivo que sería poder producir considerables volúmenes de aluminio y cobre de UFG. Un ejemplo sencillo son los componentes de una bicicleta de alta competición, tanto de montaña como de pista, donde fabricar componentes estructurales significaría una disminución importante en el peso de la bicicleta, además de un ahorro económico al sustituir los costosos materiales de fibra de carbono. Otra aplicación importante de metales

¹ (Saito, Utsunomiya, Tsuji, & Sakai, 1999)

UFG procesados por SPD se encuentra en la industria de aparatos médicos. Esta industria soportada por el creciente interés social de elementos que extiendan y mejoren la calidad de vida, posee un alto nivel de innovación en materiales avanzados. Un buen ejemplo, son los implantes para soportar la óseo-integración de huesos fabricados en Ti nanocristalino (NC). La demostrada mejora en la resistencia a la fatiga del Ti NC es particularmente atractiva en el uso de implantes médicos hechos de aleaciones de titanio. Otro ejemplo de mayor interés es el uso de Ti NC para implantes dentales. Los Implantes típicos tienen como mínimo 3 mm de diámetro debido a los severos ciclos de carga asociados a la acción de masticar. La introducción de Ti NC significa una alta resistencia a la fatiga, siendo posible reducir a 2 mm el diámetro del implante. Considerando el tamaño del diente, esta reducción significa un alto porcentaje del diente que no será necesario eliminar².

5.6.2. Aplicaciones derivadas de su fácil manufactura

Los procesos de forja son comúnmente empleados para la fabricación de piezas en la industria aérea y automotriz. Debido a la superplasticidad de los materiales UFG, las temperaturas de forja pueden ser reducidas significativamente; además de permitir la obtención de piezas cercanas a su geometría final, reduciendo los costosos procesos de mecanizado. En la industria automotriz, el conformado de láminas requiere asimilar formas complejas con múltiples caras curvas. Por tal motivo son necesarios temperaturas por encima del 50% del punto de fusión de la lámina y velocidades de deformación inferiores a 10^{-3} s^{-1} . La introducción de aleaciones UFG podría facilitar la optimización de este proceso gracias a las propiedades de superplasticidad a bajas temperaturas y altas velocidades de deformación. Se ha establecido que la velocidad de flujo en el régimen superplástico varía con el tamaño de grano en una relación de 2. Es decir que la reducción de tamaño de grano en un orden de magnitud lleva a un incremento en la velocidad óptima de deformación en dos órdenes de magnitud. Por tanto, el tiempo total de formado se puede reducir considerablemente. Por ejemplo,

² (Meyers, Mishra, & Benson, 2006)

Langdon 2001, reportó alargamientos en ensayos de tracción hasta un 2000% a una velocidad de deformación 1 s^{-1} , en una aleación Zn – Al procesada por ECAP.

5.7. Unión por Laminación Acumulativa (ARB)

La técnica de ARB hace uso de la infraestructura convencional de laminación. Un material es laminado para que su espesor se reduzca a la mitad de este en condición inicial. Después la lámina es cortada en dos mitades iguales que son apiladas. Debido a que se requiere una buena unión entre las dos láminas apiladas, las caras en contacto son desengrasadas y cepilladas con un cepillo de alambre antes de ser apiladas para luego ser laminadas de nuevo a un espesor del 50%. Así, una serie de operaciones de laminado, corte, cepillado y apilado son repetidas para que un gran esfuerzo sea acumulado en la lámina resultante. Ya que es necesario lograr una gran reducción en un solo paso, para lograr una buena adherencia entre las láminas, la unión por laminación es llevada a cabo sin lubricación para realizar una rápida formación de UFG, la fuerza de laminado durante este proceso se vuelve muy grande. Es bien sabido que la deformación del umbral disminuye con la temperatura. Si la temperatura homóloga de la unión por laminación es inferior a 0.5, se puede lograr una unión por reducción $> 50\%$. Esto significa que los materiales pueden unirse sin recristalización. El proceso puede introducir una deformación plástica muy alta sin ningún cambio geométrico, si la reducción de espesor se mantiene al 50% en cada paso de laminación, porque el aumento de ancho es insignificante en la laminación de la hoja. La deformación obtenida es ilimitada, ya que los tiempos de repetición son infinitos en principio. La deformación arbitrariamente grande es posible mediante el proceso ARB⁵. Cuando la reducción es del 50% por ciclo, el espesor de la tira inicial después de N ciclos es:

$$t = \frac{t_0}{2^n} \dots\dots\dots \text{Ec.17}$$

Donde

⁵ (Li, Nagai, & Yin, 2008)

t_0 = grosor inicial de las tiras.

La reducción total r_t después de n ciclos es:

$$r_t = 1 - \frac{t}{t_0} = 1 - \frac{t}{2^n} \dots\dots\dots \text{Ec.18}$$

Asumiendo el criterio de cedencia de von Mises y la condición de deformación plana, es decir, no se extiende lateralmente, la deformación plástica equivalente ε se expresa mediante:

$$\varepsilon = \left\{ \frac{2}{\sqrt{3}} \ln \left(\frac{1}{2} \right) \right\} \times n = 0.80n \dots\dots\dots \text{Ec.19}$$

Algunas de las ventajas de utilizar el proceso de unión por laminación acumulada son:

1. No se requiere una infraestructura con alta capacidad de carga o dados de alto costo
2. La productividad puede ser mayor
3. La cantidad de material a producirse no está limitado

Este método es el único apropiado para la producción de placas y láminas con tamaño de UFG y nanocristalinos, las cuales son la forma más utilizada de materiales de manera comercial e industrial debido a su viabilidad como un proceso continuo. Las láminas procesadas por ARB por lo regular poseen una alta resistencia de dos a cuatro veces más alta que el material inicial de grano grueso. La unión por laminación acumulada no solo se considera un método de deformación sino que también es un proceso de unión por lo cual se pueden producir compósitos laminares de distintas aleaciones. En cada ciclo de ARB, la unión en las interfaces se vuelve mejor. En la práctica, la estructura de tamaño de UFG producida por ARB no es equiaxial tridimensionalmente, sino que es una estructura alargada en dirección hacia el laminado. Este tipo de microestructura es indiferente del tipo de metal o aleación procesada. La microestructura resultante después de uno o dos pases de laminado muestra microestructuras deformadas compuestas de celdas de dislocaciones y subgranos. Después de tres pases, la

estructura de límites laminares aparece, la cual es típica de materiales altamente laminados, arriba de cinco pases se tiene una microestructura laminar uniforme de límites ultrafinos.

6. Metodología.

6.1. Previos al proceso de laminación

Antes de realizar el proceso de ARB, se hicieron cálculos de carga óptima para que el proceso se lograra con éxito.

Los cálculos necesarios se realizaron a partir de las siguientes ecuaciones:

$$h_1 = h_0 - \left[\frac{\% \varepsilon}{100} * h_0 \right] \dots \dots \dots \text{Ec.20}^{12}$$

$$L_p = \sqrt{R \Delta h} \dots \dots \dots \text{Ec.21}$$

$$\tan \alpha = \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \dots \dots \dots \text{Ec.22}$$

$$\alpha_{max} = A \tan(\mu) \dots \dots \dots \text{Ec.23}$$

$$\sigma_0 = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_y \dots \dots \dots \text{Ec.24}$$

$$\Delta h_{max} = \text{sen} \alpha_{max}^2 * R \dots \dots \dots \text{Ec.25}$$

$$P = 1.2(\sigma_0 * L_p * b) \dots \dots \dots \text{Ec.26}$$

¹² (Dieter, Bacon, & Wilkes, 1988)

Dónde:

h_1 =espesor final en mm

h_0 =espesor inicial en mm

$\% \epsilon$ =Deformación en porcentaje

L_p =Longitud proyectada del arco de contacto en mm

α =Angulo de mordida entre la pieza y el molino

μ =Coeficiente de fricción

σ_0 =esfuerzo de laminación en MPa

σ_y =esfuerzo de cedencia en MPa

R =radio de los rodillos en mm

P =carga de los rodillos en N

b =ancho de la pieza en mm

Se prepararon dos muestras de latón, una de ellas siendo la pieza de llegada y otra se sometió a un tratamiento de recocido a 850°C para observar cuál de las dos piezas es capaz de llegar a la unión sin problema alguno. Durante esta etapa, se desarrollaron tablas y gráficas en las cuales se especifica las zonas óptimas de trabajo con base en las especificaciones de trabajo del molino; se mandaron a hacer cuatro piezas para estudiar su tensión, con el apoyo de la maquina universal de ensayos Microtester, y veinte mediciones de durezas previos, con el propósito de tener valores iniciales antes de realizar el proceso de laminación. También se realizó una metalografía de cada pieza a la cual se le realizó el ensayo de tensión, para observar su microestructura y tener piezas “testigos” antes del proceso de ARB. Las medidas para las muestras están mostrando con un esquema aproximado de las piezas a trabajar.

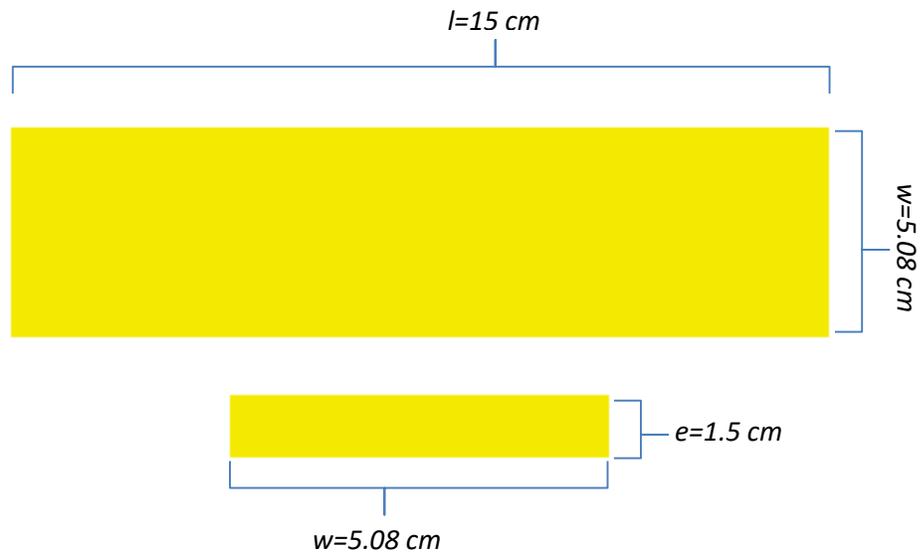


Figura 13. Esquema de las dimensiones de las piezas de latón a trabajar en el proceso ARB.

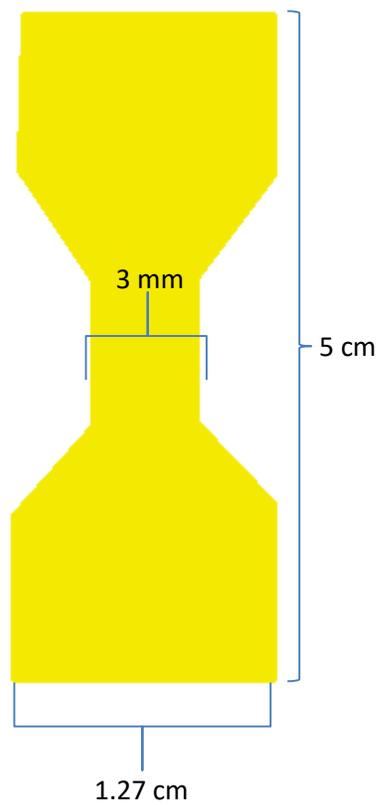


Figura 14. Esquema de las dimensiones de las piezas de latón a realizar los ensayos de tensión.

Para la medición de la dureza se utilizó un medidor con la escala Rockwell 30T y a partir de este se hizo la conversión a la escala Rockwell B y, si fuera posible, a escala Rockwell C.

Las condiciones de la maquina universal de ensayos Microtester tiene las especificaciones siguientes:

Tabla 2. Condiciones del molino para laminar

	Cantidad	Unidad
Carga (doble husillo)	5000	N
Celda de Carga	2000	N
Extensómetro	20	mm
Velocidad	0.1-1	mm/min

6.2. Proceso de Laminación

Los parámetros de trabajo del molino fueron las siguientes:

Tabla 3. Especificaciones del molino para laminar

Tamaño de Rodillos	10.16 cm ancho	15.24 cm diámetro
Material de Rodillos	Acero herramienta D2 HRC=60-62	
Requisitos de energía	220 V	15 A
Motor	5 HP	
Fuerza de separación del molino	40000 Lb-f	
Celdas de carga	20000 LBS	

Durante la laminación, primero se verificó que las condiciones que se obtuvieron previamente en los cálculos se aplicaran para el proceso; dado que hubo variaciones con el material de llegada con el que se le hizo un tratamiento de recocido, se propuso primero, utilizar las piezas que se les realizó previamente el tratamiento de recocido, en vez de usar las piezas que no fueron tratadas térmicamente, después se decidió cambiar el ancho de las piezas de 5.08 cm a 1.27 cm para disminuir el área de contacto de las piezas.

Tabla 4. Condiciones del primer tratamiento térmico

T _{Trabajo}	t _{Calentamiento}	t _{Enfriamiento}	Tratamiento Térmico
850°C	2 hora	5 – 8 horas	Recocido

A partir de estos nuevos parámetros se buscó la temperatura de trabajo para el proceso, para ello se calentaron 12 piezas previamente por 5 minutos a las siguientes temperaturas:

1. T1 (°C)=150
2. T1 (°C)=250
3. T1 (°C)=350
4. T1 (°C)=450
5. T1 (°C)=550
6. T1 (°C)=650

Posteriormente de ser calentadas, pasaron por el molino de laminación una vez para verificar si lograron una unión exitosa, y finalmente a cada par de piezas estudiadas para el proceso ARB calentadas previamente se les realizó mediciones de durezas para comparar sus durezas.

6.3. Unión por Laminación Acumulada

Para la realización del proceso ARB se trabajó a la temperatura de 250°C la cual de todas fue la más eficiente en las pruebas anteriores para este proceso. Antes de calentar las piezas a la temperatura de trabajo se hizo previamente la limpieza de las piezas, la cual es cepillar las superficies a unir y limpiar esas mismas superficies con Acetona; la velocidad del molino a las cual se trabajó es al 60% de capacidad total del molino para conseguir el 60% de deformación de las piezas. Cada paso de deformación fue de aproximadamente 1.27 cm. Se utilizaron 4 piezas para este proceso y el número de pasos que se realizaron fue variado para igualmente verificar que cantidad de pasos a laminar era el necesario para la unión. Posteriormente se prepararon muestras de las placas laminadas para analizar su microestructura y medir durezas de las mismas piezas para observar su comportamiento y posteriormente se les realizó un tratamiento térmico de recocido para observar el comportamiento de las piezas.

Tabla 5. Condiciones del segundo tratamiento térmico

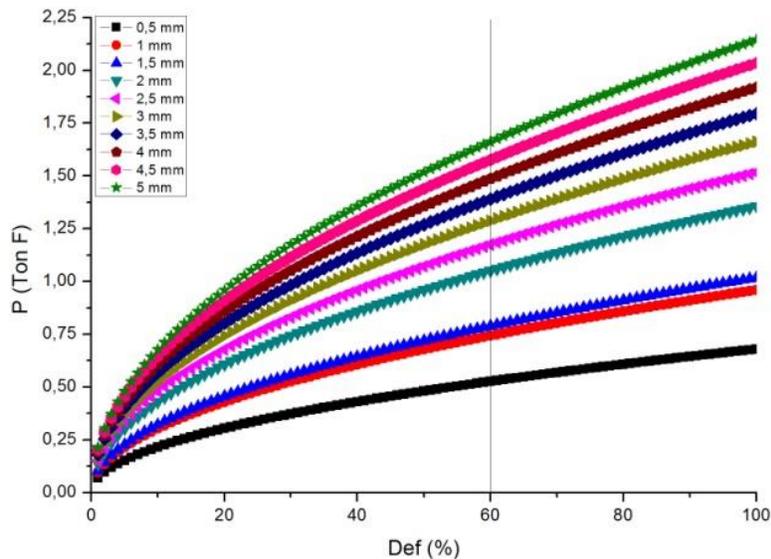
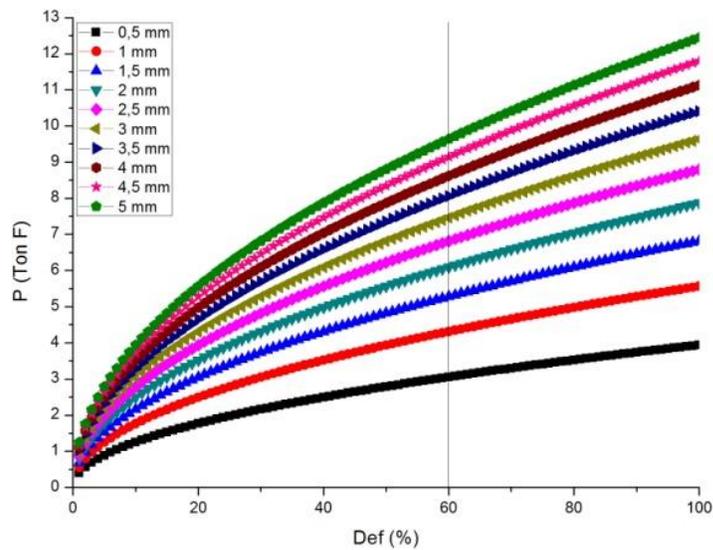
T _{Trabajo}	t _{Calentamiento}	t _{Enfriamiento}	Tratamiento Térmico
750°C	2 hora	5 – 8 horas	Recocido

Los resultados numéricos se graficaron con el apoyo del programa Origin 8, mientras que los resultados visuales se observaron con la ayuda de un microscopio. Para la revisión de la microestructura de los materiales a analizar fueron lijadas y pulidas para finalmente ser atacadas superficialmente en la zona pulida con FeCl₃ 0.1 M.

7. Resultados

7.1. Previos al proceso de laminación

Las gráficas que siguen muestran la tendencia de crecimiento de carga al querer obtener una mayor deformación de las piezas, éstas gráficas son sólo una representación teórica, a partir de cálculos matemáticos, para obtener la carga necesaria para tener 60% de deformación de las piezas y con ello unir las.



Figuras 15 y 16. Gráficas de % de deformación vs Carga en piezas de latón de llegada (arriba) y de recocido (abajo).

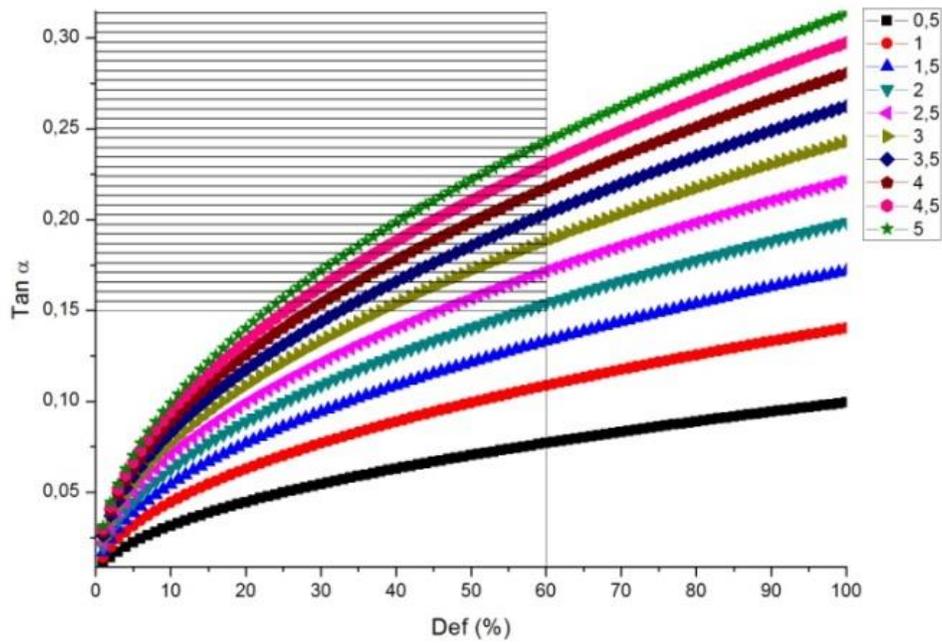


Figura 17. Gráfica de % de deformación vs Tangente de α en piezas de latón.

En la gráfica anterior se determinó, por medio de cálculos matemáticos, el ángulo de contacto de los molinos con las piezas, y de igual manera, se busca el mejor ángulo de contacto a partir de querer que las piezas alcancen el 60% de deformación.

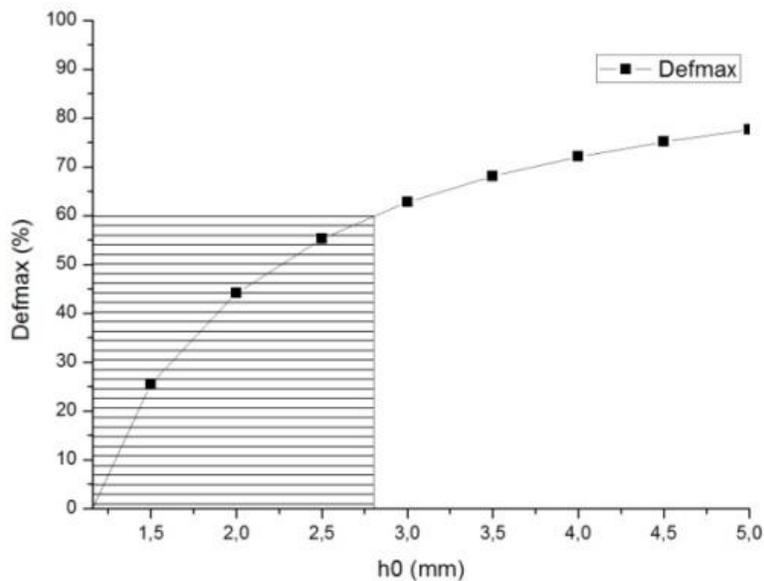
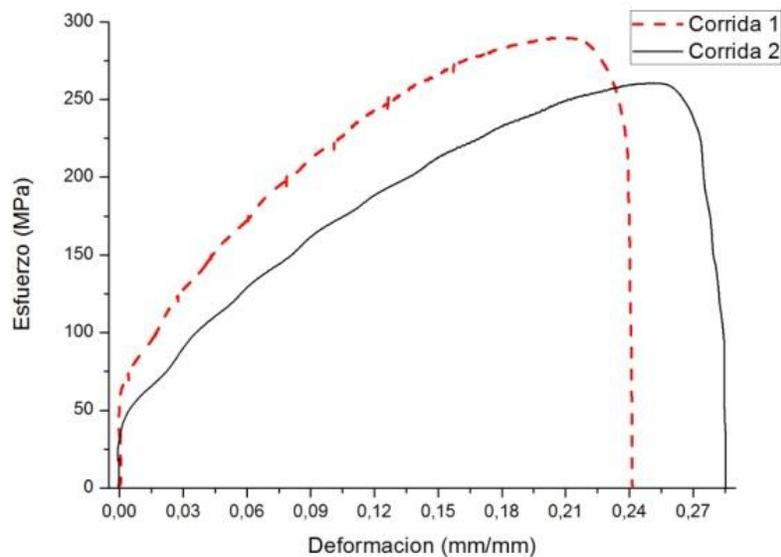
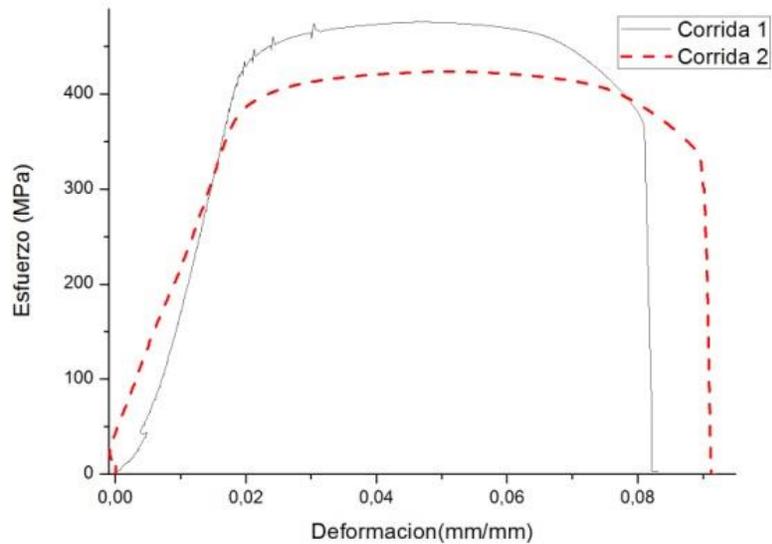


Figura 18. Gráfica de espesor vs % de deformación máxima de latón.

En la gráfica superior se observa que para obtener el 60% de deformación, los espesores de las piezas a deformar deben ser mínimo de 2.75 mm para poder efectuar el porcentaje de deformación deseada.

7.1.1. Curvas de Esfuerzo vs Deformación de latón

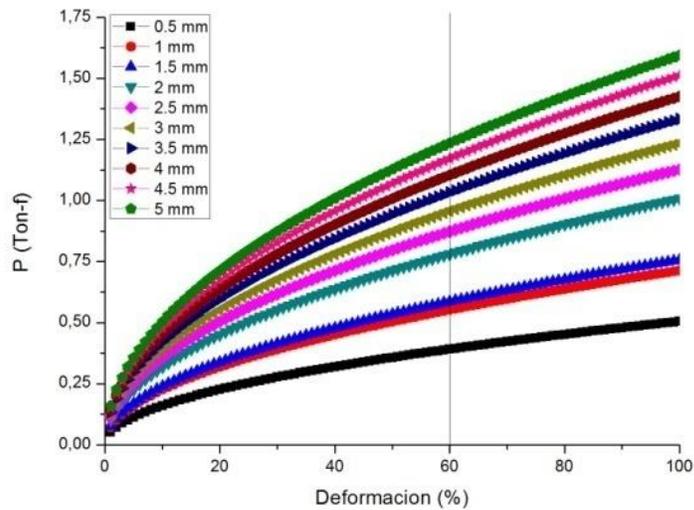
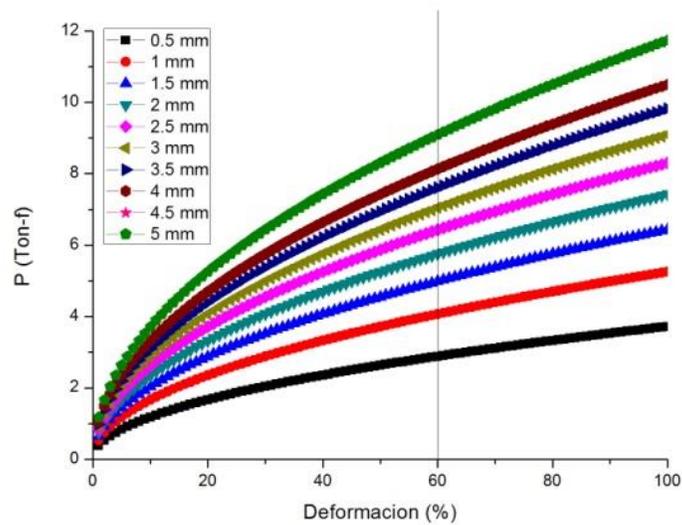


Figuras 19 y 20. Curvas de esfuerzo vs deformación en piezas de latón de llegada (arriba) y de recocido (abajo) de las cuatro piezas.

7.1.2. Datos reales basados en las curvas de Esfuerzo vs Deformación

Tabla 6. Esfuerzos de cedencia y de laminación de piezas de la primera corrida del ensayo de tensión.

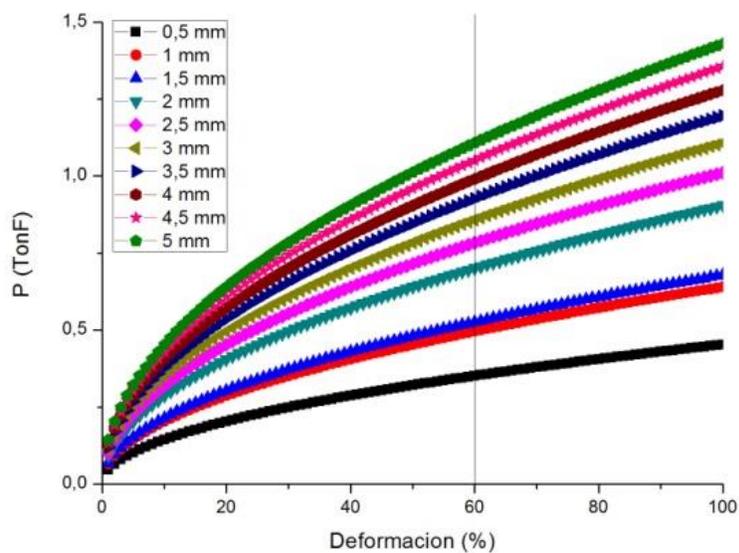
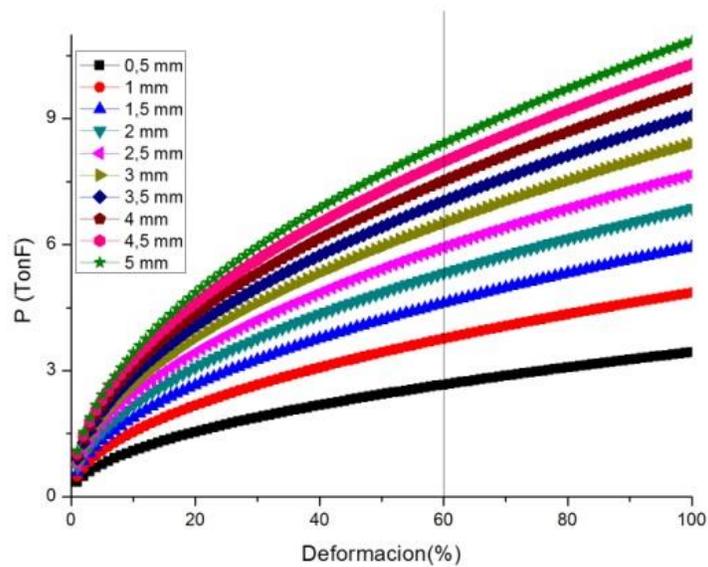
Llegada	MPa	Recocido	MPa
σ_y	410.366534	σ_y	55.7303649
σ_0	473.850458	σ_0	64.3518823



Figuras 21 y 22. Gráficas de % de deformación vs Carga en piezas de latón de llegada (arriba) y de recocido (abajo) de dos piezas de la primera corrida.

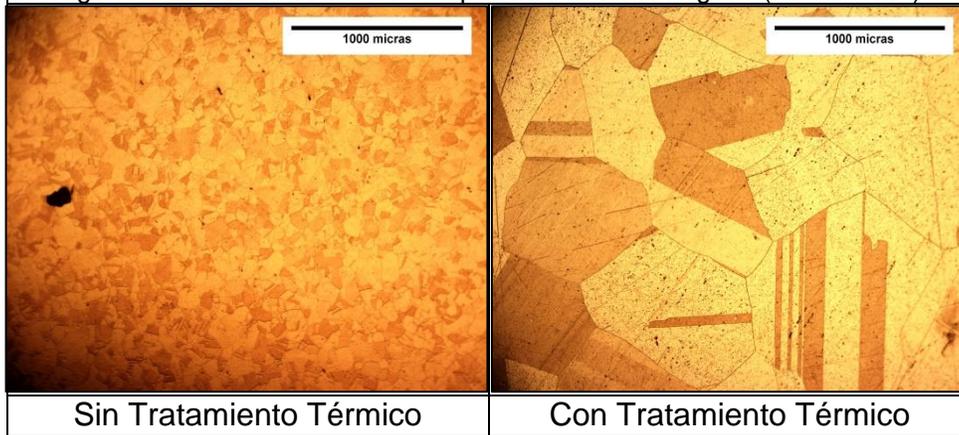
Tabla 7. Esfuerzos de cedencia y de laminación de piezas de la segunda corrida del ensayo de tensión.

Llegada	MPa	Recocido	MPa
σ_y	379.649039	σ_y	49.9855422
σ_0	438.380949	σ_0	57.7183325



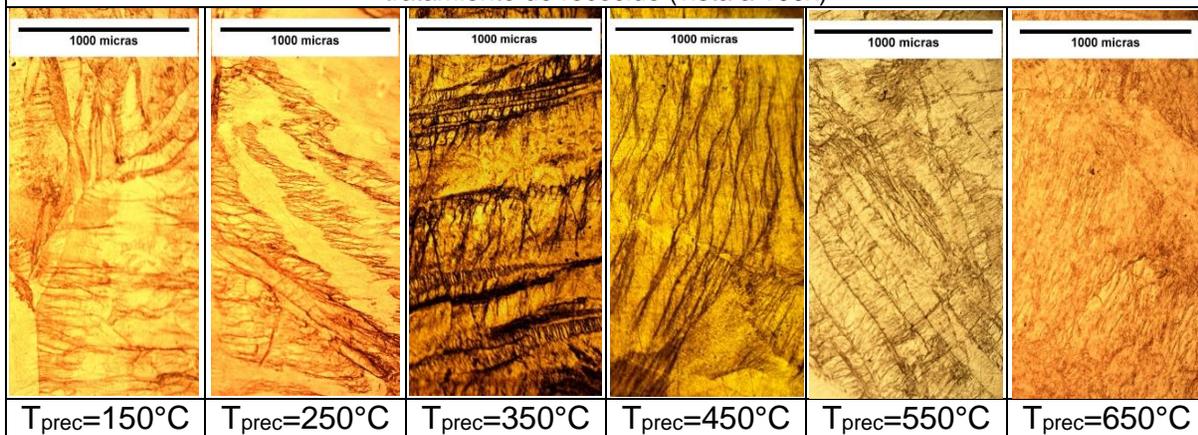
Figuras 23 y 24. Gráficas de % de deformación vs Carga en piezas de latón de llegada (arriba) y de recocido (abajo) de dos piezas de la segunda corrida.

Figura 25. Microestructura de una placa de latón de llegada (vista a 100x)



7.2. Microscopía Óptica

Figura 26. Microestructuras de unas placas de latón laminada una vez después de realizar un tratamiento de recocido (vista a 100x)



7.2.1. Unión por Laminación Acumulada

Figura 27. Microestructuras de unas placas de latón unida por laminación a $T=250^{\circ}\text{C}$ de operación

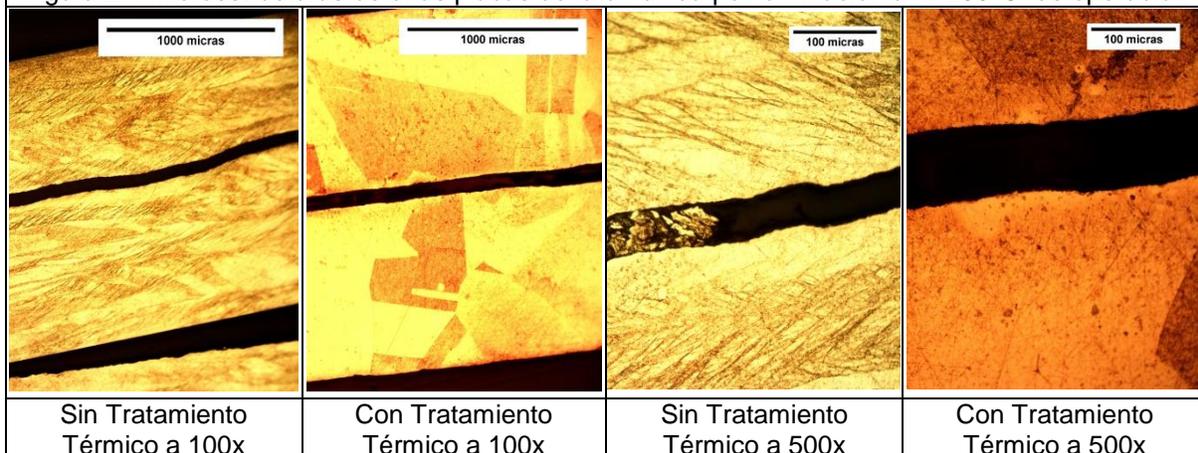


Figura 28. Microestructuras de una placa de latón unida por laminación a una $T=250^{\circ}\text{C}$ de operación con 4 y 6 pasos de laminación

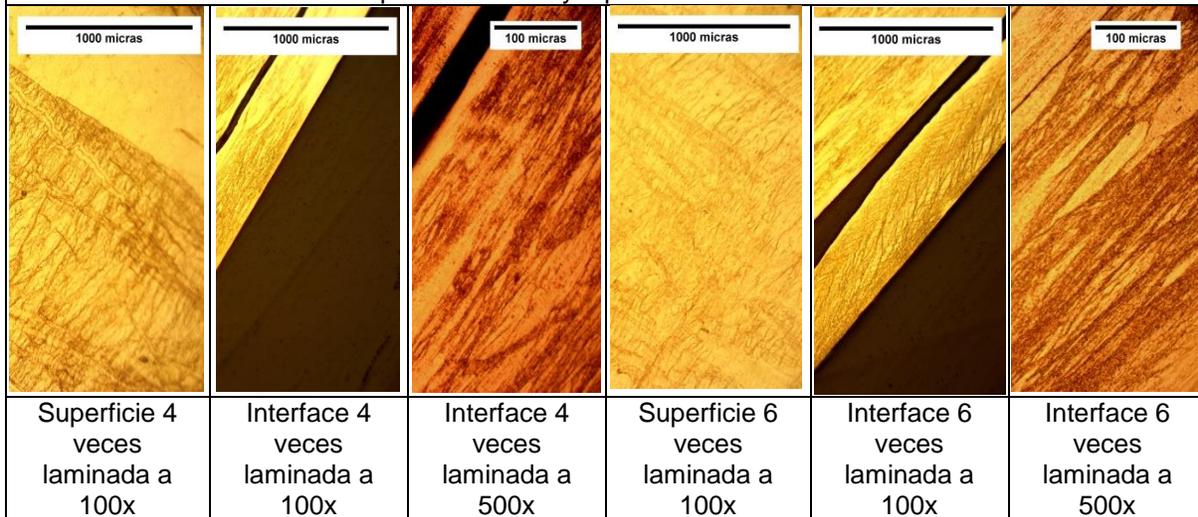
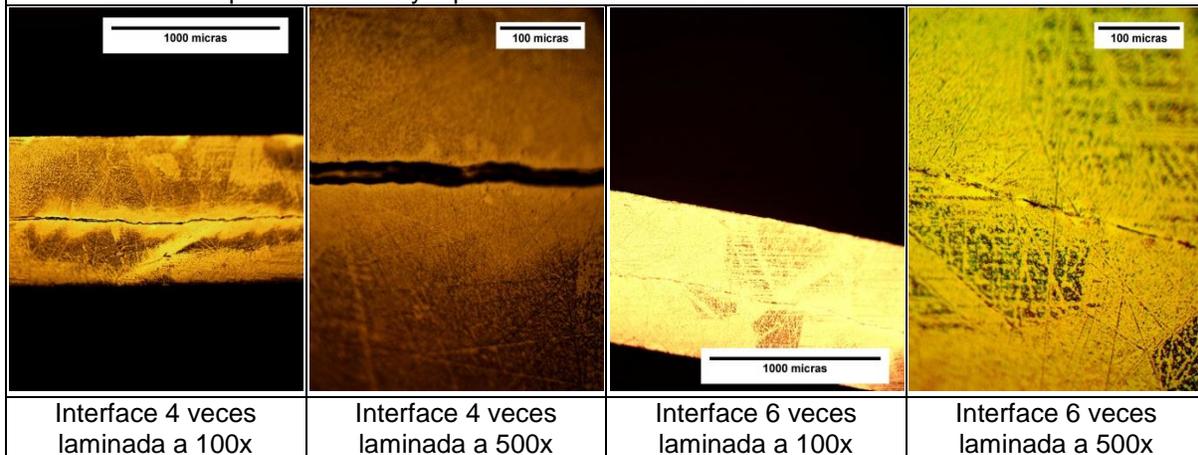


Figura 29. Microestructuras de una placa de latón unida por laminación a una $T=250^{\circ}\text{C}$ de operación con 4 y 6 pasos de laminación con Tratamiento Térmico



7.3. Medición de Durezas

Tabla 8. Mediciones de Durezas de las piezas laminadas

Pieza	Dureza		
	HR30T	HRB	
C260 150°C	26.4	16	Superficie (estos valores no son exactos, son momentáneos)
C260 250°C	20	7	
C260 350°C	8.3	-	
C260 450°C	15.13	0	
C260 550°C	16	1	
C260 650°C	17.8	3.5	
C260 250°C 1	79.13	94	Uniones
C260 250°C 4	64.2	71.5	
C260 250°C 6	68.4	78	

Mediciones de Dureza en la superficie de las piezas no unidas

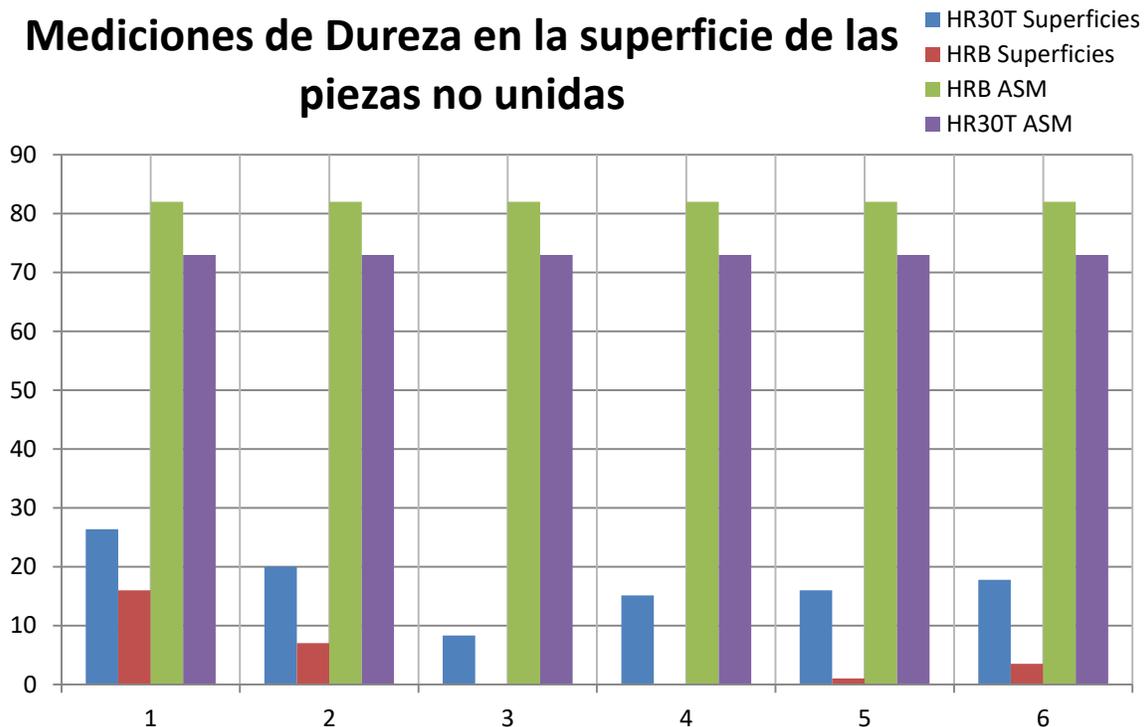


Figura 30. Gráfica de columnas de valores de Durezas en la superficie de piezas no unidas en HR30T y HRB.

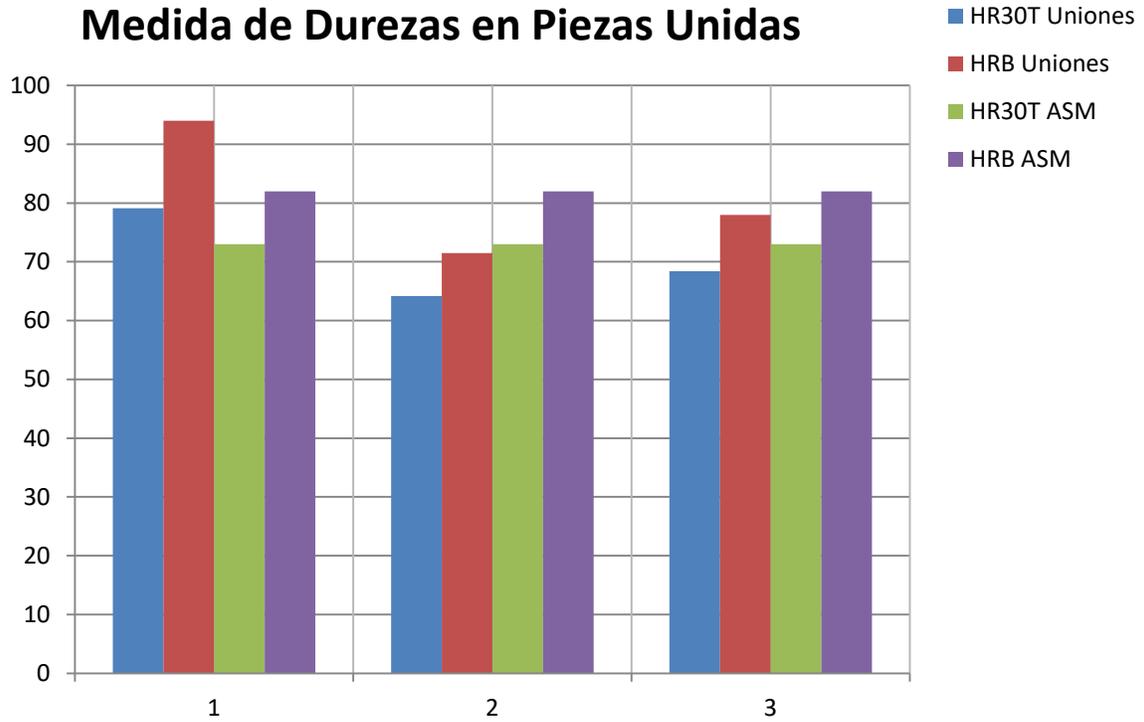


Figura 31. Gráfica de columnas de valores de Durezas en las piezas unidas en HR30T y HRB

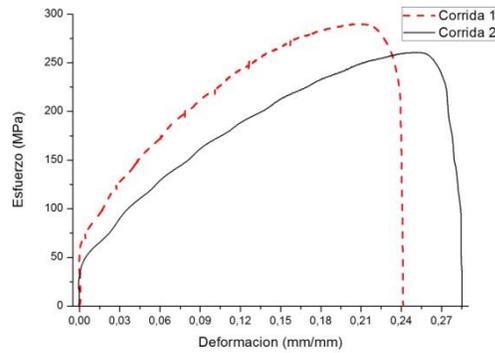
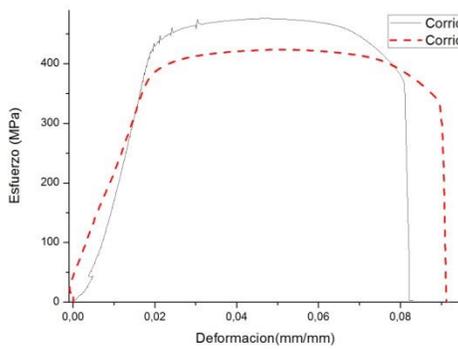
8. Análisis de Resultados

8.1. Previos al proceso de Laminación

Tabla 9. Tabla de Datos de Esfuerzos de Cedencia y de UTS de datos teóricos, de la primera pieza y segunda pieza analizadas

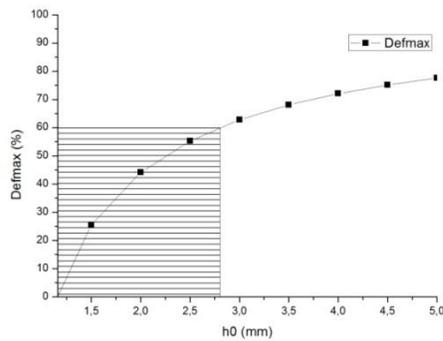
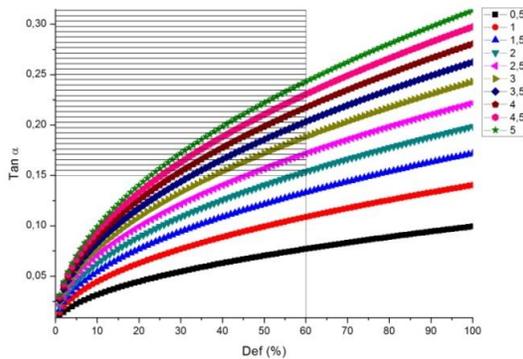
Llegada	MPa	Recocido	MPa
Teoría			
σ_y	435	σ_y	75
σ_0	502.2947	σ_0	86.60254
Primera Corrida			
σ_y	410.3665	σ_y	55.73036
σ_0	473.8505	σ_0	64.35188
Segunda Corrida			
σ_y	379.649	σ_y	49.98554
σ_0	438.3809	σ_0	57.71833

En las siguientes gráficas, se aprecia el comportamiento elástico de las piezas de latón; justo en la sección elástica en la 1° corrida tiene un ligero retroceso el cual se interpreta como una pequeña resistencia a la tensión del mismo material, en la sección más alta de la gráfica de la 1° corrida se observan distorsiones que se interpretan como ruido de la maquina al realizar el ensayo de tensión. Para la segunda corrida sólo se ve en la sección elástica un retroceso similar que en la primera corrida sólo que ésta se puede interpretar como una pequeña compresión del material al querer ser estirada. Para estas dos corridas del ensayo de tensión, se aprecia claramente que la zona elástica es muy baja debido a que estas piezas se les realizaron un tratamiento térmico previo, como el de las piezas a laminar.



Figuras 19 y 20. Curvas de esfuerzo vs deformación en piezas de latón de llegada (izquierda) y de recocido (derecha) de las cuatro piezas.

Al momento de realizar gráficas de estas piezas, se observa que no es óptimo para el trabajo, ya que a mayores espesores aumenta la carga de trabajo de laminación, y esos valores sobrepasan la carga máxima de trabajo del molino, la cual es de 40000 lb-f.



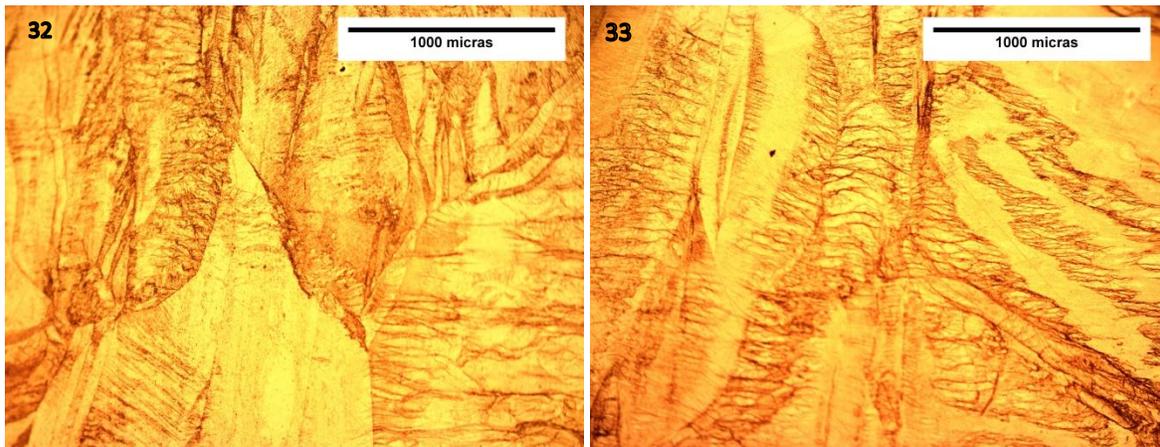
Figuras 17 y 18. Gráfica de % de deformación vs Tangente de α en piezas de latón (izquierda) Gráfica de espesor vs % de deformación máxima de latón (derecha).

En las figuras y se puede notar en las zonas rayadas, solamente se puede trabajar bajo la siguiente condición: para que la unión de las piezas fuera 100% efectiva deberían tener un espesor mayor a 2.75 mm pero con las limitaciones de la laminadora se toma las siguientes condiciones de trabajo: con espesores

menores de 2 mm y con una carga máxima de trabajo de 7 Ton F se logrará obtener una unión exitosa.

8.2. Proceso de Laminación

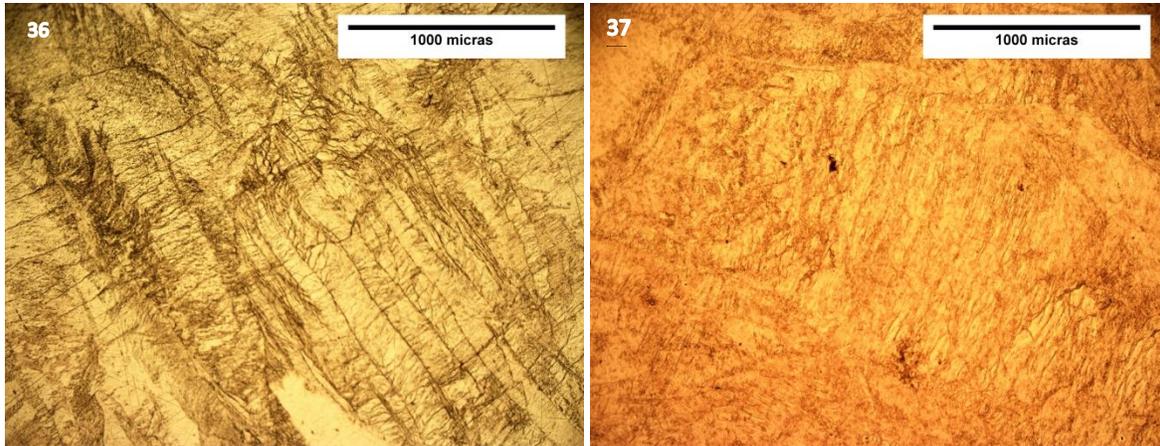
Observando las seis imágenes de la figura 32, y 33 comparándolas entre sí, se puede ver que las todas ellas presentan una dirección de laminación, cada zona tienen una dirección preferencial, sólo que en cada una tiene una diferencia que considerar; en las figuras y muestran una microestructura gruesa y en muchas zonas tienen desarrollado muchos bordes de granos mientras que las microestructuras de las figuras 34, 35, 36 y 37 no muestran tantos bordes de grano.



Figuras 32 y 33. Microestructuras de Latón laminados y precalentados a (32) 150°C y (33) 250°C



Figuras 34 y 35. Microestructuras de Latón laminadas y precalentadas a (34) 350°C y (35) 450°C

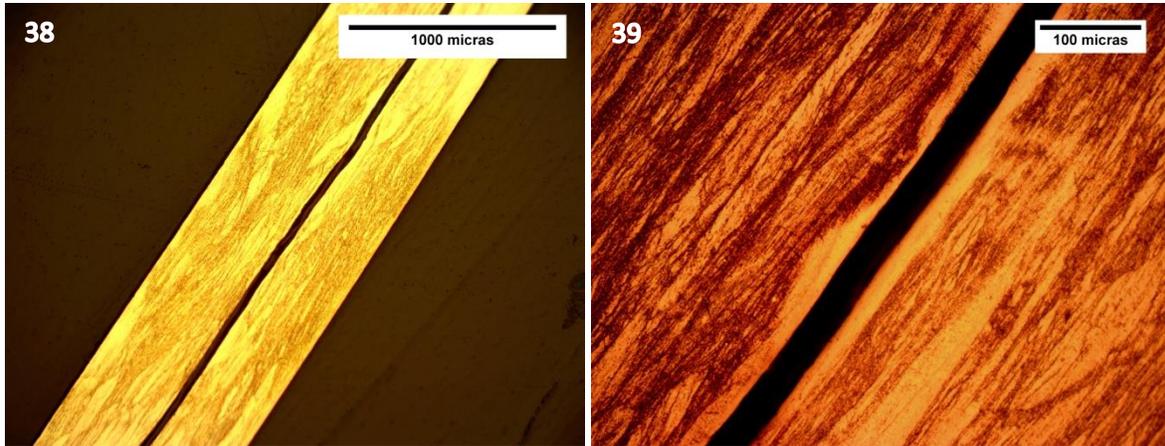


Figuras 36 y 37. Microestructuras de Latón laminadas y precalentadas a (36) 550°C y (37) 650°C

Esto ocurre por la recrystalización, a pesar de que el precalentamiento fue de sólo 5 minutos para evitar la oxidación de las muestras, si llega a afectar a la microestructura; además de que uno de los propósitos es efectuar la unión de estas piezas sin recurrir al efecto de la recrystalización, por lo que en este caso, nuestra pieza que fue precalentada a 250°C, fue en la que se logró la unión sin que exista el efecto de la recrystalización, además que de la piezas de la figura ,mostró menores fracturas que la pieza de la figura .

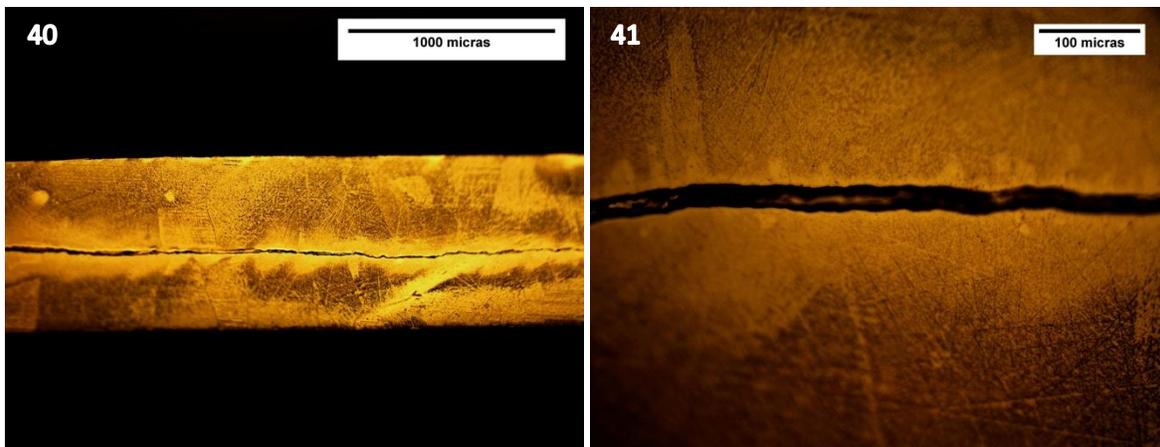
8.3. Unión por Laminación Acumulada

Para las piezas que si se unieron, se les hizo posteriormente un tratamiento de recocido a 750°C, esto para determinar si favorece o no la unión de las dos placas; para la pieza de la figura 27, se pudo observar que antes de aplicarse el recocido, no llegan a una unión fuerte por lo que en el momento que se les aplicó el tratamiento, las piezas se separaron.

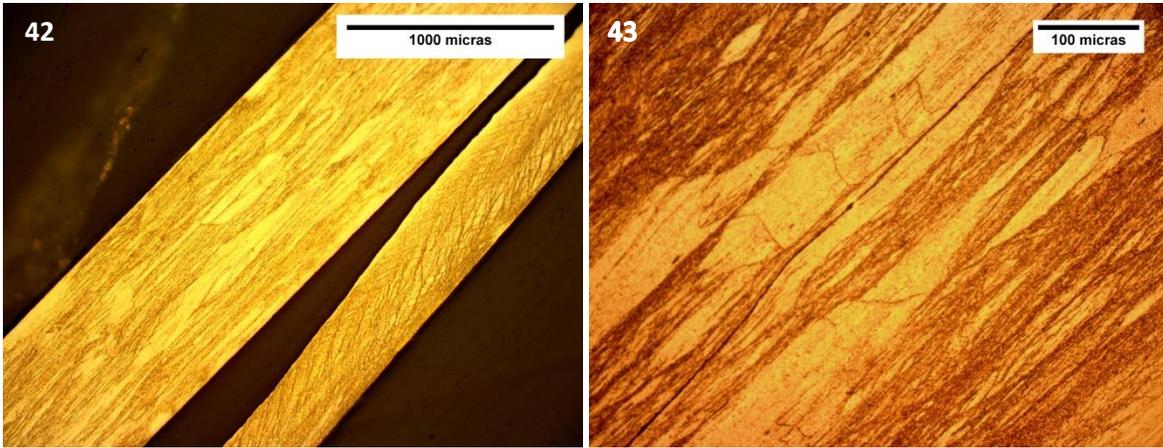


Figuras 38 y 39. Microestructuras de Latón laminadas 4 veces con una vista de (38) 100x y (39) 500x.

Para la pieza de las figuras 38 y 39, la cual tuvo cuatro pasos de laminación, aún no se ve como tal una unión fuerte entre las dos placas que se utilizaron, pero en el momento de aplicar el tratamiento estas piezas responden para bien, es decir, hubo una mayor unión de estas placas, pero no aun no llega a la unión, y se puede notar en las interfaces en las figuras 40 y 41.

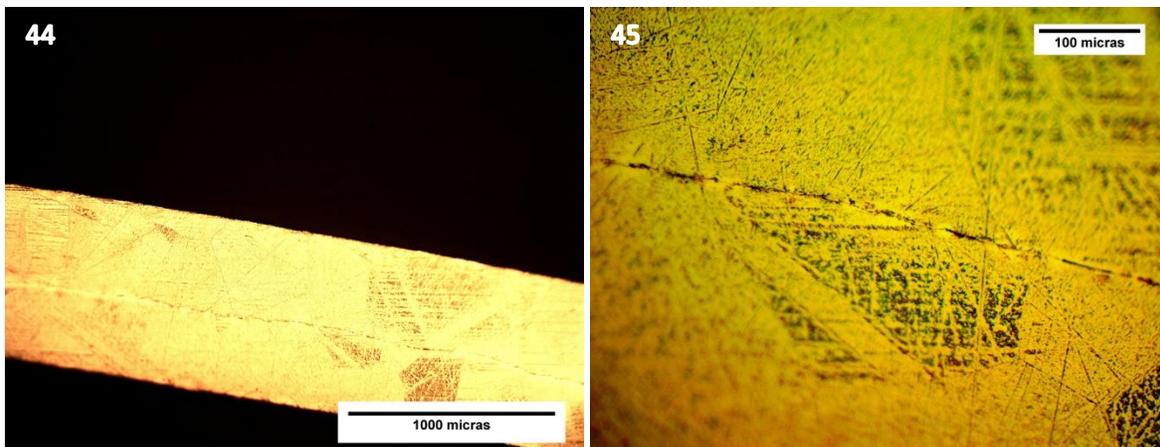


Figuras 40 y 41. Microestructuras de Latón laminadas 4 veces y recocido a 750°C con vista de (40) 100x y (41) 500x



Figuras 42 y 43. Microestructuras de Latón laminadas 6 veces con una vista de (42) 100x y (43) 500x

La pieza que se le dio seis pasos de laminación, en un inicio logró una unión mucho más notoria que las otras piezas de las figuras 26, 27 y 32 tal como se ven en las figuras 42 y 43; después de aplicar el tratamiento de recocido esta pieza favorece la unión, pero sólo en ciertas partes de la pieza se observa más estrecho la línea de interface de las dos placas en las figuras 44 y 45.



Figuras 44 y 45. Microestructuras de Latón laminadas 6 veces y recocido a 750°C con una vista de (44) 100x y (45) 500x

8.4. Durezas antes y después del proceso

Los valores teóricos comparando los con los experimentales no tienen como tal una relación entre sí; para el caso de las piezas que tuvieron un precalentamiento, los valores de dureza no son similares, ya que como no lograron una buena unión entre sí, al momento de medir la dureza en estas placas no se lograba una buena lectura por no tener una superficie firme, tanto en la base como en la zona de penetración; sólo las piezas que se lograron unir, tuvieron una tendencia de dureza sin variar sus valores, aunque la que se laminó una vez, se endureció más y esto fue por la velocidad de deformación que fue del 60% de la capacidad del molino; mientras que las piezas que se laminaron cuatro y seis veces obtuvieron valores de dureza similares al valor teórico de la pieza de llegada. En estas placas que fueron recocidas, no se pudieron obtener medidas de dureza por dos factores, una sus espesores fueron muy pequeños como para poder medir dureza superficial y la segunda, en el momento de hacer las mediciones estas piezas se doblaban o llegaban a fracturar; en estos casos se debió optar por hacer mediciones de microdureza.

9. Conclusiones

1. El proceso de unión por laminación acumulada si se puede efectuar en trabajo en frío, es decir, a temperaturas menores a la temperatura de recristalización, con el apoyo de limpieza superficial del cepillado y con Acetona, manteniendo una microestructura continúa en ambas partes de la pieza.
2. Las uniones no se desestabilizan con el tratamiento de recocido, siempre y cuando estas piezas muestren una unión fuerte en una pasada o se les hayan dado más pasos de laminación.
3. La relación de trabajo para este proceso se puede confirmar que, a partir de 250°C, con un espesor inicial de 0.5 mm, realizándole previamente un tratamiento térmico y teniendo como mínimo cuatro pasos de laminación se logra una unión en las placas de Latón.

10. Índice de figuras

- Figura 1 Representación esquemática de un material UFG_____10
- Figura 2 Esquema del proceso de ARB convencional_____11
- Figura 3 Esquema de un laminador_____15
- Figura 4 Fuerzas que actúan en la laminación_____16
- Figura 5 Molino de laminación IRM 4060 CINVESTAV Unidad Saltillo____18
- Figura 6 Fricciones y condiciones durante la laminación_____20
- Figura 7 Etapas de la laminación en frío_____24
- Figura 8 Diagrama de fases de Cu-Zn_____25
- Figura 9 Estructura de dos fases del metal muntz recocido_____27
- Figura 10 Influencia de la temperatura de recocido sobre la carga de ruptura y el grosor de grano_____28
- Figura 11 Influencia del grosor del grano sobre las características mecánicas_____29
- Figura 12 Diagrama de martilleo en frío_____30
- Figura 13 Esquema de las dimensiones de las piezas de latón a trabajar en el proceso ARB _____38
- Figura 14 Esquema de las dimensiones de las piezas de latón a realizar los ensayos de tensión _____38
- Figura 15 Gráfica de % de deformación vs Carga en piezas de latón de llegada_____42
- Figura 16 Gráfica de % de deformación vs Carga en piezas de latón de recocido_____42
- Figura 17 Gráfica de % de deformación vs Tangente de α en piezas de latón_____43, 52
- Figura 18 Gráfica de espesor vs % de deformación máxima de latón_____43, 52
- Figura 19 Curva de esfuerzo vs deformación en piezas de latón de llegada de dos piezas_____44, 52

- Figura 20 Curva de esfuerzo vs deformación en piezas de latón de recocido de dos piezas_____44, 52
- Figura 21 Gráfica de % de deformación vs Carga en piezas de latón de llegada de la primera corrida_____45
- Figura 22 Gráfica de % de deformación vs Carga en piezas de latón de recocido de la primera corrida_____45
- Figura 23 Gráfica de % de deformación vs Carga en piezas de latón de llegada de la segunda corrida_____46
- Figura 24 Gráfica de % de deformación vs Carga en piezas de latón de recocido de la segunda corrida_____46
- Figura 25 Microestructuras de unas placa de latón de llegada (vista a 100x)_____47
- Figura 26 Microestructuras de unas placa de latón laminada una vez después de realizar un tratamiento de recocido _____47
- Figura 27 Microestructuras de unas placa de latón unida por laminación a T=250°C de operación_____47
- Figura 28 Microestructuras de unas placa de latón unida por laminación a una T=250°C de operación con 4 y 6 pasos de laminación_____48
- Figura 29 Microestructuras de unas placa de latón unida por laminación a una T=250°C de operación con 4 y 6 pasos de laminación con Tratamiento Térmico_____48
- Figura 30 Gráfica de columnas de valores de Durezas en la superficie de piezas no unidas en HR30T y HRB_____49
- Figura 31 Gráfica de columnas de valores de Durezas en la superficie de piezas unidas en HR30T y HRB_____50
- Figura 32 Microestructura de Latón laminada y precalentada a 150°C___53
- Figura 33 Microestructura de Latón laminada y precalentada a 250°C___53
- Figura 34 Microestructura de Latón laminada y precalentada a 350°C___53
- Figura 35 Microestructura de Latón laminada y precalentada a 450°C___53
- Figura 36 Microestructura de Latón laminada y precalentada a 550°C___54
- Figura 37 Microestructura de Latón laminada y precalentada a 650°C___54

- Figura 38 Microestructura de Latón laminada 4 veces con una vista de 100x_____55
- Figura 39 Microestructura de Latón laminada 4 veces con una vista de 500x_____55
- Figura 40 Microestructura de Latón laminada 4 veces y recocido a 750°C con una vista de 100x_____55
- Figura 41 Microestructura de Latón laminada 4 veces y recocido a 750°C con una vista de 500x_____55
- Figura 42 Microestructura de Latón laminada 6 veces con una vista de 100x_____56
- Figura 43 Microestructura de Latón laminada 6 veces con una vista de 500x_____56
- Figura 44 Microestructura de Latón laminada 6 veces y recocido a 750°C con una vista de 100x_____56
- Figura 45 Microestructura de Latón laminada 6 veces y recocido a 750°C con una vista de 500x_____56

11. Índice de ecuaciones

• Ecuación 1	15
• Ecuación 2	15
• Ecuación 3	15
• Ecuación 4	16
• Ecuación 5	17
• Ecuación 6	18
• Ecuación 7	21
• Ecuación 8	21
• Ecuación 9	21
• Ecuación 10	21
• Ecuación 11	21
• Ecuación 12	21
• Ecuación 13	21
• Ecuación 14	22
• Ecuación 15	22
• Ecuación 16	23
• Ecuación 17	34
• Ecuación 18	35
• Ecuación 19	35
• Ecuación 20	37
• Ecuación 21	37
• Ecuación 22	37
• Ecuación 23	37
• Ecuación 24	37
• Ecuación 25	37
• Ecuación 26	37

12. Índice de tablas

- Tabla 1 Propiedades mecánicas del latón C26000 a ciertas condiciones_____27
- Tabla 2 Condiciones del molino para laminar_____39
- Tabla 3 Especificaciones del molino para laminar_____39
- Tabla 4 Condiciones del primer tratamiento térmico_____39
- Tabla 5 Condiciones del segundo tratamiento térmico_____41
- Tabla 6 Esfuerzos de cedencia y UTS de piezas de la primera corrida del ensayo de tensión_____45
- Tabla 7 Esfuerzos de cedencia y UTS de piezas de la segunda corrida del ensayo de tensión_____46
- Tabla 8 Mediciones de Durezas de las piezas laminadas_____49
- Tabla 9. Tabla de Datos de Esfuerzos de cedencia y de UTS de datos teóricos, de la primera pieza y segunda pieza analizadas_____51

13. Referencias bibliográficas

1. Saito, Y., Utsunomiya, H., Tsuji, N., & Sakai, T. (1999). Novel ultra-high straining process for bulk materials—development of the accumulative roll-bonding (ARB) process. *Acta Materialia*, 47(2), 579–583. [https://doi.org/10.1016/S1359-6454\(98\)00365-6](https://doi.org/10.1016/S1359-6454(98)00365-6)
2. Meyers, M. a., Mishra, a., & Benson, D. J. (2006). Mechanical properties of nanocrystalline materials. *Progress in Materials Science*, 51(4), 427–556. <http://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2005.08.003>
3. Yuntian T. Zhu, Terence G. Langdon. *The Fundamentals of Nanostructured Materials Processed by Severe Plastic Deformation*. JOM, 58-63, October 2004.
4. Enriquez Berciano, Jose Luis; Tremps Guerra, Enrique; Fernandez Segovia, Daniel; Elío de Bengy, Susana (2009). Monografías sobre tecnología del acero. Parte IV. Archivo Digital UPM/Universidad Politécnica de Madrid.
5. Li, L., Nagai, K., & Yin, F. (2008). Progress in cold roll bonding of metals. *Science and Technology of Advanced Materials*, 9(2), 023001. <http://doi.org/10.1088/1468-6996/9/2/023001>
6. Askeland, Donald R. (1998) Ciencia e Ingeniería de los materiales.. International Thomson Editores. pps. 92-93, 169-191.
7. J. A. Pero – Sanz Elorz. “Ciencia e Ingeniería de Materiales”. 5ª Edición (2006). Editorial CIE Dossat. pp. 239 – 257.
8. Avner, Sydney H., (1988) Introducción a la Metalurgia Física, Segunda edición, Mc Graw Hill, pps 457-467
9. ASM International. (2004). *ASM Handbook Volume 3 Alloy Phase Diagrams*.
10. ASM International. (2001). *ASM Handbook Volume 2 Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special -Purpose Materials. Technology (Vol. 2)*.

11. D. Whitwham et J. Herenguel Rev. Metal., 1962, 59, N°2, pp.154-165.
12. Dieter, G. E., Bacon, D., & Wilkes, G. L. (1988). *Mechanical Metallurgy* (SI Metric). Mc Graw Hill pps 586-616.