



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

---

FACULTAD DE QUÍMICA

DESARROLLO DE UN GUIÓN EXPERIMENTAL:  
LAMINACIÓN

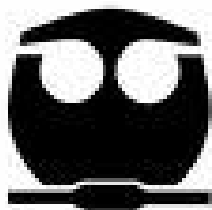
**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

P R E S E N T A :

**OCTAVIO LOZADA FLORES**



MÉXICO, D.F.

2009



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: Prof. Teresita del Niño Jesús Robert Núñez

Vocal: Prof. Ignacio Beltrán Piña

Secretario: Prof. José Guadalupe Ramírez Vieyra

1<sup>er</sup> Suplente: Prof. José Hernández Espinoza

2<sup>o</sup> Suplente: Prof. Jorge Sergio Téllez Martínez

Sitio donde se desarrolló el tema:

Departamento de Ingeniería Metalúrgica  
Facultad de Química, Edificio D  
Universidad Nacional Autónoma de México

ASESOR DEL TEMA: M. en I. Teresita del Niño Jesús Robert Núñez

SUPERVISOR TÉCNICO: I.Q.M. Jorge Sergio Téllez Martínez

SUSTENTANTE: Octavio Lozada Flores

## AGRADECIMIENTOS

*“Soy afortunado, tengo el amor de las personas a las que amo  
el cariño de las personas a las que quiero  
el respeto de las personas a las que respeto...”*

*A mi gloriosa casa de estudios la **Universidad Nacional Autónoma de México**  
por brindarme las herramientas necesarias para enfrentar el sendero que se  
extiende delante de mí.*

*A los profesores que a lo largo de mi vida me inculcaron sus conocimientos  
compartiendo instantes de la suya.*

*A la profesora Teresita: Gracias por su apoyo y por las incontables palabras de  
aliento que me obsequió cuando los nubarrones obstaculizaban el desarrollo de  
este escrito.*

## DEDICATORIAS

*“Mirando hacia el futuro...  
teniendo presente el pasado”*

*Un ciclo se ha cerrado, nuevos horizontes se extienden frente a mí, buscando un nuevo amanecer para un día alcanzar la eternidad, el mundo se detendrá por un instante, renaciendo de las cenizas estaré buscando mi futuro...*

*Un escrito, meta soñada por mí...*

*Culminación de años de esfuerzo, de sacrificios, de alegrías y tristezas, de sueños y esperanzas, de dolor, de dicha...*

*Años de mi vida, compartida por ustedes, a veces por breves instantes, en ocasiones por años enteros...*

**Padre:** *me has dado la vida, la oportunidad de experimentar el torbellino del mundo...*

**Hermano:** *una muralla nos separa, metas e ideales distintos, caminos que muchas veces se han alejado en direcciones opuestas, mi amor hacia ti es inmenso, pero la máscara de la que me he valido para enfrentar los infortunios que hemos tenido que vivir me ha impedido demostrártelo. Te amo, y tú me has demostrado infinidad de veces que tú también a mí; te amo, no únicamente por que seas mi hermano, si no porque debajo de la máscara que igualmente tú has usado, se encuentra una persona con sentimientos hermosos, una persona sensible, te encuentras TÚ...*

**Mis tíos Gela, Hilda, Marco, Cali:** *palabras, amor, consejos, regaños, lecciones, ejemplos, años de cariño y apoyo incondicional, ustedes son mi familia que ha estado ahí en momentos difíciles, en momentos alegres, tendiendo la mano como muestra desinteresada de amor.*

**Tío Carlos:** *tus consejos evitaron que tomara caminos erróneos, tus palabras me ubicaron muchas veces cuando divagaba en problemas que sucedían a mí alrededor.*

**Arturo y Abraham:** *mis amigos, mis hermanos, la vida nos unió para compartir infinidad de momentos que nunca olvidaré, momentos que hicieron más fácil transitar los instantes sombríos y momentos en los cuales únicamente existía felicidad.*

**Claudia:** *mi prima hermosa, infinidad de veces nos has brindado tu cariño, tu apoyo y comprensión.*

**Mis amigos:** *ustedes saben quiénes son, desde la secundaria, la preparatoria, la universidad, ustedes han compartido muchos instantes de mi vida, cada uno de ustedes conoce algo de mí, muchas veces me han dado su consejo cuando he estado triste y hemos celebrado juntos momentos de felicidad y desvelos. A unos los conozco desde hace años, a otros recientemente, unos han sido mis compañeros de estudios, otros han aparecido de diversos lugares.*

## **MADRE:**

*Amor, dulzura, comprensión, cariño, respeto.*

*Me has brindado el amor en la más pura de sus formas.*

*Has estado a mi lado en cada batalla,*

*dándome tu consejo y tú cariño.*

*Amor desinteresado,*

*cuando he llorado un abrazo tuyo me ha levantado,*

*cuando he reído has compartido mis alegrías.*

*A ti te dedico principalmente mi Tesis,*

*y te agradezco el infinito apoyo, el infinito cariño y el infinito amor que me has dado...*

**TE AMO.**

***“Y a ti Octavio: esta Tesis es el resultado de horas y horas de sacrificios y desvelos, has logrado la meta que te propusiste, es hora de enfrentar lo que sigue, de nuevas luchas y nuevos desafíos, aprende de tu pasado, recuérdalo, tenlo presente sin dolor, por que el pasado te ha hecho ser lo que eres ahora, perdona y ama, sin rencores, mira hacia el futuro sin olvidar quien eres, sin olvidar todo el apoyo que has recibido, esfuérate por lograr tus sueños, ya que la persona que no tiene estrellas que alcanzar, no tiene motivo para vivir...”***

# ÍNDICE

|  |    |
|--|----|
| <b>OBJETIVOS</b> .....   | 9  |
| <b>CAPÍTULO I</b> .....  | 10 |
| 1.1 Historia del cobre.....  | 10 |
| 1.2 Propiedades del cobre.....                                     | 10 |
| 1.3 Laminación.....  | 11 |
| 1.4 Tipos de molinos de laminación.....                            | 12 |
| 1.5 Tipos de laminación.....                                       | 14 |
| 1.5.1 Laminación en caliente.....                                  | 14 |
| 1.5.2 Laminación en frío.....                                      | 15 |
| 1.6 Defectos en el laminado.....                                   | 16 |
| 1.7 Análisis del proceso.....                                      | 17 |
| 1.8 El papel de la fricción en la laminación.....                  | 18 |
| 1.9 Teorías y modelos de laminación en frío.....                   | 19 |
| 1.9.1 Método del trabajo ideal.....                                | 20 |
| <b>CAPÍTULO II</b> .....   | 22 |
| 2.1 Ideas previas y cambio conceptual.....                         | 22 |
| 2.2 Resolución de problemas.....                                   | 23 |
| 2.3 La evaluación y sus funciones.....                             | 26 |
| 2.3.1 Evaluación inicial.....                                      | 27 |
| 2.3.2 Evaluación a lo largo del proceso enseñanza-aprendizaje..... | 27 |
| 2.3.2 Evaluación al final del proceso enseñanza-aprendizaje.....   | 27 |
| 2.4 La enseñanza experimental.....                                 | 28 |
| 2.4.1 El papel del profesor en la enseñanza experimental.....      | 29 |
| 2.4.2 El papel del estudiante en la enseñanza experimental.....    | 30 |
| <b>CAPÍTULO III</b> .....  | 32 |
| 3.1. Estudio cualitativo del fenómeno (sin alumnos).....           | 32 |
| 3.1.1 Objetivo.....  | 32 |
| 3.1.2 Materiales y equipo.....                                     | 32 |



|  |           |
|--|-----------|
| 3.1.3 Desarrollo .....   | 33        |
| 3.1.4 Proceso de calibración de la laminadora.....                 | 35        |
| 3.2 Evaluación inicial: conocimientos previos de los alumnos. .... | 36        |
| 3.3 Estudio cualitativo con los alumnos.....                       | 37        |
| 3.4 Evaluación a lo largo del proceso de enseñanza.....            | 38        |
| 3.5 Estudio cuantitativo del fenómeno.....                         | 38        |
| 3.5.1 Objetivo. ....   | 39        |
| 3.5.2 Materiales y equipo.....                                     | 39        |
| 3.5.3 Desarrollo.....  | 40        |
| 3.6 Evaluación al final del proceso.....                           | 41        |
| <b>CAPÍTULO IV</b> .....   | <b>42</b> |
| 4.1. Estudio cualitativo del fenómeno (sin alumnos).....           | 42        |
| 4.2 Conocimientos previos de los alumnos.....                      | 49        |
| 4.3 Estudio cualitativo con los alumnos.....                       | 54        |
| 4.4 Evaluación a lo largo del proceso de enseñanza.....            | 57        |
| 4.5 Estudio cuantitativo del fenómeno.....                         | 59        |
| 4.6 Evaluación al final del proceso.....                           | 76        |
| <b>CAPÍTULO V</b> .....  | <b>81</b> |
| <b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....  | <b>83</b> |
| <b>APÉNDICE</b> .....  | <b>85</b> |

## OBJETIVOS

1. Desarrollar un guión experimental sobre laminación de productos planos para utilizar la laminadora del Departamento de Metalurgia de la Facultad de Química.
2. Promover el desarrollo de habilidades de observación en el estudiante para la resolución de problemas durante el proceso de laminación.
3. Modificar en los alumnos sus ideas previas erróneas sobre el proceso de laminación.
4. Establecer los parámetros de control durante la laminación usando las herramientas disponibles (celda de carga, tarjeta de adquisición de datos y computadora).
5. Inducir en los estudiantes el análisis del comportamiento del proceso y del material, a partir de datos obtenidos con los equipos mencionados y que los relacionen con los cambios físicos observados en el material laminado.

# CAPÍTULO I

## ANTECEDENTES TEÓRICOS

### 1.1 Historia del cobre.

El cobre es el material más antiguamente trabajado, teniendo registros que datan su uso aproximadamente hace 10 000 años. Todas las grandes civilizaciones del pasado, incluyendo la Egipcia, la Griega, la Romana y la China, entre otras, utilizaron el cobre y sus aleaciones con objetivos decorativos y utilitarios. Desde la antigüedad hasta la Edad Media y el renacimiento, el cobre fue utilizado con propósitos militares, artísticos y en numerosos objetos funcionales. Sin embargo, fue durante la época de la revolución industrial cuando se presentó un cambio tremendo en la producción y en el consumo del cobre y sus aleaciones.

La Ingeniería Eléctrica en la industria moderna se vio enormemente favorecida por los descubrimientos de Faraday, Siemens, Edison y muchos más en los cuales el cobre jugaba un papel muy importante.

En la actualidad la importancia del cobre es enorme, debido a que entre los factores principales se encuentra su fácil combinación con otros metales, formando aleaciones con una única combinación de propiedades mecánicas y físicas y una excelente resistencia a la corrosión, lo cual ha ocasionado una gran demanda de cobre para aplicaciones ingenieriles en las industrias marítima, automotriz, química y electrónica.

### 1.2 Propiedades del cobre.

El cobre es un elemento químico de símbolo Cu, es un metal de transición de color rojizo y brillo metálico y tiene una alta conductividad eléctrica, ductilidad y maleabilidad, motivo por el cual es altamente utilizado en la industria.

|                                 |       |
|---------------------------------|-------|
| <b>Nombre</b>                   | Cobre |
| <b>Símbolo</b>                  | Cu    |
| <b>No. Atómico</b>              | 29    |
| <b>Valencia</b>                 | 1,2   |
| <b>Masa atómica<br/>(g/mol)</b> | 63.54 |
| <b>Densidad (g/ml)</b>          | 8.96  |
| <b>Punto de fusión (°C)</b>     | 1084  |

TABLA 1.1. Propiedades del cobre.

### 1.3 Laminación.

La laminación es un proceso mecánico en el cual el espesor del material de trabajo se reduce mediante fuerzas de compresión ejercidas por dos rodillos opuestos, efectuándose una deformación plástica. Al ponerse en contacto el material con los rodillos, estos lo sujetan y lo jalan a su interior debido a la fricción, ocasionando que avance en forma continua.

La apertura entre los rodillos de una laminadora es menor que el espesor del material entrante, de esta manera el material es comprimido. Además de la deformación volumétrica, también se produce una deformación en la estructura del material, produciendo cambios en sus propiedades.

En la Figura 1.1 se muestra el cambio de estructura de un metal durante el proceso de laminación.

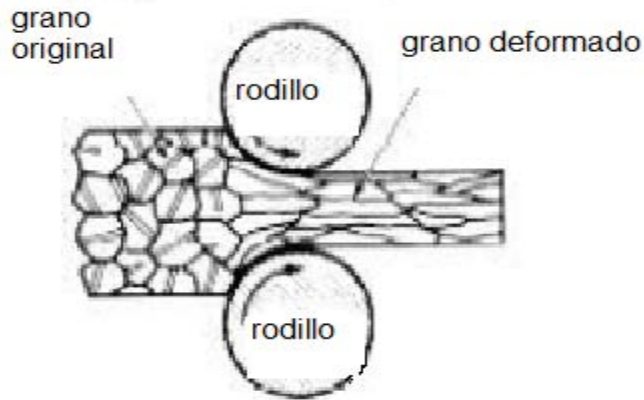


FIGURA 1.1. Cambio de la estructura de un metal FCC durante un proceso de laminación.

La laminación es un proceso que se puede llevar a cabo en frío o en caliente. Generalmente se lamina en caliente en las operaciones de desbaste y en frío en las operaciones de acabado.

#### 1.4 Tipos de molinos de laminación.

Existen diferentes tipos de molinos de laminación, los cuales frecuentemente son clasificados dependiendo el número y el arreglo de los rodillos en el proceso.

**Molino de dos rodillos.** Es el modelo más simple y el más común. En este molino los rodillos son de igual tamaño y rotan en diferentes direcciones. El material se puede regresar a la entrada de los rodillos, disminuyendo la distancia entre ellos, para lograr deformaciones mayores. Para aumentar la productividad de estos molinos se le agrega el factor de la reversibilidad, en la cual los rodillos pueden girar en ambas direcciones y el material puede pasar a través de cualquier dirección.

**Molino de tres rodillos.** Tienen la ventaja de los molinos reversibles de dos rodillos y suelen tener mesas elevables en ambos lados de los

rodillos, consisten en un rodillo superior e inferior motorizado y en un rodillo en medio que rota únicamente por fricción.

**Molino de cuatro rodillos.** Estos molinos consisten en dos rodillos de diámetro grandes y dos rodillos de diámetro más pequeño y son usados para lograr una gran disminución en la potencia requerida para la laminación, sin embargo, este tipo de rodillos (pequeños) tienen menor resistencia y rigidez en comparación con los rodillos grandes.

**Molinos agrupados o Sendzimir.** En este molino, los rodillos más pequeños, que son los que realizan la laminación, están soportados por una serie de rodillos más grandes y son utilizados para producir láminas muy delgadas de materiales muy resistentes.

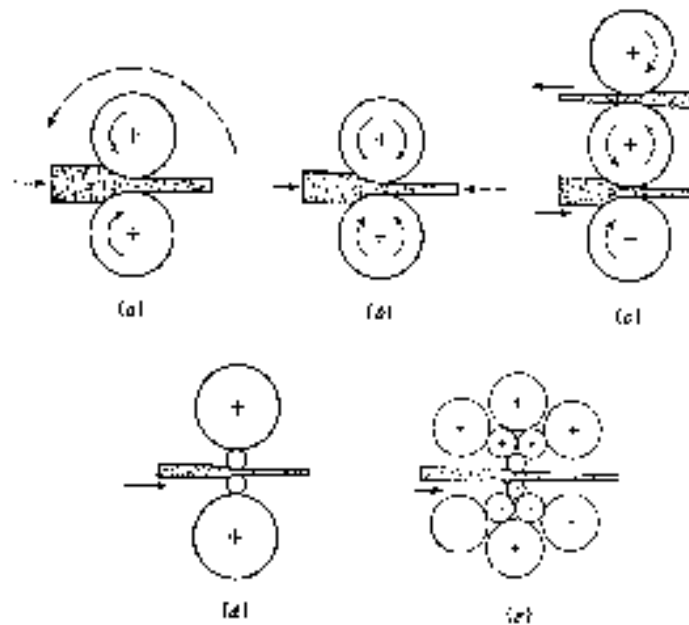


FIGURA. 1.2. Arreglo típico de rodillos en molinos de laminación. (a) Dos rodillos. (b) Dos rodillos reversibles. (c) Tres rodillos. (d) Cuatro rodillos. (e) Sendzimir o agrupado

## 1.5 Tipos de laminación.

### 1.5.1 Laminación en caliente.

Cuando es necesaria una gran cantidad de deformación durante la laminación se utilizan temperaturas elevadas con el objetivo de que el metal tenga una menor resistencia a la fluencia, lo cual favorece que disminuya el número de grietas durante el proceso.

La laminación en caliente depende más de la temperatura y de la rapidez de deformación que la laminación en frío.

La deformación plástica en caliente permite la modificación de la estructura metalográfica y el tamaño de grano.

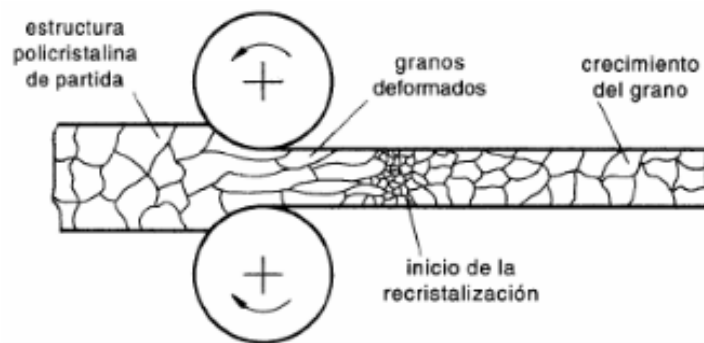


FIGURA 1.3. Cambio en la microestructura durante la laminación en caliente.

Una de las principales desventajas de este proceso es que la superficie del metal durante el proceso de laminación presenta una capa de óxido superficial debido al incremento de la temperatura.

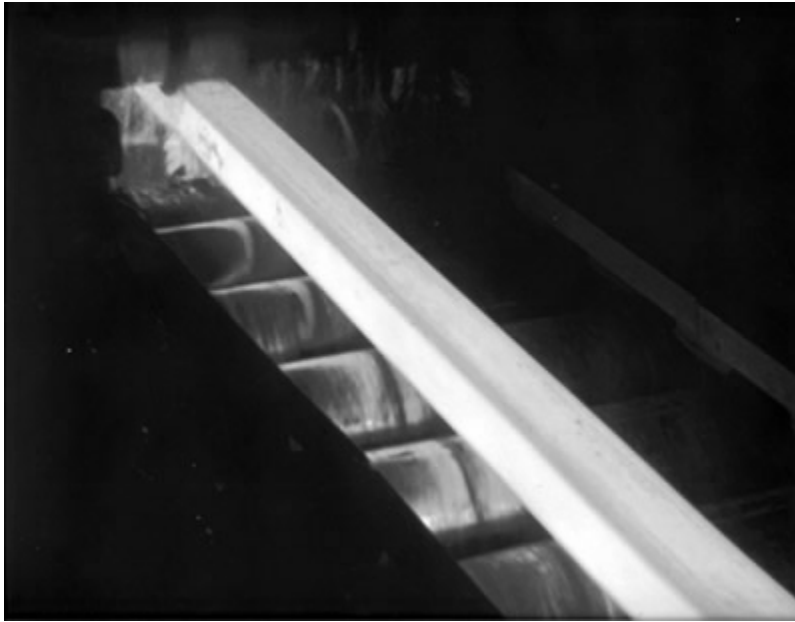


FIGURA 1.4. Laminado en caliente.

### **1.5.2 Laminación en frío.**

El laminado en frío es utilizado para producir un superior acabado superficial y con mayores tolerancias dimensionales que el obtenido por deformación en caliente.

La reducción total máxima archivada por la laminación en frío generalmente varía entre 50% y 90%.

Las láminas deformadas en frío se producen en diferentes condiciones: “skin-rolled”, cuarto duro, medio duro y completamente duro, dependiendo del porcentaje de deformación aplicada.

Los términos cuarto duro, medio duro, completamente duro tienen mayores cantidades de reducción hasta 50%. Esto incrementa el punto de fluencia, la orientación de los granos y consecuentemente las diferentes propiedades varían en la orientación de los granos.



Los materiales “cuarto duro” se pueden doblar (perpendicularmente a la dirección de laminación) sobre sí mismos sin fracturarse. Los “medio duro” se pueden doblar 90° y los completamente duros 45°. Así que estos materiales se pueden utilizar en aplicaciones que involucren una gran cantidad de doblez y deformación sin romperse.



FIGURA 1.5. Laminación en frío.

### **1.6 Defectos en el laminado.**

Durante el proceso de laminado es posible que se presenten una variedad de problemas o defectos específicos, los cuales dependen de la interacción de la deformación plástica de la pieza deformada con la elasticidad de los rodillos de la laminadora.

Es muy importante que los rodillos de la laminadora se encuentren perfectamente alineados, ya que de no estarlo la distribución de fuerzas en el metal a laminar no será la misma a lo ancho de este, lo cual ocasiona que se presenten defectos durante el laminado (Figura 1.6).

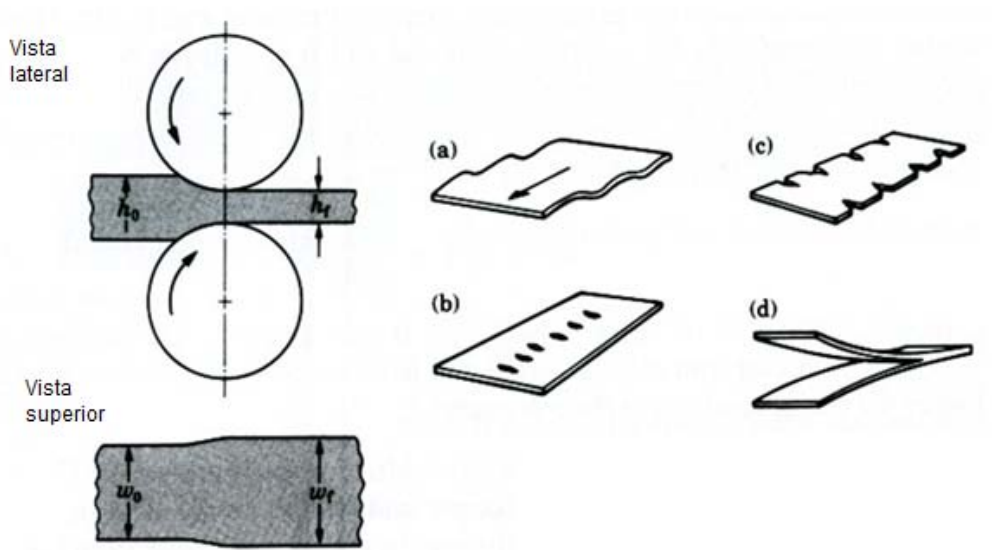


FIGURA 1.6. Defectos que se pueden presentar durante el proceso de laminación.

### 1.7 Análisis del proceso.

Es muy importante considerar que durante el proceso de laminación, el volumen a la entrada de los rodillos y el volumen a la salida de estos por unidad de tiempo es un valor constante, lo cual quiere decir que la velocidad de la lámina varía:

$$\frac{\text{Volumen del material de entrada}}{\text{tiempo}} = \frac{\text{Volumen del material de salida}}{\text{tiempo}} \Rightarrow \left[ \frac{L^3}{t} \right]$$

Por otro lado, la velocidad en la superficie del rodillo es constante, indicando que existe una velocidad relativa entre el rodillo y el material que se está laminando. La dirección de esta velocidad relativa cambia en un punto sobre el área de contacto, el cual se conoce como el punto de no deslizamiento.

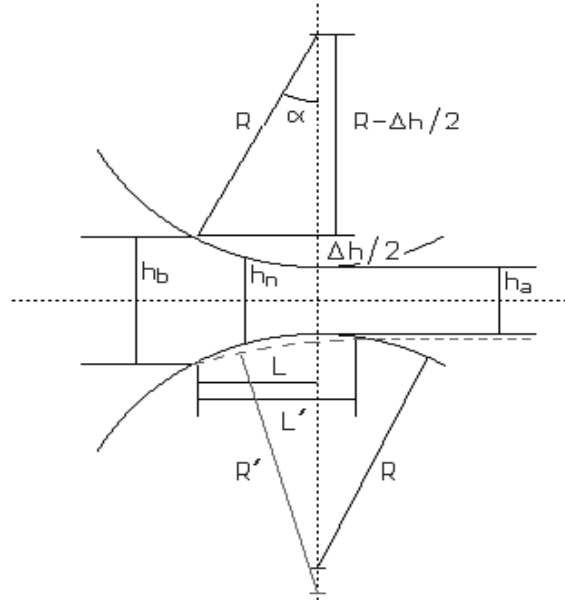


FIGURA 1.7. Geometría del proceso de laminación.

Donde:  $R$  = radio del rodillo

$\alpha$  = ángulo de contacto del material con el rodillo

$\Delta h/2$  = Disminución del espesor producida por un rodillo

$h_a$  = espesor a la salida del rodillo

$h_b$  = espesor de la lámina a deformar por un rodillo

En la Figura 1.7 el punto de no deslizamiento está indicado en la línea  $h_n$ .

### 1.8 El papel de la fricción en la laminación.

En la mayoría de los procesos, la fricción es una desventaja y se desea evitar, sin embargo, en la laminación es el eje sobre el cual gira todo el proceso, ya que sin este fenómeno los rodillos no podrían “jalar” al material hacia la zona de deformación.

El coeficiente de fricción, que puede variar sobre la longitud de contacto, depende, entre otros factores, de si el proceso es una deformación en caliente o una deformación en frío, del material que se está deformando y de la lubricación utilizada.

En el proceso de laminación en frío de aceros y aleaciones no ferrosas, el coeficiente de fricción se encuentra entre el intervalo de 0.02 y 0.3. En el proceso de laminación en caliente, este coeficiente puede ser tan alto como 0.57 (Roberts, 1978).

### **1.9 Teorías y modelos de laminación en frío.**

Existen diferentes teorías que relacionan las fuerzas que se presentan en el trabajo y la interacción entre el material a laminar y el equipo que realiza la deformación en el proceso.

La principal diferencia entre las teorías de laminación en frío y laminación en caliente es la determinación del esfuerzo de fluencia del material. Considerando que en la laminación en frío la temperatura y la rapidez de deformación son secundarias, el esfuerzo de fluencia se puede determinar con precisión y se puede esperar que los resultados teóricos sean muy cercanos a los resultados prácticos.

El principal parámetro que se desconoce durante el proceso de laminación es el coeficiente de fricción, el cual generalmente está basado en un conjunto de condiciones de laminación.

Los modelos matemáticos tienen los siguientes objetivos:

- i. Mejorar el proceso de laminación.
- ii. Servir como auxiliar en el diseño y construcción de molinos de laminación.
- iii. Servir de guía de operación en los molinos de laminación.

Para lograr estos objetivos se tiene que conocer los parámetros principales que se utilizan durante el proceso de laminación:

- i. Diámetro del rodillo.
- ii. La fricción existente entre los rodillos y la pieza.
- iii. La presencia de tensión frontal y/o posterior en el plano de la pieza.
- iv. El esfuerzo de fluencia del material.

El comportamiento exacto de cada uno de los parámetros que se presentan en la laminación tienen una gran complejidad, por lo que se realizan diversas simplificaciones, debido a esto no se ha desarrollado una teoría universal de laminación, dando lugar a diferentes métodos para enfrentar el problema.

### 1.9.1 Método del trabajo ideal.

Este método considera una compresión homogénea de una placa entre las platinas con una excelente lubricación. La fuerza vertical aplicada se llama fuerza separatriz (de los rodillos) o fuerza de laminación (del material).

Se considera el área de la placa como el área de contacto de los rodillos, la cual se proyecta en un plano horizontal. Esta área proyectada del arco de contacto de un rodillo con la placa  $l_p$ , está dada por  $R$ , el radio del rodillo, y la disminución en el espesor  $\Delta h$  (draft) por:

$$l_p = \sqrt{R\Delta h}$$

Despreciando los efectos de la fricción externa y las pérdidas por trabajo redundante, la distribución de presión media es igual al esfuerzo de fluencia de un material perfectamente plástico,  $\bar{\sigma}$ , entonces:

$$F = w * \bar{\sigma} * l_p = w * \bar{\sigma} * \sqrt{R\Delta h}$$

donde  $w$  = ancho de la lámina.

$F$  = Fuerza

$\sigma$  = Esfuerzo de fluencia

Como en la ecuación se ignora el efecto de la fricción, se sugirió que se agregara un 20% que la represente, de tal forma que la ecuación es la siguiente:

$$F = 1.2 * w * \bar{\sigma} * \sqrt{R\Delta h}$$

Otros modelos matemáticos que se pueden aplicar son el Método de Bloque, el Método de Bland y Ford, etc.

Para una mayor información sobre los diferentes modelos matemáticos que explican el proceso de laminación consultar: Roberts, 1978; Wusatowski, 1969 y Dieter, 2003.

# CAPÍTULO II

## ENSEÑANZA EXPERIMENTAL

### 2.1 Ideas previas y cambio conceptual.

Entre los problemas a los que se enfrenta la enseñanza de las ciencias, uno de los más grandes es la existencia en los alumnos de concepciones alternativas a los conceptos científicos. Estos conceptos alternativos resultan muy difíciles de modificar ya que están avalados en ocasiones por años de “creer que son los adecuados” y muchas veces sobreviven a un largo tiempo de instrucción científica.

Estas concepciones son conocidas como ideas previas, errores conceptuales, etcétera, y son construcciones que los sujetos elaboran para dar respuesta a su necesidad de interpretar fenómenos naturales o conceptos científicos.

El esquema de pensamiento alternativo se conoce entre los investigadores educativos como esquema representacional. Si los estudiantes encuentran información que contradiga sus esquemas representacionales es difícil para ellos aceptarla, porque les parece errónea. En estas condiciones actúan de diversas maneras: la ignoran, la rechazan, no creen en ella, la reinterpretan a la luz de sus propios esquemas, o bien, llegan a aceptarla haciendo sólo pequeños cambios en sus conceptos.

Una forma de clasificar a las ideas previas es la siguiente (Gil y Rico, 2003):

- i. Creencias: Verdades personales indiscutiblemente sustentadas por cada uno, derivadas de la experiencia o de la fantasía, que tienen un fuerte

componente evaluativo y afectivo. Se manifiestan verbalmente o con acciones (justificándolas).

- ii. Concepciones: Marcos organizadores implícitos de conceptos, con naturaleza cognitiva y que condicionan la forma en que afrontamos las tareas.

Las concepciones son mantenidas con plena convicción y existen procedimientos para evaluar su validez, mientras que las creencias no.

Una vez que se conocen las ideas previas de los alumnos, se busca lograr un cambio conceptual mediante la realización de algunas actividades prácticas que validen o rectifiquen las creencias de los alumnos.

## **2.2 Resolución de problemas.**

Uno de los métodos para lograr que el alumno modifique sus ideas previas es la resolución de problemas.

Entre los fines que persigue la educación científica se encuentran (Jiménez Alexandre y Sanmartí, 1997):

- i. El aprendizaje de conceptos y la construcción de modelos.
- ii. El desarrollo de destrezas cognitivas y de razonamiento científico.
- iii. El desarrollo de destrezas experimentales y de resolución de problemas.
- iv. El desarrollo de actitudes y valores.
- v. La construcción de una imagen de la ciencia.

Algunos de los enfoques para abarcar y cumplir estas metas son los siguientes (Campanario y Moya, 1999):

- i. La enseñanza de las ciencias basada en la resolución de problemas.
- ii. El cambio conceptual como punto de partida de las ideas constructivistas.
- iii. El aprendizaje de las ciencias como un proceso de investigación dirigida.



- iv. La enseñanza de las ciencias y el desarrollo de las capacidades metacognitivas.
- v. El diseño de unidades didácticas para la enseñanza de las ciencias.

La resolución de problemas en cualquier área implica un comportamiento humano muy complejo y se puede definir como el proceso de sobreponerse a algún impedimento real o aparente para proceder a alcanzar una meta.

Un problema se puede definir como un obstáculo, algo que detiene la marcha normal de la inteligencia, obliga a detenerse y a considerar como eliminar o rodear a dicho obstáculo.

En el caso de los estudiantes se deben considerar tres factores primordiales para estudiar cómo se resuelven los problemas:

- i. La naturaleza del problema y los conceptos subyacentes en los cuales se basa el problema (así como el entendimiento estudiantil de estos conceptos).
- ii. Las características del aprendiz, esto es, cómo al usar las habilidades y actitudes se puede resolver problemas con éxito. Dentro de este aspecto se analiza el proceder de expertos y novatos.
- iii. El ambiente de aprendizaje, o sea, los factores contextuales o ambientales hallados por quien resuelve el problema que son externos al problema y al aprendiz.

Con relación a la naturaleza del problema, el primer paso requerido para tener éxito es entender el significado del mismo. Al resolverse el problema se debe mostrar un entendimiento conceptual científico y un conocimiento procedimental, se deben decodificar las palabras dadas en el enunciado del problema en una comprensión significativa del mismo.

Respecto a las características del aprendiz se debe resaltar la capacidad de razonamiento proporcional, la visualización y la capacidad de memoria.

En relación con el ambiente de aprendizaje se han mencionado las siguientes dificultades para la resolución de problemas: inadecuadas instalaciones de estudio, textos inconvenientes y materiales del curso, enseñanza impropia, etc.

Cuando se termina el trabajo práctico, es recomendable que los estudiantes hagan un reporte, tanto para que refuercen sus habilidades de escritura, clarifiquen ideas, expliquen el fenómeno estudiado, la justificación de la metodología utilizada, analicen los resultados obtenidos, obtengan conclusiones.

Leite y Figueroa (2004) explican el fenómeno de la siguiente forma:

| TIPO DE EXPLICACION | CARACTERISTICAS DE LA EXPLICACION  | CUESTION SUBYACENTE   |
|---------------------|--|---|
| DESCRIPTIVA         | Consiste en un relato del comportamiento (natural o provocado) del fenómeno.   | ¿Cómo se comporta el fenómeno?, ¿Qué ocurre con el fenómeno?                            |
| CAUSAL              | Presenta un mecanismo, basado en relaciones del tipo causa-efecto, a través del cual las entidades implicadas en los fenómenos provocan el comportamiento observado.                                   | ¿Por qué el fenómeno se comporta de determinada forma?, ¿Cuál es la causa del fenómeno? |
| PREDICTIVA          | Anticipa el comportamiento de un fenómeno cuando se somete a determinadas condiciones, sobre la base de conocimientos previos relacionados con este. El comportamiento previsto podrá luego evaluarse. | ¿Cómo se comportará el fenómeno bajo la condición X?                                    |
| INTERPRETATIVA      | Consiste en la identificación de las entidades implicadas en el fenómeno, así como de sus comportamientos espaciales y temporales, a fin de hacer posible una comprensión del fenómeno.                | ¿En qué consiste el fenómeno?, ¿Qué entidades implica?                                  |

Tabla 2.1. Tipología de explicaciones. Leite, L. Figueroa, A (200).

La redacción del informe es muy importante debido a que la expresión escrita ayuda a clarificar las ideas.

### 2.3 La evaluación y sus funciones.

La palabra evaluación tiene muchos usos diversos, por lo que conviene precisar qué se entiende por el término. Toda actividad de evaluación se puede reconocer como un proceso en tres etapas (Jorba y Sanmartí, 1996):

- i. Acopio de información, que puede ser por medio de instrumentos o no.
- ii. Análisis de esta información y juicio sobre el resultado de este análisis.
- iii. Toma de decisiones de acuerdo con el juicio emitido.

Según el momento del proceso de aprendizaje en el que se evalúa se puede distinguir entre tres tipos de evaluación (Black y William, 1998):

- i. La **evaluación inicial** tiene por objetivo obtener información sobre las concepciones previas, los procedimientos intuitivos que el estudiante tenderá a utilizar para aprender y comunicarse, los hábitos de trabajo y las actitudes del estudiante al inicio de un proceso de enseñanza-aprendizaje, todo ello con la finalidad de adecuar dicho proceso a las necesidades de los estudiantes. Su función es fundamentalmente de un diagnóstico.
- ii. La **evaluación a lo largo del proceso de enseñanza** permite detectar los obstáculos que va encontrando el alumnado durante el proceso de construcción del conocimiento. La información que se busca se refiere a las representaciones mentales de los alumnos y a las estrategias que utilizan para llegar a un determinado resultado. La finalidad es entender las causas de las dificultades que se presentan en el proceso de aprender para poder ayudar a superarlas.
- iii. La **evaluación al final del proceso de enseñanza** sirve para identificar los conocimientos aprendidos, así como la calidad del proceso de enseñanza aplicado, todo ello con la finalidad de plantear propuestas de mejora y/o tenerlos en cuenta en el estudio de otros temas o al repetir dicho proceso de enseñanza.

Cuando se analizan los modelos didácticos que se aplican en la enseñanza de las ciencias es posible distinguir tres clasificaciones diferentes: los modelos constructivistas, los de transmisión-recepción y los de descubrimiento.

Aunque se corre el riesgo de simplificar la realidad, estos tipos de modelos pueden ser útiles para reconocer la distinta función de la evaluación en la enseñanza, sobre como aprenden mejor los alumnos y sobre como evaluar.

En este caso se hablará de los procesos de evaluación siguiendo el **modelo constructivista**.

### **2.3.1 Evaluación inicial.**

En estos modelos se tiende a plantear inicialmente preguntas orientadas a que los alumnos expresen sus concepciones explicativas y tienen la función implícita de comunicar y compartir con los alumnos los objetivos de aprendizaje.

### **2.3.2 Evaluación a lo largo del proceso enseñanza-aprendizaje.**

En los modelos constructivistas se constata que las actividades tienen una función reguladora de las dificultades, obstáculos o errores que se van manifestando, no se espera que los estudiantes recuerden y reproduzcan contenidos sino que tomen conciencia de sus formas de razonar e identifiquen otras posibles y que tomen decisiones en relación a qué cambiar de su propia argumentación.

### **2.3.2 Evaluación al final del proceso enseñanza-aprendizaje.**

En los modelos constructivistas, se tiende a planear cuestionarios finales que incluyen preguntas caracterizadas por:

- i. Ser no reproductivas, es decir, se busca comprobar si el alumno sabe transferir las ideas aprendidas a la interpretación de hechos o a la solución de problemas distintos de los trabajados en el aula o que incluyen libros de texto.
- ii. Dar indicios acerca de qué ideas utilizar para dar la respuesta, ya que muchas veces el alumno no responde adecuadamente sólo porque no adivina que ideas le está pidiendo el profesor que utilice.
- iii. Está claramente definido el destinatario para el que se elabora la respuesta, que generalmente no es el profesor. Si los alumnos responden al profesor, como éste ya sabe la respuesta, se esfuerzan poco en justificar claramente sus ideas o procesos de resolución.

#### **2.4 La enseñanza experimental.**

Una vez que se conocen los conceptos de ideas previas, que se ha trabajado en la resolución de problemas y que se ha elegido un método didáctico de evaluación, es muy importante empezar a trabajar en el papel que el alumno y el docente seguirán en el proceso de enseñanza, ya que una condición fundamental para que el alumno pueda regular su propio proceso de aprendizaje es que identifique qué se va a aprender y por qué.

Un error muy común es que se considera a la enseñanza experimental como un simple agregado a la enseñanza teórica, la cual es pasiva, receptiva y unidireccional en el sentido estudiante, en la cual el estudiante no llega a la comprensión del fenómeno por sus propios medios y con sus sentidos, y no debe considerarse como un apéndice de las actividades que se desarrollan en el interior del salón.

En la enseñanza experimental debe existir un objetivo académico explícito, una intencionalidad definida en lo que se busca: que el estudiante relacione en sus

justos términos a la realidad con su representación en términos de leyes o modelos, ya sea mediante el establecimiento de estas leyes o mediante la aplicación de ellas en la realidad misma, y conforme el estudiante tenga la oportunidad de relacionarse con los fenómenos naturales obtendrá una visión más realista de estos.

Se pueden englobar los principios de la reforma de la enseñanza experimental de la siguiente manera: (Hernández y Llano, 1994)

- i. La adquisición del conocimiento se da a la luz de las evidencias medibles de los fenómenos que ocurren en el laboratorio.
- ii. Mediante una relación directa con el fenómeno, el estudiante tiene la vivencia de constatar las relaciones de causalidad existentes y de ubicar en su espacio de origen la ley, concepto o conocimiento formal.
- iii. Las relaciones de causalidad deben ser encontradas por el estudiante.
- iv. Para ello, se le debe plantear al estudiante una pregunta, un cuestionamiento, un problema bien definido que contenga una incógnita.
- v. El estudiante entonces, al buscar la respuesta al problema planteado, encontrará esas relaciones de causa-efecto del fenómeno.
- vi. En el preciso momento en que el fenómeno se muestra el estudiante lo aprende.

Una vez que se conoce el objetivo que persigue la enseñanza experimental es muy importante mencionar los dos principales protagonistas de esta y sus respectivas funciones: el profesor y el estudiante.

#### **2.4.1 El papel del profesor en la enseñanza experimental.**

Las tareas que debe desarrollar el profesor son consecuencia directa de los objetivos que persigue la enseñanza experimental.

La primera de las actividades es la selección de los temas a ser tratados en la experimentación, considerando dos criterios fundamentales: que los

conocimientos o conceptos a tratar sean los más importantes o formativos de la asignatura y que los fenómenos o conceptos se presten mejor para la experimentación.

Cuando se ha seleccionado el tema, es muy importante relacionarse con el fenómeno, analizarlo, atacarlo, cuantificarlo con precisión, manejarlo, etc.

Una vez que se ha seleccionado y se conoce el fenómeno a experimentar, se presenta la parte más delicada y compleja del proceso: el diseño del guión de enseñanza experimental. Es importante notar que se descarta el término de

“práctica de laboratorio”, ya que en un sentido estricto no se pretende el practicar alguna actividad en forma repetitiva.

Este guión debe tener un título apropiado a los objetivos didácticos que se persiguen y debe incluir la información suficiente y necesaria para que el estudiante pueda experimentar y se acerque hasta una cierta distancia del problema, para que desde ahí, mediante sus propios pasos llegue al objetivo deseado, conozca el fenómeno y resuelva el problema planteado.

La presencia del personal docente debe darse en la concepción, diseño y elaboración por escrito del guión de enseñanza experimental, ya que durante la realización de esta debe estar ausente, entendiendo esa ausencia en términos didácticos y no físicos.

#### **2.4.2 El papel del estudiante en la enseñanza experimental.**

El estudiante tiene la obligación de leer la guía de enseñanza experimental, entender el objetivo a realizar, conocer detalladamente el uso de los materiales, equipos e instrumentos a utilizar, y conocer los reglamentos de seguridad para trabajar en el laboratorio.

Una vez que posee estos conocimientos el estudiante debe realizar las pruebas experimentales que se sugieren, debe medir y observar los eventos señalados. A partir de estas mediciones obtenidas en forma personal y directa, el estudiante debe establecer las relaciones de causalidad en el sistema bajo estudio, esto lo llevará a cabo de la mano de las preguntas sugeridas, de ahí la absoluta necesidad de que este esté realizado de manera adecuada.

En pocas palabras, el estudiante debe percatarse por sí mismo de la existencia del fenómeno, debe encontrarlo justo ahí donde se encuentra, experimentando en y con la naturaleza misma.



# CAPÍTULO III

## DESARROLLO EXPERIMENTAL

### 3.1. Estudio cualitativo del fenómeno (sin alumnos).

Dado que se pretende proponer un guión experimental a los alumnos, y de acuerdo a lo planteado por el Programa de la Reforma de la Enseñanza Experimental, es necesario estudiar en primer lugar la parte cualitativa del proceso de laminación plana, para lo cual se realizó a nivel laboratorio.

Se entiende por laminación plana al proceso de laminación en el cual disminuye el espesor de una placa, aumenta su longitud y el ancho permanece constante.

#### 3.1.1 Objetivo.

- Observar y conocer el fenómeno de laminación plana en laboratorio.

#### 3.1.2 Materiales y equipo.

- Probetas de cobre de 31.7 mm de ancho, 9.5 mm de espesor y 100 mm de largo.
- Vernier.
- Regla.
- Toallas de papel.
- Laminadora Lastra-Filo M120Al.

- Equipo de seguridad en laboratorio (bata de algodón y lentes protectores).

### 3.1.3 Desarrollo.

Se establecieron las dimensiones de la probeta de cobre usada (31.7 mm de ancho, 9.5 mm de espesor y 100 mm de largo), para lo cual es necesario remitirse al manual de uso de la laminadora (Figura 3.1).



FIGURA 3.1. Laminadora Lastra-Filo M120AI.

A continuación se procedió al encendido de la laminadora y a establecer una velocidad constante de laminación (5.6 m/min).

Una vez establecida esta velocidad, se seleccionaron los rodillos planos y se realizó el proceso de laminación introduciendo la probeta de cobre entre los rodillos de la laminadora observando los cambios presentados en la probeta.



FIGURA 3.2. Rodillos seleccionados para realizar la laminación.

El proceso continuó, disminuyendo el espacio entre los rodillos de laminación de forma aleatoria, con el objetivo de observar e identificar los cambios presentados en la probeta, el funcionamiento de la laminadora y la interacción entre ambas, así mismo para establecer el máximo de reducción que se puede lograr (la separación mínima de los rodillos está dada en el manual de la laminadora, pero se pretende conocer este valor real para el cobre en particular).

Posteriormente se calibra la laminadora.

### 3.1.4 Proceso de calibración de la laminadora.

Ver figura (Figura 3.3).

- i. Se reduce el espesor de laminación al mínimo.
- ii. Se retira (1) de la laminadora, jalándola hacia arriba.
- iii. Se giran los engranes (2,3) de manera independiente en el sentido de reducción hasta que se presenta una oposición al giro.
- iv. Se observa que no exista abertura entre los rodillos de laminación (4).
- v. Se coloca nuevamente (1) en la laminadora y se procede a girar de manera que la separación entre los rodillos sea aproximadamente 3 milímetros.
- vi. Si los rodillos están paralelos, el procedimiento de calibración ha terminado, en caso contrario se repite el paso ii y se giran los engranes de manera independiente hasta conseguirlo.

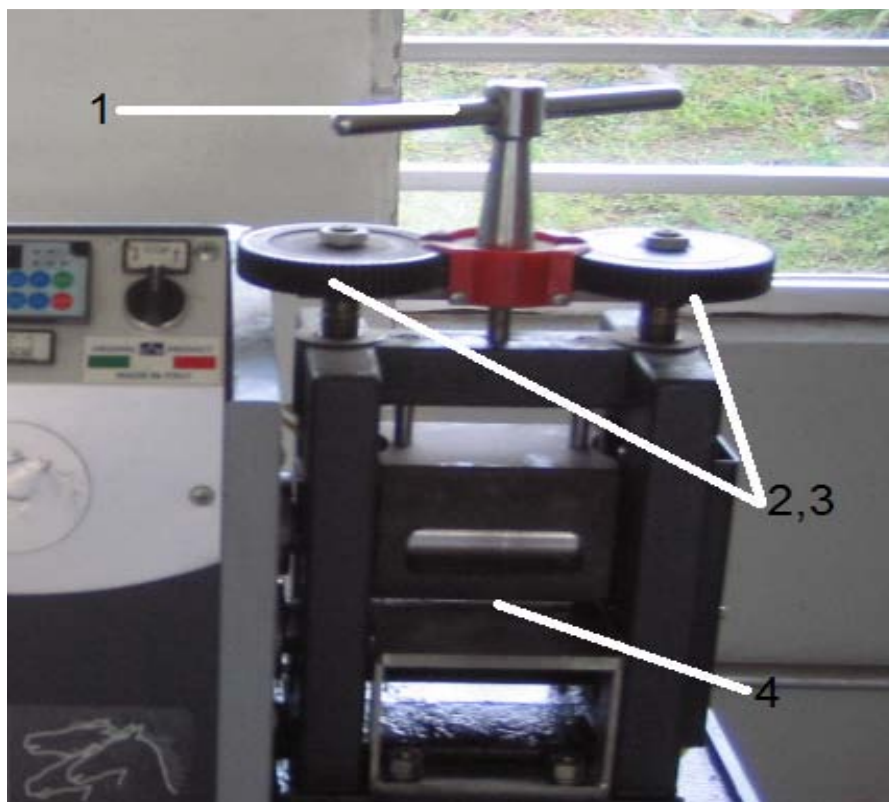


Figura 3.3. Partes de la laminadora utilizadas durante el proceso de calibración del equipo.

Una vez calibrada la laminadora, se efectuará otro proceso de laminación. Todo esto se efectuó sin la presencia de los estudiantes.

El proceso se realizó hasta una deformación de aproximadamente 0.5 mm, y tomando como base los defectos que aparecieron se estableció un valor de 1 mm como espesor mínimo para realizar la parte cuantitativa del fenómeno.

Para facilitar el análisis cuantitativo del fenómeno se establecieron las siguientes consideraciones:

- i. Velocidad de proceso constante.
- ii. Dimensiones constantes de la probeta al inicio.
- iii. Reducción constante en cada uno de los pasos de laminación.

La velocidad constante se estableció debido a que el objetivo del desarrollo del guión experimental es que el alumno comprenda el fenómeno, lo analice y lo observe, e incluir una variable más al proceso dificulta el objetivo perseguido.

Las dimensiones constantes de la probeta y la reducción constante en cada uno de los pasos de laminación tienen el objetivo de realizar un análisis más objetivo del proceso, además de permitir que este proceso sea reproducible.

### **3.2 Evaluación inicial: conocimientos previos de los alumnos.**

Con el objetivo de conocer los conocimientos previos de los alumnos (Black y William, 1998) sobre el tema de laminación se realizó una encuesta sobre el tema.

Las preguntas fueron las siguientes:

- a) ¿En qué consiste el proceso de laminación?
- b) ¿Qué consideras que le sucede a un material durante el proceso de laminación?
- c) ¿Qué objetos conoces que se producen por laminación?
- d) Dibuja un esquema de lo que consideres es el proceso de laminación.
- e) ¿Cuántos tipos de laminación crees que existen?
- f) ¿Qué crees que le sucede a las propiedades de un metal al ser laminado?

- g) Dibuja la microestructura que creas que se presenta en un material antes y después de ser laminado.
- h) ¿Qué defectos crees que se presenten durante el proceso de laminación?
- i) ¿Cuáles consideras que son las variables de entrada y las variables de salida en un proceso de laminación?
- j) De las materias cursadas hasta este momento, menciona cuales de ellas crees que son útiles para comprender el proceso de laminación.

Un parámetro importante para obtener respuestas representativas de los conocimientos previos de los alumnos, es que estas preguntas se realizaron antes de que en clase de teoría se abordara el tema de laminación, con el objetivo de que los alumnos, sin los antecedentes de Conformado Mecánico, escribieran los conceptos que se han ido formando durante el transcurso de la carrera.

### **3.3 Estudio cualitativo con los alumnos.**

Después de analizar los cuestionarios anteriores de los alumnos se realizó la laminación con ellos con el objetivo de que conozcan y observen el proceso de laminación.

De acuerdo a lo establecido en los principios de la reforma de la enseñanza experimental (Hernández y Llano, 1994), se establecieron las siguientes consideraciones para el estudio cualitativo del fenómeno:

- Los alumnos deben observar el fenómeno.
- Los alumnos deben interactuar con el fenómeno.
- El profesor únicamente es un espectador en el desarrollo del estudio del fenómeno.

Tomado como base las propuestas anteriores, el desarrollo del estudio cualitativo se llevó a cabo con la metodología utilizada en el punto 3.1, los alumnos realizaron la calibración del equipo de acuerdo a sus observaciones y deducciones.

Los alumnos estaban divididos en 3 grupos (1, 2 y 3) y se trabajó con cada grupo por separado.

Como primer paso se les expuso a los estudiantes el método de trabajo de la parte cualitativa, haciendo un especial énfasis en que pusieran atención al fenómeno, que lo observaran, que trataran de identificar las variables y que se familiarizaran con él.

A continuación se les condujo al laboratorio 110 del edificio D de la Facultad de Química, se les presentó la laminadora, se mostró su correcto funcionamiento, las medidas de seguridad y se les proporcionó una probeta de cobre de 31.7 mm de ancho, 9.5 mm de espesor y 100 mm de largo (esto con el objeto de tener un valor de referencia inicial que sirva como control para el proceso).

Una vez con la explicación del funcionamiento y con el material en sus manos, se les indicó que procedieran a deformar la probeta.

### **3.4 Evaluación a lo largo del proceso de enseñanza.**

Con el objeto de determinar la evolución de las ideas de los alumnos durante el proceso de aprendizaje se aplicó el siguiente cuestionario:

- a) Describe qué cambios observaste en la probeta durante el laminado.
- b) Describe qué problemas encontraste durante el proceso.
- c) Describe los defectos presentes en la probeta durante el proceso de laminado.
- d) Menciona en qué momento es conveniente detener el proceso.
- e) Escribe qué harías para controlar el proceso.

### **3.5 Estudio cuantitativo del fenómeno.**

Ahora se procede a analizar la parte cuantitativa del proceso de laminación, efectuado con los estudiantes divididos en tres grupos.

### **3.5.1 Objetivo.**

Determinar cuantitativamente los parámetros principales del proceso de laminación y los cambios físicos producidos en el cobre por el proceso.

### **3.5.2 Materiales y equipo.**

- Probetas de cobre de 31.7 mm de ancho, 9.5 mm de espesor y 100 mm de largo.
- Vernier.
- Regla.
- Toallas de papel.
- Laminadora Lastra-Filo M120Al.
- Equipo de seguridad en laboratorio (bata de algodón y lentes protectores).
- Adquisidor de datos Iotech P3000.
- Celda de carga.
- Software DaqView.
- Laptop.
- Software Microsoft Excel.
- Software Sigma Plot 10.0.
- Durómetro Macromet® 3 Buehler “Rockwell/Superficial Type Hardness Tester”.
- Juego de lijas.
- Alúmina.
- Microscopio metalográfico.
- Cloruro férrico.
- Pulidoras.





Figura 3.5. Equipo utilizado durante la prueba. 1) Laptop, 2) Celda de carga, 3) Adquisidor de datos, 4) Vernier, 5) Regla, 6) Laminadora.

### 3.5.3 Desarrollo.

El primer paso es realizar el proceso de calibración de la laminadora, según lo descrito en el punto 3.1.4.

Después se tomaron las medidas iniciales de la probeta y se procede a conectar la celda de carga con el adquisidor de datos y a colocar esta en la laminadora. Se conecta el adquisidor de datos y se arranca el Software DaqView.

Después se realiza el proceso de laminación con intervalos de reducción del espesor de aproximadamente 0.2 mm en cada paso.

En cada intervalo de deformación se registran los valores de Voltaje (V) obtenidos mediante el adquisidor de datos y la celda de carga y se registran los cambios en las dimensiones de la probeta.

Se continúa con el proceso de laminación hasta obtener un valor aproximado de 1 mm de espesor.

Una vez obtenidos los valores de voltaje, la calibración de la celda de carga establece la transformación de estos valores a Fuerza (N) y se da un tratamiento matemático a estos datos mediante el Software Microsoft Excel y Sigma Plot 10.0.

Se realiza la gráfica de Esfuerzo vs Deformación del proceso.

Se efectúan varios pasos de laminación con el objetivo de obtener muestras con diferente valor de deformación para observar la microestructura y la dureza del cobre laminado. Esto se lleva a cabo cortando un tramo de la probeta con los espesores de 9.5 mm, 8.5 mm, 7.5 mm, 6.5 mm, 4.5 mm, 3.5 mm, 2.5 mm y 1.5 mm.

Se pulen las probetas obtenidas a espejo y se mide la dureza con el Durómetro utilizando la escala HRB, se atacan con Cloruro Férrico y se observan mediante el microscopio metalográfico.

### **3.6 Evaluación al final del proceso.**

Finalmente se aplica el siguiente cuestionario a los alumnos:

- a) ¿En qué consiste el proceso de laminación?
- b) ¿Qué cambios sufren los metales durante el proceso de laminación?
- c) ¿Qué defectos se presentan durante el proceso de laminación?
- d) Basándote en la curva de esfuerzo vs deformación explica la variación de la energía utilizada en el proceso de laminación.
- e) Basándote en las metalografías de la probeta explica los cambios físicos ocurridos en la probeta.
- f) Explica como utilizarías los conocimientos obtenidos para la resolución de problemas en la industria.
- g) Especifica en qué aspectos cambió tu concepto previo sobre el proceso de laminación.
- h) ¿Qué modificaciones sugieres para enriquecer esta “práctica”?

# CAPÍTULO IV

## RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 4.1. Estudio cualitativo del fenómeno (sin alumnos).

Realizar el proceso en forma cualitativa permite identificar lo que sucede en el sistema y en sus alrededores, así como los problemas que se presentan durante el proceso.

El primer problema encontrado fue que no se puede plantear una reducción de espesor mayor a 0.4 mm, debido a que la capacidad de la máquina es insuficiente para producir una gran deformación del material.

Una vez conocido el parámetro anterior, el proceso de laminación continúa, poco a poco se va observando como el espesor de la probeta de cobre se va reduciendo y se puede notar que se presenta una curvatura en esta, debido que la laminadora se encuentra mal calibrada (Figuras 4.1 – 4.3)



FIGURA 4.1 Probeta deformada por un mal calibrado del equipo.



FIGURA 4.2. Probeta deformada por un mal calibrado del equipo después de 5 deformaciones.



FIGURA 4.3. Probeta deformada al término del proceso por un mal calibrado del equipo.

Esta curvatura que se presenta en la probeta es debido a que los rodillos se encuentran mal calibrados (Figura 4.4.a), ocasionando que en la parte donde se aplica una fuerza de compresión mayor, tienen una menor separación originando una mayor velocidad de laminación en ese punto.

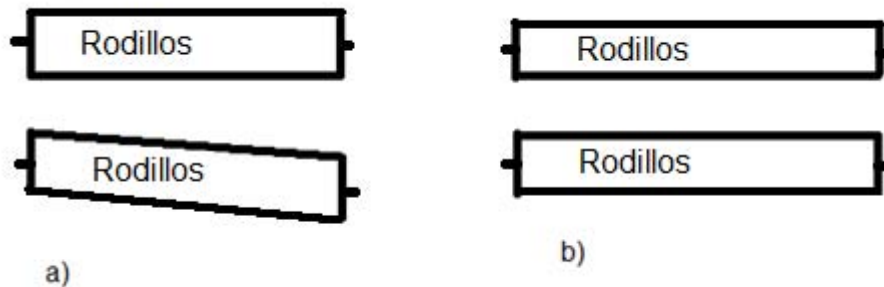


FIGURA 4.4. Calibración de los rodillos. a) Rodillos incorrectamente calibrados. b) Rodillos correctamente calibrados.

Posteriormente se calibró correctamente el equipo y se repitió el proceso de laminación.

En este punto del proceso de laminación el defecto anteriormente mencionado fue prácticamente inexistente; sin embargo se presentaron nuevos defectos en la probeta conforme el proceso se iba llevando a cabo.



FIGURA 4.5. Defecto en la probeta durante el laminado (vista lateral).

En la Figura 4.2 se observa como la probeta conforme se va laminando empieza a deformarse formando “ondas”, esto se debe a que la laminadora utilizada no tiene un riel o canal que la guíe.

Al existir una gran deformación se presentan los siguientes defectos en la probeta (Figuras 4.6-4.8):



FIGURA 4.6. Defecto en un extremo de la probeta: formación de un borde curvo.

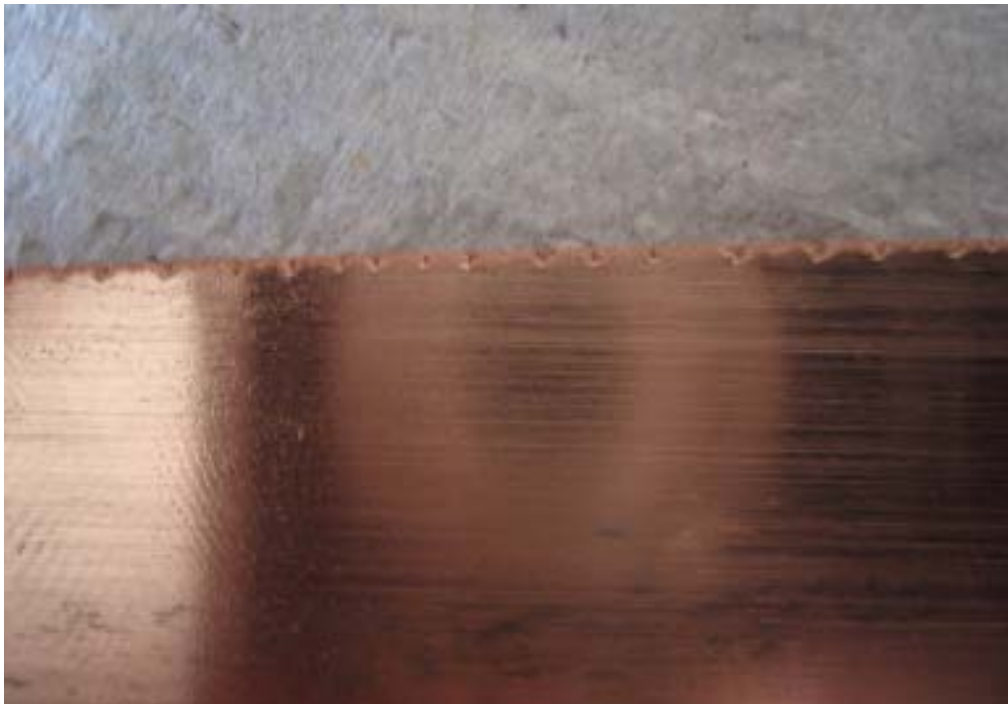


FIGURA 4.7. Defecto lateral en la probeta: formación de grietas en el borde.



FIGURA 4.8. Defecto en el espesor de la probeta: formación de separación de la lámina, conocido como “boca de cocodrilo”.

Cuando la deformación de la probeta es muy grande, empiezan a aparecer una serie de defectos muy singulares, estos defectos son causados por un endurecimiento del material que ha alcanzado su límite de fluencia, fragilizándose y por lo tanto fracturándose.

En forma paralela se presentan tres fenómenos muy importantes de mencionar:

- a) Un incremento en la temperatura del metal.
- b) Una recuperación elástica.
- c) Una mejoría en el acabado superficial.

El primer fenómeno sucede debido a la Ley de la Conservación de la Energía (Primera ley de la Termodinámica), el trabajo realizado por los rodillos durante el proceso de laminación se transforma en calor, de la misma manera la mayor parte del trabajo generado en la microestructura del metal al momento de deformarse se desprende en forma de calor.



Este desprendimiento de calor no se considera importante en el desarrollo de la práctica, debido a que el gradiente de temperatura obtenido no es tan grande como para afectar el proceso de laminación en frío, siendo únicamente de unos pocos grados Celsius.

La recuperación elástica es un fenómeno que existe en cualquier proceso de conformado mecánico, todo metal al ser deformado tiende a recuperar su forma original, en este caso, la recuperación elástica es despreciable en comparación con la deformación plástica que sufre el metal.

Respecto al acabado superficial, al final del proceso de laminación se observa que la superficie de la probeta tiene un mejor acabado superficial, más lisa y más brillante, esto es debido a que durante el proceso el material reproduce la superficie del rodillo.

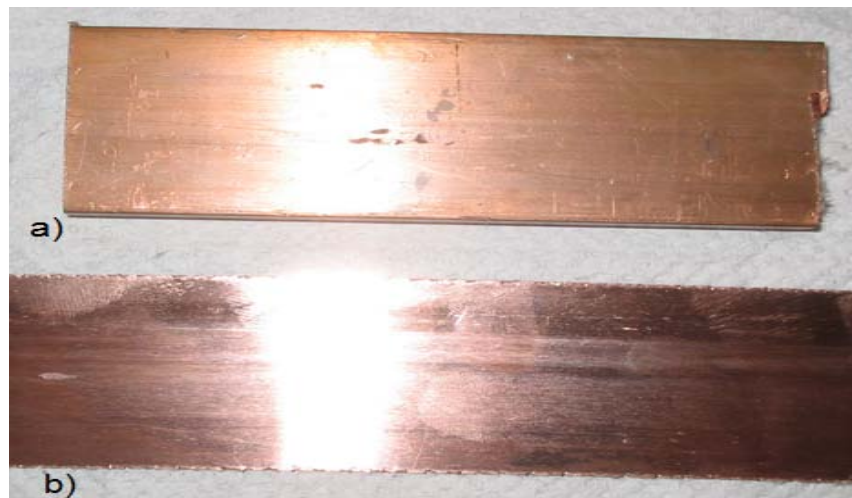


FIGURA 4.9. Diferencia en el acabado superficial de la probeta. a) Antes del proceso.

b) Al final del proceso.

## **4.2 Conocimientos previos de los alumnos.**

Después de aplicar el cuestionario para realizar la evaluación inicial (Ver capítulo 4.2), se analizó y se obtuvieron los siguientes resultados:

Número total de encuestas realizadas: 25.

### **a) ¿En qué consiste el proceso de laminación?**

El 48% de los alumnos mencionó que la laminación se lleva a cabo mediante rodillos.

El 24% mencionó que el objetivo de la laminación es obtener láminas.

El 52% mencionó que en el proceso se persigue una reducción del espesor.

El 28% se expresó de forma vaga que puede referirse a cualquier proceso mecánico.

Los alumnos que representa este 28% utilizaron respuestas como: “Reducción de área de un tocho”, “En aprovechar las propiedades de maleabilidad de los metales para poder deformarlos mecánicamente” y “En deformar plásticamente a un metal”.

### **b) ¿Qué consideras que le sucede a un material durante el proceso de laminación?**

El 48% menciona que existe un cambio en las propiedades mecánicas del metal.

El 64% hace mención a un cambio en la microestructura.

Únicamente un alumno mencionó que existe un desprendimiento de energía del proceso en forma de calor.

**c) ¿Qué objetos conoces que se producen por laminación?**

El 52% mencionó láminas o varillas.

El 36% mencionó partes de automóviles.

El 16% mencionó perfiles.

**d) Dibuja un esquema de lo que consideres es el proceso de laminación.**

El esquema predominante fue el siguiente:

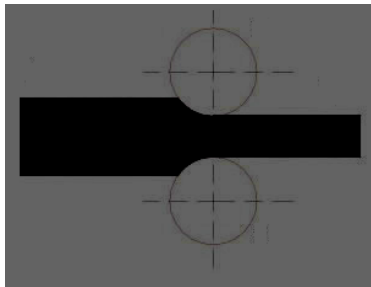


FIGURA 4.10. Esquema del proceso de laminación

dibujado por los estudiantes.

Únicamente un alumno no dibujó un esquema del proceso de laminación.

**e) ¿Cuántos tipos de laminación crees que existen?**

El 68% de los alumnos mencionó que existen dos tipos: laminación en frío y laminación en caliente.

El 24% no contestó.

El 8% mencionó que existen dos tipos de laminación: plana y no plana.

**f) ¿Qué crees que le sucede a las propiedades de un material al ser laminado?**

El 56% menciona un aumento en la dureza.

Un estudiante menciona que la dureza disminuye.

El 12% hace mención de que el material se fragiliza.

Un alumno menciona que el material se vuelve más dúctil.

**g) Dibuja la microestructura que creas que se presenta en un material antes y después de ser laminado.**

El siguiente esquema fue dibujado por el 100% de los alumnos.

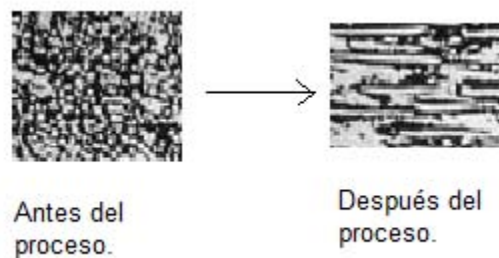


FIGURA 4.11. Cambio en la microestructura durante el proceso de laminación.

**h) ¿Qué defectos consideras que se presentan durante el proceso de laminado?**

El 88% de los alumnos menciona defectos microscópicos, tales como maclas, límites de grano, vacancias, deformaciones cristalinas.

El 16% mencionó defectos macroscópicos, como deformaciones plásticas y fracturas.

Un alumno no respondió a esta pregunta.

**i) ¿Cuáles consideras que son las variables de entrada y las variables de salida en un proceso de laminación?**

El 52% de los alumnos respondió esta pregunta sin hacer distinción entre las variables de entrada y las variables de salida, las respuestas fueron: temperatura, velocidad, propiedades, tamaño de grano, tiempo, microestructura, velocidad, lubricación, velocidad de enfriamiento, espesor, fuerza aplicada.

El 32% de los alumnos respondió la pregunta separando los tipos de variables, las respuestas fueron:

- Variables de entrada: Temperatura, tamaño de la pieza, tipo de material, porcentaje de reducción, tamaño de grano, velocidad de entrada, fuerza aplicada.
- Variables de salida: Temperatura, esfuerzos residuales y acumulados, propiedades mecánicas, espesor final, estructura, tamaño de grano, velocidad de salida.

El 16% de los alumnos no respondió a esta pregunta.

**j) De las materias que has cursado hasta este momento, menciona cuales de ellas crees que son útiles para comprender el proceso de laminación.**

Las materias fueron las siguientes (ordenadas de acuerdo al número de menciones):

- Comportamiento mecánico de los metales: 18
- Fundamentos de metalurgia y materiales: 16
- Transformaciones de fase: 14
- Introducción a la ciencia e ingeniería de materiales: 14
- Tratamientos térmicos: 12
- Metalurgia y sociedad: 2
- Transporte de masa: 1
- Transporte de energía: 1
- Procesos de solidificación: 1

Analizando los datos obtenidos en la encuesta, se observa que la mayoría de los alumnos no posee un concepto muy definido del proceso de laminación, intuyen en gran medida el concepto, pero se notan deficiencias en este, por ejemplo, un 28% de los alumnos mencionó que el proceso de laminación consiste en deformar un metal, y si bien esto es algo que se lleva a cabo en el proceso de laminación, también puede referirse a cualquier otro proceso, como extrusión, forja, trefilado, etc.

Otro punto a considerar es que los alumnos en su mayoría están acostumbrados a mencionar los cambios en los materiales durante los procesos en forma microscópica (64%) en comparación con los que consideran cambios en las propiedades mecánicas (48%). Esto se ve ratificado al momento de preguntarles a los alumnos qué tipo de defectos se presentan en las probetas durante el proceso de laminación, aquí la diferencia fue aun más notable: los alumnos que mencionan que existen defectos microscópicos, como vacancias y dislocaciones (88%) son mayoría en comparación con los alumnos que mencionan defectos macroscópicos como deformaciones plásticas y fracturas (16%).

Lo anterior indica que los alumnos tienden a imaginar un proceso en forma microscópica, tomando como referencia instantánea imágenes de metalografías,

descuidando lo que se debe observar a nivel macroscópico, los defectos que están a simple vista.

Es por eso que es muy importante que los alumnos observen y conozcan el proceso antes de atacar los problemas matemáticos que se derivan de él, que lo analicen y que lo identifiquen.

Con esta información se prosigue con una metodología de análisis cualitativo del fenómeno.

### **4.3 Estudio cualitativo con los alumnos.**

Se observó que los alumnos no están acostumbrados a trabajar por su cuenta, a plantearse por sí mismos una metodología a seguir, teniendo el material y la maquinaria a su alcance no sabían cómo iniciar la deformación.

Surgieron frases como: No sé qué hacer, nos podrían orientar que procedimiento llevar, me siento desnudo frente al proceso.

Una vez que los alumnos superaron el desconcierto inicial, comenzaron a realizar la laminación (Figura 4.12).

Establecieron una velocidad de los rodillos, y cuanto querían deformar la probeta.

Aquí se encontraron con el problema de que si ellos querían deformar en grandes cantidades, la laminadora no lo permitía, así que plantearon una deformación cada vez menor hasta que la probeta pasó entre los rodillos.



FIGURA 4.12. Alumnos observando los cambios sufridos por una probeta durante el proceso de laminación.

Al seguir realizando el proceso, los alumnos siguieron enfrentando problemas, uno muy importante que se presentó fue la curvatura de las probetas, causada por una mala calibración del equipo.

Ellos externaron sus dudas y preguntaron cómo resolver este problema, y se les dio la indicación de que lo resolvieran por sí mismos. La forma en cómo intentaron calibrar el equipo fue de diferente manera entre los grupos, un grupo planteó usar un nivel entre los engranes para ver si estaban alineados, otro grupo contar las vueltas de los tornillos que soportan los engranes para ver si eran las mismas y decidir si los rodillos estaban calibrados, y finalmente otro grupo abrir lo más posible los rodillos y luego bajarlos en forma paralela para asegurarse que estuvieran alineados.



Una vez que los alumnos hicieron la suposición de que la laminadora se encontraba calibrada, continuaron con el experimento, observando, analizando, tratando de explicar que sucedía con el material hasta que se llegó a un espesor aproximado de 1mm.



FIGURA 4.13. Probeta laminada con defecto debido a una calibración inadecuada.

En este punto los alumnos observaron tanto los defectos que se producen en la probeta por una deformación excesiva, como los causados por una mala calibración del equipo, de lo cual se dieron cuenta por la forma de la probeta al final del laminado (Figuras 4.13 y 4.14).



FIGURA 4.14. Curvatura presentada en una probeta al término de la laminación ocasionada por un mal calibrado del equipo.

De esta forma se concluyó la parte de análisis cualitativo con los alumnos y se prosiguió con la evaluación.

#### **4.4 Evaluación a lo largo del proceso de enseñanza.**

La siguiente encuesta tuvo como objetivo analizar si existió un cambio en las ideas previas de los alumnos respecto al proceso de laminación.

##### **a) Describe que cambios observaste en la probeta durante el laminado.**

El 74% de los alumnos mencionó que se produjo un aumento en la temperatura de la probeta.

El 62% de los alumnos mencionó que aparecen pequeñas rayas en la dirección en que se realizó el proceso.

El 84 % mencionó que la superficie de la probeta se pone más brillante

El 100% menciona que la probeta se alarga y disminuye su espesor.

**b) Describe que problemas encontraste durante el proceso.**

El 90% mencionó que el principal problema fue que los rodillos no se encontraban totalmente alineados.

El 68% de los alumnos mencionó que la probeta se “enchuecaba”.

El 58% mencionó la dificultad de que la laminadora no puede realizar grandes deformaciones en un solo paso.

**c) Describe los defectos presentes en la probeta durante el proceso de laminado.**

El 76% de los alumnos mencionó que la laminación no era homogénea, incluyendo dobleces e imperfecciones en la superficie.

El 88% de los alumnos mencionó que la probeta presentó una curvatura muy pronunciada al final del proceso.

El 78% mencionó que la probeta se rompe en los extremos de la probeta y en la parte lateral.

**d) Menciona en qué momento es conveniente detener el proceso.**

El 22% mencionó que se debe detener cuando por un exceso de deformación se pueda dañar el equipo.

El 74% mencionó que se debe detener cuando el material alcanza el espesor deseado.

El 84% mencionó que se debe detener cuando el material empieza a fracturarse.

**e) Escribe qué harías para controlar el proceso.**

Una de las propuestas fue el utilizar canaletas para que la probeta no se ladeara durante el proceso, también el control de la velocidad, la dirección de entrada de la probeta así como el correcto calibrado de los rodillos durante la laminación.

También se propuso el llevar un control de la dureza y la temperatura para ir conociendo las propiedades del metal a laminar.

Al analizar las respuestas obtenidas se observó que la mayoría de los estudiantes analizaron el proceso desde un punto de vista macroscópico, observando el fenómeno y familiarizándose con él.

#### **4.5 Estudio cuantitativo del fenómeno.**

Una vez analizada la parte cualitativa del proceso, se procede a analizar la parte cuantitativa en cada grupo, lo cual constituye un experimento realizado por triplicado.

En primer lugar se analizó el cambio en las dimensiones de la probeta. Se consideraron el ancho de la probeta, el espesor y la longitud. El medir el ancho de la probeta únicamente se utilizó como referencia, debido a que se tomó como base la consideración de una deformación plana.

En la Tabla 4.1 se muestra un ejemplo de las dimensiones obtenidas.

| Pasos | Ancho (mm) | Espesor (mm) | longitud (mm) |
|-------|------------|--------------|---------------|
| 1     | 31.74      | 9.55         | 101.00        |
| 2     | 31.81      | 9.51         | 101.00        |
| 3     | 31.76      | 9.49         | 101.00        |
| 4     | 31.83      | 9.32         | 102.00        |
| 5     | 31.90      | 9.15         | 103.50        |
| 6     | 31.92      | 8.92         | 107.00        |
| 7     | 32.04      | 8.74         | 109.00        |
| 8     | 32.14      | 8.54         | 112.00        |
| 9     | 32.26      | 8.34         | 114.50        |
| 10    | 32.30      | 8.15         | 117.00        |
| 11    | 32.40      | 7.94         | 121.00        |
| 12    | 32.45      | 7.74         | 124.00        |
| 13    | 32.57      | 7.565        | 127.00        |
| 14    | 32.57      | 7.32         | 130.00        |
| 15    | 32.45      | 7.14         | 134.00        |
| 16    | 32.69      | 6.96         | 137.00        |
| 17    | 32.90      | 6.75         | 142.00        |
| 18    | 32.79      | 6.605        | 145.50        |
| 19    | 32.74      | 6.395        | 150.50        |
| 20    | 32.28      | 6.27         | 155.50        |
| 21    | 32.74      | 5.9          | 160.00        |
| 22    | 32.68      | 5.69         | 166.00        |
| 23    | 32.72      | 5.51         | 172.00        |
| 24    | 32.89      | 5.33         | 177.00        |
| 25    | 33.04      | 5.09         | 184.50        |
| 26    | 33.22      | 4.89         | 193.00        |
| 27    | 33.09      | 4.7          | 201.00        |
| 28    | 33.06      | 4.49         | 209.50        |
| 29    | 33.13      | 4.29         | 218.00        |
| 30    | 33.15      | 4.09         | 229.50        |
| 31    | 33.13      | 3.9          | 241.00        |
| 32    | 33.16      | 3.69         | 254.50        |
| 33    | 33.18      | 3.48         | 269.00        |
| 34    | 33.33      | 3.31         | 284.00        |
| 35    | 33.18      | 3.1          | 302.50        |
| 36    | 33.26      | 2.84         | 323.50        |
| 37    | 33.22      | 2.71         | 346.50        |
| 38    | 33.39      | 2.51         | 372.00        |
| 39    | 33.36      | 2.3          | 402.00        |
| 40    | 33.52      | 2.11         | 440.00        |
| 41    | 33.56      | 1.91         | 483.00        |
| 42    | 33.36      | 1.72         | 539.00        |
| 43    | 33.71      | 1.54         | 610.00        |
| 44    | 33.23      | 1.32         | 698.50        |
| 45    | 33.71      | 1.14         | 811.00        |
| 46    | 33.69      | 0.95         | 965.00        |

TABLA 4.1. Variación de las dimensiones de la probeta durante el proceso.

Los GRÁFICOS 4.1 a 4.3 muestran la variación de la longitud, el ancho y el espesor de cada placa deformada.

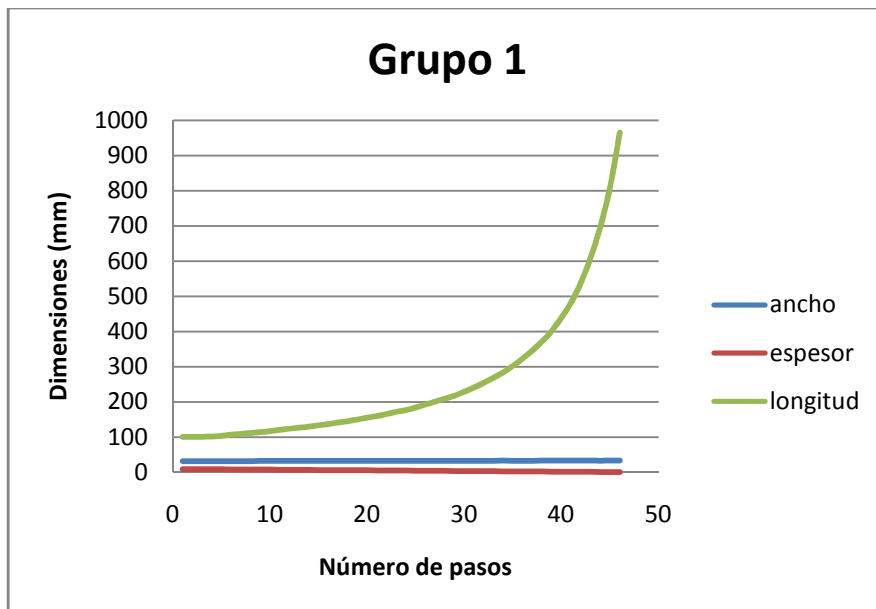


GRÁFICO 4.1. Variación de las dimensiones de la probeta. Grupo 1.



GRÁFICO 4.2. Variación de las dimensiones de la probeta. Grupo 2.

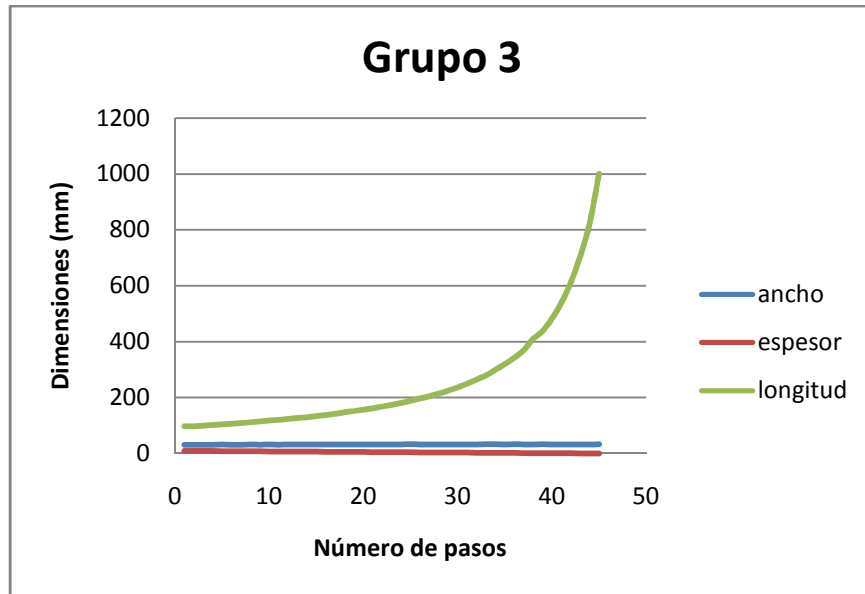


GRÁFICO 4.3. Variación de las dimensiones de la probeta. Grupo 3.

Se observó que las variaciones de las probetas en los tres casos fueron prácticamente iguales. El incremento en la longitud tiene un comportamiento exponencial, el ancho prácticamente se mantiene con un valor constante, mientras que el espesor disminuye con un comportamiento lineal.

Esto reafirma la teoría de que se está realizando una deformación plana en la que hay cambio únicamente en dos dimensiones: espesor y longitud.

Para observarlo más detalladamente se muestran en un mismo gráfico los valores de longitud y espesor de los tres grupos:

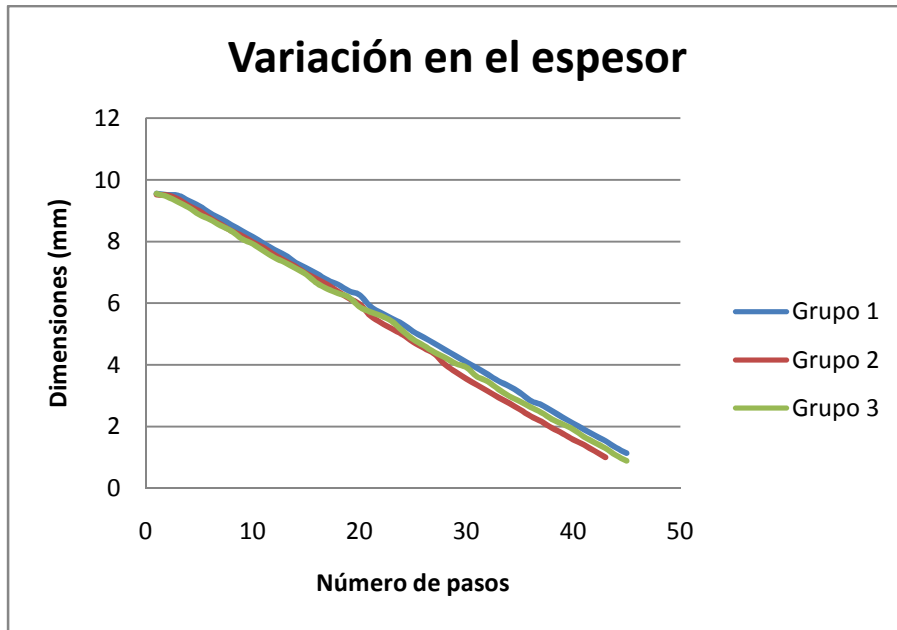


GRÁFICO 4.4. Variación en el espesor de la probeta en las tres pruebas.

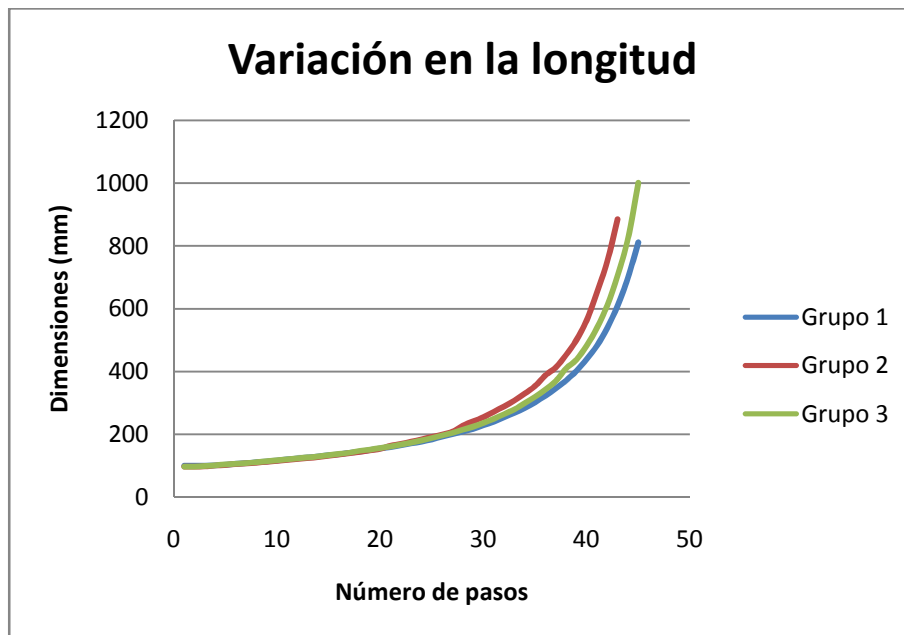


GRÁFICO 4.5. Variación en el largo de la probeta en las tres pruebas.

En los GRÁFICOS 4.4 y 4.5 se observa que el comportamiento del material es muy parecido entre las tres pruebas que se realizaron, lo cual indica que la prueba sí es reproducible.



Durante la laminación final, en cada grupo se utilizó una laptop, un adquisidor de datos Iotech P3000, celda de carga y el software DaqView que proporciona los siguientes datos en cada una de las reducciones de espesor (0.2 mm):

|    | A        | B   | C          | D        |
|----|----------|-----|------------|----------|
| 1  | Time     | ms  | Date       | PD1_A01  |
| 2  |          |     |            | V        |
| 3  | 15:44:57 | 0   | 05/03/2009 | 9.76E-08 |
| 4  | 15:44:57 | 111 | 05/03/2009 | 9.76E-08 |
| 5  | 15:44:57 | 222 | 05/03/2009 | 6.10E-08 |
| 6  | 15:44:57 | 333 | 05/03/2009 | 1.10E-07 |
| 7  | 15:44:57 | 444 | 05/03/2009 | 7.32E-08 |
| 8  | 15:44:57 | 555 | 05/03/2009 | 1.22E-07 |
| 9  | 15:44:57 | 666 | 05/03/2009 | 1.10E-07 |
| 10 | 15:44:57 | 777 | 05/03/2009 | 7.32E-08 |
| 11 | 15:44:57 | 888 | 05/03/2009 | 1.10E-07 |
| 12 | 15:44:58 | 999 | 05/03/2009 | 9.76E-08 |
| 13 | 15:44:58 | 110 | 05/03/2009 | 9.76E-08 |
| 14 | 15:44:58 | 221 | 05/03/2009 | 9.76E-08 |
| 15 | 15:44:58 | 332 | 05/03/2009 | 7.32E-08 |
| 16 | 15:44:58 | 443 | 05/03/2009 | 8.54E-08 |
| 17 | 15:44:58 | 554 | 05/03/2009 | 7.32E-08 |
| 18 | 15:44:58 | 665 | 05/03/2009 | 7.32E-08 |
| 19 | 15:44:58 | 776 | 05/03/2009 | 9.76E-08 |
| 20 | 15:44:58 | 887 | 05/03/2009 | 8.54E-08 |

TABLA 4.2. Datos obtenidos mediante el adquisidor de datos Iotech P3000, celda de carga y el software DaqView

En la columna A se indica la hora en la que se está realizando el proceso, en la columna B los milisegundos del proceso, en la columna C la fecha y en la columna D los datos obtenidos por la celda de carga durante el proceso en Volts (V).

En la TABLA 4.2 hay 18 valores de voltaje, los cuales son un ejemplo de los datos obtenidos. El total de datos obtenidos fue de 4854 mediciones de voltaje distribuidas entre cada uno de los pasos que se realizaron durante el proceso de laminación.

Con los datos anteriores se procedió a obtener los datos de tiempo de proceso dividiendo la columna B entre 1000 para obtener segundos y aplicando en la columna A la fórmula **=Hora actual/HORANUMERO("00:00:01")-Hora inicial/HORANUMERO("00:00:01")** para realizar el cambio de hora a tiempo de proceso y sumando ambas columnas para obtener el tiempo total.

El siguiente paso dado fue convertir los valores de Voltaje (V) en valores de Fuerza (kN), para lo cual se utilizó la siguiente fórmula:

$$F = 2392.6 * V + 0.4615$$

Donde: F = Fuerza (kN).

V = Voltaje (V).

La fórmula anterior se obtuvo mediante la Máquina MTS-810, se aplicó una fuerza de compresión conocida en una probeta y se leyó el voltaje obtenido mediante la celda de carga, tal como se muestra en el Gráfico 4.6.

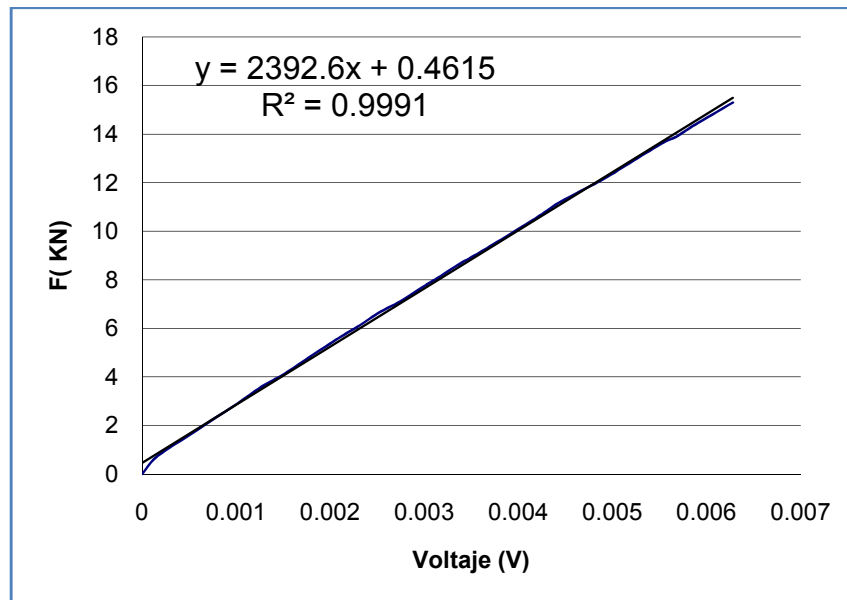


GRÁFICO 4.6. Curva de calibración usada para obtener la ecuación de Fuerza en función del Voltaje.

A los valores de fuerza les fue aplicado un factor de corrección de 0.46164591 kN, esto es debido a que cuando la probeta se encontraba fuera de la laminadora, la celda de carga registró mediciones, las cuales deben ser eliminadas, considerando que si la probeta se encuentra fuera del proceso, los valores de fuerza aplicada son iguales a cero.

En el GRÁFICO 4.7 se muestran los valores de fuerza (kN) vs tiempo (s).

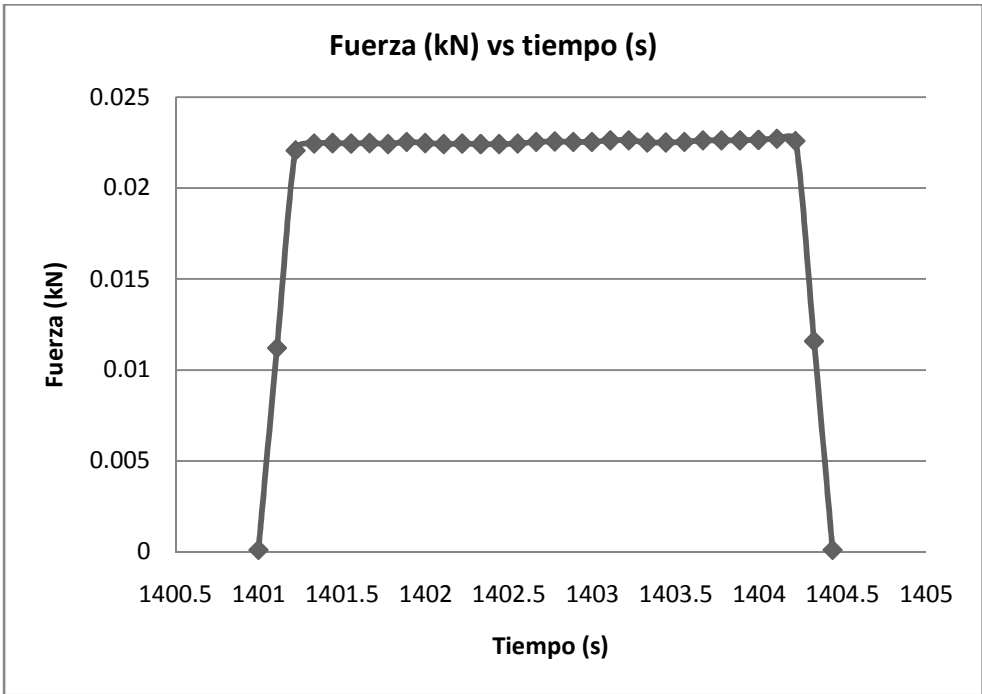


GRAFICO 4.7. Fuerza (kN) vs tiempo de proceso (s).

El Gráfico 4.7 es únicamente una muestra del procedimiento llevado a cabo en un paso, esto se repitió en cada uno de los 34 pasos realizados durante todo el proceso y representa el lapso de tiempo en el cual la probeta entra en la laminadora y sale de esta.

Como se observa en el Gráfico 4.7 se tiene un valor de fuerza respecto a un valor de tiempo, y lo que se pretende es obtener un valor de fuerza promedio que represente cada una de las reducciones de espesor.

Para obtenerlo se utilizó el teorema del valor medio:

$$\bar{F} = \frac{\int F(t)dt}{\int dt}$$

Donde  $\bar{F}$  = Fuerza promedio

$dt$  = diferencial de tiempo.

Para evaluar el área bajo la curva se utilizó el software SigmaPlot 10.0.

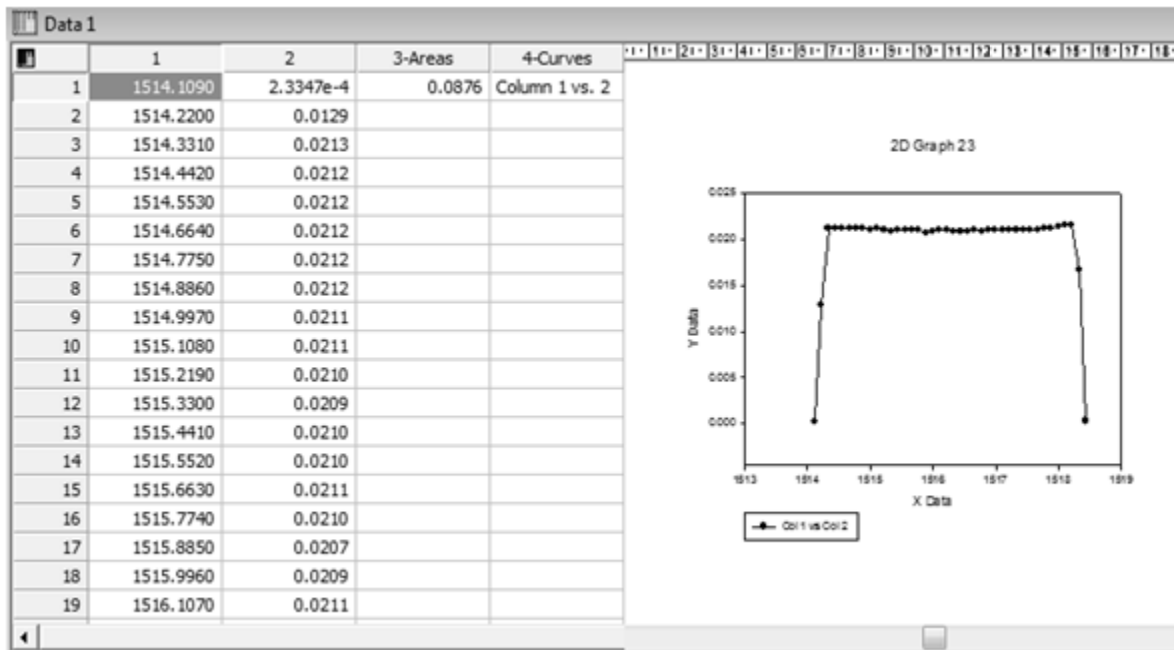


FIGURA 4.15. Software SigmaPlot.

El valor obtenido mediante SigmaPlot se divide entre el tiempo de proceso de ese paso en específico y se obtiene un valor de fuerza promedio en todo el paso.

Lo siguiente fue realizar un gráfico de esfuerzo vs deformación, para lo cual es necesario dividir la fuerza aplicada en cada paso entre el área en la cual se aplicó la fuerza.

El área que se necesitó para realizar los cálculos es el área de contacto (A) y se evaluó con la siguiente fórmula:

$$A = W\sqrt{R * \Delta h}$$

Donde: A = área de contacto

R = diámetro de los rodillos

$\Delta h$  = delta de espesor de la probeta

W = ancho de la probeta

Para evaluar la deformación real del espesor se utilizó la siguiente definición:

$$\varepsilon = \ln \frac{h}{h_0}$$

Donde  $\varepsilon$  = Deformación real del espesor

h = espesor

$h_0$  = espesor inicial

En la Tabla 4.3 se muestra un ejemplo de los datos obtenidos para determinar el esfuerzo requerido para lograr una deformación deseada:

| Pasos | $\Delta t$ (s) | F (kN)     | $\Delta$ espesor (mm) | A (mm <sup>2</sup> ) | $\sigma$ (kN/mm <sup>2</sup> ) | Def real espesor (mm/mm) |
|-------|----------------|------------|-----------------------|----------------------|--------------------------------|--------------------------|
| 1     |                |            |                       |                      |                                |                          |
| 2     | 2.22           | 0.00404176 | 0.04                  | 51.1792122           | 78.9726255                     | 0.00419728               |
| 3     | 2.22           | 0.01585586 | 0.02                  | 36.189168            | 438.13817                      | 0.00630254               |
| 4     | 2.44           | 0.02010647 | 0.17                  | 105.508649           | 190.567032                     | 0.02437853               |
| 5     | 2.33           | 0.02273702 | 0.17                  | 105.508649           | 215.499137                     | 0.04278728               |
| 6     | 2.55           | 0.02169996 | 0.23                  | 122.72344            | 176.820018                     | 0.06824521               |
| 7     | 2.55           | 0.02142577 | 0.18                  | 108.567504           | 197.349785                     | 0.08863096               |
| 8     | 2.66           | 0.02105856 | 0.2                   | 114.440197           | 184.013651                     | 0.11178015               |
| 9     | 2.66           | 0.0222973  | 0.2                   | 114.440197           | 194.837983                     | 0.13547794               |
| 10    | 2.66           | 0.02323574 | 0.19                  | 111.542507           | 208.312834                     | 0.15852323               |
| 11    | 2.66           | 0.02402402 | 0.21                  | 117.266307           | 204.867235                     | 0.18462788               |
| 12    | 2.77           | 0.02273874 | 0.2                   | 114.440197           | 198.695382                     | 0.21013947               |
| 13    | 2.89           | 0.02335412 | 0.175                 | 107.049003           | 218.162923                     | 0.23300881               |
| 14    | 2.89           | 0.02331947 | 0.245                 | 126.662088           | 184.10776                      | 0.26593083               |
| 15    | 3.00           | 0.02268936 | 0.18                  | 108.567504           | 208.988465                     | 0.29082838               |
| 16    | 3.11           | 0.02249035 | 0.18                  | 108.567504           | 207.155426                     | 0.31636168               |
| 17    | 3.22           | 0.02149736 | 0.21                  | 117.266307           | 183.320853                     | 0.34699865               |
| 18    | 3.22           | 0.02214974 | 0.145                 | 97.4423169           | 227.311261                     | 0.36871422               |
| 19    | 3.33           | 0.02249249 | 0.21                  | 117.266307           | 191.806948                     | 0.40102472               |

TABLA 4.3. Datos necesarios para realizar el gráfico de esfuerzo vs deformación.

Y finalmente se obtienen las tablas de esfuerzo vs deformación de los tres grupos (Tabla 4.4) y las curvas de esfuerzo vs deformación de cada grupo (Figura 4.8).

| grupo 1                           |                             | grupo 3                           |                             | grupo 2                           |                             |
|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------------|
| $\sigma$<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) | Deformación<br>real espesor | $\sigma$<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) | Deformación<br>real espesor | $\sigma$<br>(kN/mm <sup>2</sup> ) | Deformación<br>real espesor |
| 78.9726                           | 0.0042                      | 78.9726                           | 0.0042                      | 78.9726                           | 0.0042                      |
| 210.5670                          | 0.0244                      | 210.1151                          | 0.0105                      | 215.1802                          | 0.0148                      |
| 215.4991                          | 0.0428                      | 213.9825                          | 0.0287                      | 221.5538                          | 0.0386                      |
| 211.3498                          | 0.0886                      | 210.7287                          | 0.0483                      | 217.8727                          | 0.0573                      |
| 209.8380                          | 0.1355                      | 204.8411                          | 0.0921                      | 211.8623                          | 0.1064                      |
| 208.3128                          | 0.1585                      | 199.8359                          | 0.1153                      | 209.9728                          | 0.1507                      |
| 204.8672                          | 0.1846                      | 195.7843                          | 0.1671                      | 203.6293                          | 0.1767                      |
| 198.6954                          | 0.2101                      | 190.4905                          | 0.2153                      | 199.0247                          | 0.1982                      |
| 194.1078                          | 0.2659                      | 186.8054                          | 0.2443                      | 197.5715                          | 0.2282                      |
| 193.1554                          | 0.3164                      | 184.6185                          | 0.2922                      | 193.1737                          | 0.2549                      |
| 187.3209                          | 0.3470                      | 181.4568                          | 0.3619                      | 191.5472                          | 0.3122                      |
| 185.8069                          | 0.4010                      | 179.7898                          | 0.3909                      | 188.4483                          | 0.3668                      |
| 180.6398                          | 0.5178                      | 173.9991                          | 0.4850                      | 183.5541                          | 0.4359                      |
| 177.6789                          | 0.5832                      | 170.7162                          | 0.5664                      | 180.7425                          | 0.4673                      |
| 175.8606                          | 0.6293                      | 169.2271                          | 0.6253                      | 174.1323                          | 0.5734                      |
| 173.1690                          | 0.6693                      | 168.5248                          | 0.6817                      | 171.3669                          | 0.6469                      |
| 173.0433                          | 0.7090                      | 165.1576                          | 0.7240                      | 169.4439                          | 0.6963                      |
| 171.0396                          | 0.7547                      | 163.8308                          | 0.7727                      | 166.9342                          | 0.7394                      |
| 169.3154                          | 0.8003                      | 165.6211                          | 0.8603                      | 163.9621                          | 0.8660                      |
| 167.9387                          | 0.8480                      | 167.3048                          | 0.9701                      | 162.0942                          | 0.9279                      |
| 168.2991                          | 0.8956                      | 169.8934                          | 1.0153                      | 165.5383                          | 0.9882                      |
| 166.6426                          | 0.9509                      | 168.3884                          | 1.0903                      | 170.0013                          | 1.0464                      |
| 165.9715                          | 1.0095                      | 171.4616                          | 1.1613                      | 172.8893                          | 1.1081                      |
| 168.7550                          | 1.1251                      | 177.8305                          | 1.2198                      | 177.4454                          | 1.1739                      |
| 169.2672                          | 1.2127                      | 182.9819                          | 1.2896                      | 181.8926                          | 1.2407                      |
| 177.8908                          | 1.3363                      | 188.9289                          | 1.3564                      | 186.1332                          | 1.3163                      |
| 180.7676                          | 1.4236                      | 192.4825                          | 1.4501                      | 189.7637                          | 1.4065                      |
| 190.5971                          | 1.5099                      | 197.3820                          | 1.5242                      | 197.0226                          | 1.4822                      |
| 197.9941                          | 1.6094                      | 204.8525                          | 1.6094                      | 205.7543                          | 1.5845                      |
| 205.2264                          | 1.7142                      | 213.2832                          | 1.7437                      | 214.1557                          | 1.6814                      |
| 216.1966                          | 1.8248                      | 222.9549                          | 1.8645                      | 226.7075                          | 1.8013                      |
| 236.1774                          | 1.9789                      | 237.9369                          | 1.9942                      | 239.7310                          | 1.9159                      |
| 263.3574                          | 2.1255                      | 261.3105                          | 2.1889                      | 259.5283                          | 2.0700                      |
| 288.0415                          | 2.3078                      | 297.3609                          | 2.3731                      | 292.4381                          | 2.2523                      |

TABLA 4.4. Valores de esfuerzo y deformación para los tres grupos.

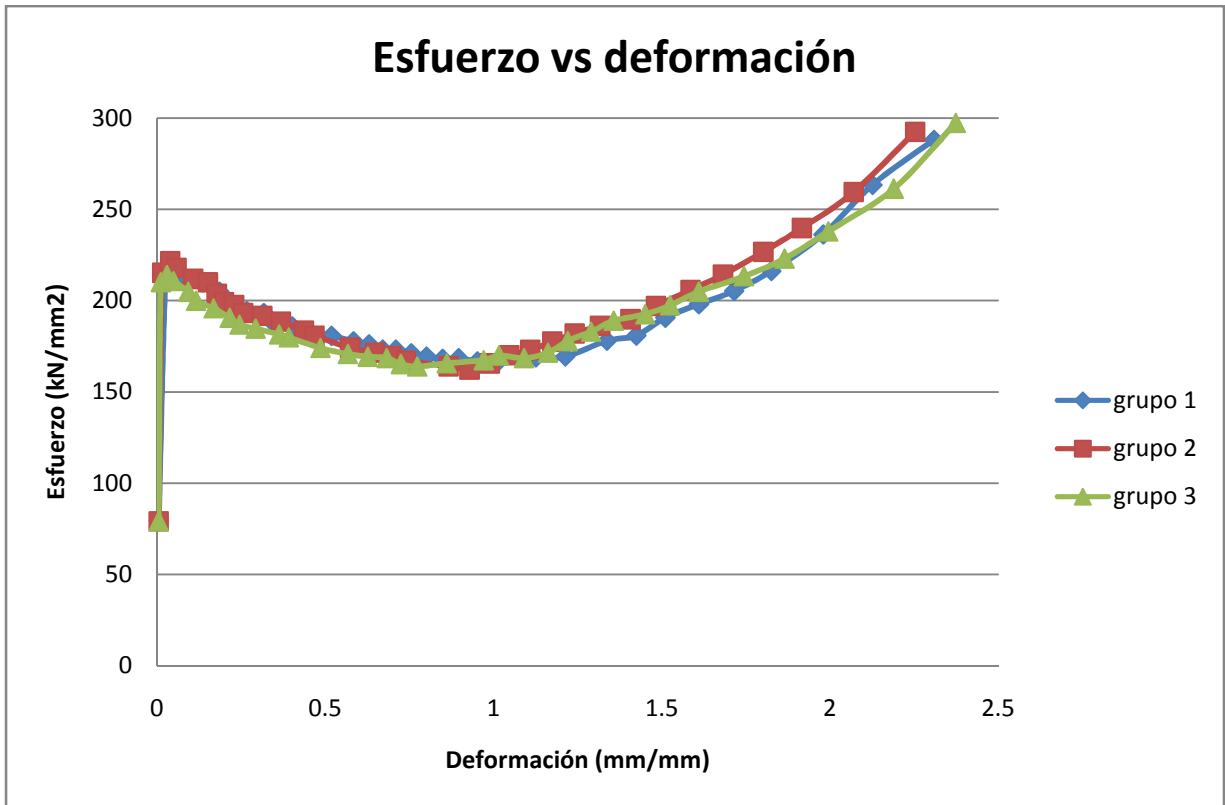


GRÁFICO 4.8. Esfuerzo vs deformación (tres grupos) de laminación.

El Gráfico 4.8 representa el proceso de laminación en su totalidad, desde el momento en que la probeta entra a la primera laminada, hasta el punto donde se detuvo el proceso. Como se observa, las tres corridas que se hicieron tienen un comportamiento bastante parecido, con ligeras variaciones debidas principalmente a errores experimentales.

En primera instancia, el esfuerzo necesario para empezar a deformar la probeta es muy alto, después comienza a bajar conforme se tiene más deformación y finalmente aumenta nuevamente el valor de esfuerzo a deformaciones más grandes, debido al endurecimiento del material y al pequeño espesor a deformar.

Para conocer de una manera más detallada qué le sucede a la probeta se realizaron metalografías (Figuras 4.16-4.20).



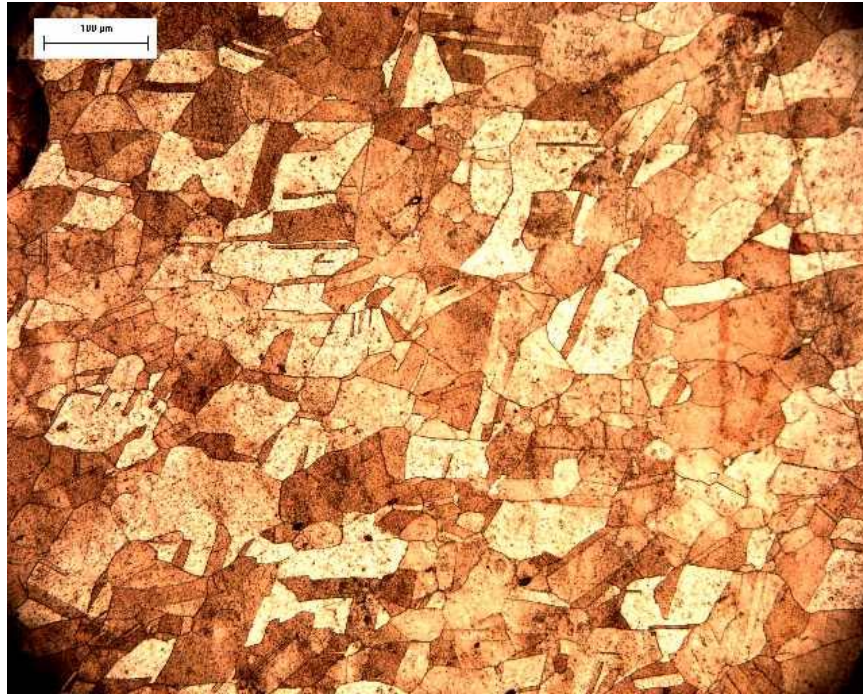


FIGURA 4.16. Cobre con 9.5 mm de espesor. Fotografía tomada a 200X.



FIGURA 4.17. Cobre con 7.5 mm de espesor. Fotografía tomada a 200X.

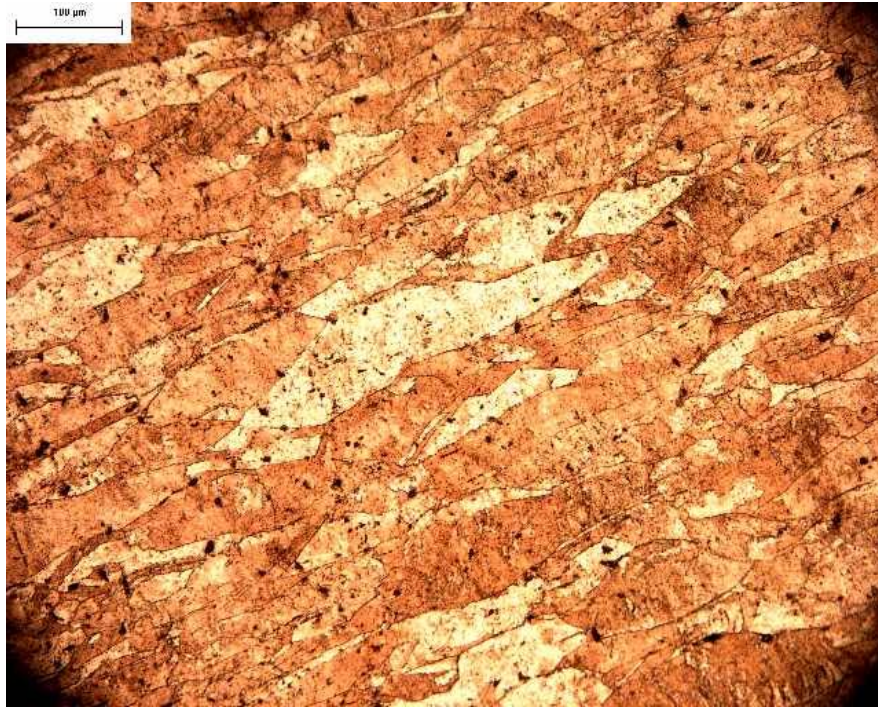


FIGURA 4.18. Cobre con 55 mm de espesor. Fotografía tomada a 200X.

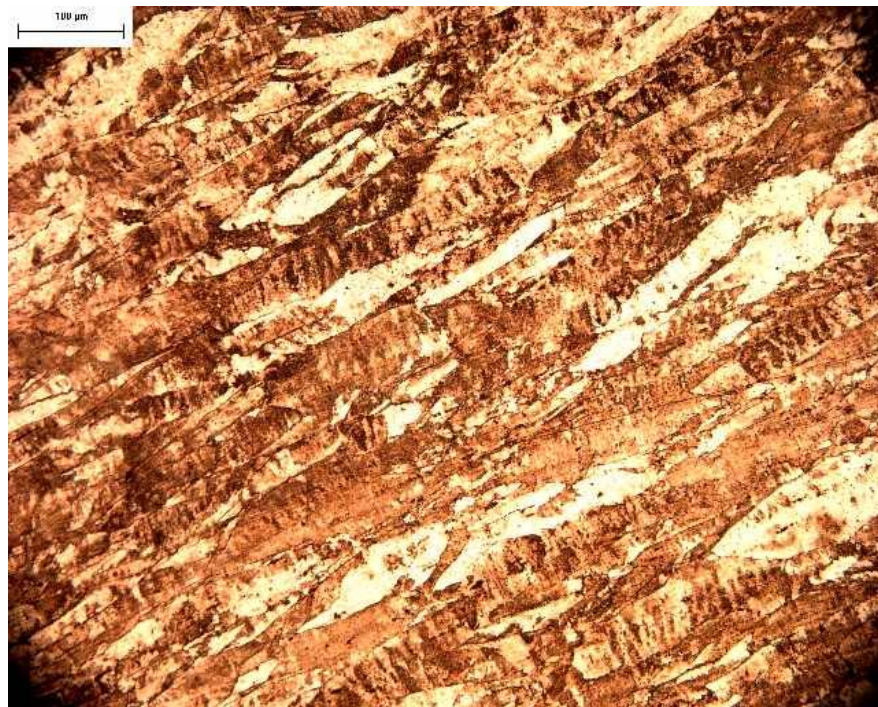


FIGURA 4.19. Cobre con 3.5 mm de espesor. Fotografía tomada a 200X.

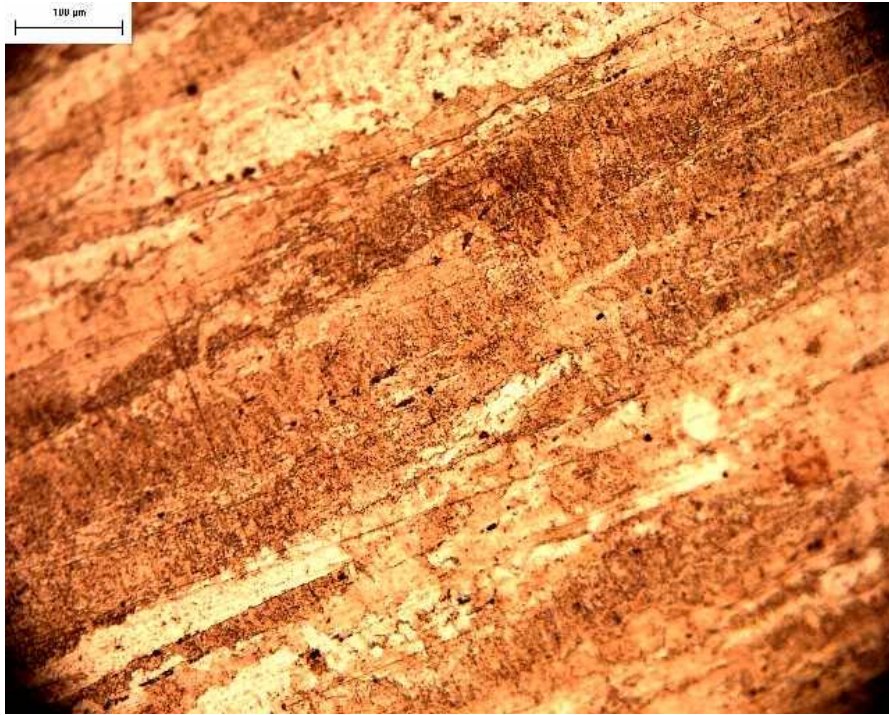


FIGURA 4.20. Cobre con 1.5 mm de espesor. Fotografía tomada a 200X.

El cambio en la microestructura de la probeta durante el proceso (Figuras 4.16-4.20) muestra el alargamiento de los granos en el sentido de la deformación longitudinal, observando en la probeta que los granos están tan alargados que no aparecen completos en la fotografía (Figura 4.20).

Conforme los granos se van alargando, se generan más esfuerzos residuales, dislocaciones y otros defectos que almacenan energía, los cuales propician que exista un aumento en la dureza de la probeta.

Para medir esta dureza se utilizó el MACROMET® 3 BUEHLER Rockwell/superficial Type Hardness Tester, utilizando la escala de dureza HRB con una carga de 100 kgf y un indentador de 1/16" (Figura 4.21).



FIGURA 4.21. MACROMET® 3 BUEHLER Rockwell/superficial Type Hardness Tester.

Los valores obtenidos se presentan en la Tabla 4.5 y el Gráfico 4.9.

| espesor | dureza |      |      | Promedio |
|---------|--------|------|------|----------|
| 9.5     | 41.4   | 41   | 41.5 | 41.30    |
| 8.5     | 44.7   | 44.2 | 46   | 44.97    |
| 7.5     | 46.7   | 47.9 | 46.2 | 46.93    |
| 6.5     | 47.3   | 46.2 | 47.1 | 46.87    |
| 5.5     | 51.1   | 51.8 | 52.7 | 51.87    |
| 4.5     | 53.9   | 53.7 | 53.7 | 53.77    |
| 3.5     | 57.9   | 59.3 | 60.1 | 59.10    |
| 2.5     | 59.3   | 58.8 | 60   | 59.37    |
| 1.5     | 62.9   | 62.5 | 62.6 | 62.67    |

TABLA 4.5. Valores de dureza y su promedio en cada reducción de espesor.

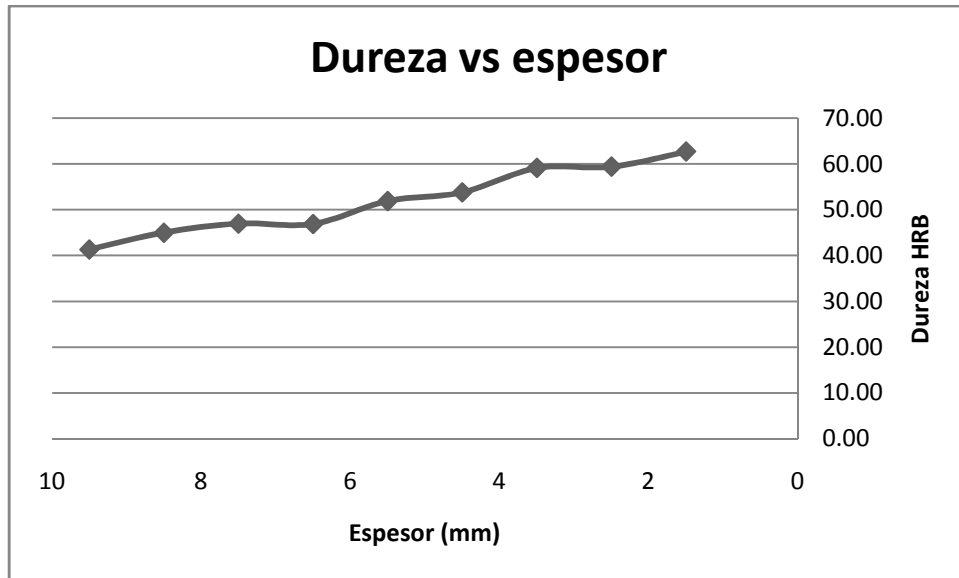


GRÁFICO 4.9. Dureza vs espesor.

Corroborando lo observado en las metalografías, la dureza de la probeta va aumentando conforme se obtiene un espesor menor, es decir, la dureza aumenta conforme se va deformando más la probeta.

#### 4.6 Evaluación al final del proceso.

Una vez que se realizó todo el proceso con los alumnos se les sometió a una evaluación final para observar si existieron cambios en sus conceptos sobre el tema de laminación.

##### a) ¿En qué consiste el proceso de laminación?

Un 96% mencionó que es un proceso en el cual se comprime un metal mediante rodillos.

Un 88% mencionó que en el proceso se realiza una deformación plástica.

**b) ¿Qué cambios sufren los metales durante el proceso de laminación?**

El 100% de los alumnos hizo mención a los cambios de dimensiones que sufre la probeta.

El 80% mencionó que existe un aumento en la dureza.

El 90% mencionó que existe una deformación en la estructura cristalina, ocasionando que los granos se alarguen.

El 84% de los alumnos mencionó que existe un calentamiento.

El 92% mencionó que existe un mejor acabado superficial.

**c) ¿Qué defectos se presentan durante el proceso de laminación?**

El 88% de los alumnos mencionó que se pueden presentar fracturas cuando la laminación es excesiva.

El 84% hizo mención de los defectos microestructurales como maclas y dislocaciones.

El 90% mencionó que la laminación se lleva a cabo en forma heterogénea, ocasionando que existan diferentes espesores a lo largo de la probeta.

**d) Basándose en la curva de esfuerzo vs deformación explica la variación de la energía utilizada en el proceso de laminación.**

Todos los alumnos mencionaron que a mayor deformación, se requiere mayor energía para deformar la probeta.

**e) Basándote en las metalografías de la probeta explica los cambios físicos ocurridos en la probeta.**

El 100% de los alumnos menciona que en las metalografías se observa cómo se van alargando los granos, lo que originó que la probeta se alargara en esa misma dirección.

**f) Explica como utilizarías los conocimientos obtenidos para la resolución de problemas en la industria.**

“Dependiendo de los requerimientos del cliente se determina algún tratamiento posterior a la laminación para modificar sus propiedades”

“Al tener los conocimientos de las diferentes etapas que ocurren durante el proceso de laminación se pueden modificar las variables que están involucradas y poder obtener diferentes resultados”

“Con los conocimientos obtenidos es posible diseñar procedimientos experimentales en planta que permitan conocer mejor el proceso y conocer que variables es necesario modificar”

**g) Especifica en qué aspectos cambió tu concepto previo sobre el proceso de laminación.**

“Que no es un proceso tan sencillo como pensaba debido a que existen muchas variables a controlar”

“Buena parte de la laminación vista en teoría y la vista en la práctica fueron totalmente diferentes, por tal motivo analizar los datos fue difícil ya que todo lo metalúrgico que sufre el material no se ve en teoría ya que solo se vio la parte mecánica”

“Ahora conozco los fenómenos físicos que tienen lugar durante la laminación y los posibles problemas que ocurren durante la operación”

“Antes creía que era como en las tortillas. La masa pasa por rodillos y esta se va acumulando en la entrada, ahora sé que el material se va deformando continuamente”

**h) ¿Qué modificaciones sugieres para enriquecer esta “práctica”?**

“La implementación del mismo sistema pero haciendo el ensayo a diferentes temperaturas y con diferentes metales”

“Ayudaría bastante reducir el número de alumnos por equipo para cada práctica”

“Me gustaría realizar un ensayo con rodillos continuos y así ver y estimar el efecto de la tracción en la laminación”

“Controlar la temperatura y si lo permite el presupuesto comparar con otro material”

“Nada”

“Evaluar el efecto de la temperatura, así como el efecto de la realización de un tratamiento térmico al material antes de ser sometido a un paso subsecuente de laminación”

“Cambiar los materiales utilizados”

Al observar los resultados en las distintas etapas de evaluación se observó el progreso de los alumnos, desde sus ideas previas, hasta sus conceptos al final de todo el proceso, por ejemplo, en la evaluación inicial, el 28% de los alumnos al



referirse al proceso de laminación lo hizo de forma vaga, cosa que no sucedió en la evaluación al final.

Otro punto muy importante es que al inicio la visión de los alumnos respecto a los defectos que se pueden presentar era prácticamente en su mayoría en forma microscópica, olvidando que la parte macroscópica es también fundamental en todos los procesos metalúrgicos, y conforme se fue llevando a cabo el proceso de laminación se presentó un cambio en la visión de los alumnos, ya que si bien no dejaron de lado la parte microscópica, aprendieron a observar el fenómeno antes de analizarlo y querer explicarlo, a observar la gran cantidad de detalles que surgen en él y a identificar los cambios que suceden a simple vista.

Lo anterior se ve reforzado al analizar las respuestas de los alumnos a la pregunta:

**Especifica en qué aspectos cambió tu concepto previo sobre el proceso de laminación,**

Donde, por poner un ejemplo, mencionan que identificaron los fenómenos físicos que se llevan a cabo durante el proceso, lo cual era uno de los objetivos perseguidos.

Por otro lado, de entre sus propuestas para mejorar la “práctica” algunas son viables, como el uso de diferentes materiales, pero otras requerirían la compra de maquinaria más sofisticada para ser llevadas a cabo.

Finalmente, no hay que olvidar que si bien una parte de los objetivos a lograr depende en gran medida de los profesores, la actitud de los alumnos es de vital importancia, ya que si ellos no quieren aprender, los esfuerzos del profesor son vanos, esto se ve en las respuestas dados por los estudiantes, una de las cuales fue simplemente “Nada”.

# CAPÍTULO V

## CONCLUSIONES

- 1) LOS PARÁMETROS A CONTROLAR DURANTE EL PROCESO DE LAMINACIÓN EN EL LABORATORIO SON:
  - a) Velocidad de laminación, en este caso se estableció constante.
  - b) Apertura de los rodillos, lo cual establece la reducción en el espesor.
  
- 2) LOS PARÁMETROS GENERADOS SON:
  - a) El voltaje registrado por la celda de carga.
  - b) La variación en las dimensiones de la probeta: ancho, longitud y espesor.
  - c) Incremento de la temperatura, lo cual no se considero.
  
- 3) EL PROCESO:
  - a) Demostró ser reproducible, ya que al realizarse por triplicado, los resultados no dependieron de parámetros externos.
  - b) La utilización del sistema de adquisición de datos permitió conocer los valores de voltaje, los cuales, mediante la calibración de la celda de carga, indicaron la fuerza aplicada durante todo el proceso.
  - c) La microestructura del cobre se deforma longitudinalmente en el sentido del proceso de laminación.
  - d) La dureza del cobre se incrementa con la deformación.
  - e) El gráfico del proceso muestra que a mayor deformación y menor espesor se requiere un mayor esfuerzo para realizar la laminación.

#### 4) LOS ALUMNOS:

- a) Al enfrentarse al proceso de laminación, sin la intervención del profesor, inicialmente mostraron confusión por la falta de indicaciones, pero después esto propició que desarrollaran su capacidad de observación y de toma de decisiones.
- b) Mostraron a través del análisis de las encuestas aplicadas a los alumnos, durante los tres procesos de evaluación, una modificación en sus ideas previas.
- c) Independientemente del profesor, del equipo, del proceso y de la metodología aplicada, el aprendizaje depende de la actitud que tenga el estudiante.

# BIBLIOGRAFÍA

- ✓ Black, P.; William, D. ASSESSMENT IN EDUCATION, 1998.
  
- ✓ Campanario, J. M. y Moya, A. ¿Cómo ENSEÑAR CIENCIAS? PRINCIPALES TENDENCIAS Y PROPUESTAS. Enseñanza de las ciencias. 1999.
  
- ✓ Davis, J.R. COPPER AND COPPER ALLOYS. ASM International. United States of America. 2001.
  
- ✓ Dieter, G.E. MECHANICAL METALLURGY. McGraw Hill. Third Edition. United States of America. 1986.
  
- ✓ Dieter, G.E. WORKABILITY AND PROCESS DESIGN. ASM International. United States of America. 2003.
  
- ✓ Gil, F y Rico, R. CONCEPCIONES Y CREENCIAS DEL PROFESORADO DE SECUNDARIA SOBRE ENSEÑANZA Y APRENDIZAJE DE LAS MATEMÁTICAS. Enseñanza de las ciencias. 2003.
  
- ✓ Hernández, M; Llano, M. PROPUESTA DE LA REFORMA EXPERIMENTAL. Ciencia y Tecnología. IMIQ, 1994.

- ✓ Jiménez Alexandre, M.P. y Sanmartí, N. ¿QUÉ CIENCIA ENSEÑAR? Barcelona, Horsori, 1997.
- ✓ Jorba, J.; Sanmartí, N. ENSEÑAR, APRENDER Y EVALUAR: UN PROCESO DE REGULACIÓN CONTINUA. Madrid: MEC, 1996.
- ✓ Leite, L. y Figueroa A. LAS ACTIVIDADES DE LABORATORIO Y LA EXPLICACIÓN CIENTÍFICA EN LOS MANUALES ESCOALRES DE LAS CIENCIAS. Alambique. Didáctica de las Ciencias Experimentales. 2004.
- ✓ Roberts, William L. COLD ROLLING OF STEEL. Marcel Dekker, Inc. New York and Basel 1978.
- ✓ Wusatowski, Z. FUNDAMENTALS OF ROLLING. Pergamon Press. Poland. 1969.

# APÉNDICE

## GUIÓN EXPERIMENTAL PROPUESTO:

---

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA METALÚRGICA

PROCESOS DE CONFORMADO MECÁNICO

## GUIÓN EXPERIMENTAL: LAMINACIÓN

### OBJETIVOS

Al término del proceso el alumno será capaz de:

- Identificar y controlar las variables de operación de un equipo de laminación a nivel laboratorio.
- Observar e identificar defectos macroscópicos, tanto por operación como por las características del material, durante un proceso de laminación en condiciones cercanas a deformación idealmente plana.
- Elaborar la curva de esfuerzo vs deformación de flujo del material por trabajo en frío.

### CONOCIMIENTOS PREVIOS

Previo al desarrollo de esta práctica el estudiante debe tener dominio de los temas:

- Relación esfuerzo-deformación del comportamiento mecánico de materiales.
- Ensayos de compresión.

### LECTURAS RECOMENDADAS

Donald R. Askeland, La Ciencia e Ingeniería de los Materiales. Grupo Editorial Iberoamérica. Edición 1987. Capítulos 6 y 7

Dieter George E., Mechanical Metallurgy. Editorial Borrada, McGraw-Hill Series in

### **Cuestionario previo.**

- a) ¿En qué consiste el proceso de laminación?
- b) ¿Qué consideras que le sucede a un material durante el proceso de laminación?
- c) ¿Qué objetos conoces que se produzcan por laminación?
- d) Dibuja un esquema de lo que consideres es el proceso de laminación.
- e) ¿Cuántos tipos de laminación crees que existen?
- f) ¿Qué crees que le sucede a las propiedades de un metal al ser laminado?
- g) Dibuja la microestructura que creas que se presenta en un material antes y después de ser laminado.
- h) ¿Qué defectos crees que se presenten durante el proceso de laminación?
- i) ¿Cuáles consideras que son las variables de entrada y las variables de salida en un proceso de laminación?
- j) De las materias cursadas hasta este momento, menciona cuales de ellas crees que son útiles para comprender el proceso de laminación.

### **PRIMERA PARTE**

#### **Materiales y equipo.**

- Probetas de cobre de 31.7 mm de ancho, 9.5 mm de espesor y 100 mm de largo.
- Vernier.
- Regla.
- Toallas de papel.
- Laminadora Lastra-Filo M120Al.
- Equipo de seguridad en laboratorio (bata de algodón y lentes protectores).

#### **Procedimiento.**

- Atender a las instrucciones de operación de la laminadora (tomando muy en cuenta las medidas de seguridad para evitar accidentes).
- Seccionar de la solera la(s) probeta(s) con la cortadora de disco o cierra cinta.
- Eliminar con un papel lija grueso los sobrantes de material en las orillas de corte.
- Realizar el conformado mecánico de laminación.
- Observar, en el sentido estricto de la palabra, las variables que afectan la laminación.
- Identificar y establecer control sobre las variables de operación en el proceso para lograr el objetivo de reducción.

#### **Cuestionario.**

- a) Describe que cambios observaste en la probeta durante el laminado.
- b) Describe los problemas que encontraste durante el proceso.
- c) Indica y explica los defectos presentes en la probeta durante el proceso de laminado.
- d) Menciona en qué momento es conveniente detener el proceso.
- e) Escribe qué harías para controlar el proceso.

## SEGUNDA PARTE

### Materiales y equipo.

- Probetas de cobre de 31.7 mm de ancho, 9.5 mm de espesor y 100 mm de largo.
- Vernier.
- Regla.
- Toallas de papel.
- Laminadora Lastra-Filo M120Al.
- Equipo de seguridad en laboratorio (bata de algodón y lentes protectores).
- Adquisidor de datos Iotech P3000.
- Celda de carga.
- Software DaqView.
- Laptop.
- Software Microsoft Excel.
- Software Sigma Plot 10.0.
- Durómetro Macromet® 3 Buehler “Rockwell/Superficial Type Hardness Tester”.
- Juego de lijas.
- Alúmina.
- Microscopio metalográfico.
- Cloruro férrico.

### Procedimiento.

- Atender a las instrucciones de instalación de la celda de carga y el sistema automático de adquisición de datos (SAAD).
- Establecer parámetros fijos de las variables de operación identificadas (como resultado del trabajo en la primera sesión).
- Realizar el conformado mecánico de laminación de la probeta hasta alcanzar 1 mm de espesor.
- Registrar a través del SAAD las historias de la señal capturadas por la celda de carga.
- Limpiar con el paño o la sección de tela el aceite lubricante después de cada paso de laminación.
- Medir las dimensiones de la probeta en cada paso de laminación.
- Tomar mediciones de dureza que sean representativas del proceso.
- Realizar el gráfico de esfuerzo vs deformación del proceso.
- Realizar el gráfico de dureza vs espesor,

### Cuestionario.

- a) ¿En qué consiste el proceso de laminación?
- b) ¿Qué cambios sufren los metales durante el proceso de laminación?
- c) ¿Qué defectos se presentan durante el proceso de laminación?
- d) Basándote en la curva de esfuerzo vs deformación explica la variación de la energía utilizada en el proceso de laminación.
- e) Basándote en las metalografías de la probeta explica los cambios físicos ocurridos en la probeta.
- f) Explica como utilizarías los conocimientos obtenidos para la resolución de problemas en la industria.
- g) Especifica en qué aspectos cambió tu concepto previo sobre el proceso de laminación.
- h) ¿Qué modificaciones sugieres para enriquecer lo visto en laboratorio?