

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**

**FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELECTRICA**



***ANÁLISIS DE ENSANCHAMIENTO LATERAL DURANTE LA  
LAMINACIÓN DE UN PERFIL PARA DISEÑO DE UN  
LARGUERO AUTOMOTRIZ***

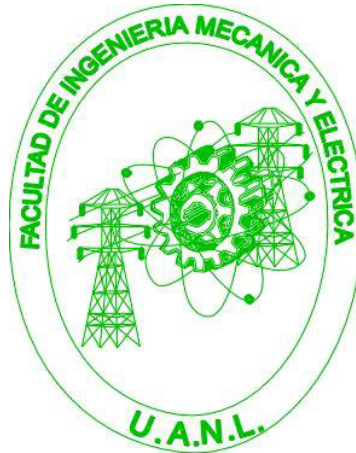
POR

**ING. OMAR ALEJANDRO RESÉNDEZ CÓRDOVA**

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

JUNIO, 2016

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**TESIS**

***ANÁLISIS DE ENSANCHAMIENTO LATERAL DURANTE LA  
LAMINACIÓN DE UN PERFIL PARA DISEÑO DE UN LARGUERO  
AUTOMOTRIZ***

**PRESENTA**

**OMAR ALEJANDRO RESÉNDEZ CÓRDOVA**

**PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA  
INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**Junio, 2016**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA  
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis “Análisis de Ensanchamiento Lateral Durante la Laminación de un Perfil Para Diseño de un Larguero Automotriz”, realizada por el alumno Omar Alejandro Reséndez Córdova, matrícula 1424499, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias en Ingeniería Automotriz.

El Comité de Tesis

---

Asesor

Dr. Oscar Jesús Zapata Hernández

---

Coasesor

Dr. Rafael Colás Ortiz

---

Coasesor

Dr. José Jaime Taha Tijerina

---

Vo.Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez  
Subdirector de Estudios de Posgrado.

San Nicolás de los Garza, Nuevo León

junio, 2016

## DEDICATORIA

A mis padres, por el apoyo brindado durante toda mi carrera profesional, por las herramientas y valores que me inculcaron para llegar hasta donde estoy.

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi familia por siempre estar presente y acompañarme en el camino de mi vida profesional, por aconsejarme, instruirme, en la obtención de las herramientas que me permitieron abrir camino a una etapa en mi desarrollo profesional.

A mis asesores, Dr. Oscar Zapata Hernández por estar presente en el desarrollo de la tesis, al enseñarme con su paciencia, dedicación y entrega, lo indispensable en mi formación de la maestría. Al Dr. Rafael Colás por permitir desarrollarme en esta gran área de oportunidad. Al Dr. Manuel G. Rodríguez por el apoyo brindado durante el proceso de formación educativo, y las enseñanzas impartidas en el desarrollo de la tesis. Al Dr. José Taha, por la atención brindada y dedicación.

A mi amigo y excelente compañero Sergio Cruz que juntos formamos una extraordinaria mancuerna de trabajo durante el proceso de trabajo, en donde pulimos conocimientos, aprendimos, y desarrollamos nuevas áreas.

A mis amigos, Rodolfo Ramos, Javier Álvarez y Roberto Suárez, que en toda mi vida me han acompañado, me apoyan, y me ayudan a creer en mí, y siempre han estado presentes en la formación de mi persona.

A mis amigos de la maestría, Rene, Irving, Nayeli, Guillermo y Jorge, que, como comunidad, nos hemos apoyado mutuamente para salir adelante y triunfantes en todas las áreas.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León, por crear oportunidades para estudiar una carrera, y además junto con la CONACYT, de permitir seguir estudiando una maestría.

# Índice

CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN .....	8
1.1 Introducción .....	8
1.2 Objetivo.....	9
1.3 Hipótesis.....	9
CAPÍTULO 2 Laminación .....	10
2.1 Laminación.....	10
2.2 Tipos de laminación. ....	11
2.2.1 Laminación en frio .....	11
2.2.2 Laminación en caliente.....	12
2.2.3 Laminación de perfiles de calibre variable .....	14
Capítulo 3: Plasticidad.....	17
3.1 Introducción .....	17
3.2 Curvas de fluencia .....	19
3.3 Deformación real.....	20
3.4 La fluencia plástica en dos dimensiones. ....	20
3.4.1 Deformación plana .....	20
3.5 Teorías de fluencia .....	21
3.5.1 Cuando un material plástico es ideal rígido .....	21
3.6 Criterio de máxima distorsión de energía (Von mises).....	22
3.7 Fricción .....	23
3.8 Temperatura .....	23
3.9 Ecuaciones de equilibrio.....	24
3.9.1 El principio del trabajo virtual.....	25
Capítulo 4: Transferencia de calor.....	27
4.1 Transferencia de calor .....	27
4.1.1 Conducción.....	27
4.1.2 Convección .....	28
4.1.3 Radiación .....	29
4.1.4 Ecuación general de transferencia de calor. ....	30
4.1.5 Condiciones de frontera.....	30
Capítulo 5: Elemento finito .....	32
5.1 Introducción .....	32
5.2 Historia del elemento finito .....	33

5.3 Aplicaciones de elemento finito .....	34
5.4 Transferencia de calor mediante elemento finito .....	34
5.4.1 Método de Ritz .....	35
5.4.2 Método Rayleigh-Ritz.....	35
5.4.3 Método de residuos ponderados.....	36
5.4.4 El método de Galerkin .....	38
5.5 MEF en plasticidad .....	38
5.5.1 Método de Eliminación Gaussiana .....	39
Capítulo 6: Experimentación .....	41
6.1 Introducción .....	41
6.2 Pruebas físicas.....	41
6.2.1 Escaneo .....	42
6.3 Desarrollo de modelos numéricos.....	44
6.3.1 Geometrías .....	44
6.3.2 Propiedades .....	46
6.3.3 Ensamble de las piezas.....	48
6.3.4 Condiciones de frontera .....	49
6.3.5 Mallado .....	50
6.3.6 Simulación .....	51
6.4 Etapa 1: Pruebas de contacto para el pase 1 .....	51
6.5 Etapa 2: Simulación de los pases 2 al 4 .....	53
Capítulo 7: Resultados y discusión .....	54
7.1 Introducción .....	54
7.2 Resultados piezas escaneadas.....	54
7.3 Resultados de los casos considerados para el pase 1.....	56
7.4 Resultados pases 2 al 7. ....	57
Capítulo 8: Conclusiones y recomendaciones .....	62
8.1 Conclusiones .....	62
8.2 Recomendaciones .....	62
LISTADO DE SIMBOLOS .....	63
REFERENCIAS .....	65

# CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN

## 1.1 Introducción

Hoy en día en la industria automotriz junto con los avances tecnológicos que se han presentado a lo largo de todos estos años se ha buscado la manera de reducir material en los planchones y placas, para hacerlos más ligeros y resistentes, además reducir el costo de su producción desarrollando métodos eficientes para la reducción de material.

Existe información que las placas se procesan de una manera longitudinal a través de rodillos para reducir el espesor del material, en este trabajo de tesis se busca reducir el espesor, pero de una manera transversal, para obtener largueros de tipo C. Un larguero es una viga horizontal que se encarga de soportar cargas concentradas en puntos aislados a lo largo de su longitud, (Figura 1).



Figura 1: Larguero de canal Tipo C, [1].

El larguero en forma de “C” es una viga resistente mecánicamente, normalmente es utilizado en vehículos pesados y en algunas zonas de automóviles y camionetas convencionales.

Los largueros del bastidor se sostienen con travesaños entre sí, el travesaño más importante se encuentra en el frente del bastidor que permite que soporte el motor y la suspensión de la parte delantera.

La industria automotriz busca reducir el peso y los costos de producción, porque las nuevas regulaciones CAFE (Corporate Average Fuel Economy, por sus siglas en inglés) obligan a las empresas a trabajar en nuevos proyectos o incluso en innovar nuevas herramientas que permitan reducir la contaminación a la hora de producir nuevas partes automotrices. Para ello se ha buscado la manera de desarrollar nuevos procesos de manufactura en partes complejas, especialmente con el acero. En base a lo anterior, es un buen momento para cambiar el diseño en secciones transversales para los componentes utilizando material en áreas donde lo requiera, ya que eso permite reducir el peso y optimizar las propiedades del producto de manera considerable, [2].

## **1.2 Objetivo**

Desarrollar modelos numéricos que permitan simular la formación de placas de calibre variable para largueros automotrices.

## **1.3 Hipótesis**

Es posible modelar un proceso de laminación para producir placas de calibre variable en su sección transversal, pudiendo determinar el número de pases necesario para obtener un perfil idealizado con menor peso y mejor resistencia estructural.

# CAPÍTULO 2 Laminación

## 2.1 Laminación.

La laminación puede definirse como un proceso de conformado en el que las herramientas en contacto con el producto a ser deformado son unos cilindros o rodillos que giran sobre un eje fijo, [3]. Para laminar se requiere de una estación denominada molino o castillo, que se compone esencialmente de cilindros, cojinetes adecuados, columnas que los soportan y un sistema de accionamiento para aplicar a los rodillos la fuerza motriz y controlar su velocidad, [4] [5].

Al hacer pasar el metal entre los cilindros, éste se somete a intensos esfuerzos de compresión y cortantes. Las fuerzas de fricción que se generan en la interfase rodillo-pieza son las encargadas de producir la entrada del material.  
Figura 2:

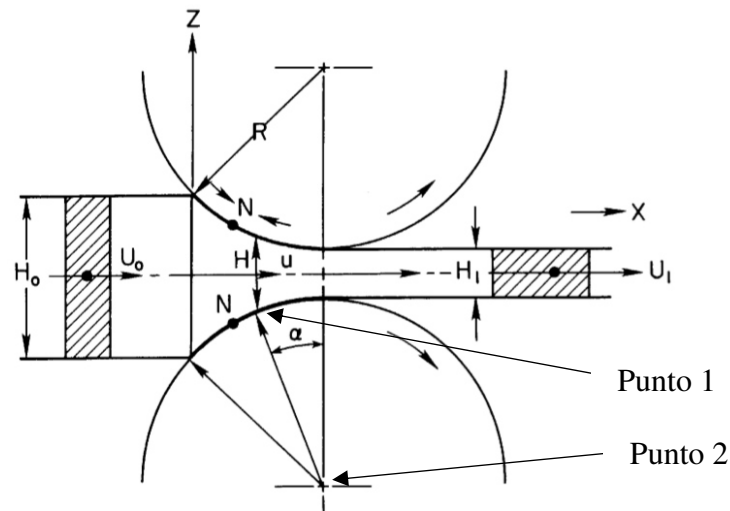


Figura 2: Condiciones de entrada de una placa de laminación [6].

Donde  $H_0$  es el espesor inicial,  $H_1$  es el espesor final,  $\alpha$  es el ángulo formado entre los puntos 1 y 2. Este ángulo es conocido como el ángulo de mordida y en la práctica no debe exceder los  $24^\circ$  para evitar problemas en la laminación, [6].

## 2.2 Tipos de laminación.

Existen dos tipos de laminación conocidos, laminación en frío y laminación en caliente, de los cuales cada uno tiene sus características y propiedades diferentes.

### 2.2.1 Laminación en frío

La mayoría de los metales de ingeniería, tales como las aleaciones de aluminio, aleaciones de cobre y aceros son fundidos para producir planchones que luego se procesan adicionalmente mediante laminación en caliente convirtiéndolos en "placas" o "tochos", [7] [8].

En la laminación en frío, el planchón se encuentra en una temperatura menor a la de recristalización, [9].

En la Figura 3 se presentan los diferentes perfiles de laminación que es posible obtener en frío, [10] [11].

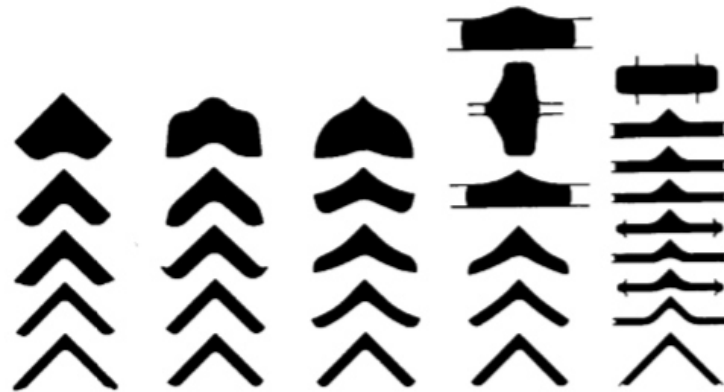


Figura 3: Diferentes perfiles de laminación [10].

### 2.2.2 Laminación en caliente

El proceso de laminación en caliente se define como el proceso metalúrgico en el cual el metal se deforma plásticamente haciéndolo pasar entre una serie de rodillos a una temperatura mayor de recristalización [12].

La laminación en caliente es el método más barato y más eficiente para reducir el área transversal de una pieza de material, de tal manera que el espesor final sea uniforme a lo largo de todo el producto.

Por ejemplo, al trabajar con un planchón de acero para formar perfiles estructurales, barras o láminas resulta prácticamente imposible si no se trabaja en caliente, debido a las altas cargas de laminación requeridas para llevar a cabo este proceso [13].

En el proceso de laminado en caliente, el planchón se introduce en un horno de recalentamiento (Figura 4) donde se obtienen temperaturas entre los 900°C y los 1200°C con el fin de producir una temperatura homogénea para proporcionar ductilidad y maleabilidad para que sea más fácil la reducción de área a la cual va a ser sometido.



Figura 4: Horno de recalentamiento [14].

A continuación del proceso de calentamiento, se hace pasar los lingotes entre una serie de rodillos metálicos colocados en pares que lo aplastan hasta darle la forma y tamaño deseados.

Los molinos de laminación producen tiras y láminas con anchuras de hasta 2.5m. Los planchones de acero caliente de más de 100 mm de espesor pasan por una serie de rodillos que reducen progresivamente su espesor hasta unos 10 mm, y aumentan su longitud de 4 a 370 metros. Los molinos de laminación están equipados con una serie de accesorios como rodillos de borde, aparatos de decapado o eliminación y dispositivos para enrollar de modo automático la lámina cuando llega al final del tren, [14].

Algunos trenes de laminación permiten moldear el lingote de muchas maneras creando perfiles de varias formas, de tipo H, L, C y se crean por medio de geometrías de rodillos específicas para que se proporcione la forma adecuada. (Figura 5).

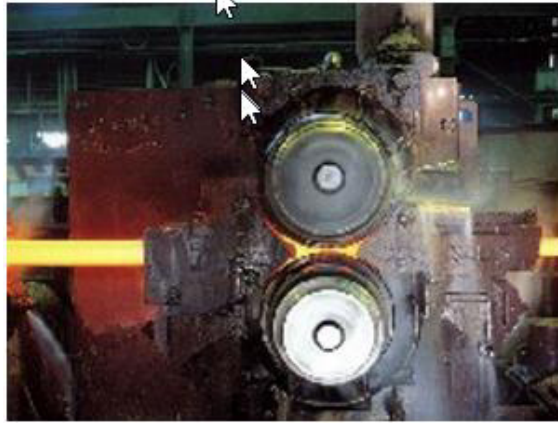


Figura 5: Rodillos para crear perfiles de los planchones [14].

### 2.2.3 Laminación de perfiles de calibre variable

Los perfiles de calibre variable permiten adaptar el espesor de la lámina a una respectiva curva de una estructura con el fin de soportar cargas, Figura 6: **Laminación convencional, [15].**

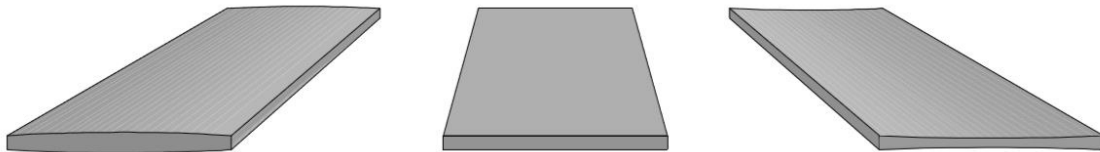


Figura 6: Laminación convencional, [15].

En otras palabras, permite crear estructuras adaptables con diferentes perfiles, difíciles de obtener en una laminación convencional como se muestra en la Figura 7: Láminas con un perfil variable predefinido, .

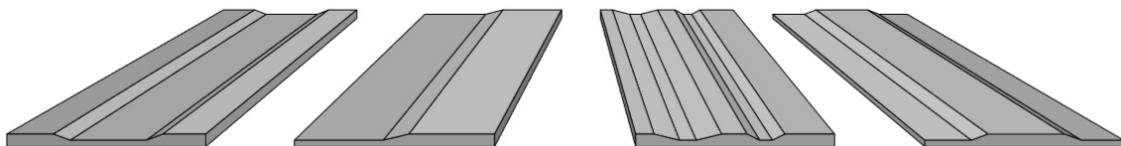


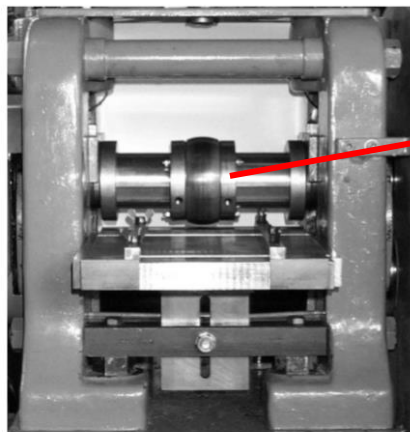
Figura 7: Láminas con un perfil variable predefinido, [15].

Un sistema de rodillo especial tiene que ser utilizado para conseguir un flujo de material exclusivamente en la dirección transversal de la placa, evitando al mismo tiempo la aparición de defectos de llanuras.

El material que se desplaza del centro de una lámina, incrementará el ancho de la misma debido al efecto que causa al someter un rodillo. El flujo de material se desplaza solamente hacia el lateral.

Cuando el rodillo produce la ranura, el material que se encuentra en deformación es comprimido, y a su vez el material se distribuirá hacia las zonas donde exista menos compresión.

Los rodillos son piezas con protuberancias predefinidas con cierto ancho que van colocados en el eje de un castillo, lo cual sirve para realizar diferentes formas en el proceso de laminación, (Figura 8) [16].



Rodillo superior  
con protuberancia  
en el centro

Figura 8: Molino de laminación para experimentos [16].

Las pruebas realizadas en dicho molino son de gran importancia para el estudio, dado que con los resultados queda comprobado que se puede lograr una expansión lateral completa a través de múltiples pases haciendo uso de rodillos con protuberancias específicas, [17].

Existen tres tipos de campos de aplicación para este tipo de proceso de laminación:

- Reducción de peso a través de cargas de distribución de material optimizadas.
- Reducción de costo a través de la distribución de “material inteligente” antes del proceso de formado.

- Mejora funcional a través del proceso de distribución de material optimizado.

Una distribución de material de una carga adaptada es la clave para los componentes de peso ligero. Esto es con el fin de reducir costos de producción, y así mismo obtener piezas metálicas optimizadas.

# Capítulo 3: Plasticidad

## 3.1 Introducción

Plasticidad se refiere a estudiar el comportamiento de los materiales en la zona de deformación plástica y está relacionada con diferentes tipos de problemas. Dependiendo del punto de vista del diseño, la plasticidad está relacionada con la predicción de la carga máxima que se puede aplicar al cuerpo sin causar una fluencia excesiva [18] [19].

Al aplicar carga a un material, se obtienen respuestas como la deformación elástica, la deformación plástica, y la fractura. En este capítulo se centra en la segunda respuesta: la deformación plástica. El concepto de plasticidad ayuda a:

- Cálculo de los esfuerzos y deformaciones implicadas en el procesamiento de deformación, tales como laminado, forjado, extrusión, dibujo, etc.
- Determinación de cargas y energías requeridas para ejecutar el proceso.

La resistencia mecánica de un material bajo una carga cada vez mayor se puede determinar en ensayos de tracción uniaxial, compresión, ensayos de flexión, pruebas de corte, ensayos de tensión y compresión en condiciones de deformación plana, pruebas de torsión, y pruebas biaxiales [19].

En la Figura 9: **Pruebas comunes usadas para determinar la fuerza de los materiales** se muestran diferentes cargas aplicadas en el objeto, tanto de compresión o tensión.

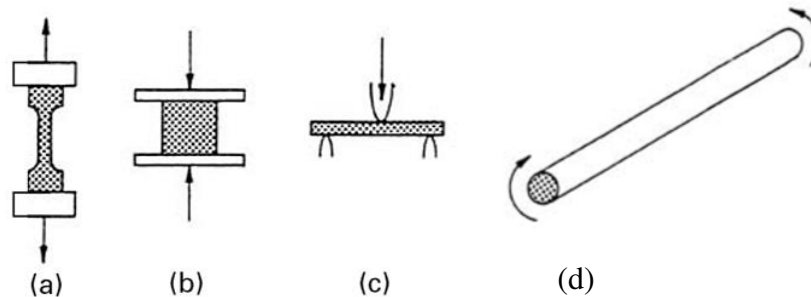


Figura 9: Pruebas comunes usadas para determinar la fuerza de los materiales [19].

En la pieza (a), se aplican cargas axiales de una manera longitudinal, estirando el objeto en un sentido opuesto a esto se le llama ensayo de tensión una vez que alcanza el punto de fractura se realizan los estudios pertinentes. En la pieza (b) consiste en comprimir un cilindro entre placas paralelas; la relación altura/diámetro tiene que ser inferior a un valor crítico a fin de eliminar la posibilidad de inestabilidad (pandeo). También se puede aplicar cargas por el centro con dos puntos de apoyo como se ve en la pieza (c). O también se puede aplicar esfuerzos para elementos de tipo tubular utilizando una carga conocida como el torque, como se muestra en la pieza (d).

En los metales, la plasticidad frecuentemente está relacionada con el desplazamiento de dislocaciones en el interior del material. Los metales usualmente están formados por cristales con planos razonablemente bien alineados dentro de cada cristal, aunque siempre existen algunas dislocaciones y planos atómicos incompletos. A partir de un cierto valor de la tensión esas dislocaciones sufren desplazamientos, que constituyen transformaciones irreversibles que absorben energía y cuyas deformaciones asociadas no se recuperan cuando desaparece el esfuerzo, [19].

### 3.2 Curvas de fluencia

La curva esfuerzo-deformación se obtiene mediante un ensayo de tensión uniaxial. Para el análisis de plasticidad se utiliza tanto el esfuerzo como la deformación verdaderos,  $\sigma$  y  $\varepsilon$ , respectivamente, [12] [19] [20].

En la Figura 10: **Curvas de fluencia** se muestra una gráfica esfuerzo-deformación unitaria en donde se observa que existe un cierto límite elástico  $\sigma_y$ . A partir del  $\sigma_y$  se existe una zona llamada de deformación plástica. La zona anterior al límite elástico se le llama zona elástica de la cual la pendiente corresponde a la ley de Hooke.

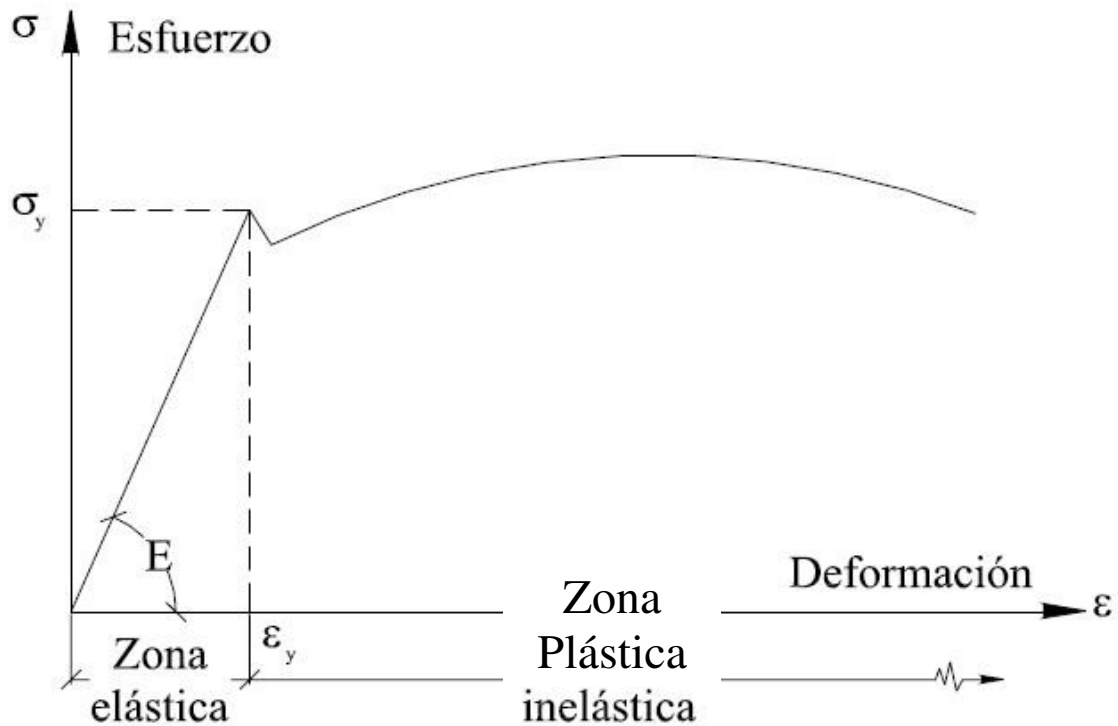


Figura 10: Curvas de fluencia.

La expresión más común para expresar el esfuerzo en la zona plástica es mediante la ecuación 3-1:

$$\sigma = K\varepsilon^n \quad (3-1)$$

Donde  $K$  es un coeficiente que depende del material y  $n$  es el coeficiente de endurecimiento [12].

### 3.3 Deformación real

La deformación real se define como  $\frac{dL}{L}$ , en donde  $dL$  es el cambio incremental de longitud y  $L$  la longitud real de escala en el momento en que se determina la variación, [12].

Por lo que se expresa en la siguiente ecuación:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (3-2)$$

La ecuación 3-3 expresa la deformación verdadera utilizando los incrementos de longitud diferencial propuestas por Ludwik [21]:

$$\varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0} \quad (3-3)$$

Durante la deformación plástica el volumen permanece constante por lo que la ecuación 3-3 se puede reescribir en términos del cambio de área o sección transversal, ecuación 3-4, [12]:

$$\varepsilon = \ln \frac{L}{L_0} = \ln \frac{A_0}{A} \quad (3-4)$$

### 3.4 La fluencia plástica en dos dimensiones.

#### 3.4.1 Deformación plana

Existen casos en los cuales los movimientos están limitados en un plano XY despreciando las deformaciones en la dirección Z, a esto se le conoce como un caso de *deformación plana*. Un ejemplo de proceso en condiciones de deformación plana sería uno de laminación de perfiles rectangulares con anchos mucho mayores al espesor de la lámina, Figura 2.

En la Figura 11 se muestran diferentes formas de impedir flujos en ciertas direcciones [12]:

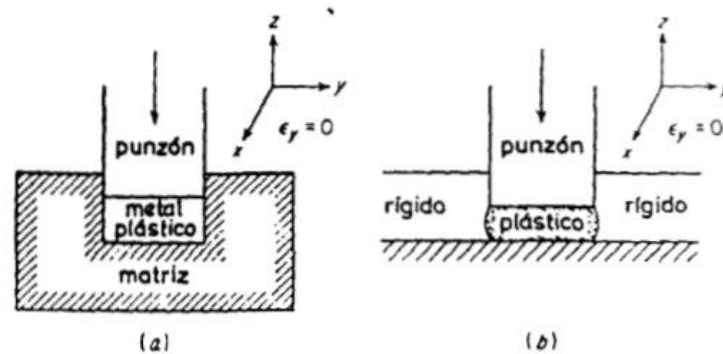


Figura 11: Métodos para producir impedimento plástico [12].

### 3.5 Teorías de fluencia

#### 3.5.1 Cuando un material plástico es ideal rígido

Esta teoría se basa en la proporcionalidad entre el tensor de esfuerzos reducido (sin la contribución hidrostática) y la velocidad de deformación,  $\dot{\epsilon}$ . Si se define  $\lambda$  como una constante de proporcionalidad y  $\sigma_m$  como la componente de hidrostática del tensor de esfuerzos, Venant, Levy y von Mises propusieron la ecuación 3-5, [18] [22]:

$$\begin{aligned}
 \sigma_x - \sigma_m = \sigma'_x &= 2\lambda\dot{\epsilon}_x & \tau_{xy} &= \lambda\dot{\gamma}_{xy} \\
 \sigma'_y &= 2\lambda\dot{\epsilon}_y & \tau_{yz} &= \lambda\dot{\gamma}_{yz} \\
 \sigma'_z &= 2\lambda\dot{\epsilon}_z & \tau_{xz} &= \lambda\dot{\gamma}_{xz}
 \end{aligned}
 \tag{3-5}$$

La cual se puede reescribir en términos de los esfuerzos principales, resultando en la ecuación 3-6:

$$\sigma'_1 = 2\dot{\epsilon}_1\lambda \quad \sigma'_2 = 2\dot{\epsilon}_2\lambda \quad \sigma'_3 = 2\dot{\epsilon}_3\lambda
 \tag{3-6}$$

En el caso de un cuerpo plástico, el valor de  $\lambda$  depende de los valores del esfuerzo y la deformación y se obtiene al establecer el criterio de fluencia, [22].

El criterio de Von Mises está dado por:

$$J_2 = k^2 \text{ ó } 2J_2 = (\sigma'_1)^2 + (\sigma'_2)^2 + (\sigma'_3)^2 = \frac{2\sigma_0^2}{3} \quad (3-7)$$

Donde  $\sigma_0$  es el esfuerzo de cedencia. Ahora sustituyendo las ecuaciones 3-6 en la ecuación 3-7, se obtiene:

$$\lambda^2(\dot{\epsilon}_1^2 + \dot{\epsilon}_2^2 + \dot{\epsilon}_3^2) = \frac{\sigma_0^2}{6} \quad (3-8)$$

Sustituyendo la ecuación 3-8 en la ecuación 3-6 permite calcular el primer esfuerzo principal:

$$\sigma'_1 = \frac{\sqrt{2}\sigma_0\dot{\epsilon}_1}{[3(\dot{\epsilon}_1^2 + \dot{\epsilon}_2^2 + \dot{\epsilon}_3^2)]^{1/2}} \quad (3-9)$$

De forma análoga se obtienen las ecuaciones para los esfuerzos principales  $\sigma'_2$  y  $\sigma'_3$ .

### 3.6 Criterio de máxima distorsión de energía (Von mises)

Este criterio fue originalmente propuesto por Huber, ecuación 3-11:

$$\frac{\sqrt{2}}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2]^{1/2} > \sigma_0 \quad (3-11)$$

Lo que se encuentra a la izquierda es la ecuación del *esfuerzo efectivo*. Esta ecuación se basa en que la falla de un cuerpo ocurre cuando se excede una energía de deformación crítica, llamada energía de distorsión, [19].

### 3.7 Fricción

Las condiciones de fricción en la interfase influyen en gran medida en el flujo de metal, la formación de la superficie y los defectos internos, tensiones que actúan sobre los troqueles y los requisitos de carga y energía, [7].

En la mayoría de las aplicaciones de conformado, el lubricante es el factor significativo que determina la fricción. La fricción permite predecir la presión del formado. El coeficiente de fricción se relaciona con la ecuación 3-12:

$$f_s = \mu p \quad (3-12)$$

Donde  $p$  es la presión de contacto y  $f_s$  es la fuerza de fricción. El valor  $p$  también se puede considerar como un esfuerzo normal de compresión de la interfase. La ecuación 3-12 también se puede reescribir como:

$$f_s = mk \quad (3-13)$$

Donde  $k$  es resistencia de esfuerzo cortante de la deformación del material mientras que  $m$  es conocido como factor de fricción, [7] [23].

Las pruebas de lubricación utilizados para la determinación de los factores de fricción deben incluir los efectos de enfriamiento de la herramental y lubricación, [7] [24].

### 3.8 Temperatura

En los procesos de conformado, la deformación plástica y la fricción conforman un papel importante en la generación de calor. Aproximadamente un 90-95% de la energía mecánica está involucrada en el proceso y es transformada en calor.

Las temperaturas desarrolladas en el proceso influyen en las condiciones de lubricación, la vida útil de la herramienta, las propiedades del producto final, y determina la máxima velocidad de desgaste.

La magnitud y la distribución de temperaturas depende principalmente de:

1. La temperatura inicial del material y los soportes.
2. La generación de calor debido a la deformación plástica y fricción en la interfaz material-soporte.
3. Transferencia de calor entre la deformación del material y los soportes y entre el material y el ambiente (aire o enfriamiento).

El material se encuentra en contacto con el herramental durante un periodo corto de tiempo. La deformación del material está continuamente en contacto con el soporte y la temperatura acumulativa se incrementa de manera significativa.

La influencia de temperaturas en las operaciones de conformado de metales es más dramática en las operaciones de formado en caliente, donde el tiempo de contacto bajo presión entre la deformación del material y los soportes, es el factor más significativo que influye en las condiciones de temperatura, [24].

### 3.9 Ecuaciones de equilibrio

En un plano cartesiano rectangular en un sistema de coordenadas, las ecuaciones de equilibrio de un cuerpo están representadas en:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0$$

(3-14)

Las ecuaciones 3-14 se reescriben en notación tensorial como:

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_i} = 0, \quad \text{ó} \quad \sigma_{ij,i} \quad (3-15)$$

La notación que se utiliza en las ecuaciones 3-15 los sufijos indican una suma, y la coma denota una diferenciación parcial.

El esfuerzo a lo largo de la frontera de la superficie  $S$  está en equilibrio con una fuerza aplicada  $F_i$  (fuerza por unidad de superficie).

### 3.9.1 El principio del trabajo virtual

El principio de trabajo virtual establece que para el campo de esfuerzos que está en equilibrio dentro del cuerpo y con cargas de superficie aplicados, la cantidad de trabajo en el interior del cuerpo de la deformación es igual al trabajo generado por las fuerzas externas, [25] [26].

Por lo tanto, se expresa de la siguiente manera:

$$\int_V \sigma_{ij} \frac{\partial w_j}{\partial x_i} dV = \int_S F_j w_j dS \quad (3-18)$$

El primer término de la ecuación 3-18 representa la energía de deformación y el otro representa el trabajo por las fuerzas externas, en este caso, fuerzas superficiales.  $V$  es el volumen del cuerpo, y la  $S$  es la superficie.

En resumen, las ecuaciones gobernantes para la solución de problemas de deformación plástica son las siguientes:

1. Ecuaciones de Equilibrio, ecuación 3-15.
2. Ecuaciones constitutivas, ecuación 3-19:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{\partial f(\sigma_{ij})}{\partial \sigma_{ij}} \dot{\lambda}; \quad \dot{\epsilon}_{ij} = \frac{3 \dot{\bar{\epsilon}}}{2 \bar{\sigma}} \sigma'_{ij} \quad \text{donde} \quad \dot{\bar{\epsilon}} = \sqrt{\frac{2}{3}} (\dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij})^{1/2} \quad (3-19)$$

3. Criterio de fluencia.

4. Condiciones de compatibilidad, ecuación 3-20:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (3-20)$$

Donde  $u$  es el desplazamiento. Los procesos de conformado en caliente requieren a su vez el cálculo de temperaturas en la pieza de trabajo, tema que será detallado en el siguiente capítulo.

# Capítulo 4: Transferencia de calor

En este capítulo se hace énfasis a los fenómenos que surgen por la transferencia de calor durante el proceso de laminación en caliente.

## 4.1 Transferencia de calor

El calor se transporta fundamentalmente, o se mueve por una gradiente de temperatura, que fluye o se transfiere desde una región de alta temperatura a uno de baja temperatura, esto es conocido como transferencia de calor, [27].

### 4.1.1 Conducción

Conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas, [6].

#### 4.1.1.1 Ecuación de Conducción

La velocidad por la que se transfiere calor por conducción,  $\dot{Q}_{cond}$  es proporcional al gradiente de temperatura  $dT/dx$ , [28] [27].

Por lo tanto;

$$\dot{Q}_{cond} \propto A \frac{dT}{dx} \quad (4-1)$$

La proporcionalidad entre el flujo de calor y el gradiente de temperatura está dada por la conductividad térmica, por lo tanto:

$$\dot{Q}_{cond} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (4-2)$$

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (4-3)$$

El cual se llama ley de Fourier de la conducción del calor, [28].

#### 4.1.2 Convección

Convección, es lo que constituye el mecanismo de transferencia de calor a través de un fluido, en presencia de un movimiento masivo de éste.

La transferencia de calor por convección es complicada por el hecho de que comprende movimiento del fluido, así como conducción del calor. El movimiento del fluido mejora la transferencia de calor, ya que pone en contacto porciones más calientes y más frías de ese fluido, iniciando índices más altos de conducción en un gran número de sitios. La figura 12 muestra un ejemplo de un problema con transferencia de calor por convección, [27].

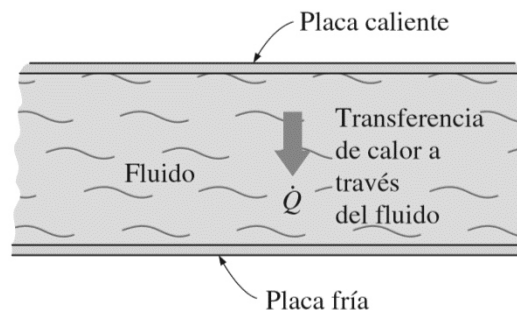


Figura 12: Transferencia de calor a través de un fluido comprimido entre dos placas paralelas, [27].

#### 4.1.2.1 Ecuación de convección

La razón de la transferencia de calor por este mecanismo es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa mediante la ley de enfriamiento de Newton:

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (4-4)$$

#### 4.1.3 Radiación

Es el calor emitido por un cuerpo debido a su temperatura, en este caso no existe contacto entre los cuerpos, ni fluidos intermedios que transporten el calor. Simplemente por existir un cuerpo A (sólido o líquido) a una temperatura mayor que un cuerpo B existirá una transferencia de calor por radiación de A a B.

##### 4.1.3.1 Ecuaciones de radiación

La ecuación de la energía de la radiación (energía emitida,  $E_b$ ) se expresa por unidad de tiempo y por unidad de área superficial y fue determinada de manera experimental por Joseph Stefan en 1879, y se escribe así:

$$E_b(T) = \sigma T^4 \quad (4-5)$$

$\sigma$  es llamada constante de Stefan-Boltzmann. El flujo de calor por radiación se calcula mediante la ecuación 4-6:

$$q_r = \sigma A \epsilon (T^4 - T_s^4) \quad (4-6)$$

Donde  $\epsilon$  es la emisividad y  $T_s$  es la temperatura de la superficie.

#### 4.1.4 Ecuación general de transferencia de calor.

Para el desarrollo de la ecuación general de transferencia de calor se parte de un volumen de control en el cual se hace un balance de energías. Dicho balance de energías consiste en evaluar los flujos de calor de entrada y de salida en cada una de las caras del volumen de control y se igualan a la energía acumulada o interna dentro del volumen de control, [29].

Al final se obtiene la ecuación general que permite calcular la distribución de temperaturas en un cuerpo y se expresa mediante la ecuación 4-7:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + G = \rho C_p \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (4-7)$$

Donde  $k$  es la conductividad térmica,  $\rho$  la densidad,  $C_p$  el calor específico,  $G$  un flujo de calor volumétrico y  $t$  el tiempo. El problema general puede ser resuelto en condiciones de estado estable o transitorio.

#### 4.1.5 Condiciones de frontera

Para las ecuaciones que describen el sistema físico queden totalmente determinadas se debe de proporcionar un conjunto adecuado de condiciones de frontera. Y estas pueden ser de tres tipos:

##### 1.- Condiciones de frontera de primera clase

Se prescribe la temperatura a lo largo de toda la frontera y en el caso general es función del tiempo y de la posición.

$$T = f(x_i, t) \quad (4-8)$$

## 2.- Condiciones de frontera de segunda clase

En este caso se prescribe la primera derivada de la temperatura a lo largo de toda la frontera pudiendo ser función también de la posición y del tiempo. Esta condición sería un flujo de calor asignado sobre una superficie.

$$\frac{\partial T}{\partial n} = f(x_i, t) \quad (4-9)$$

## 3.- Condición de frontera de tercera clase

Aquí se prescribe una combinación lineal de la temperatura y su primera derivada sobre toda la frontera.

$$k \frac{\partial T}{\partial n} + hT = f(x_i, t) \quad (4-10)$$

Si  $k$  o  $h$  igual a cero se obtienen los otros 2 tipos de condición de frontera.

El significado físico de la ecuación anterior es el de que la frontera bajo consideración disipa calor por convección a los alrededores cuya temperatura varía con el tiempo y la posición.

Haciendo un balance de calor en la frontera, se obtiene:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} + hT = 0 \quad (4-11)$$

Para lo que se refiere a la solución transitoria, es necesario establecer una condición inicial de temperatura, es decir,  $T(t=0)$ .

# Capítulo 5: Elemento finito

## 5.1 Introducción

En muchas ocasiones, hay estudios en los que se requieren más detalles del comportamiento de ciertos fenómenos físicos, en el capítulo 4 se habló de transferencia de calor, en donde por medio de fórmulas matemáticas se obtienen resultados que permiten entender el comportamiento de un objeto. La solución directa de estas ecuaciones es llamada método analítico. Sin embargo, existen otros métodos en donde se pueden sacar resultados de una manera aproximada con menor grado de complejidad matemática y obtener aún resultados más precisos. Uno de ellos es el método de elemento finito, que es un método numérico general para la aproximación de soluciones de ecuaciones diferenciales parciales muy utilizado en diversos problemas de ingeniería y física, [15] [30].

El elemento finito permite obtener una solución numérica aproximada sobre un cuerpo, estructura o dominio sobre el que están definidas ciertas ecuaciones diferenciales en forma débil o integral que caracterizan el comportamiento físico del problema dividiéndolo en un número elevado de subdominios denominados elementos finitos. El conjunto de elementos finitos forma una partición del dominio también denominada discretización. Dentro de cada elemento se distinguen una serie de puntos representativos llamados nodos. Dos nodos son adyacentes si pertenecen al mismo elemento finito; además, un nodo sobre la frontera de un elemento finito puede pertenecer a varios elementos. El conjunto de nodos considerando sus relaciones de adyacencia se llama malla, [31].

De acuerdo con estas relaciones de conectividad se relaciona el valor de un conjunto de variables incógnitas definidas en cada nodo y denominadas grados

de libertad. El conjunto de relaciones entre el valor de una determinada variable entre los nodos se puede escribir en forma de sistema de ecuaciones lineales. La matriz de dicho sistema de ecuaciones se llama matriz de rigidez del sistema. El número de ecuaciones de dicho sistema es proporcional al número de nodos.

## **5.2 Historia del elemento finito**

El método de elemento finito (MEF) surge a partir de dos ramas: la ingeniería, y las matemáticas. Desde el punto de vista matemático se diseñaron técnicas que se aplicaban directamente sobre las ecuaciones diferenciales, tales como los métodos de diferencias finitas y los métodos variacionales [15].

En 1943 Courant realizó un ensamble de elementos triangulares y éste aplica el principio de energía potencial mínima para resolver problemas de torsión. En el año 1959 Greenstadt presentó un método de discretización el cual involucraba celdas en lugar de puntos y para cada celda la función desconocida era representada mediante una serie de funciones, cada una asociada con cada celda para después aplicar un método variacional apropiado a cada celda y finalmente acoplar las ecuaciones obtenidas para todas las celdas, [32] [33].

Desde un punto de vista ingenieril nace el término “elemento finito” utilizado por primera vez por Clough en 1960. Al mismo tiempo, en ese año surge una publicación de Argyris en la cual se establece en forma detallada una formulación matricial para la teoría estructural en la cual se demostraba que ésta podía ser generalizada para cualquier tipo de aplicación que involucrara elementos estructurales diferentes a vigas, barras, etc., [33].

Desde una perspectiva computacional Argyris publicó en 1954 una serie de artículos que cubrían análisis lineales estructurales y técnicas eficientes de solución para ser resueltos mediante una computadora. A partir de 1960 comenzaron a desarrollarse paquetes computacionales de elemento finito,

entre los que destacan NASTRAN, ANSYS, ALGOR, COSMOS, ABAQUS, entre muchos otros, [34] [35].

### 5.3 Aplicaciones de elemento finito

El método de los elementos finitos es un método numérico para resolver problemas de ingeniería y la física matemática. Áreas problemáticas típicas de interés en las ramas anteriormente mencionadas que se pueden resolver mediante el uso del método de elementos finitos incluyen análisis estructural, transferencia de calor, el flujo de fluido, transporte masivo, y el potencial electromagnético, [31].

El MEF ha demostrado las amplias posibilidades que posee como herramienta para la solución de problemas de ingeniería y para el análisis de problemas de investigación.

El MEF se enfoca más a problemas con condición frontera de segunda clase mientras que los métodos de diferencias finitas y de volumen finito son más aplicados a problemas con condición frontera de primera clase, [36].

### 5.4 Transferencia de calor mediante elemento finito

Ahora se centra la atención en la determinación de las características del elemento, es decir, la relación entre las incógnitas nodales y las cargas correspondientes o fuerzas en la forma de la siguiente ecuación matricial:

$$[K]\{T\} = \{f\} \quad (5-1)$$

Donde  $[K]$  es la matriz de rigidez térmica,  $\{T\}$  es el vector de las temperaturas desconocidas y  $\{f\}$  es llamado vector de carga térmica, o vector de fuerza.

Para resolver la ecuación genreal existen varios métodos disponibles para aproximar hacia una solución al problema dado.

Se consideran tres métodos en la primera instancia:

1. El método de Ritz.
2. Método Rayleigh-Ritz.
3. Método de residuos ponderados.

La ecuación más conocida de transferencia de calor está representada de esta manera, que representa un problema unidimensional con condición frontera convectiva:

$$kA \frac{d^2T}{dx^2} - hP(T - T_a) = 0 \quad (5-2)$$

Haciendo un cambio de variable en la ecuación 5-2, se reduce a una ecuación gobernante expresada de la siguiente manera:

$$\frac{d^2\theta}{d\zeta^2} - \mu^2\theta = 0 \quad (5-3)$$

#### **5.4.1 Método de Ritz**

El método de Ritz consiste en plantear una función prueba que cumpla las condiciones geométricas del problema. Es decir, que cumpla con las condiciones de frontera del problema.

#### **5.4.2 Método Rayleigh-Ritz**

El método de Rayleigh-Ritz es un método de cálculo variacional, que utiliza un importante teorema del cálculo de variaciones, en donde determina que la función  $T(x)$  extremisa que la integral variacional corresponde a una ecuación diferencial gobernante (llamada Euler o ecuación Euler-Lagrange) es la solución de la ecuación diferencial gobernante original y las condiciones de frontera.

Entonces, partiendo de la ecuación 5-3 y aplicando las ecuaciones de las condiciones de frontera, integrando con la ecuación diferencial de Euler-Lagrange, y simplificando se obtiene como resultado final.

$$\frac{\theta(\zeta)}{\theta_b} = 1 - (1 - \zeta^2)B \quad (5-4)$$

Donde;

$$B = \frac{\frac{\mu^2}{2}}{1 + \frac{2}{5}\mu^2} \quad (5-5)$$

Lo que sustituyendo la ecuación 5-4 en la ecuación 5-5, se obtiene:

$$\frac{\theta(\zeta)}{\theta} = 1 - (1 - \zeta^2) \frac{\frac{\mu^2}{2}}{1 + \frac{2}{5}\mu^2} \quad (5-6)$$

### 5.4.3 Método de residuos ponderados

El método de los residuos ponderados provee una poderosa solución aproximada que se aplica a una gran variedad de problemas. Además, este método es utilizado para los problemas que se presentan de elemento finito.

Las ecuaciones gobernantes de este método están representadas por la ecuación 5-6:

$$L(T) = 0 \quad (5-7)$$

En la cual se utiliza una temperatura aproximada  $\bar{T}$ , expresada mediante la ecuación 5-7;

$$T \approx \bar{T} = \sum_{i=1}^n a_i N_i(x) \quad (5-8)$$

Para el método de los residuos ponderados se requiere determinar los parámetros  $a_1, a_2, \dots, a_n$  que minimicen al residuo  $R$ :

$$\int_{\Omega} w_i(x) R dx = 0 \text{ con } i = 1, 2, \dots, n \quad (5-9)$$

Existen algunas opciones para resolver la función  $w_i(x)$ , siendo 4 funciones que son las más utilizadas, dependiendo de la elección de las funciones ponderadas. Los métodos más populares son: *colocación*, *subdominio*, *Galerkin* y *mínimos cuadrados*, [29]. La figura 13 muestra un comparativo de los métodos.

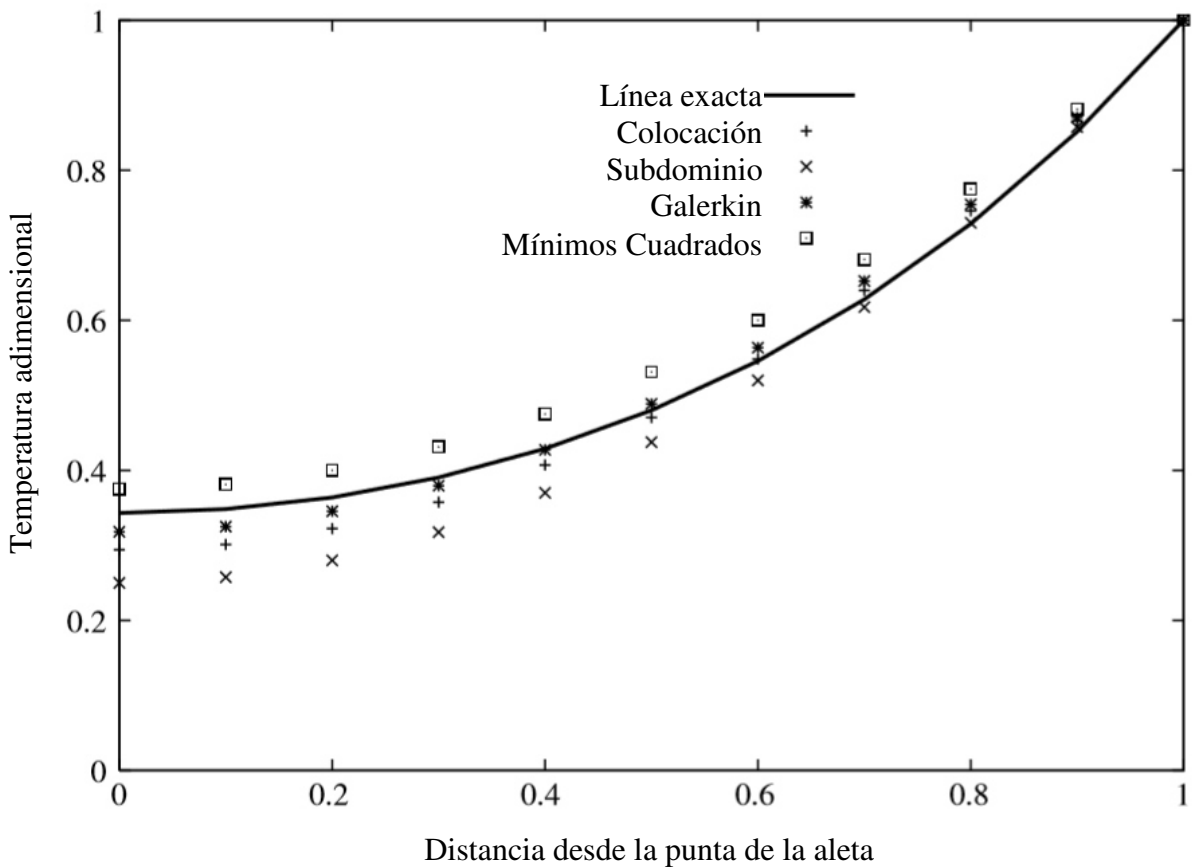


Figura 13: Ejemplo donde se representan los diferentes métodos de los residuos ponderados y la solución exacta, [29].

Con respecto a la Figura 13 se puede ver que el método de Galerkin es la función ponderada que más se ajusta a la solución.

#### 5.4.4 El método de Galerkin

Este es uno de los más importantes métodos usados en el análisis elemento finito. La función de ponderación es  $N_i(x) = (1 - \zeta^2)$ . En una formula Galerkin se expresa como:

$$\int_{\zeta} N_k \left[ \frac{d^2 \bar{\theta}}{d\zeta^2} - \mu^2 \bar{\theta} \right] d\zeta = 0 \quad (5-10)$$

En donde el subíndice  $k$  representan los nodos del dominio, después de una serie de despejes se obtiene una fórmula para el primer elemento representado por la ecuación 5-10, [29] [37]:

$$\frac{1}{\zeta_e} \begin{bmatrix} 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_i \\ \theta_j \end{Bmatrix} + \frac{\mu^2 \zeta_e}{6} \begin{bmatrix} 2 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_i \\ \theta_j \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \frac{d\theta}{d\zeta} \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (5-11)$$

Esa última ecuación ayuda a resolver problemas nodales de una dimensión. En forma general para problemas en 3D se puede aplicar el mismo concepto hasta llegar a un sistema final de ecuaciones donde las variables a calcular serán las temperaturas en cada nodo.

#### 5.5 MEF en plasticidad

Para comprender más el concepto de plasticidad, a través de elemento finito, existen ecuaciones que permiten entender cómo se distribuye el material, utilizando las ecuaciones básicas del análisis elemento finito.

El enfoque variacional está basado en el método de trabajo virtual mencionado en el capítulo 3. Eso requiere que se admita la velocidad  $u_i$  que satisface las condiciones de compatibilidad e incompresibilidad [7] [38]:

$$\pi = \int_V \bar{\sigma} \dot{\bar{\epsilon}} dV - \int_{S_F} F_i u_i dS, \quad \text{para materiales plastico rigidos} \quad (5-12)$$

Existe una alternativa de la ecuación 5-11, pero ya con la notación de la derivada, llamada forma débil de las ecuaciones de equilibrio:

$$\int_V \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} \delta u_i dV = 0 \quad (5-13)$$

Donde  $\delta u_i$  es una variación arbitraria en  $u_i$ , por lo tanto, la ecuación 5-12 se convierte en:

$$\int_V \sigma_{ij} \frac{\partial(\delta u_i)}{\partial x_j} dV - \int_V \frac{\partial}{\partial x_j} (\sigma_{ij} \delta u_i) dV = 0 \quad (5-14)$$

La solución se obtendrá minimizando el funcional mediante la primera variación (operador  $\delta$ ). Dicha minimización llevará al sistema final de ecuaciones  $K\Delta v = f$ .

Para poder obtener resultados, es necesario resolver el sistema de ecuaciones resultante, siendo uno de ellos el método de eliminación Gaussiana.

### 5.5.1 Método de Eliminación Gaussiana

Este método ayuda a resolver el sistema de ecuaciones. Una vez que se obtiene la formulación por elemento, la misma se aplica para todos los elementos restantes del dominio, realizando una sumatoria de todos los elementos hasta obtener una matriz de rigidez global.

La forma más común de resolver la ecuación  $K\Delta v = f$  es a través de la eliminación Gaussiana. Que es un método algebraico que sirve para resolver ecuaciones matriciales que arrojan los elementos de una pieza.



# Capítulo 6: Experimentación

## 6.1 Introducción

A continuación, se describe el trabajo realizado en este trabajo de tesis. El trabajo se divide en 2 etapas, pruebas físicas y pruebas numéricas. Para las pruebas físicas se realizó un proceso de escaneo de láminas ya procesadas en 4 pases de laminación y en las pruebas numéricas se utilizó el paquete ABAQUS para continuar los pases corriendo el total hasta 7 pases para después extrapolar el comportamiento de flujo de material.

## 6.2 Pruebas físicas

En las pruebas físicas, primero se calienta una placa de acero a una temperatura de 750°C en un horno, posteriormente se pasa la placa por un castillo que consiste en dos rodillos. El rodillo superior cuenta con una protuberancia con cierto espesor en forma “V” que permite crear una ranura en el acero por el centro, ocurriendo un desplazamiento lateral. La Figura 15 muestra el sistema de laminación considerado en este trabajo:

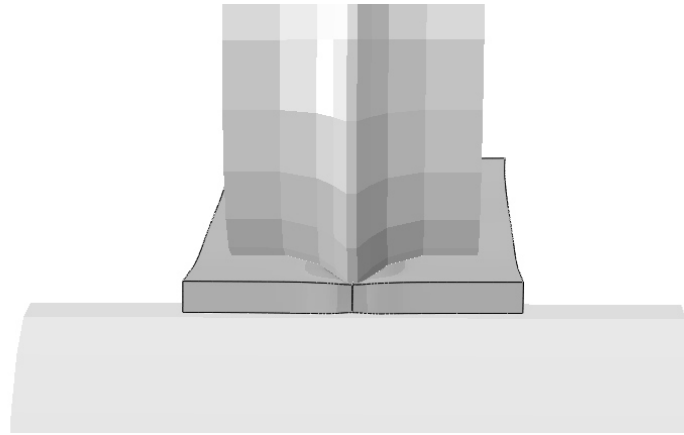


Figura 15: Vista frontal de la mordida de la placa.

### 6.2.1 Escaneo

Una vez obtenidas las placas en físico, se procedió a preparar las muestras para un proceso de escaneo. Esto para obtener las medidas de la placa ya deformada y obtener el archivo CAD para poder realizar la comparación con el modelo de simulación.



Pase 1



Pase 2



Pase 3



Pase 4

Figura 16: Piezas físicas.

Las piezas físicas que fueron procesadas experimentalmente fueron puestas en un escáner Konica Minolta fijo a una distancia determinada sobre una mesa rotatoria que gira de manera automática, como se ilustran en la Figura 17 y Figura 18.



Figura 17: Muestra del escaneo

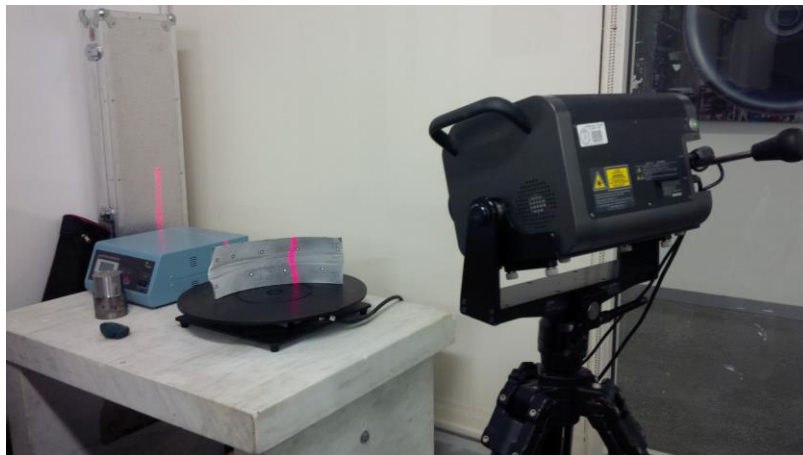


Figura 18: Se aprecia la mesa rotatoria, el escáner tomando la muestra desde una distancia, y la placa pintada de aerosol para hacerlo detectable ante el láser.

Las piezas fueron tomadas a través del lente del escáner que es ser capaz de reconocer la pieza. En este caso la pieza se pintó de color blanco para que los elementos fueran visibles. Se realizaron escaneos parciales con la finalidad de ensamblarlos para obtener las piezas completamente escaneadas. El resultado del escaneo arrojó una nube de puntos que fue posteriormente convertida a formato STL mediante un software llamado Geomagic, (Figura 19:9).

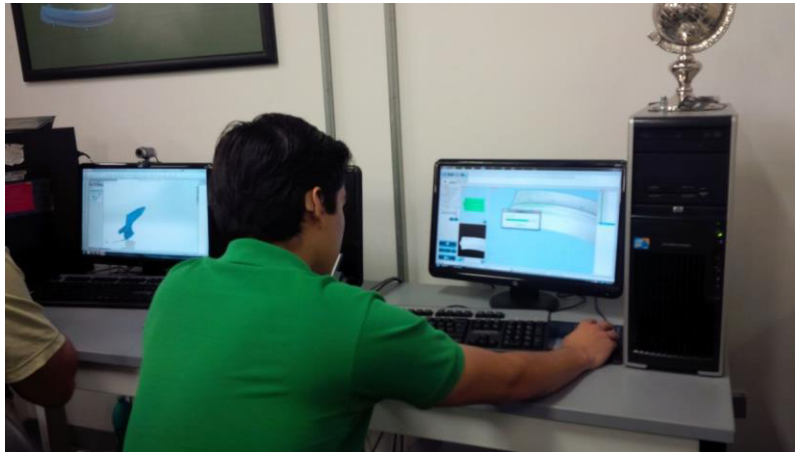


Figura 19: Se emparejan las zonas donde el láser no fue capaz de leer.

Al finalizar el proceso de escaneo, la pieza finalmente fue convertida a un formato CAD que ayudó posteriormente a la comparación de los modelos escaneados con los de la simulación.

### **6.3 Desarrollo de modelos numéricos**

En la parte de la modelación por elemento finito se realizaron simulaciones del proceso de laminación en caliente de las placas. Se simularon 4 pases. A continuación, se muestran los pasos realizados para preparar el modelo:

#### **6.3.1 Geometrías**

A continuación, se muestran las medidas y las imágenes de cada una de las piezas consideradas en este trabajo de tesis, figuras 20 a 22:

### Diseño de la placa

**Medidas totales**

101.6 mm Ancho

9.53 mm Espesor

308.08 mm Largo

Se ilustra solo la mitad de la pieza

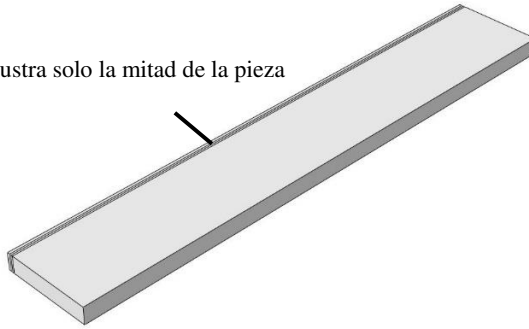
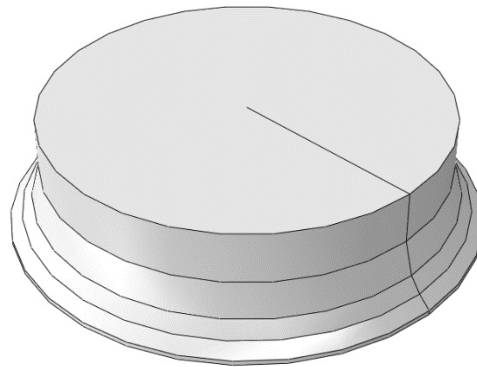


Figura 20: Placa de acero.

### Rodillo superior

Dibujo del rodillo superior.



Medidas del rodillo superior

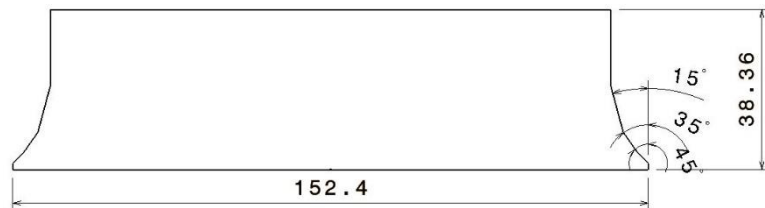
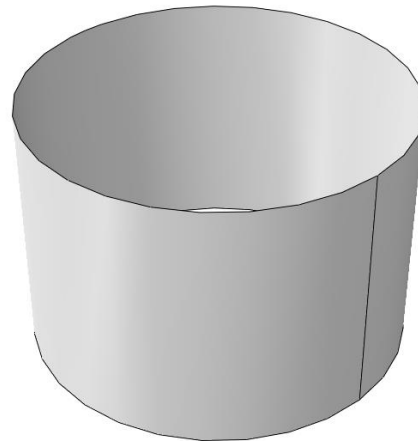


Figura 21: Rodillo superior (medidas en mm).

## Rodillo inferior

Dibujo del rodillo inferior



Medidas del rodillo inferior

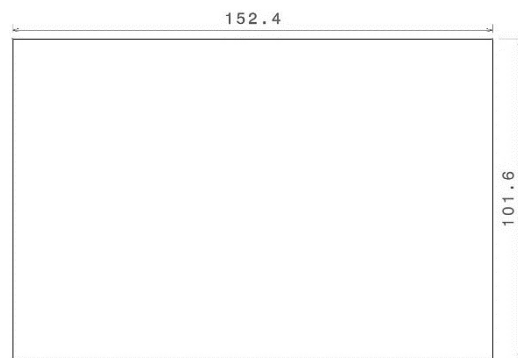


Figura 22: Rodillo inferior (medidas en mm).

### 6.3.2 Propiedades

A la placa de acero se le asignaron las propiedades correspondientes en el software las cuales se obtuvieron a partir de la composición química del material mediante JMATpro:

Densidad	7800 Kg/m <sup>3</sup>
Módulo de Elasticidad	200,000 MPa
Coefficiente de Poisson	0.3

Tabla 1: Propiedades mecánicas.

La conductividad térmica y el calor específico se muestran en las figuras 23, 24 y 25:

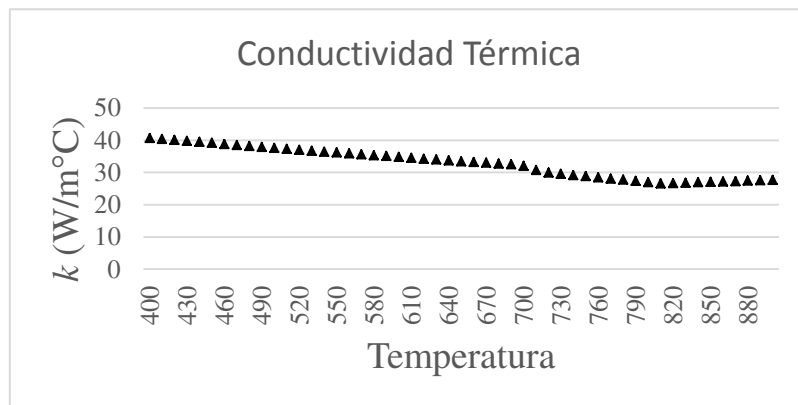


Figura 23: Conductividad Térmica.

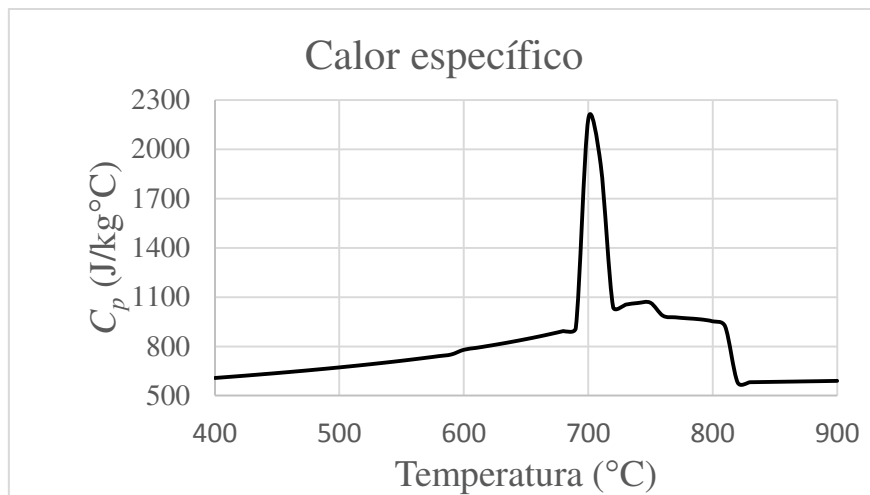


Figura 24: Calor específico.

La Figura 25 muestra las propiedades plásticas:

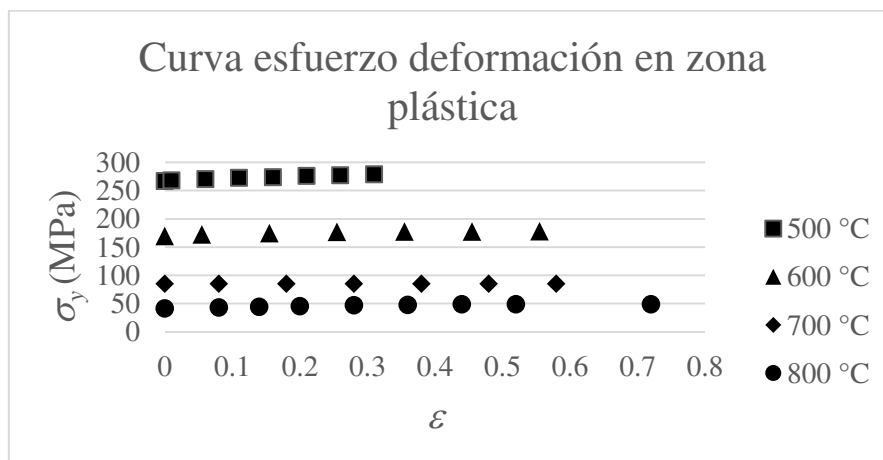


Figura 25: Propiedades plásticas.

### 6.3.3 Ensamble de las piezas

El ensamble consiste en unir las tres piezas principales, se consideró simetría para la simulación para poder reducir la cantidad de nodos y elementos finales.

Se asignó una separación (gap) de 4.5 mm entre el rodillo superior y el inferior, **Figura 26: Muestra la distancia (gap) que debe existir entre el rodillo superior e inferior.**

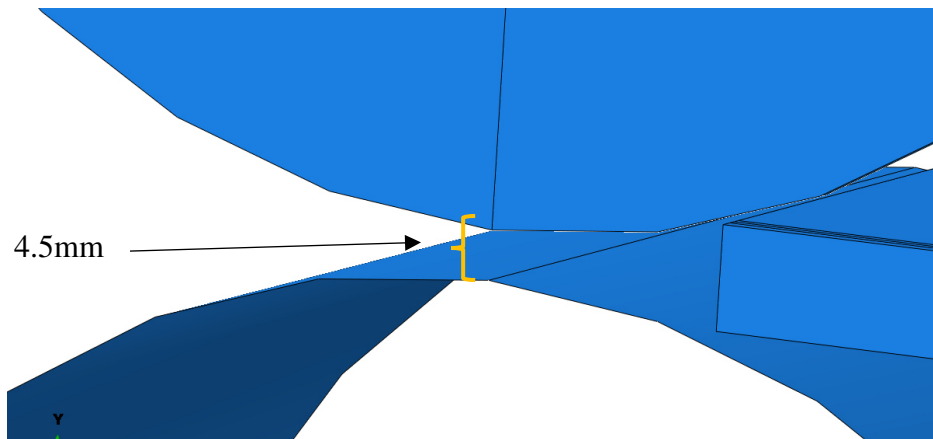


Figura 26: Muestra la distancia (gap) que debe existir entre el rodillo superior e inferior.

La Figura 27, muestra el ensamble final:

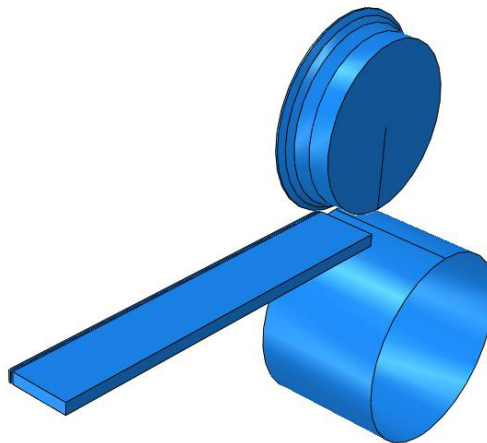


Figura 27: Piezas ensambladas.

### 6.3.4 Condiciones de frontera

Se desarrolló un modelo termo-mecánico. Desde el punto de vista térmico, la placa está a una temperatura inicial de 750°C, se consideró simetría, la placa tiene una velocidad inicial justo antes de entrar a la zona de mordida de los rodillos con un valor 231 mm/s y para el caso de los rodillos se le asigna una velocidad angular de 3.33 rad/s.

Se le asignan las condiciones de frontera a la placa, primero empezando por la simetría de la placa.

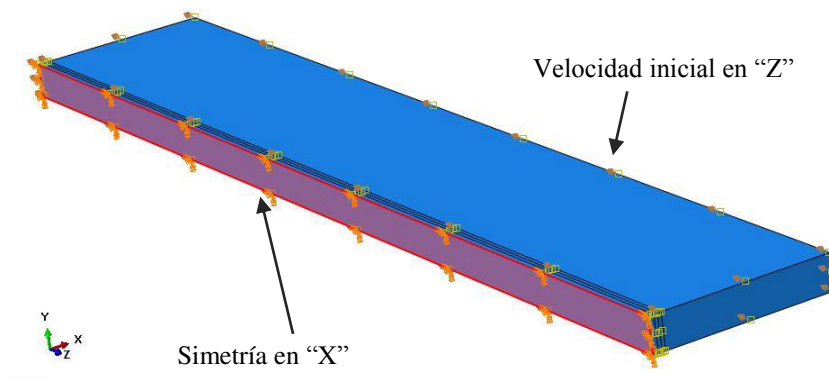


Figura 28: Condiciones de frontera de los ejes.

Las condiciones de frontera para los rodillos permiten restringir los desplazamientos ( $U$ ) y rotaciones de los mismos ( $UR$ ). Los rodillos fueron considerados como cuerpos rígidos analíticos y se muestran en la figura 29.

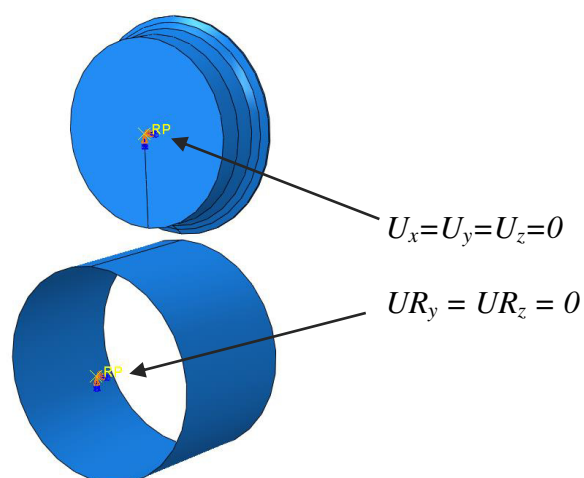


Figura 29: Condiciones de frontera de los rodillos.

La Figura 30 muestra la superficie expuesta a convección, se asignó un coeficiente de transferencia de calor en dicha superficie, no se tomaron en cuenta los efectos de la radiación.

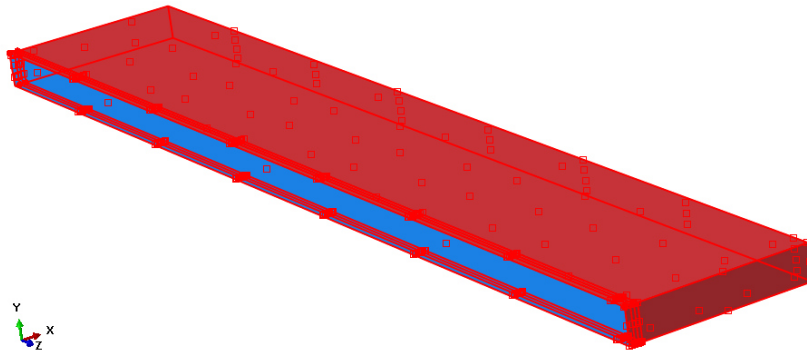


Figura 30: Contacto, convección sobre la placa.

### 6.3.5 Mallado

La Figura 31 muestra el mallado. La placa consistió de 36540 elementos y 44268 nodos.

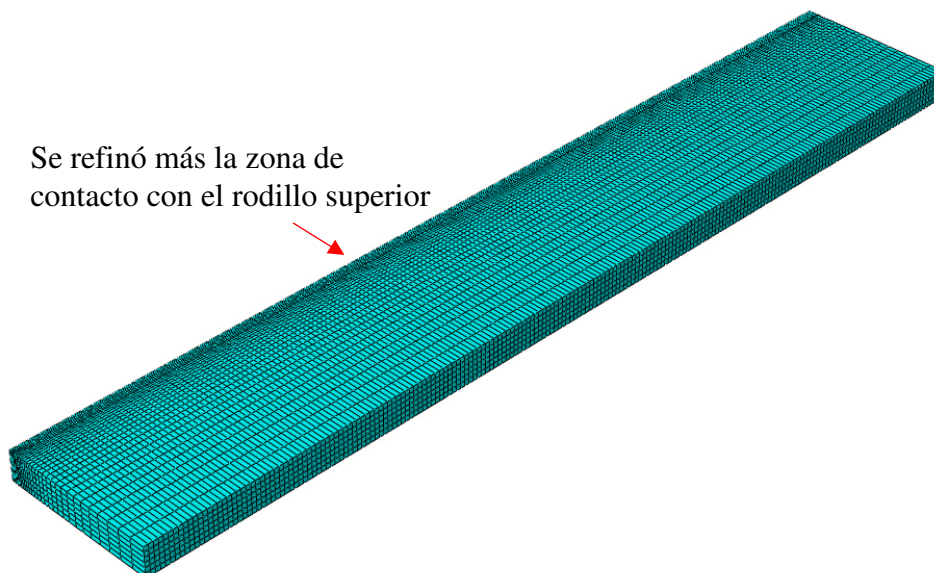


Figura 31: Mallado de la placa de Acero.

Para este trabajo las condiciones de mallado, que se le aplican a esta placa en caliente son:

Tipo de elemento:	Acoplamiento de temperatura- desplazamiento, hexaedro lineal de 8 nodos (C3D8T)
Orden geométrico:	Lineal

### 6.3.6 Simulación

En esta sección se explica la metodología a seguir de los pases. Se simularon 4 pases de los cuales se realizaron las condiciones experimentales explicadas en la sección 6.2. En cada pase, el rodillo superior va sufriendo un cambio, el ancho donde se crea la ranura en la placa, se incrementa 2 mm por pase, ver Figura 32. El estudio se realizó en 2 etapas: la etapa 1 llamada etapa de prueba de contacto para el pase 1, y etapa 2 llamada etapa de simulación de pases 2 al 4.

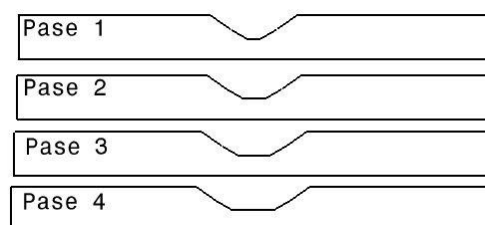


Figura 32: Pases a simular.

### 6.4 Etapa 1: Pruebas de contacto para el pase 1

El primer pase es el más crítico, para ello se hicieron diferentes pruebas hasta encontrar los parámetros de simulación que mejor aproximaran a los resultados escaneados del pase 1 para poder validar dicho pase y poder continuar con los siguientes.

A continuación, se describen los tipos de contacto utilizados en el software. En el caso 1 se consideraron únicamente las superficies superior e inferior de la placa en contacto con los rodillos utilizando una formulación maestro-esclavo en ABAQUS llamada superficie-superficie. En el caso 2 también se considera un contacto superficie-superficie, pero concentrado solamente en la zona de la protuberancia del rodillo superior, lo que está fuera de dicha zona no considera ningún coeficiente de fricción. El caso 3 considera otra formulación de contacto en ABAQUS llamada contacto general que toma en cuenta todas las superficies posibles incluyendo autocontacto para la placa. La figura 33 ilustra las diferencias entre cada caso. La tabla 3 muestra un resumen de las condiciones para la etapa 1.

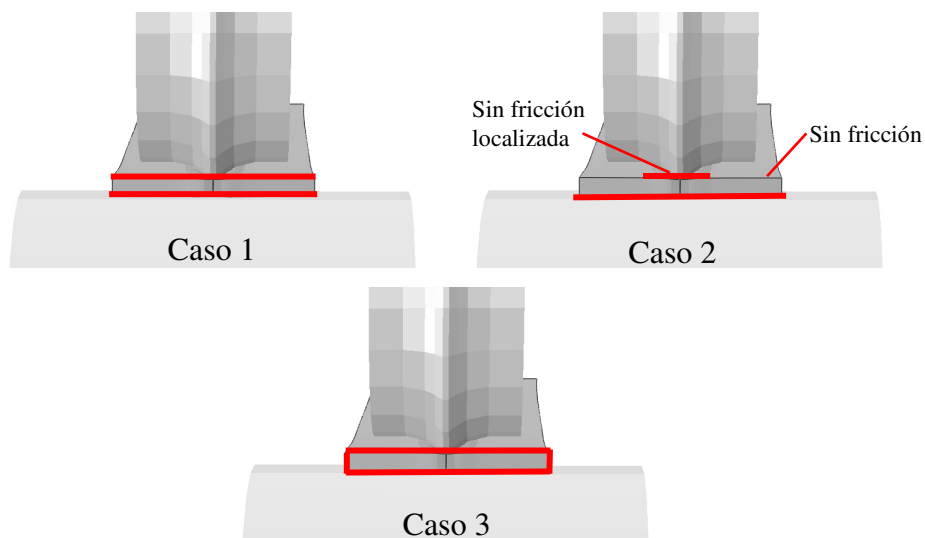


Figura 33: Casos considerados para el pase 1.

CASO	Tipo de contacto	Zonas de contacto
1	Superficie-superficie	Superficie superior inferior de placa
2	Superficie-superficie	Contacto "localizado" en la parte superior de la placa, contacto completo en la parte inferior.
3	General	Todas, incluyendo posibles autocontactos

Tabla 2: Casos considerados para el pase 1.

## **6.5 Etapa 2: Simulación de los pases 2 al 4**

Una vez corridos los casos se procedió a comparar los resultados con los de la muestra escaneada del pase 1. El modelo que presentó mejor ajuste fue el considerado para la simulación de los pases 2 al 4.

# Capítulo 7 Resultados y discusión

## 7.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados de las simulaciones en ABAQUS, se crea una comparativa con el resultado medido de las pruebas físicas contra las simuladas.

## 7.2 Resultados piezas escaneadas.

La figura 34 muestra las piezas procesadas mediante escaneo para cada uno de los pases. Las piezas mostradas están en formato STL.

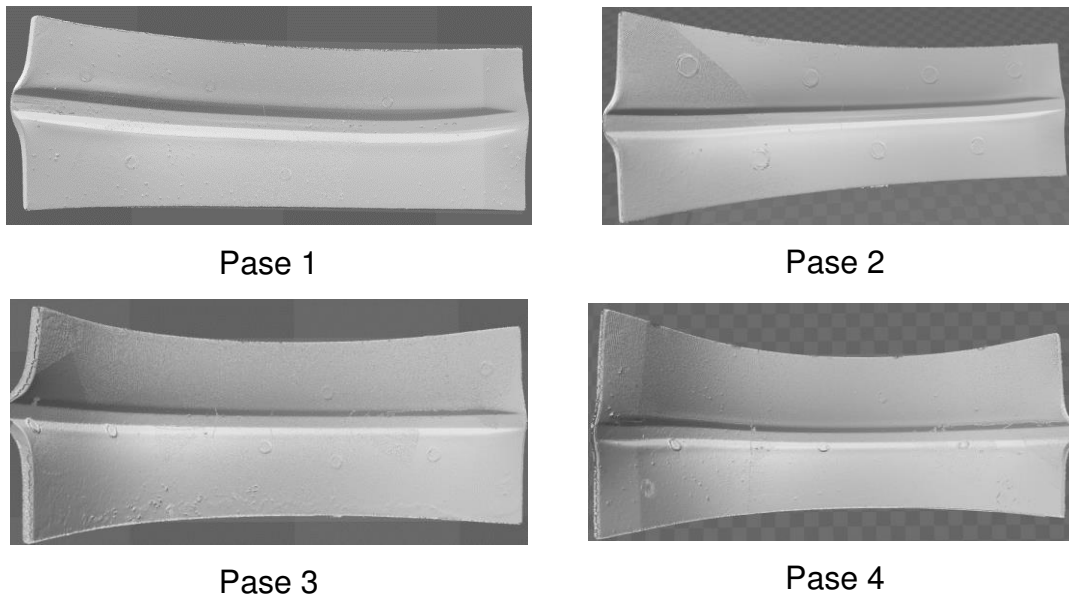


Figura 34: Piezas físicas escaneadas.

Para poder tomar las medidas de ambas pruebas, se realizaron cortes de sección y se eligieron zonas para la medición de espesores, tal como se representa en las Figura 36 y 36.

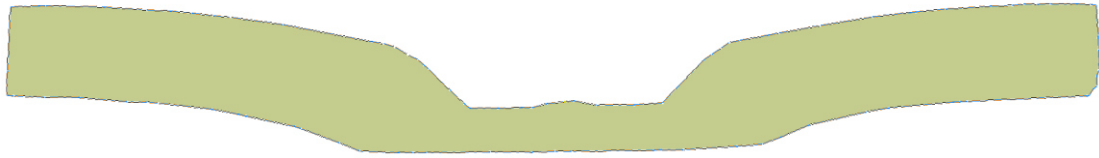


Figura 35: Pieza seccionada en determinada zona.

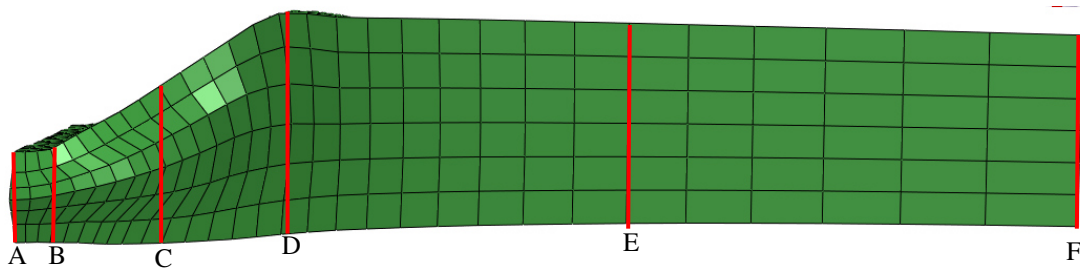


Figura 36: Zonas de medición de espesores.

La figura 37 muestra el comportamiento del espesor en cada uno de los pases escaneados. Se puede observar un desplazamiento de la curva a medida que se va incrementando el ancho del rodillo. Se localiza un punto máximo que corresponde a una acumulación de material en la zona entre 8 y 13 mm de distancia (eje x).

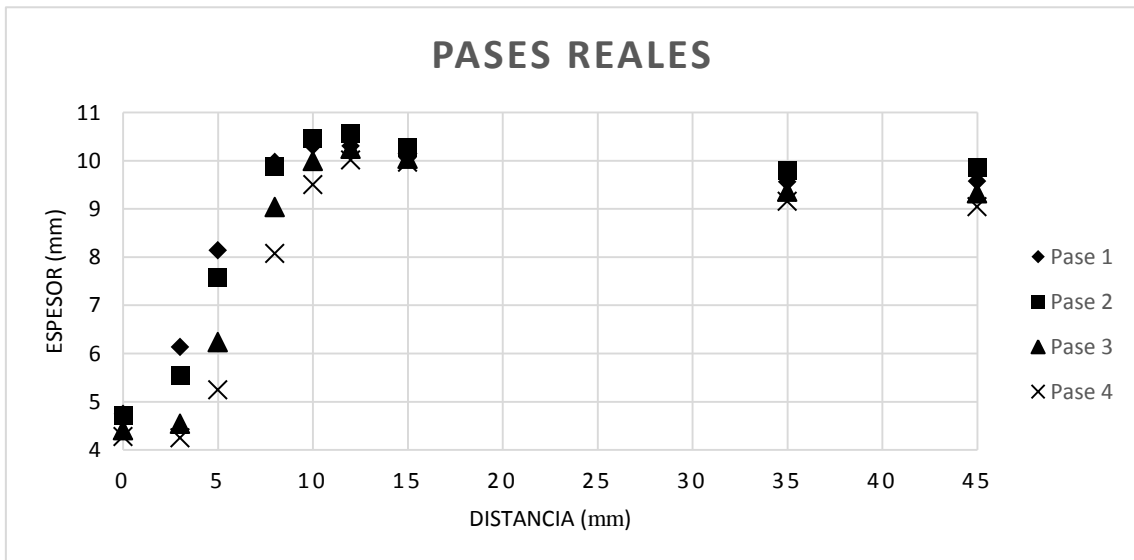


Figura 37: Gráfica de los 4 pases físicos.

### 7.3 Resultados de los casos considerados para el pase 1.

En la Figura 38 se muestran los resultados de los espesores calculados para cada uno de los casos considerados en el pase 1. Se puede observar que el caso 3 es el que más se aproxima al caso real. Por lo tanto, para los pases posteriores se tomaron las condiciones del caso 3.

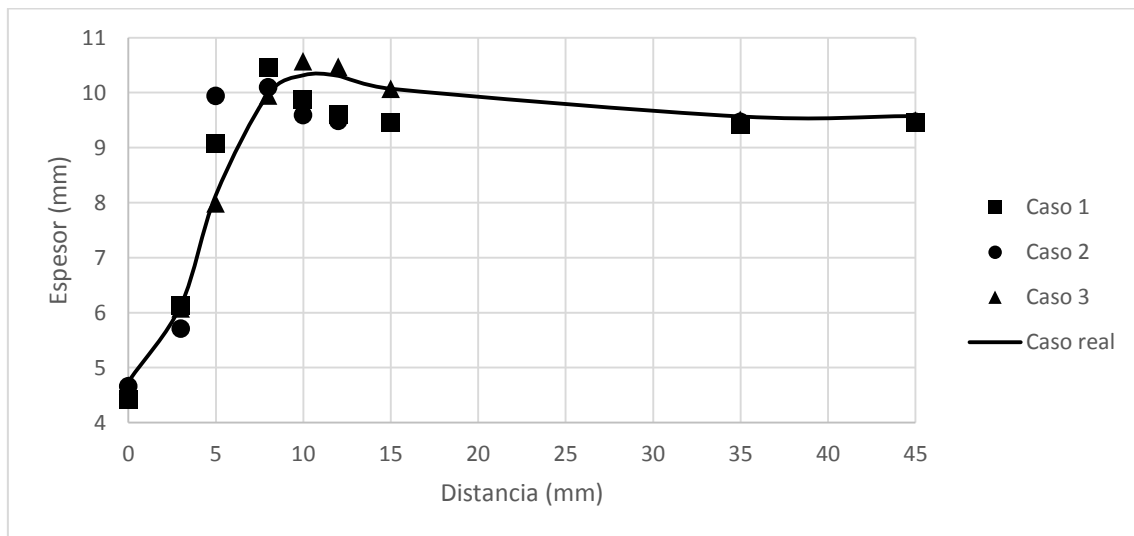


Figura 38: Espesores en la placa para los casos del pase 1 simulado vs pase 1 real.

#### 7.4 Resultados pases 2 al 7.

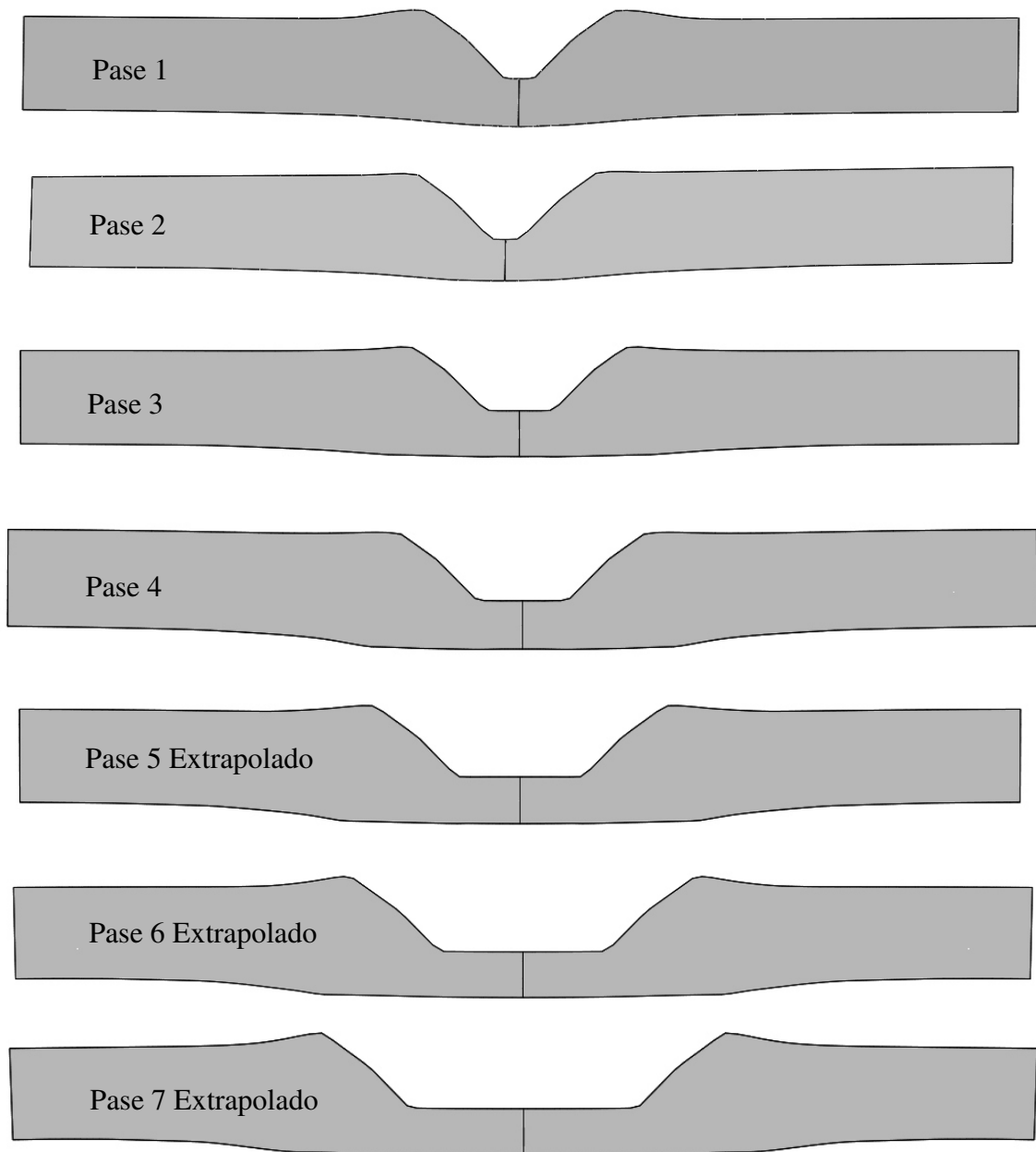


Tabla 3: Resultados arrojados de los pases simulados.

Para poder apreciar más el resultado, se presentarán algunas gráficas en donde se observa el flujo del material, la forma de medir para que arroje el resultado en la gráfica está basada de la figura 37.

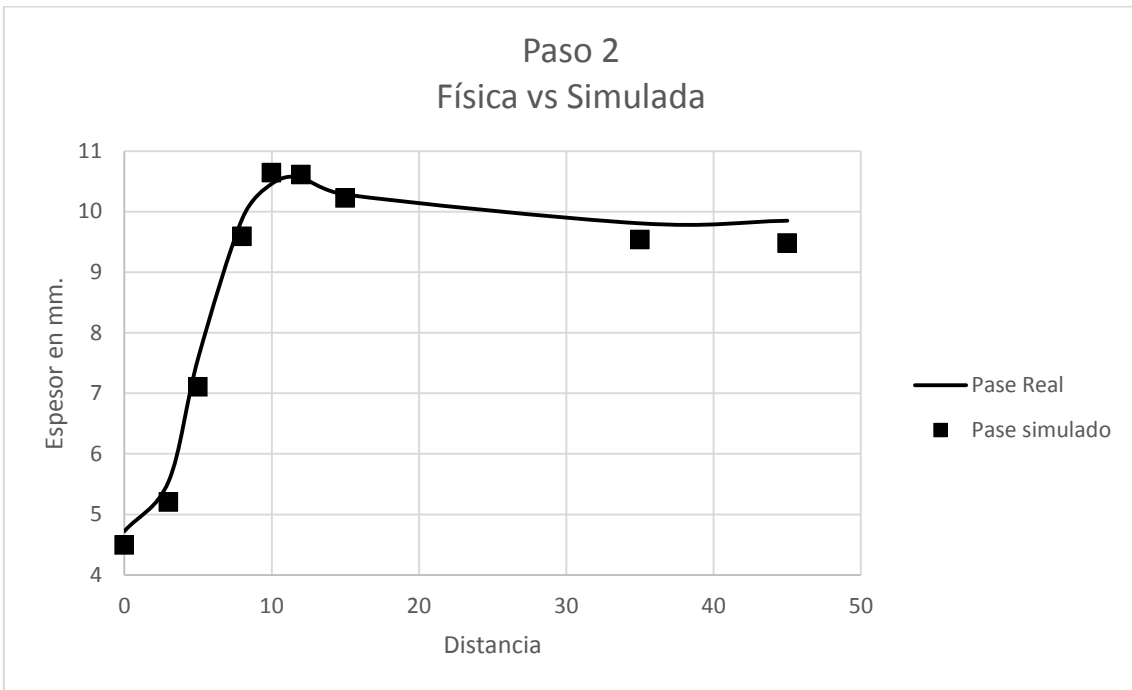
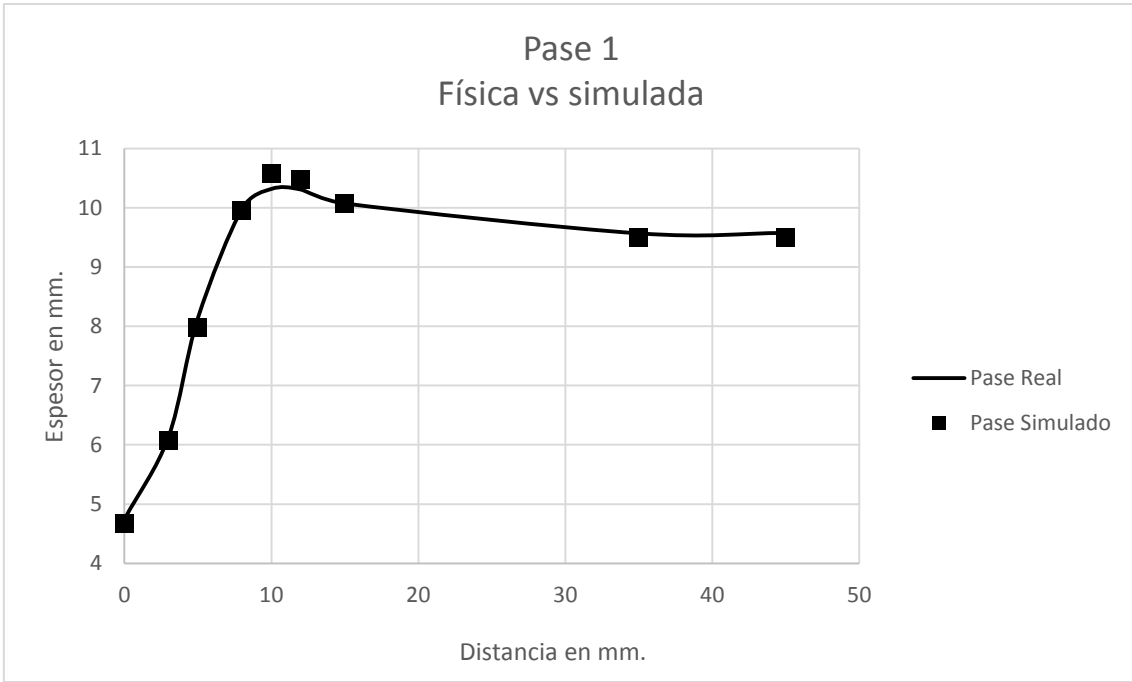


Figura 39: Gráfica del pase 2, física contra simulada

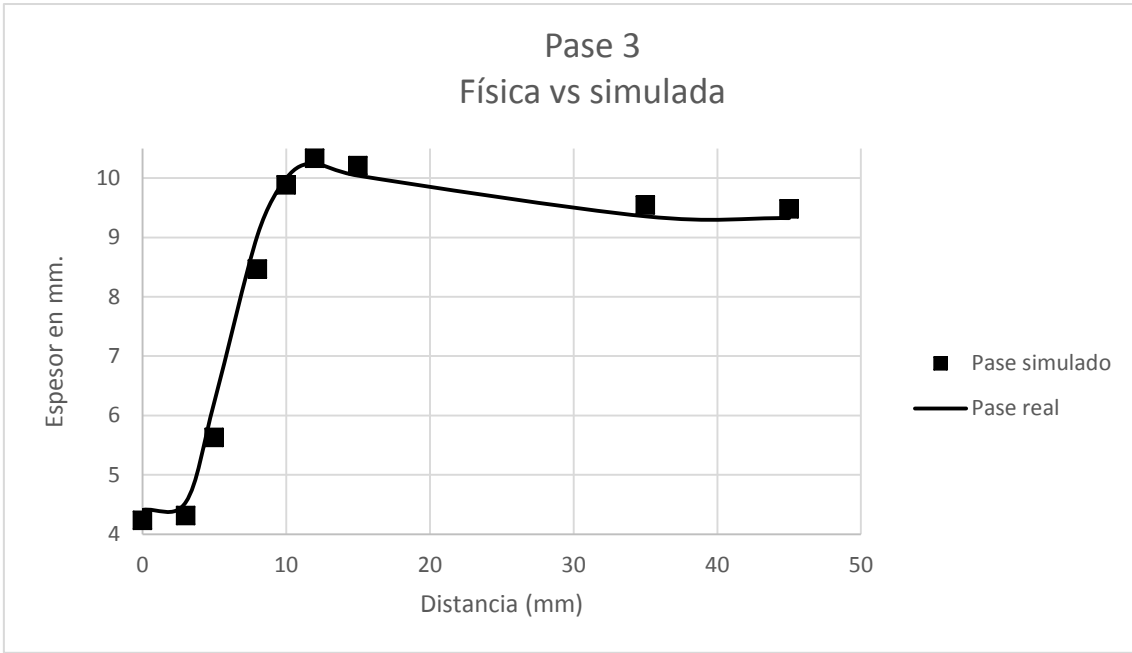


Figura 40: Gráfica del pase 3, física vs simulada.

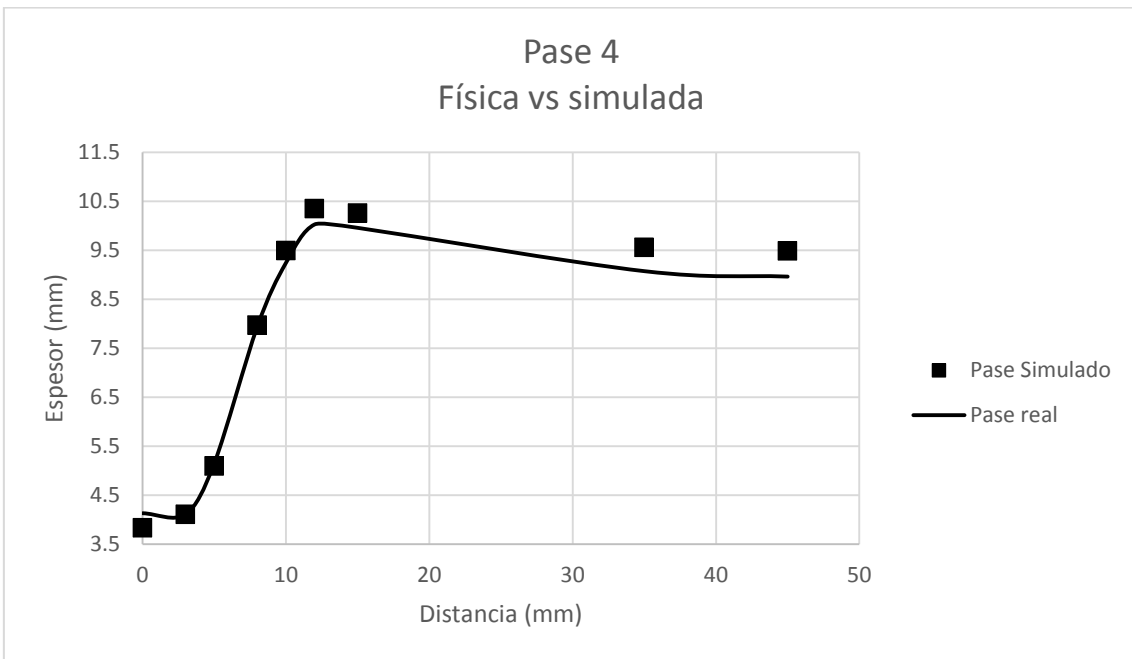


Figura 41: Gráfica del pase 4, Física vs simulada.

Pase	Porcentaje de error (%)
1	0.243%
2	2.808%
3	2.236%
4	4.186%

Tabla 4: Representa el porcentaje de error que existe entre los pases reales y el simulado.

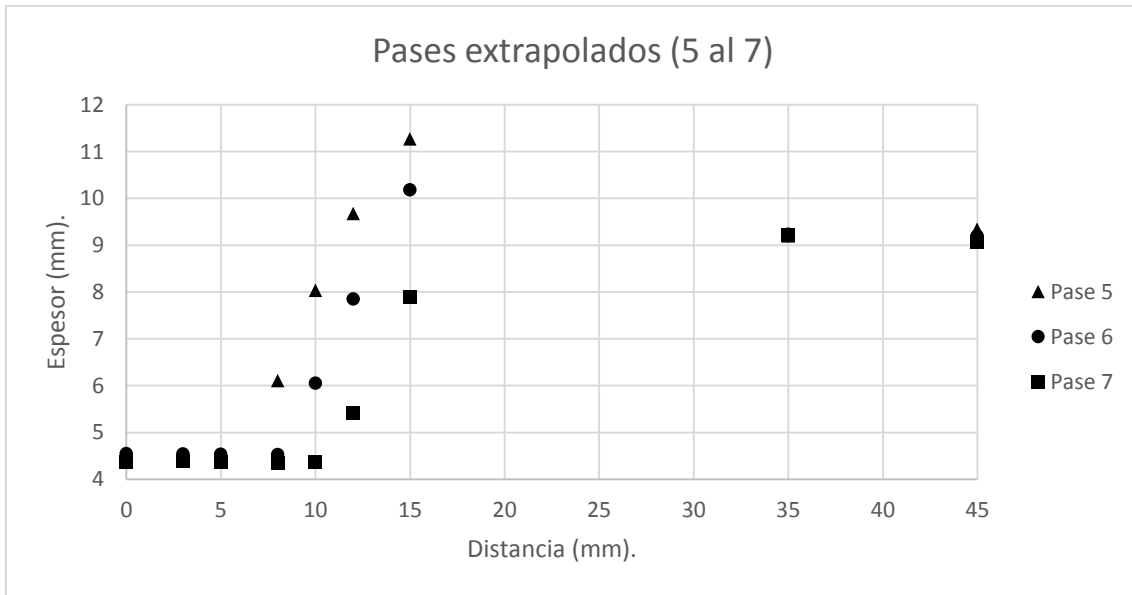


Figura 42: Gráficas de los pases extrapolados (5 al 7).

En la Tabla 5 se observa como la fuerza de laminación que requiere el rodillo para lograr el primer pase es muy alta después baja considerablemente en el segundo pase, para después volver a restablecerse y obtener una alta fuerza concentrada en la zona de contacto del rodillo y la placa.

<b>Pases</b>	<b>Fuerza de laminación (KN)</b>
Pase 1	83
Pase 2	36
Pase 3	71
Pase 4	86
Pase 5	90
Pase 6	92
Pase 7	96

Tabla 5: Fuerzas de laminación.

# Capítulo 8

## Conclusiones y recomendaciones

### 8.1 Conclusiones

Se generó un modelo numérico que permitió obtener una placa con calibre variable mediante un proceso de laminación en caliente.

Se obtuvo un modelo de laminación en la simulación en el paquete ABAQUS que permite determinar el flujo de material durante cada pase.

Se obtuvo una buena correlación entre las pruebas escaneadas y las pruebas físicas para los primeros 4 pases permitiendo después extrapolar el comportamiento de flujo de material para los pases siguientes.

Este trabajo ha presentado una metodología que puede permitir obtener un cálculo teórico del número de pases necesarios para llegar a obtener las dimensiones de un perfil comercial.

Este estudio demuestra que es posible desplazar material lateralmente, sin embargo, existen restricciones de flujo (montaña) que deben ser controladas variando la geometría de los rodillos.

### 8.2 Recomendaciones

Se puede considerar el efecto de variación de la geometría del rodillo en base el ángulo de ataque, hacer diferentes consideraciones de temperatura de procesado de las placas, así como varias las condiciones de fricción en función de la temperatura.

# LISTADO DE SIMBOLOS

## Capítulo 2

$H_0$  = Espesor inicial

$H_1$  = espesor final

$\alpha$  = ángulo

## Capítulo 3

$\sigma_y$  = Límite elástico

$\sigma$  = Esfuerzo

$\varepsilon$  = Deformación

$dL$  = cambio incremental de longitud

$L$  = Longitud

$L_0$  = Longitud inicial

$A_0$  = Área inicial

$A$  = Área

$\varepsilon$  = Deformación real

$\sigma_m$  = Esfuerzo promedio

$\lambda$  = coeficiente de viscosidad

$f_s$  = fricción del esfuerzo cortante

$p$  = esfuerzo normal de compresión de la interfase.

$k$  = Resistencia de esfuerzo cortante

$F_i$  = Fuerza por unidad de superficie

$n_j$  = unidad normal de la superficie exterior

## Capítulo 4

$\dot{Q}_{cond}$  = Velocidad de calor por conducción

$k$  = conductividad térmica

$dT$  = diferencial de temperatura

$A_s$  = Área de superficie

$T_s$  = Temperatura superficie

$T_{\infty}$  = Temperatura fluido

$\dot{Q}_{conv}$  = velocidad de calor por convección

$T$  = Temperatura

## Capítulo 5

$[K]$  = Matriz de rigidez térmica

$\{T\}$  = Vector de temperaturas desconocidas

$\{f\}$  = carga termal o vector de fuerza

$k$  = conductividad térmica

$A$  = Área

$h$  = coeficiente de calor

$N_i$  = Nodo vector i

$a_i$  = parámetro vector i

$w_i$  = función residual

$R$  = Residual

$N_k$  = Nodo con vector k

$u_i$  = Velocidad

# Referencias

- [1] I. J. C. Starchevich, «Criterios de Pensamiento,» 19 Octubre 2014. [En línea]. Available: <http://juancastarcreaciones.blogspot.mx/2014/10/calculo-de-correas-de-perfiles-c-de.html>.
- [2] S. C. A. K. M. Kleiner, «Metal forming techniques for lightweight construction,» *Materials Processing Technology*, 2006.
- [3] A. M. y. otros, Tecnología de los Metales, Moscú: MIR, 1975.
- [4] M. P. G. Mata, Modelación Térmica en rodillos de laminación, San Nicolás De los Garza, N.L.: UANL, 1993.
- [5] R. Beynon, Roll design and Mill Layout, Pittsburgh, Pennsylvania: Association of Iron & Steel Engineers, 1952.
- [6] R. M. M. B. F. Kreith, Principles of heat transfer., CENCAGE Learning, 2011.
- [7] Kobayashi, Metal forming and the Finite Element Method.
- [8] a. S. R. JohnsonW, Metal forming Processes: Analysis and Technology", 1978.
- [9] K. Lange, Study book of Forming Technology, Berlín: Springer-Verlag, 1972.
- [10] E. C. Larke, The Rolling of Strip, Sheet and Plate, London: Chapman and Hall, 1957.
- [11] S. i. H. N. Ekelund, Roll Pass Design, Verlag, Leibzig, 1963.
- [12] G. E. Dieter, Mechanical Metallurgy, McGraw Hill, 1988.
- [13] M. M. Eduard, «Metalworking Science and Engineering,» 1991.
- [14] K. Lange, Handbook of metal forming, McGraw Hill, 1976.
- [15] O. Z. -. R. Taylor, El metodo de los Elementos Finitos, Barcelona, España: McGraw Hill, 1994.
- [16] P. B. R. Kopp, «A new rolling process for strip with a definded cross section.»
- [17] V. A. M. Ginzburg, «Selection of optimum strip profile and flatness technology for rolling mills,» *Iron and Steel Engineer*, 1997.
- [18] A. Nadai, Plasticity, New York: McGraw Hill , 1931.
- [19] M. M. A. K. Chawla, Mechanical Behavior of Materials, Cambridge, 2009.
- [20] O. y. G. S. Hoffman, Introduction of the Theory of Plasticity for Engineers, New York: McGraw Hill.
- [21] P. Ludwik, Elemente der Technologischen Mechanik, Springer, 1909.
- [22] R. V. Misses, Gottinger Nachr Math Phys Klasse, 1913.
- [23] J. A. Schey, «Metal Deformation Processes: Friction and Lubrication,» *American Society for Metals Park*.
- [24] T. a. G. H. Altan, «Metal Forming: Fundamentals and Applications,» *ASM International*.
- [25] R. Hill, «The matemathical Theory of Plasticity,» *Press*, 1950.
- [26] W. Szczepinski, «Introduction to the Mechanic of Plastic Forming of Metals,» *Sijthoff & Noordhoff International Publishers*, 1979.
- [27] Y. Cengel, Transferencia de Calor.

- [28] J. Holman, *Transferencia de Calor*, México: McGraw Hill, 1999.
- [29] P. N. K. S. Roland W. Lewis, *Fundamentals of the Finite Element Method for Heat and Fluid Flow*, 2004.
- [30] L. O. Pereiro, «Aprendiendo sobre el Método de los Elementos Finitos,» 2006.
- [31] O. J. Z. Hernandez, *Simulación de descascarado en planchón de colada continua*, Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2007.
- [32] E. T. y. T. B. K.H. Huebner, *The finite element method for engineers*, Wiley, 1995.
- [33] J. Reddy, *An introduction to the finite element method*, McGraw Hill, 2004.
- [34] R. Clough, «The finite element method after twenty-five years: A personal view,» *Computers and Structures*, vol. 12, pp. 361-370, 1980.
- [35] H. David, *Fundamentals of finite element analysis*, McGraw Hill, 2004.
- [36] P. T. y. T. Damian, «Basics of fluid mechanics and introduction to computational fluid dynamics,» *Springer*, 2005.
- [37] O. J. a. C. MN, *Finite difference Methods in Heat Transfer*, CRC Press, 1994.
- [38] K. Washizu, *Variational Methods in Elasticity and Plasticity*, Oxford: Pergamon Press, 1968.
- [39] B. M. Irons, «A frontal solution program for Finite Element Analysis,» *Int. J. Num. Meth. Engr*, vol. 2, p. 5, 1970.
- [40] W. L. Roberts, *Cold rolling of Steel*, Marcel Dekker Inc, 1983.
- [41] M. Modest, *Radiative Heat Transfer*, New York: McGraw Hill, 1993.
- [42] J. B. Orr, «Roll Pass Design,» *Sheffield: British Steel Corporation*, 1979.
- [43] O. F. ., B. M. Amstead B.H., *Procesos de Manufactura*, México: Grupo Editorial Patria, 2012.
- [44] B. Avitzur, *Metal forming: Processes and Analysis*, New York: McGraw Hill, 1968.
- [45] K. J. Bathe, *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*, Englewood Cliffs, NJ.: Prentice-Hall, 1982.
- [46] B. A, *Heat Transfer*, New York: John Wiley & Sons, 1993.
- [47] S. SP, *A text book on Heat Transfer*, Orient Longman Publisher, 1992.